INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO, EXPERIENCIAS EN EL CARIBE COLOMBIANO

Texto de apoyo para un curso de Edafología Física

Iván Darío Bustamante Barrera
María Isabel Toro Quijano
Mónica Cecilia Cantero Benítez

2022

FONDO EDITORIAL
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO, EXPERIENCIAS EN EL CARIBE COLOMBIANO: Texto de apoyo para un curso de Edafología Física

Iván Darío Bustamante Barrera, María Isabel Toro Quijano, Mónica Cecilia Cantero Benítez, 2022

ILUSTRACIÓN PORTADA: **Monumento a "La Madre Tierra", (La Montaña Embarazada) Santo Domingo, Antioquia, Colombia.**

Fotógrafa: Martha Helena Villegas Bustamante. 2020. Móvil.3104403011 malin498@hotmail.com

474 páginas, 11 cuadros, 27 tablas, 185 figuras

Incluye bibliografía, 107 citas, páginas: 467- 474

ISBN: 978-958-5104-56-3

Diseño de carátula y edición general: Julio César Álvarez Castillo

CC BY NC ND

FONDO EDITORIAL UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEDICATORIA

A la memoria de mis padres, mis primeros y mejores maestros

A mis hermanos, mis amigos incondicionales.

A mis invaluables hijos: Iván Ramiro, Claudia Helena, Diana María,
Juan Esteban e Ivanna.

A mis discípulos, lienzo en blanco y afilado buril que han logrado generar el estudio de los hallazgos y hechos que se refieren en las siguientes páginas.

A mi inolvidable compañero y amigo: Luis Carlos Raciny Rueda. (qepd)

A los BUENOS HIJOS de la MADRE TIERRA.

Iván Darío Bustamante Barrera
2022

“No hay que estudiar para saber más,
Sino por ser menos.”

Sor Juana Inés de la Cruz

“La tierra proporciona lo suficiente para satisfacer las necesidades de cada hombre, pero no la codicia de cada hombre”

“ Gandhi”

“La Agricultura es la profesión propia del sabio, la más adecuada al sencillo y la ocupación más digna para todo hombre libre”

“Cicerón”

AGRADECIMIENTO

Con especial afecto a los alumnos que, con desusado entusiasmo y afecto acogieron nuestras enseñanzas, en todas las Facultades de Ingenierías Agronómica, Agrícola, Forestal y Ambiental donde hemos tenido el honor de ser Docentes, pues fueron ellos el acicate para que los apuntes, anotaciones y actividades prácticas fuesen actualizados y reformulados en forma permanente. Mención destacada a Gamaliel, Lenia, Nelissa Betancur D'Ambrosio, Abelarmino Melanio, Sebastián Polo C., Hernando Díaz H, Juan Contreras, Fernando Carlos Jiménez Vargas, Eliana Arzuaga, Juan David Llano, Frank Ordoñez R, Iván Darío Pardo, Salim Jaller, Juan J. Ruiz A, Victor De la Ossa, Robert Smith Valencia Agresoth, Carlos Mario Velásquez, Gustavo Vaca, Sebastian Henao, Elisa María Paternina Durango, Judith Martínez Atencia, Teobaldis Mercado, Enrique Miguel Combatt Caballero, Eliecer Miguel Cabrales Herrera, Carlos Cardona Ayala, Victor Manuel Deguiovanny Beltramo, Graciliano Palencia, Bernardo Prieto Pinzón, José Peroza, Humberto Narváez Mejía, Edgar Manotas Olascuaga y muchos más, difíciles de enumerar, quienes siempre hicieron gala de sin igual paciencia e interés.

Un agradecimiento especialísimo de los tres autores para el Artista Plástico Dubian Fernando Monsalve, escultor de "La montaña embarazada", foto empleada para la portada de este texto, dicha escultura fue nombrada así por la comunidad y está ubicada en la vereda Raudal en un talud al lado de la vía principal a cuatro kilómetros antes de ingresar al municipio de Santo Domingo en el nordeste antioqueño. Esta obra se desarrolló en el marco del trabajo de grado del artista Monsalve, titulado "Mi casa es de Tierra" de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín en el año 2012.

Especial agradecimiento a los Ingenieros Agrónomos Nelissa Betancur D'Ambrosio, Adriana Marcela Ramos Romero y Robert Smith Valencia Agresoth, por su valiosa colaboración en la revisión y ajuste del manuscrito final.

I.D. Bustamante B.

M.I. Toro Q.

M. C. Cantero B.

2022

ANOTACIONES DE LOS AUTORES

En el diario trasegar de la vida docente, el profesor encuentra un filón de oportunidades para dejar plasmadas una serie de vivencias del proceso enseñanza: aprendizaje que día a día desarrolla inmerso en la más variada gama de estudiantes, aspiraciones e inquietudes. Se hace necesario por tanto el ordenamiento canónigo de los fundamentos teóricos y correlativamente de los conocimientos prácticos de la disciplina de la cual se es docente, de tal forma que se cristalice en un documento adecuadamente presentado, ceñido a las más mínimas normas pedagógicas y de presentación técnica.

Los Agrólogos e Ingenieros Agrónomos, Ingenieros Agrícolas, Ingenieros Forestales e Ingenieros Ambientales egresados de sus respectivas Escuelas en el siglo pasado, recuerdan los textos de Edafología en los cuales se iniciaron y son comunes las menciones a los textos de Rusell,1982; Thompson,1970, Buckman y Brady, 1967; y otros similares, todos ellos materiales concebidos en el primer mundo, y lo que es más, ubicados dentro de un contexto social, cultural, económico y ambiental, exótico a las condiciones del trópico. Seguidamente, autores mexicanos como Ortíz, 1975, y colombianos como González, 1972; Borrero, 1987; Malagón y otros, 1995; Castro, 1998; Jaramillo, 2002, entre otros muchos propugnan por aterrizar los conceptos clásicos de la ciencia en referencia, al contexto latinoamericano

El suelo es un cuerpo natural, piel excitada de la tierra, medio de vida, altamente dinámico y que merced a todo lo anterior se constituye en el alfa y el omega de cualquier ecosistema (Bustamante, 1996). En razón a su carácter pentadimensional y a su condición de recurso natural básico y sustrato económico y social esencial para la vida del hombre en el planeta, el principal objetivo de todo conglomerado humano es hacer de este un recurso sostenible tanto ecológica, como económica, cultural y socialmente.

El presente trabajo pretende llegar un poco más allá que los alcances de una simple compilación de conocimientos técnicos, tantas veces repetidos, bajo una y mil formas, para adentrarse en los temas que apuntan hacia un curso básico de Ciencia del Suelo con especial focalización al Caribe colombiano, haciendo especial énfasis en los aspectos referentes al manejo del recurso suelo en ésta región natural de Colombia, en atención al fuerte arraigo que tienen dichas técnicas en algunos factores seculares regionales, de tipo cultural, social, económico y ambiental.

I.D. Bustamante B.
M.I. Toro Q.
M. C. Cantero B
2022

RESEÑA HISTÓRICA DEL DESARROLLO DE LA CIENCIA DEL SUELO

Tan antiguo como la referencia que hace el libro del Génesis, capítulo 1, de la tierra como sustrato productor de hierbas, simientes y frutos, es la visión que ha tenido del suelo el hombre, desde su aparición en los albores del Pleistoceno (2,58 Ma. AP).

El hecho es que a medida que ha evolucionado el conocimiento acerca de este recurso natural, la visión del hombre acerca del mismo ha cambiado. Así entonces hasta comienzos del Siglo XX la Ciencia del Suelo estuvo bajo la tutela de Químicos y Geólogos, visionando al suelo como producto de la descomposición de las rocas de la corteza terrestre. Consecuentemente con ello, mientras en 1600 Oliver de Serres, establece al lado de B. Palissy que: "La base de la agricultura es el conocimiento de los terrenos que se desean cultivar", en 1803, el Padre de la Agronomía, Arthur Thaër, anota la influencia que tienen las aplicaciones de estiércol en el crecimiento de las hortalizas que se cultivan en la Universidad de Göttinghen. En 1837 Sprengel publica en Dresde *"Ciencia del Suelo"*, el primer texto formal acerca del tema, y en 1843, Gasparin en su "Curso de Agricultura" diferencia los conceptos de suelo activo y suelo inerte.

A mediados del siglo XIX, Boussingault (Francia, 1807 – 1887) es el primer investigador que visiona al suelo dentro de su entorno natural y señala la influencia del clima en la repartición geográfica de los suelos en el mundo. Al poco tiempo, en 1862 Alberto Fallou publica también en Dresde, *"Ciencia del Suelo, general y especial".* En 1885, Rissler en Alemania señala en su obra *"Geología Agrícola"* que los sistemas de cultivo deben diseñarse de acuerdo con el tipo de suelo, en una clara alusión a la alta variabilidad de las propiedades del recurso

Oponiéndose abiertamente a la influencia marcada de Químicos y Geólogos en el estudio del suelo, en 1880 Vassili Vassilievith Docuchaiev (1846-1903), reporta un estudio sobre los *Chernozems* de Rusia, como base de cobro por el fisco zarista, de impuestos sobre la tierra; en dicho informe emplea principios morfológicos para la clasificación de los suelos. En 1886 el mismo V.V. Docuchaiev propone el término "suelo" para referirse a aquellos horizontes de rocas que han cambiado sus relaciones bajo la influencia conjunta del aire, el agua y varios organismos vivos o muertos". Posteriormente plantea la definición clásica del suelo como cuerpo natural producto de la acción de los cinco factores de formación que hoy conocemos. En todos sus trabajos hizo especial énfasis en la influencia del clima en el desarrollo de los suelos, misma que finalmente cristalizó enunciando su célebre "Ley de la zonalidad de suelos". En el año de 1900, con el marco de la "Exposición Universal de París", V.V. Docuchaiev y sus colaboradores presentan a la consideración del mundo científico "La Carta de Suelos de la Rusia Europea", en escala 1:2.5 millones.

La “Ley de la zonalidad de suelos” fue ampliamente difundida por los colaboradores y discípulos de Docuchaiev, entre quienes cabe mencionar a Nikolai Miklailovitch Sibirtzev, nombrado en 1894 como profesor de la primera Cátedra de Edafología creada en el mundo, formulador de los conceptos de zonalidad, azonalidad e intrazonalidad, son sus compañeros en ésta visión de zonalidad investigadores tan destacados como Wolny, Glinka, Jarilov, Vernadsky, Agafonoff y otros que no tardaron en imponer sus criterios a todos los edafólogos contemporáneos como: von Richtoffen, Stremme y Ramann en Alemania; Treitz en Hungría; Novak, Svorykine y Snolik en Checoslovaquia; Murgoci en Rumania; en Inglaterra a E.J.Rusell, A.D. Hall y J.E. Marr; en los Países Bajos a J. Bayens, R. Meurice, A.J. Ossting y C.H. Edelman, y finalmente en Norteamérica a científicos del renombre de W. Hilgard, M. Withney, C.F. Marbut, Ch. E. Kellog y F. Bear.

Los discípulos de Docuchaiev en 1899 crean en Rusia la revista “Potchvoviedenia” (Ciencia del Suelo) primera publicación periódica sobre el tema.

En 1908 Herny publicó en Francia su obra *“Suelos Forestales”*, y en su contexto planteó el concepto de PEDOLOGÍA como equivalente a Ciencia del Suelo, pero aun así hasta esas fechas el estudio del suelo era considerado como parte de la Geología.

También en 1908 tiene lugar la Primera Conferencia Internacional “Agrogeológica” de Budapest, en su marco se hace la presentación de la “Primera carta esquemática de los suelos del mundo”, dirigida por Glinka. Dicha carta de suelos es revisada y corregida en 1929 por Agafonoff.

En 1910 se efectúa la Segunda Conferencia Internacional Agrogeológica en Estocolmo y durante 1911, en Rusia, la revista “Potchvoviedenia” se transforma en revista internacional multilingüe.

Entre 1910 y 1920, las condiciones políticas de Rusia hacen decrecer su ritmo de avance científico, lo cual conduce a que Estados Unidos tome la delantera en la Ciencia de Suelo. No obstante, no es sino después de superada la Primera Guerra Mundial, 1914-1918, cuando los métodos de estudio edafológico propuestos por los rusos comienzan a aplicarse en diferentes países, hasta el punto de que en 1927 en Estados Unidos de Norteamérica se registra la creación de la Sociedad Internacional de la Ciencia del suelo, (ISSS), con sede en Washington, USA.

Precisamente son los investigadores norteamericanos Balldwin, Kellog y Thorp quienes fundamentados en la “Ley de la zonalidad de suelos” presentan a la comunidad científica en 1938 el “Sistema de Clasificación de Suelos”; dicho sistema subsiste hasta 1960, cuando, inspirada en los señalamientos de raíces griegas y latinas relacionadas con los procesos que se dan en el suelo, los cuales fueron formulados por Horace Jones,

profesor de Lingüística de la Universidad de Cornell, USA, aparece también en Norteamérica “The Seventh Aproximation” la cual es precursora del “ Soil Taxonomy USDA”, de amplia aplicación actualmente en el mundo a excepción de Francia y parcialmente México.

Mención especial merece aquí Charles E Kellog, ya referido en los dos párrafos anteriores, como impulsor de obras tan vitales como el “Soil Survey Manual” con ediciones en 1937, 1951 y 1993.

En el contexto francés reciente, deben destacarse los aportes realizados por Philippe Duchaufour (1912 – 2000), quien tuvo como eje investigativo la relación material parental: vegetación: especies forestales: tipos de humus: suelos, y quien en 1961 creó el Centre de Pedologie Biologique, mismo que dirigió hasta 1975. Su obra: *“Précis de Pedologie”* es una referencia incunable en la Ciencia del Suelo.

En Estados Unidos de Norteamérica, la obra: *“Soil Formation Factors”* presentada en 1941 al mundo por Hans Jenny constituye el ABC de la contextualización del suelo en el ecosistema. En el campo que más ha descollado este país dentro de la Edafología es en el estudio de la erosión y la conservación de suelos, y hoy se consideran clásicos los trabajos realizados por H.H. Bennet en los años 30’s del siglo pasado y la creación del “Soil Conservation Service” del USDA en 1935, durante el primer gobierno de Franklin D. Roosevelt.

En nuestro país el estudio del suelo comienza con la Expedición Botánica en 1801 con las observaciones de Humboldt y Francisco José de Caldas, quien con el concurso de otros científicos participantes en la referida Expedición escribieron el *“Manual de Agricultura”* , en él, el sabio Caldas se anticipa al concepto de lo que hoy denominaríamos textura y se refiere a las cuatro clases de tierras que conforman los terrenos arables, ellas son: 1. Tierra arenosa o de sílice, 2. Tierra gredosa o de alúmina, 3. Tierra calichosa o calcárea y 4. Tierra vegetal o de humus, señala Caldas que cada terreno está constituido por una mezcla en diferentes proporciones de los cuatro tipos de tierra y que dicha proporción determina la bondad o mediocridad de cada campo.

En 1914, bajo la dirección de personal científico belga se creó en Bogotá el Instituto Nacional Agrícola y marcó el comienzo del estudio de la Agronomía en Colombia, en la Escuela Nacional de Agronomía en Medellín, Antioquia.

En los años 50’s, con la llegada de la Misión Rockefeller al Minagricultura y específicamente al DIA, División de Investigación Agrícola, antecesora del ICA, se da el paso a la agricultura moderna y a los estudios de suelos. En ésta misma década

comienzan los estudios de suelos con fines catastrales por parte de la Sección de Suelos del IGAC, bajo la dirección de J.V. Lafaurie; por su parte en la Federación de Cafeteros el Dr. Paul Schaufelberger estudia la génesis de los suelos de la zona cafetera y adelanta su clasificación taxonómica; así mismo, simultáneamente en el Laboratorio Químico Nacional, el Dr.Jorge Ancizar Sordo investiga sobre la Química de los Suelos, después de haber recibido en la década anterior, la visita de Hans Jenny, quien allí adelantó investigaciones sobre el humus tropical y sus variaciones altitudinales, las cuales fueron consignadas en su trabajo: *" Soil Formation Factors",* ya referido.

En las décadas de los 50's y los 60's la sección de Suelos del ICA se aboca a la validación y calibración de métodos de análisis químicos de suelos, a finales de los 60's el ICA en asocio con la Universidad Nacional de Colombia crea el PEG, Programa de Educación de Graduados en Ciencias Agrícolas, en el cual se forman los primeros Magisters en Suelos generados dentro de nuestras fronteras. Específicamente en los 60's se crea con sedes en Palmira, Valle del Cauca y Carimagua, Meta el Centro Internacional de Agricultura tropical, CIAT, el cual, en el tópico de Suelos, se aboca a los temas de mínima labranza y manejo de suelos ácidos, cabe destacar dentro de la producción científica del CIAT los trabajos del Dr. Luis Alfredo León sobre el Uso de roca fosfórica en la agricultura de Colombia y la liberación de algunos materiales genéticos resistentes a condiciones de alta acidez.

El 03 de septiembre de 1955 nace en Medellín, Antioquia, como fruto de la inquietud de un grupo de profesores y estudiantes de la Facultad Nacional de Agronomía, y con el liderazgo del profesor Manuel Del Llano, la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, la cual anualmente realiza diversos encuentros técnicos de divulgación científica de la Ciencia del Suelo y en forma bianual desarrolla el ya tradicional Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo en diferentes ciudades del país.

En la actualidad, existen Secciones de Suelos en cada una de las doce universidades que incluyen el programa de Ingeniería Agronómica en su currículum académico, la vinculación de esas células académicas al desarrollo de la Ciencia del Suelo, es palpable a través de su participación en los diferentes eventos de difusión científica que organiza periódicamente la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, en tales encuentros es común encontrar también participaciones de entidades como CORPOICA, CENICAÑA, CENIPALMA, FEDERACAFE, ASOCOLFLORES, UNIBAN, AUGURA, FEDEARROZ , FEDECACAO, lo mismo que algunas Corporaciones Autónomas Regionales.

Finalmente cabe destacar el apoyo constante al desarrollo de esta Ciencia que brinda la División de Agrología del IGAC y, a un nivel más cercano, las acciones permanentes en este campo de Empresas como: Carbones del Cerrejón, Cementos Argos; S.A, Empresa Multipropósito Urrá, S.A, ESP y Cerro Matoso, S.A.

I.D. Bustamante B.
M.I. Toro Q.
M. C. Cantero B
2022

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA……7

AGRADECIMIENTOS……9

ANOTACIONES DE LOS AUTORES……10

RESEÑA HISTÓRICA DEL DESARROLLO DE LA CIENCIA EN EL SUELO……11

MÓDULO I: RUDIMENTOS DE GEOLOGÍA ……33

I. MINERALES……35

1.1. DEFINICIÓN DE MINERAL ……..36

1.2. FORMACIÓN DE MINERALES……40

1.2.1. Cristalización a partir de una solución……40

1.2.2. Cristalización a partir de un fundido……41

1.2.3. Cristalización a partir de vapores hidrotermales……...41

1.2.4. Formación de minerales a partir de otros minerales preexistentes……41

1.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES……..41

1.3.1. Hábito ……42

1.3.2. Color ……45

1.3.3. Brillo o lustre ……47

1.3.4. Raya o huella: ç[5] ……48

1.3.5. Dureza: H[7] ……48

1.3.6. Fractura ……49

1.3.7. Clivaje o exfoliación ……50

1.3.8. Peso específico: G[10] ……..52

1.3.9. Otras propiedades ……..53

1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS MINERALES ……53

1.5. SILICATOS MÁS COMUNES ……..57

1.5.1 Silicatos ferromagnesianos ……57

1.5.2. Silicatos no ferromagnesianos ……57

II. ROCAS ÍGNEAS ……..58

2.1. EL MAGMA ……59

2.1.1. Tipos de Magma ……59

a. Ultrabásico ……..59
b. Básico ……..60
c. Intermedio ……60
d. Ácido ……60
2.1.2. Cristalización de un Magma……..61
2.2. TIPOS DE ROCAS ÍGNEAS ……61
2.2.1. Rocas Ígneas Volcánicas ……62
2.2.2. Rocas Ígneas Plutónicas ……..62
2.2.3. Rocas Ígneas Hipoabisales ……63
2.3. TEXTURA DE LAS ROCAS ÍGNEAS ……63
2.3.1. Tipos de Textura……..63
2.4. COMPOSICIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS ……..64
2.5. PROCESOS MAGMÁTICOS ……...64
2.5.1 Serie de Reacción de Bowen. ……65
2.5.2. Diferenciación Magmática. ……...66
2.5.3. Asimilación y Mezcla de Magmas ……67
2.6. CLASIFICACIÓN DE ROCAS ÍGNEAS. ……67
2.6.1. Rocas Ultrabásicas o Ultramáficas ……69
2.6.2. Rocas Básicas o Máficas ……69
2.6.3. Rocas Intermedias ……69
2.6.4. Rocas Ácidas……...70
2.6.5. Rocas Piroclásticas……70
III. METEORIZACIÓN…….. 71
3.1. TIPOS DE METEORIZACIÓN ……71
3.1.1 Meteorización Física o Mecánica. ……72
3.1.2. Meteorización Química. ……74
3.2. VELOCIDAD DE METEORIZACIÓN. ……76
3.2.1. Tiempo……...76
3.2.2. Tipo de Roca (Composición y Textura)……76
3.2.3. Elementos climáticos. ……77
3.2.4. Pendiente (Escorrentía) ……77
3.2.5. Vegetación y Organismos……78

IV. PROCESOS EROSIVOS O DENUDATIVOS ……80
4.1. CAUSAS ……80
4.2. CONSECUENCIAS ……82
4.3. TIPOS DE EROSIÓN. ……83
4.4. CLASES DE EROSIÓN……..83
4.5. PROCESOS EROSIVOS……83
4.5.1. Erosión Superficial……84
a. Erosión eólica.. ……84
b. Erosión pluvial……..84
b.1. Erosión por goteo o por impacto y saltación pluvial……84
b.1.1. Erosión laminar……..85
b.1. 2. Erosión en surcos……86
b.1.3. Erosión en cárcavas……86
c. Erosión fluvial……89
d. Erosión litoral u oceánica…… 89
4.5.2. Erosión subsuperficial…… 90
4.5.2.1. Tubificación…… 90
4.5.2.2. Karstificación …….. 91
4.5.3. Movimientos en Masa …… 92
4.5.3.1. Reptación …… 92
4.5.3.2. Terracetas por sobrepastoreo…….. 93
4.5.3.3. Deslizamientos, deslaves, derrumbes…… 93
4.5.3.4. Desplomes…….. 95
4.5.4. Flujos y avalanchas…… 95
V. ROCAS SEDIMENTARIAS…… 97
5.1. ORIGEN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS…… 97
5.2. PRINCIPALES CONSTITUYENTES…… 98
5.3. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS…… 98
5.3.1. Rocas sedimentarias detríticas…… 99
5.3.1.1. Lutita…… 99
5.3.1.2. Arenisca…… 100
5.3.1.3. Conglomerado……102

5.3.1.4. Brecha……..103
5.3.2. Rocas sedimentarias químicas inorgánicas……103
5.3.2.1. Evaporitas……103
5.3.2.2. Caliza……104
5.3.2.3. Silíceas……104
5.3.3. Rocas Sedimentarias Orgánicas o Bioquímicas……104
5.3.3.1. Caliza.....105
5.3.3.2. Rocas silíceas (chert).....105
5.3.3.3. Rocas organógenas ……105
5.4. ESTRATIFICACIÓN……106
5.5. LITIFICACIÓN……..107
5.6. TEXTURA.....107
VI. ROCAS METAMÓRFICAS……112
6.1. DEFINICIÓN DE METAMORFISMO……112
6.2. FACTORES DE METAMORFISMO ……113
6.2.1. Presión……...113
6.2.2. Temperatura ……114
6.2.3. Presencia de Flúidos Químicamente Activos. ……...114
6.3. GRADOS DE METAMORFISMO ……114
6.4. CONSECUENCIAS DEL METAMORFISMO ……115
6.4.1. Cambios Texturales……115
6.4.2. Cambios Mineralógicos……...116
6.5. TIPOS DE METAMORFISMO……...117
6.5.1. Metamorfismo de contacto: 10^5 años……...117
6.5.2. Metamorfismo regional: 10^7 años…… 118
6.5.3. Metamorfismo Dinámico: 400°C – Tº ambiente……..121
VII. ANOTACIONES DE GEOMORFOLOGÍA……123
7.1. BREVE INTRODUCCIÓN……...123
7.2. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS……123
7.2.1. Denudación ……..123
7.2.2. Agradación o Acumulación ……123
7.2.3. Diastrofismo……..124

7.2.4. Pliegues……124
7.2.5. Fallas……124
7.2.6. Diaclasas ……126
7.2.7. Vulcanismo……126
7.2.8. Efectos Topográficos de los Organismos…….. 126
7.2.9. Influencia del clima sobre los Procesos Geomórficos……126
7.3. GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL……127
7.3.1. Ríos y Valles……..127
7.3.2. Corriente. ……...127
7.3.2.1. Velocidad de una corriente: ……...127
7.3.2.2. Desarrollo de un Valle:……127
7.3.2.3. Nivel Base: …… 128
7.3.2.4. Capacidad de Transporte: ……128
7.3.2.5. Acumulación Fluvial……129
7.3.2.6. Relieves resultantes de la acumulación fluvial …… 130
7.3.2.6.1. Llanura de inundación…… 130
7.3.2.6.2. Abanicos aluviales o conos de deyección……131
7.3.2.6.3. Deltas……131
7.3.2.6.4. Relieves resultantes de la dinámica costera ……..132
7.3.2.6.4.1. Relieve submarino ……132
7.3.2.6.4.2. Relieve costero……..133
7.3.2.6.4.3. Geoformas erosivas……..133
7.3.2.6.4.4. Geoformas de acumulación……134
MÓDULO II: CONSTITUCIÓN FÍSICA DEL SUELO ……136
VIII. INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO……...139
8.1. EL SUELO COMO INDIVIDUO……140
8.2. EL SUELO, UN SISTEMA CERRADO……...141
8.3. EL SUELO Y SU EQUILIBRIO CON LOS FACTORES DE FORMACIÓN…..141
8.3.1. El Perfil del suelo……...142
8.3.2. Suelos Trasportados y Residuales……143
8.3.3. Pérdidas y Ganancias……...145
8.3.4. Meteorización e Intemperismo……145

8.3.4.1. Tipos de Meteorización……..146
8.3.4.2. Procesos de Meteorización……...147
8.4. ATRIBUTOS DEL SUELO……...150
8.5. EL SUELO Y LA ROCA……151
8.6. SUELOS MINERALES Y ORGÁNICOS, Horizontes Minerales y Orgánicos. 152
8.7. HORIZONTES MAESTROS Y HORIZONTES TRANSICIONALES ……153
8.8. HORIZONTES Y PERFILES EN EL CAMPO ……154
IX. COMPOSICIÓN DEL SUELO……160
9.1. FASE SÓLIDA DEL SUELO……161
9.2. FASE LÍQUIDA DEL SUELO……165
9.3. FASE GASEOSA DEL SUELO……166
9.4. COMPLEJO BIO-COLOIDAL DEL SUELO……167
9.5. DEFINICIÓN AMPLIADA DEL SUELO. ……167
9.6. IMPORTANCIA DEL SUELO……169
9.6.1. El Suelo sustrato y sustento de la biomasa captadora de energía cósmica……..169
9.6.2. El Suelo transformador de sustancias……170
9.6.3. El Suelo, sistema regulador de acuíferos y del régimen pulsátil de los ríos……170
9.6.4. El Suelo, banco de germoplasma universal……...170
9.6.5. El Suelo, archivo histórico de la humanidad……...171
9.6.6. El Suelo, soporte físico de todas las actividades humanas……..171
X. GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DEL SUELO……172
10.1. FACTORES DE FORMACIÓN DE LOS SUELOS……173
10.1.1. Material parental……173
10.1.2. Clima……180
10.1.3. Factor biótico……..186
10.1.4. Factor relieve……..190
10.1.5. Factor Tiempo……192
10.2. PROCESOS DE FORMACIÓN DE LOS SUELOS……194
10.2.1. Ganancias……194
10.2.1.1. Enriquecimiento: ……...194

10.2.1.2. Acumulación ……195
10.2.1.3. Cumulización ……195
10.2.2. Pérdidas……195
10.2.2.1. Lixiviación ……195
10.2.2.2. Erosión ……..195
10.2.3. Translocaciones. ……195
10.2.3.1. Eluviación ……. 195
10.2.3.2. Iluviación ……...195
10.2.3.3. Decalcificación ……...196
10.2.3.4. Calcificación ……196
10.2.3.5. Salinización ……....196
10.2.3.6. Desalinización ……..196
10.2.3.7. Alcalinización ……196
10.2.3.8. Desalcalinización ……196
10.2.3.9. Lavado ……....196
10.2.3.10. Podzolización ……196
10.2.3.11. Laterización ……196
10.2.3.12. Leuxinización ……197
10.2.3.13. Melanización ……..197
10.2.4. Transformaciones……197
10.2.4.1. Descomposición ……..197
10.2.4.2. Síntesis ……197
10.2.4.3. Humificación ……197
10.2.4.4. Mineralización ……197
10.2.4.5 Ferruginación ……..197
10.2.4.6. Gleysación ……....198
10.3. EL PERFIL DEL SUELO……198
10.3.1. Nomenclatura de horizontes transicionales……203
10.3.2. Subíndices……203
10.3.3. Límites entre horizontes……..206
10.3.4. Otros subíndices……..206
10.3.4.1. “b” ……..206

10.3.4.2. “k” ……..206
10.3.4.3. “m” ……206
10.3.4.4. “cs” ……207
10.3.4.5.”pn” …… 208.
10.3.4.6.” f” …… 208
10.3.4.7.“cn” ……209
10.3.4.8.“sa” …… 209
10.3.4.9. “si” …… 209
10.3.4.10.“x” …… ….209
10.4. AMPLIACIÓN DEL CONCEPTO DE PERFIL DE SUELO……209
10.5. EL MUESTREO DE SUELOS……212
XI. COLOR DEL SUELO ……..214
11.1. MODIFICACIONES AL COLOR DE LOS SUELOS…….....216
11.1.1. Moteamientos……...216
11.1.2. Vaciamientos ó variegaciones ……..217
11.1.3. Concreciones ……...218
11.1.4. Cutanes y Crotovinas…….....218
11.2. EL COLOR Y LA TAXONOMÍA DE LOS SUELOS……219
11.3. EL ORIGEN DEL COLOR DE LOS SUELOS……..221
11.4. PROPIEDADES DEL COLOR…….....222
11.5. ESTIMACIÓN DEL COLOR DE LOS SUELOS……223
11.6. SIGNIFICADO DEL COLOR DE LOS SUELOS……..227
11.7. MANEJO DEL COLOR DE LOS SUELOS……229
XII. TEXTURA DEL SUELO……231
12.1. EL SUELO FINO Y SU IMPORTANCIA……231
12.2. CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS MINERALES DE LOS SUELOS……232
12.3. SIGNIFICANCIA DE LAS SEPARATAS DE LOS SUELOS……..233
12.3.1. Los suelos pesados y livianos……234
12.4. TÉCNICAS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS……234
XIII. ESTRUCTURA DEL SUELO……..242
13.1. ARQUITECTURA DEL SUELO……..242
13.2. GÉNESIS DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO……...243

13.2.1. Formas (Tipos) de agregados del suelo……..245
13.2.2. Clases (tamaños) de agregados del suelo……..252
13.2.3. Grado (estabilidad) de los agregados del suelo…….254
13.2.3.1. Factores de Estabilidad Estructural en el Suelo…….255
13.2.3.2. Factores de Dispersión Estructural en el Suelo……..259
13.3. EFECTOS DE LA TEXTURA SOBRE LA ESTRUCTURA DEL SUELO…….260
13.4. EL PERFIL ESTRUCTURAL DEL SUELO……261
13.5. LOS FENÓMENOS DE LA ESTRUCTURACIÓN DEL SUELO……262
13.6. EL SUELO COMO MEDIO POROSO……263
13.6.1. Características de un Sistema Poroso……..266
13.6.2. El Sistema Poroso del Suelo……..267
13.6.3. Características deseables en el Sistema poroso edáfico……..267
13.7. ESTIMACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO.. ……....268
13.7.1. Técnica de la Membrana y Olla de Richards……..268
13.7.2. Técnica de Yoder……269
13.7.3. Técnica de Henin……271
13.7.4. Técnica de estimación de la Velocidad de Infiltración (VI) del suelo……272
13.7.5. Técnica de estimación de la Conductividad Hidráulica (K) del suelo……272
13.7.6. Técnica de estimación de la Permeabilidad (k, L2, Darcy) del suelo……274
13.7.7. Técnica de estimación de la Resistencia Mecánica del suelo a la Penetración, RMP (Kr/cm2, Kpa). (Penetrometría). ……274
13.7.8. Técnica de microscopía electrónica……276
13.8. MANEJO DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO……277
13.8.1. Objetivos del Manejo de la Estructura del Suelo……277
13.8.2. Técnicas de Manejo de la Estructura del Suelo. ……277
13.8.3. Estrategias de Manejo de la Estructura del Suelo……277
13.9. RELACIONES MASA: VOLUMEN EN EL SUELO……278
13.9.1. La Densidad Real o Densidad de Partículas (ρs (g/cm3)) ……..279
13.9.2. Peso Específico del Suelo……279

13.9.3. Densidad aparente en seco (ρb, (g/cm^3))……...280
13.9.4. Densidad aparente total o en húmedo (ρt , (g/cm^3))…….280
13.10. COMPARACIÓN DENSIDAD APARENTE (Dap) .vs. DENSIDAD REAL DEL SUELO (DR). …….280
13.11. UTILIDADES DEL CONOCIMIENTO DE Dap (gr/cc, T/m3). ……281
13.11.1. Cálculo de la humedad volumétrica (θv %,cc/cc.100)…….....281
13.11.2. Calculo de la lámina de riego (L). ……282
13.11.3. Cálculo del Peso de una hectárea de capa mecanizable para la estimación del requerimiento de fertilizantes y enmiendas por hectárea. (Wha)……283
13.11.4. Cálculo del espacio poroso total (w)……..283
XIV. CONSISTENCIA DEL SUELO……286
14.1. CONSISTENCIA DEL SUELO……..287
14.1.1. Definición…….287
14.1.2. Fenómenos de la Consistencia del Suelo……..288
14.1.3. Fuerzas responsables de la Consistencia del Suelo. ……..289
14.1.4. Estimación de la Consistencia del Suelo ……...293
14.2. COMPRESIÓN Y COMPACTACIÓN ……..295
14.2.1. Conceptos……295
14.3. COMPACTACIÓN Y ADENSAMIENTO ……296
14.3.1. Conceptos……297
14.4. RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN. (RAP), (RM) ……..298
14.5. ESTUDIO DE CASO ……..299
XV. COLOIDES DEL SUELO ……..306
15.1. INTRODUCCIÓN ……306
15.2. COLOIDES INORGÁNICOS O MINERALES…….307
15.2.1. Arcilla Mecánica…….....307
15.2.2. Arcilla Mineralógica……307
15.2.3. Arcilla Coloidal……309
15.3. ARCILLAS SILICATADAS. ……...311
15.3.1. Tipos de coordinación entre lamelas arcillosas……313
15.3.2. Génesis de Arcillas.. ……316

15.3.3. Evolución de las Arcillas……...317
15.4. ARCILLAS NO SILICATADAS.. ……..317
15.4.1. Arcillas de Ceniza Volcánica. ……318
15.4.2. Arcillas Tropicales. ……...319
15.4.3. Óxidos e hidróxidos de Silicio y Fragmentos de minerales y rocas con Ø < 0.002 mm. = 2 µ ……320
15.5. MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN Y ESTUDIO DE LA FRACCIÓN ARCILLA.. ……320
15.6. COLOIDE ORGÁNICO. ……322
15.6.1. Importancia. ……322
15.6.2. Definición de la Materia Orgánica. …….....323
15.6.3. Clasificación de la Materia Orgánica. ……323
15.6.4. ¿Qué es la Humificacion?.....323
15.6.5. Tipos de Humificación. …….....324
15.6.6. Composición y Clasificación del Humus ……324
15.6.7. Funciones de la Materia Orgánica del Suelo. ……329
15.6.8. Evolución de la humificación y tipo de Humus obtenido.. ……329
15.6.9. Manejo de la Materia Orgánica. ……...332
15.7. ORIGEN DE CARGAS ELÉCTRICAS EN LOS SISTEMAS COLOIDALES. ……334
15.7.1. Mecanismo de Bordes Rotos.. ……336
15.7.2. Cargas Compartidas o carga variable.. ……..336
15.7.3. Cargas por Sustitución Isomórfica o Carga Fija.. ……..337
15.8. EL FENÓMENO DE INTERCAMBIO IÓNICO.. ……..337
MÓDULO III: ARQUITECTURA FÍSICA DEL SUELO. ……339
XVI. AGUA DEL SUELO. ……...342
16.1. IMPORTANCIA. ……...342
16.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.. ……343
16.3. AGUA Y HUMEDAD.. ……343
16.4. PRIMERA APROXIMACIÓN AL RÉGIMEN HÍDRICO DEL SUELO.. ……347
16.4.1. La Succión del Suelo por el Agua.. ……349
16.4.2. Dinámica de Humedecimiento del Suelo.. ……349

16.4.3. Las “Constantes” de Humedad del Suelo.. ……352
16.5. CLASIFICACIÓN FÍSICA DEL AGUA DEL SUELO.. ……...353
16.6. CLASIFICACIÓN BIOLÓGICA DEL AGUA DEL SUELO.. ……..354
16.6.1. Factores que Afectan la Calidad y el Uso de la Humedad Aprovechable…….....356
16.6.1.1. Factor Planta…….....356
16.6.1.2. Factor Clima …….....356
16.6.1.3. Factor Suelo …….....357
16.7. MECANISMOS DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA POR LAS PLANTAS. ……...362
16.8. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO ……363
16.8.1. Método Gravimétrico ……..363
16.8.2. Método Tensiométrico…….....364
16.8.3. Método de Unidades de Resistencia Eléctrica……369
16.8.4. Método de Dispersión de Neutrones ……372
16.8.5. Método del TDR (Time Domain Reflectometry)…….375
16.9. TIPOS DE MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD EN EL SUELO …….....376
16.9.1. Flujo de Agua por Ascenso Capilar. ……376
16.9.2. Flujo Saturado del Agua en el suelo. ……..377
16.9.3. Flujo Insaturado del Agua en el Suelo ……381
16.9.4. Flujo de Agua en el Suelo, por ajustes de Presión de vapor.. ……383
16.10. REGÍMENES DE HUMEDAD EDÁFICA……...384
16.11. EGRESOS DE HUMEDAD DESDE EL SUELO. ……385
16.11.1. Egresos en Fase de Vapor. ……386
16.11.1.1. Magnitud de los Egresos en fase de vapor. ……386
16.11.1.2. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. ……..387
16.11.1.3. Manejo de la evaporación mediante Cubrimientos ……388
16.11.2. Egresos en Fase Líquida. ……...391
16.11.2.1. Percolación y Lavado……392
16.11.2.1.1. Métodos de Estudio de la Percolación……392
16.11.2.1.2. Condiciones de Ocurrencia de las Pérdidas por Percolación……392

16.11.2.1.3. Pérdida de Nutrimentos por Lixiviación……...394
16.11.2.2. Drenaje Natural del Suelo……...395
16.11.2.3. Drenaje Artificial……395
16.11.2.4. Escurrimiento y erosión……...399
16.11.2.4.1. Coeficiente de Erosión…….....401
16.11.2.4.2. Prácticas para el Control de la Erosión……401
16.11.2.4.3. Prácticas para el Manejo de la erosión en cárcavas……403
XVII. AIREACIÓN DEL SUELO……408
17.1. EL OBJETIVO DE ESTUDIO. ……..408
17.2. COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA DEL SUELO……409
17.3. VARIACIONES EN LA COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA DEL SUELO…411
17.4. LA CAPACIDAD DE AIRE DEL SUELO……..412
17.5. LA RENOVACIÓN DEL AIRE DEL SUELO …….....413
17.5.1. El Flujo de Masas o Flujo Masivo……414
17.5.2. La Difusión…….....415
17.6. LA VELOCIDAD DE DIFUSIÓN DE OXÍGENO……..416
17.7. LA AIREACIÓN Y OTRAS PROPIEDADES DEL SUELO…….....418
17.8. LA AIREACIÓN Y EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS……419
17.9. ESTIMACIÓN DE LA AIREACIÓN……420
17.10. MANEJO DEL AIRE DEL SUELO……421
17.10.1. Estrategias de Manejo……421
17.10.2. Objetivos……422
17.10.3. Técnicas de Manejo……422
17.10.3.1. Técnicas enfocadas en la incentivación de la Difusión.....422
17.10.3.2. Técnicas apoyadas en la labranza y el manejo de la materia orgánica del suelo ……423
17.10.3.3. Técnicas enfocadas en el mejoramiento estructural del suelo423
17.10.3.4. Técnicas que involucran el empleo de “mantillos” ……424
17.10.3.5. Otras técnicas para el Manejo de la Aireación del Suelo……424
17.11. LA AIREACIÓN COMO FACTOR DE CALIFICACIÓN AGROLÓGICA……..425
XVIII. RÉGIMEN TÉRMICO DEL SUELO……426

18.1. IMPORTANCIA……426
18.2. CONCEPTOS Y UNIDADES TÉRMICAS. ……427
18.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA TEMPERATURA DEL SUELO……429
18.3.1. Factores Ambientales ……429
18.3.1.1. Radiación Solar……429
18.3.1.2. Radiación desde la Atmósfera……429
18.3.1.3. Conducción de calor por la Atmósfera……..430
18.3.1.4. Condensación……...430
18.3.1.5. Evaporación. ……430
18.3.1.6. Lluvia ……430
18.3.1.7. Aislamiento……431
18.3.1.8. Vegetación……431
18.3.2. Factores Edáficos……431
18.3.2.1. Capacidad Térmica……431
18.3.2.2. Conductividad y Difusividad Térmicas……432
18.3.2.3. Actividad Biológica……..434
18.3.2.4. Radiación desde el Suelo……..434
18.3.2.5. Textura, Estructura y Humedad del Suelo……..434
18.3.2.6. Sales Solubles……436
18.4. FLUCTUACIONES DE LA TEMPERATURA DEL SUELO……..436
18.4.1. Fluctuaciones Diarias……436
18.4.2. Fluctuaciones Periódicas……438
18.5. EL RÉGIMEN TÉRMICO Y OTRAS CONDICIONES DEL SUELO……...440
18.5.1. Régimen Hídrico……440
18.5.1. Estructura del Suelo……440
18.5.3. Actividad Microbial y Ambiente Nutrimental……440
18.5.4. Desarrollo del Suelo……441
18.6. EFECTO DEL RÉGIMEN TÉRMICO DEL SUELO SOBRE EL CRECIMIENTO VEGETAL……...441
18.7. ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL SUELO……..442
18.8. MANEJO DEL RÉGIMEN TÉRMICO DEL SUELO……..443
XIX. REFLEXIÓN ENFOCADA HACIA EL MANEJO DE LOS SUELOS……445

19.1. OBJETIVOS DEL MANEJO DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO……446
19.1.1. Ambiente Favorable para las Plantas……446
19.1.2. Conservación de Suelos……....446
19.1.3. Conservación del agua……....446
19.2. REQUERIMIENTOS DE CONDICIONES FÍSICAS POR LAS PLANTAS…….447
19.3. AJUSTES AL USO DE LA TIERRA, SEGÚN LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO……448
19.3.1. Textura……448
19.3.2. Humedad del Suelo……...448
19.3.3. Aireación del Suelo…….....449
19.3.4. Régimen Térmico del Suelo……449
19.3.5. Estructura del Suelo……..449
19.3.6. Color…….....450
19.4. METAS PARA UN PROGRAMA DE MANEJO DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO…….....450
19.4.1. Régimen Hídrico…….....450
19.4.2. Régimen de Aireación del Suelo……..451
19.4.3. Estructura……451
19.4.4. Régimen Térmico del Suelo……...452
19.4.5. Color……..452
19.5. RECONOCIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO……..452
19.6. MÉTODOS PARA EL MANEJO DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO460
19.6.1. Uso del Suelo…….....462
19.6.2. Métodos de Cosecha……..464
19.6.3. Manejo de residuos de cosecha y uso de mantillos……464
19.6.4. Labranza……..465
19.6.5. Drenaje. ……..468
19.6.7. Riego……470
19.6.8. Tratamientos químicos……..475
BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA……..460

EL SUELO

Viento, agua, sol y lluvia van en el planeta tierra
formando con todas las plantas,
unos organismos simples
y uno que otro más complejo,
la base fundamental del universal sustento.

Si mi amigo. Van formando
al mundial y omnipresente testigo.
Al humilde y portentoso basamento
de la vida que es el suelo.

Pasa el tiempo sobre el tiempo.
Son siglos y muchos años
que exige la rígida y fría roca
para ser sustento y base de la vida,
a través de su único hijo:
Quien no es otro que:
nuestro inefable suelo.

Cuando Dios en la creación...
Creó agua, luz y amplias cadenas de vida,
siempre tenía en su Divina Mente
el bienestar y el sustento,
para aquella epifanía de vida
con que estaba al mundo cubriendo.

Por eso imaginativo.
Con índice omnipotente,
tocó la roca. E increpándola, diciendo:
"Da La Vida”. Y fue así que creó al suelo,
fundamental elemento
para todo ser que respira
en este planeta de ensueño.

Iván Darío Bustamante Barrera
Ivándebebé
Agosto 29/2019;

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO, EXPERIENCIAS EN EL CARIBE COLOMBIANO

MÓDULO I: RUDIMENTOS DE GEOLOGÍA

Iván Darío Bustamante Barrera
María Isabel Toro Quijano
Mónica Cecilia Cantero Benítez

2022

Paisaje de Cornubianitas. Intrusión del Batolito Antioqueño en los Esquistos Intercalados del Complejo Cajamarca (Vereda Tobón, Yarumal, Antioquia)

(Foto Estudiantes Suelos I UNICOR, 1998)

I. MINERALES

La corteza terrestre es fuente de minerales útiles y esenciales para los procesos que desarrolla el hombre, podemos tomar muestras de estos minerales, pero sólo de aquellos que se encuentran en la parte más superficial del Planeta, y son precisamente éstos los que determinan algunas de las características de los suelos.

Sin embargo, es importante indicar que las propiedades o características de los minerales determinan no sólo los procesos superficiales[1] tales como las características de una erupción volcánica, la meteorización, la erosión y la configuración superficial sino también determinan los procesos internos de la Tierra[2], como la subducción, los depósitos o yacimientos minerales y también las características de las ondas sísmicas al propagarse por diferentes materiales y por lo tanto, los daños potenciales causados por los terremotos.

La importancia de los minerales en los procesos productivos que desarrolla el hombre es indiscutible, casi todos los procesos industriales o cotidianos requieren de uno o varios minerales: la elaboración de cementos requiere como materia prima la calcita contenida en las calizas y mármoles; algunos correctores de suelos son en realidad minerales triturados tales como la Silvina (denominada por los Ingenieros Agrónomos Potasa (KCl) la sal utilizada como condimento no es más que un mineral llamado Halita, que se usa también en la industria textil para fijar los colores de las telas, como descongelante en las vías de países afectados por las nevadas, como conservante de alimentos, entre otras; el Oro no es sólo utilizado en la industria de la joyería sino también en la industria electrónica y en la medicina nuclear, dada su gran conductividad.

El precio de los minerales depende de dos condiciones básicamente, de la abundancia o escasez relativa en la corteza terrestre y de las propiedades que el hombre aproveche de ellos.

[1] También llamados exógenos.

[2] También llamados endógenos.

1.1. DEFINICIÓN DE MINERAL.

Existen varias definiciones de MINERAL, la definición clásica es:
Sustancia sólida y homogénea, formada mediante un proceso natural e inorgánico, que tiene una composición química DEFINIDA y una Estructura Interna Ordenada (EIO). A continuación, se analiza cada parte de la definición:

- Sólida: para ser denominado mineral en el sentido estricto, la sustancia debe estar en estado sólido en condiciones superficiales, por lo tanto, el petróleo no se considera mineral.
- Homogénea: significa que al disminuir el tamaño de grano seguirá siendo la misma sustancia.
- Natural: quiere decir que en el proceso de formación no debe intervenir de ninguna manera el hombre, por lo tanto, no se consideran minerales en sentido estricto las sustancias obtenidas mediante procesos de síntesis (v.g. diamantes y zafiros sintéticos) o las escorias de los hornos. Estas sustancias producidas por el hombre deben considerarse como el "equivalente sintético" de la sustancia mineral.
- Inorgánica: significa que durante su formación no habrá intervención de ningún organismo vivo, por lo tanto, las perlas y el carbón no se consideran minerales.
- Composición: la composición de la sustancia debe poder definirse mediante una fórmula química, la cual se considera DEFINIDA PERO NO FIJA, es decir, que puede variar dentro de ciertos límites, por ejemplo:

  Cuarzo: SiO_2

  Calcita: $CaCO_3$

  Turmalina: $Na(Mg,Fe,Mn,Li,Al)_3\ Al(Si_6O_{18})(OH,F)_4$. Significa que el Sodio puede ser reemplazado por Magnesio, Hierro, Manganeso, Litio y Aluminio y tener variaciones composicionales en este rango, pero no otros elementos.

  Oro: Au
- Estructura Interna Ordenada: significa que en cada especie mineral los átomos están organizados en un arreglo geométrico repetitivo, que bajo ciertas circunstancias se refleja en el exterior del mineral; esta forma como los átomos están dispuestos en el espacio depende del tamaño y carga de los átomos y es fija para cada mineral, independiente de las condiciones de su formación.

Tal como puede observarse en la Figura 1, los diferentes elementos químicos se asocian para formar minerales, y la asociación de uno o varios minerales da origen a las rocas**.**

Aunque la definición anterior ha sido aceptada durante décadas, y continúa vigente en la actualidad, es necesario indicar que, en 1995, la Comisión de Nomenclatura

Mineral y Minerales Nuevos de la Asociación Mineralógica Internacional definió como mineral, “un elemento o compuesto químico que normalmente es cristalino y que se ha formado como resultado de procesos geológicos”.

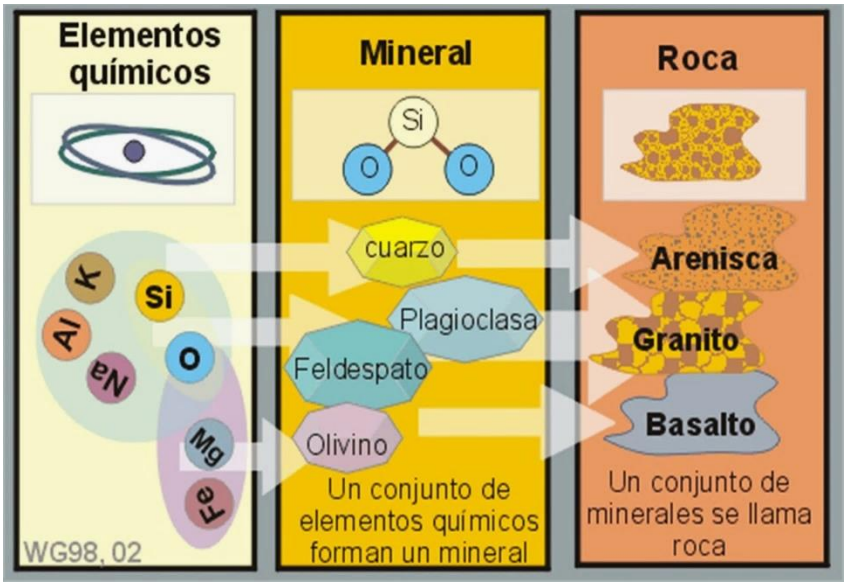


Figura 1. Relación entre los elementos, minerales y rocas. Note que un mismo mineral puede dar origen a varias rocas de tipo diferente. Fuente: http://www.geovirtual.cl/geologiageneral.

Como esta nueva definición es mucho más amplia, se aceptan como minerales las sustancias amorfas[3] de origen natural; adicionalmente, considera que, aunque el agua en estado líquido no es mineral, en estado sólido (hielo) si es un mineral. Esta nueva definición no es totalmente aceptada por algunos geólogos que siguen considerando las sustancias amorfas como mineraloides y excluyen el hielo dado que la estructura interna ordenada no es única y de esta manera cristalizaría en varios sistemas cristalinos, siendo el hielo hexagonal la fase más común, pero puede ser romboidal, tetragonal y monoclínico.

En algunos minerales, se presenta una forma geométrica regular, limitada por caras planas y pulidas, recibiendo el nombre de **cristal**, tal como se muestra en la Figura 2, que en última instancia reflejan su desarrollo en un medio favorable de espacio, tiempo y condiciones termodinámicas adecuadas. Es decir, durante su formación no existió una fuerte competencia por el espacio, crecieron a una baja velocidad y las condiciones de presión y temperatura no tuvieron variaciones bruscas. Es necesario aclarar que todos los cristales son minerales, pero no todos los minerales presentan caras planas y pulidas; así mismo, esta forma externa geométrica es reflejo de la estructura interna ordenada,

[3] Se entienden por sustancias amorfas, aquellas que presentan todas las características de un mineral, excepto la de tener estructura interna ordenada, por ejemplo, el ópalo y la obsidiana.

pero independientemente de si se han desarrollado cristales o no, el mineral tiene la misma estructura cristalina (atómica).

Biotita $K(Mg, Fe^{2+})_3(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$

Eritrina $(Co,Ni)_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$

Figura 2. Imágenes de cristales de diferentes minerales. Note que la geometría de la Biotita y la Eritrina son muy diferentes entre sí. Fuente: http://www.geologypage.com/.

Algunos minerales pueden tener la misma composición química pero exhibir estructuras cristalinas diferentes, dependiendo de las condiciones de presión y temperatura a las que fueron formados, éstos reciben el nombre de **polimorfos**, y el ejemplo más representativo lo constituyen el diamante y el grafito, ambos minerales están compuestos exclusivamente por átomos de Carbono, que se arreglan de maneras totalmente diferentes dadas las condiciones de presión y temperatura durante su formación: en el diamante, formado a altas presiones y temperaturas, los átomos se ordenan con una densidad atómica muy alta mientras que en el grafito, formado a presiones y temperaturas bajas, los átomos se localizan a mayor distancia unos de otros, es decir, con una densidad atómica menor; otro ejemplo de minerales polimorfos lo constituyen la calcita y el aragonito.

Es necesario aclarar que un mineral presenta una combinación de elementos representados en la fórmula química, y dependiendo de la afinidad geoquímica[4] de los elementos químicos, éstos pueden ser reemplazados por otros, en algunos minerales se genera el intercambio de algunos átomos o iones por otros de radios similares, dando origen a sustancias **isomórficas**, es decir, aquellas que tienen la misma forma pero diferente composición química, el mejor ejemplo de estos minerales lo constituye la serie de las plagioclasas, dado que al cristalizar la anortita, a mayor temperatura, a medida que ésta va descendiendo, el Calcio es reemplazado en la estructura por el Sodio, formando una serie compleja de minerales en función de su composición química.

Al estudiar los cristales perfectos, como la Biotita en la Figura 2, se identifican elementos de simetría en las tres direcciones del espacio, es decir ejes, planos y centro,

[4] Que está en función básicamente de la valencia y del radio iónico de los átomos.

se pueden definir SIETE GRUPOS BÁSICOS que reciben el nombre de SISTEMAS CRISTALINOS. Es decir que todos los minerales existentes pueden expresarse geométricamente según la proporción de ejes cristalográficos en siete sistemas cristalinos, teniendo en cuenta que el número de combinaciones posibles de los elementos de simetría es finito.

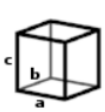
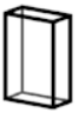
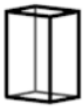
Cúbico	Tetragonal	Hexagonal	Trigonal	Rómbico	Monoclínico	Triclínico
todos iguales a=b=c	dos iguales a=b≠c		todos iguales a=b=c	los tres lados son distintos a≠b≠c		
Ángulos rectos α=β=γ=90º		α=β=90º γ=120º	α=β=γ≠90º	Ángulos rectos α=β=γ=90º	α=β=90º≠γ	α≠β≠γ≠90º
						

Figura 3. Sistemas Cristalinos. Fuente: https://aulaenred.fundacionibercaja.es/contenidos-didacticos/cristalografia/redes-cristalinas-

Es importante indicar que esta proporción es única para cada mineral, esto es, todos los diamantes del mundo cristalizan en el sistema Cúbico, lo que quiere decir que guardan la misma proporción entre los ejes porque los átomos de Carbono que lo constituyen ocupan la misma posición espacial que se repite, así como la Biotita de la Figura 2 cristaliza en el sistema Monoclínico.

En la naturaleza existen más de 5.300 minerales nombrados, de éstos aproximadamente 5.090 han sido aprobados por la Asociación Internacional de Mineralogía, pero sólo una docena de éstos son abundantes, estos minerales constituyen la mayor parte de las rocas de la corteza terrestre (continental y oceánica) y son denominados **minerales petrográficos.** Es importante entender que la composición de estos minerales petrográficos depende de manera directa de la composición promedio de la Corteza Continental, en la que sólo ocho elementos constituyen el 98% (en peso), tal como puede observarse en la Tabla 1.

Se hace necesario aclarar que la composición anterior hace referencia a la composición **promedio** de la corteza continental y no expresa que, en todos los sitios de ésta se presenta dicha composición, significa que algunos sitios presentan valores significativamente mayores o menores del contenido de cualquiera de estos elementos. Sin embargo, es necesario reflexionar en la composición promedio en la Tierra de elementos tales como el Potasio, al hacer un promedio ponderado en la corteza continental su porcentaje sólo alcanza el 2,6 del 98% del total. Conviene a esta altura de la discusión reflexionar acerca de la importancia de este elemento en muchos de los

procesos vegetales (apertura y cierre de los estomas, regulación del agua en las plantas (osmo-regulación), fructificación, la síntesis de proteínas y de almidón, entre otras).

Tabla 1. Composición promedio de la Corteza Continental.

Elemento	Porcentaje
Oxígeno	46.6%
Silicio	27.7%
Aluminio	8.1%
Hierro	5.0%
Calcio	3.6%
Sodio	2.8%
Potasio	2.6%
Magnesio	2.1%

Fuente: Tarbuck y Lutgens.2005

1.2. FORMACIÓN DE MINERALES.

Los átomos en estados líquido y gaseoso están desordenados y tienen una disposición al azar, pero al cambiar la TEMPERATURA, LA PRESIÓN O LA CONCENTRACIÓN pueden agruparse en una disposición ordenada característica del estado cristalino. En general se puede indicar que los minerales se forman en general a partir de soluciones, fundidos, vapores y transformaciones en estado sólido.

1.2.1 Cristalización a partir de una solución.

Un mineral precipita a partir de una solución acuosa debido a una de tres condiciones: la evaporación de la solución, aumento en la concentración o la acción de organismos vivos. Si tomamos el ejemplo del lagunas costeras o lagos continentales la evaporación del solvente conllevaría a un cambio en la concentración de la solución y los iones se combinarían para formar minerales como halita y yeso. Por otro lado, en ambos sistemas lacustres algunos organismos, pueden sintetizar minerales a partir de las soluciones y suspensiones acuosas, produciendo exoesqueletos.

1.2.2 Cristalización a partir de un fundido.

Los minerales también pueden formarse a partir de la cristalización a partir de un magma o roca fundida, teniendo en cuenta que al disminuir la temperatura se generan fuerzas de enlaces químicos que dan como resultado la cristalización de determinados minerales; la formación de un mineral u otro dependen de la composición del magma y de las condiciones de presión y/o temperatura y de esta manera determinan la composición mineralógica final de la roca.

1.2.3 Cristalización a partir de vapores hidrotermales.

A medida que el vapor se enfría, los átomos o moléculas separadas van aproximándose entre sí, hasta formar eventualmente un sólido cristalino. Este proceso se desarrolla por ejemplo en la base de las fumarolas y/o en el cuello de los volcanes, donde se forman cristales de azufre utilizados entre otros como correctores de los suelos.

1.2.4 Formación de minerales a partir de otros minerales preexistentes.

Puede darse mediante dos procesos totalmente diferentes:

- Meteorización química, mediante la cual algunos minerales en SUPERFICIE (condiciones atmosféricas) sufren cambios de composición y estructura, por ejemplo, los feldespatos se transforman en caolinita.
- Metamorfismo, mediante el cual algunos minerales en PROFUNDIDAD sufren cambios de composición y estructura: por ejemplo, las arcillas se transforman en minerales del Grupo de las Micas.

1.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES.

Cada especie mineral se caracteriza por presentar propiedades físicas, químicas y ópticas que permiten la identificación del mineral, estas características varían en función de las condiciones químicas (propiedades no diagnósticas) o permanecen invariables en el mineral (propiedades diagnósticas).

En general puede afirmarse que las características físicas dependen de la composición química y de la estructura cristalina del mineral, y se usan para la identificación inicial. Es necesario aclarar que el tipo de enlace determina muchas propiedades físicas macroscópicas del mineral.

Muchos de los atributos de los suelos, tanto de tipo físico, como químico y nutrimental están en función de las propiedades, no sólo químicas, sino físicas de los minerales. Ejemplos de lo anterior lo constituyen la textura, la permeabilidad, como atributos físicos; y la fertilidad nativa, compuesta a su vez por los factores capacidad, intensidad y velocidad, en lo referente a atributos químicos y nutrimentales.

1.3.1 Hábito.

Desafortunadamente, el término "forma" es ampliamente usado para indicar la apariencia externa de los minerales, sin embargo, es más correcto aplicar el término hábito para describir la apariencia externa, tanto de los cristales como de los minerales.

El término hábito se refiere al aspecto que presenta un mineral como consecuencia del desarrollo o no de caras cristalinas. Aunque cada mineral cristaliza en un solo sistema cristalográfico, puede presentar varios hábitos, dado que el hábito refleja en gran medida las condiciones de formación.

Para nombrar el hábito se utilizan varios términos descriptivos, como:

- Acicular: cristales con gran desarrollo de caras verticales que tienen el aspecto de agujas.
- Fibroso: cristales que asemejan hilos.
- Radial: cristales con considerable desarrollo de caras verticales y que divergen desde un punto central.
- Hojoso: cristales con apreciable desarrollo de caras horizontales que imparten el aspecto de hojas. Este hábito es típico de los minerales del Grupo de las Micas como la Biotita, la Moscovita y la Clorita.
- Prismático: cristales similares a la forma geométrica del prisma.
- Cúbico: cristales de paralelepípedos. Minerales como los del Grupo del Granate, la Halita, la Pirita (u oro de tontos), el Diamante presentan hábito cúbico.
- Columnar: cristales en los cuales dos de las dimensiones son similares entre sí, pero mucho menores que la tercera dimensión, asemejando las columnas de un edificio, este hábito es típico de la Hornblenda.
- Tabular: cristales donde las tres dimensiones son muy diferentes en cuanto a magnitud, este hábito es típico de la Augita.
- Reniforme: cristales que se asemejan a la apariencia de un riñón.
- Botroidal: cristales que se asemejan a esferas.
- Granular: los cristales tienen la apariencia de granos, típico de minerales del Grupo del Olivino.
- Terroso: de aspecto parecido al polvo.
- Masivo: no existe definición en la apariencia del mineral.

Eritrina, hábito acicular
Fuente: Geology page
(http://www.geologypage.com)

Serpentina var. Crisotilo, hábito fibroso
Fuente: Foro de Minerales FMF
(http://www.mineralogia.es/)

Wavelita, hábito radial
Fuente: Geology page
(http://www.geologypage.com)

Moscovita, hábito hojoso
Fuente: Foro de Minerales FMF
(http://www.mineralogia.es/)

Calcita, hábito prismático
Fuente: Foro de Minerales FMF
(http://www.mineralogia.es/)

Halita, hábito cúbico
Fuente: Foro de Minerales FMF
(http://www.mineralogia.es/)

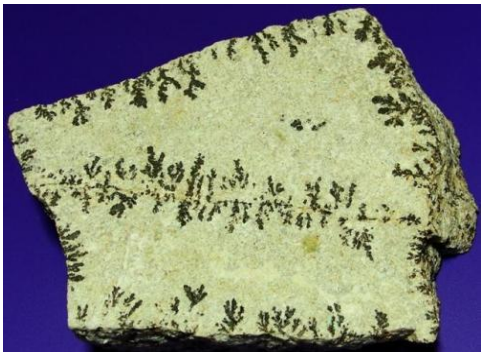
Hornblenda, hábito columnar
Fuente: Foro de Minerales FMF
(http://www.mineralogia.es/)

Augita, hábito tabular
Fuente: Foro de Minerales FMF
(http://www.mineralogia.es/)

Eritrina, hábito tabular
Fuente: Geology page

Olivino, hábito granular
Fuente: Foro de Minerales FMF (http://www.mineralogia.es/)

Hematita, hábito botroidal
Fuente: Foro de Minerales FMF (http://www.mineralogia.es/)



Pirolusita, hábito dendrítico
Fuente: Foro de Minerales FMF (http://www.mineralogia.es/)

Hematites, hábito botroidal y Limonita hábito terroso
Fuente: Foro de Minerales FMF (http://www.mineralogia.es/)

Apatito, hábito masivo
Fuente: Foro de Minerales FMF (http://www.mineralogia.es/)

Figura 4. Ejemplos de hábitos de algunos minerales. Fuente: http://www.geologypage.com/ y http://www.mineralogia.es/

Es importante aclarar que cuando varios cristales de la misma especie mineral se encuentran asociados y se han formado conjuntamente se denomina AGREGADO. Tal vez los ejemplos más claros son el agregado dendrítico en el cual los cristales crecen formando unas ramas divergentes muy finas, que asemejan un musgo como en la Pirolusita (Figura 4) y el agregado botroidal típico de la Hematita (Figura 4), ambos de abundante ocurrencia en Córdoba.

1.3.2. Color.

El color es una propiedad óptica, resultado de la composición química del mineral. En algunos casos es característico de un mineral determinado, en este caso reciben el nombre de minerales IDIOCROMÁTICOS porque el color constituye una propiedad diagnóstica muy útil para su identificación como en el caso de la Eritrina (Figura 4).

Sin embargo, en gran cantidad de minerales el color natural es una propiedad muy variable y por lo tanto no resulta útil para la determinación del mineral, éstos reciben el nombre de minerales ALOCROMÁTICOS, el mejor ejemplo de este tipo de minerales lo constituye el Cuarzo (SiO_2) cuyo color varía de incoloro a negro pasando por colores amarillo, ocre, naranja, rojo, azul, verde, morado, rosado, café, gris, debido a pequeñas impurezas en su estructura (Figura 5). El color puede variar como consecuencia de pequeños contenidos de elementos de impurezas o variaciones de composición, incluso dentro del mismo mineral como en la turmalina (Figura 5).

Es necesario aclarar que no significa que el color de un mineral se debe a las impurezas, simplemente el contenido de éstas puede variar el color del mineral.

El color también puede asociarse con la presencia de ELEMENTOS CROMÓFOROS en la estructura de los minerales, que de alguna manera van a determinar el color del suelo: contenidos de hierro férrico (Fe^{3+}) dan como resultado minerales de color rojo, pasando a café y hasta negro (Ver Hematita de la Figura 4), el hierro ferroso (Fe^{2+}) por el contrario imprime en el mineral tonalidades verdes y hasta azulosas, el magnesio produce en el mineral coloraciones negras, el manganeso se asocia con colores rosados o morados, mientras que el sodio es cromóforo claro.

Es importante indicar que el color es una de las propiedades físicas que sufre cambios más rápidamente como producto de la meteorización, por lo tanto, esta propiedad debe determinarse en una superficie fresca y no alterada del mineral, por lo que es recomendable apreciarlo en una fractura reciente.

Cuarzo incoloro

Cuarzo negro

Cuarzo naranja

Cuarzo morado (variedad amatista)

Cuarzo rosado

Cuarzo ocre (variedad citrino)

Turmalina

Turmalina

Figura 5. Variaciones del color en algunos minerales. Fuente: http://www.geologypage.com/

1.3.3. Brillo o lustre.

Hace parte de las propiedades ópticas y se define como el aspecto que ofrece la superficie FRESCA del mineral al reflejar la luz. Junto con el color es una de las propiedades físicas que muestran cambios más rápidamente al iniciar la meteorización química.

Esta es una propiedad que depende fundamentalmente de la composición química y el tipo de enlace químico, aunque también puede estar modificada por la rugosidad de la superficie, el propio mineral y por el tamaño.

Se divide en:

- Brillo METÁLICO: Se dice que los minerales metálicos tienen brillo metálico, en este grupo se encuentran por ejemplo el Oro, la Plata, el Platino (elementos nativos), también muchos sulfuros como la Pirita y la Galena presentan lustre metálico. Cuando la intensidad del brillo metálico es menor, se habla de brillo submetálico, el cual es común en muchos de los sulfuros.
- Brillo NO METÁLICO: lo presentan la mayoría de los minerales no metálicos. Se clasifica como vítreo (si la superficie brilla como el vidrio), adamantino (si la superficie brilla como el diamante), nacarado (si la superficie brilla como el nácar), sedoso (si la superficie brilla como la seda), perlado (si la superficie brilla como las perlas), graso (si la superficie brilla como el aceite), mate (si la superficie no tiene brillo).

Existe una relación muy estrecha entre el brillo y el tipo de enlace, de esta manera puede decirse que los minerales con enlace iónico presentan en general brillo vítreo, tal es el caso de la Fluorita, el Olivino, el Cuarzo y el Feldespato. Aquellos minerales con enlace covalente como el Rutilo, el Diamante y la Esfalerita presentan brillo adamantino.

Las combinaciones de enlace metálico – covalente en un mineral dan como resultados minerales más opacos que aquellos que tienen el enlace metálico exclusivamente, tal es el caso del Cinabrio (mena de mercurio) el Grafito y la Magnetita. En los minerales donde se da una combinación de enlace iónico – covalente presentan brillo vítreo o adamantino, como la Malaquita, el Circón, la Casiterita y el Azufre nativo.

1.3.4 Raya o huella: Ç[5].

Es el color del mineral pulverizado. Aunque el color de un mineral puede variar la raya suele permanecer constante, de esta manera, los minerales alocromáticos tienen el

[5] Este es el símbolo para representar la raya.

mismo color de la raya. La raya es, por lo tanto, mucho más útil para la identificación de un mineral que el color natural.

La determinación de la raya se realiza frotando el mineral contra una porcelana sin esmaltar, que tiene una dureza de 6,5, por lo tanto, a los minerales con dureza superior a este valor requieren otra sustancia para ser pulverizados (ver Tabla 2).

Como regla general, puede decirse que los minerales de brillo metálico tienen raya negra o muy oscura, mientras que los minerales de brillo no metálico presentan raya blanca o muy clara. Es necesario aclarar en este punto que la raya incolora no existe, dado que los minerales incoloros al ser triturados reflejan la luz en muchas direcciones y por lo tanto como consecuencia de la física ondulatoria, no pueden tener raya incolora porque cada pequeña partícula refleja la luz de diferente manera en el espectro visible donde no existe el incoloro, pero sí el blanco.

1.3.5 Dureza: H[6].

La dureza es una propiedad mecánica de carácter vectorial relacionada con la composición y la estructura del mineral. La dureza se define como la oposición que ofrece la superficie de un mineral a sufrir deformación mecánica, es decir, a ser rayada o penetrada por otra sustancia, que se relaciona de manera directa con los enlaces de la estructura del mineral.

La dureza constituye una propiedad DIAGNÓSTICA porque permanece CONSTANTE cuando la sustancia está fresca.

Un mineral posee una dureza mayor que otro, cuando el primero es capaz de rayar al segundo.

Tal como se indicó, la dureza es una propiedad vectorial que depende de la COMPOSICIÓN DEL MINERAL Y DE SU ESTRUCTURA. Los factores estructurales que la determinan son:

- LA DENSIDAD DEL EMPAQUETAMIENTO: a mayor densidad del empaquetamiento mayor dureza.
- EL TAMAÑO DE LOS IONES: a mayor dureza, menor radio iónico.

[6] Este es el símbolo para representar la dureza.

En general puede considerarse que enlaces fuertes y cargas grandes se corresponden con durezas más elevadas.

La dureza se evalúa mediante la Escala Relativa de Dureza de Mohs[7]. Esta escala como su nombre lo indica ordena de manera relativa los minerales de más blando a más duro, tal como puede observarse en la Tabla 2, pues al momento de Mohs publicarla no existían métodos de laboratorio que permitieran la medición de la Dureza Absoluta de un mineral, en realidad el mineral 10 (diamante) es 80 VECES MÁS DURO QUE 1 (talco) en la escala de Vicker que es lineal.

Tabla 2. Escala de Dureza Relativa de Mohs y los referentes en el trabajo de campo.

DUREZA DE MOHS		CLASIFICACIÓN INDUSTRIAL	ELEMENTOS COMUNES PARA MEDIR DUREZA EN CAMPO
1	Talco	BLANDOS	2,5 Uña
2	Yeso		
3	Calcita		
4	Fluorita	SEMIDUROS	5,1 Navaja 5,5 Vidrio
5	Apatito		
6	Ortosa		
7	Cuarzo	DUROS (utilizados como gemas)	
8	Topacio		
9	Corindón		
10	Diamante		

Fuente: Elaboración Propia.

1.3.6. Fractura.

La fractura es una propiedad mecánica que está relacionada de manera directa con la estructura del mineral. Se define como el aspecto que ofrece un mineral al romperse. Puede ser:

- Laminar o fibrosa: cuando al romperse el mineral presenta una superficie irregular en forma de astillas o fibras. Ejemplo: la actinolita.
- Concoidea: la superficie del mineral luego de someterse a la fractura presenta una superficie lisa y de concavidad suave, como la que muestra una concha en su parte interior o un vidrio al partirse. Típica del Cuarzo.
- Ganchuda: cuando se produce una superficie tosca e irregular, con bordes agudos y dentados. Ejemplos: magnetita y cobre nativo.
- Lisa: es la que presenta una superficie lisa y regular.

[7] Ideada en 1.825 por el científico del mismo apellido.

- Terrosa: la fractura deja una superficie con aspecto granuloso o pulverulento.

1.3.7. Clivaje o exfoliación.

La exfoliación, también denominada clivaje y en algunos textos mexicanos crucero, es una propiedad mecánica que también se encuentra relacionada con la estructura del mineral y que posee una característica de diagnóstica de su invariabilidad en una misma especie mineral. Se define como una tendencia del mineral a romperse a lo largo de planos de debilidad estructural que se correlacionan con enlaces atómicos débiles.

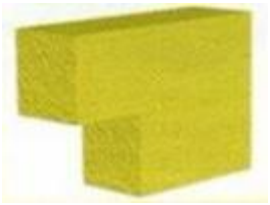
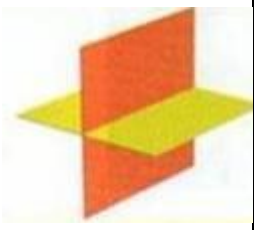
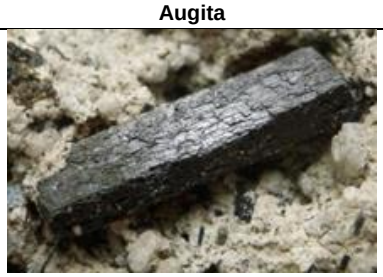
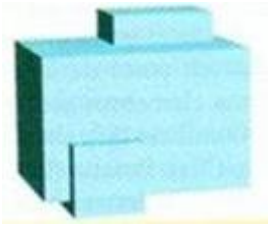
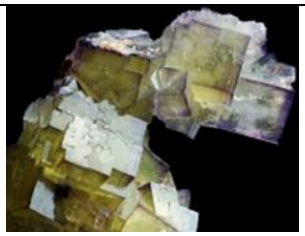
Es necesario aclarar que una cara cristalina no siempre es una cara de clivaje, por ejemplo, el cuarzo exhibe buen desarrollo de cristales, pero no tiene clivaje. Para decir que un mineral tiene clivaje es necesario ver planos paralelos entre sí tal como se muestra en la Figura 6, la existencia de estos planos predispone a partirse a lo largo de los mismos cada vez que se imprima un esfuerzo mecánico en el mineral.

Es importante no confundirla con el hábito, es decir, al observar el cristal no debe confundirse la cara cristalina con la exfoliación. La exfoliación[8] es el resultado de la distribución geométrica espacial de las partículas de la materia cristalina (estructura interna ordenada, EIO) por lo tanto, no la exhiben las sustancias amorfas. Las direcciones de clivaje se corresponden con las de los planos reticulares débiles, por lo tanto, es constante para todos los ejemplares del mismo mineral. Esta propiedad se aprovecha en la talla de gemas.

Tabla 3. Tipos y ejemplos de exfoliación

Número de direcciones de clivaje y ángulo	Esquema	Ilustración	Ejemplo
1			**Moscovita**

[8] Que en ningún caso debe confundirse con la foliación de las rocas metamórficas, las cuales serán estudiadas más adelante.

Número de direcciones de clivaje y ángulo	Esquema	Ilustración	Ejemplo
2 a 90°			**Augita**
2 no a 90°			 **Hornblenda**
3 a 90°			**Galena**
3 no a 90°			**Calcita**
4			 **Fluorita**

Fuente: Modificado de Tarbuck y Lutgens, 2005. Fuente fotografías de minerales: http://www.geologypage.com/, http://www.uhu.es/museovirtualdemineralogia/ y http://www.mineralogia.es/

1.3.8. Peso específico: G[9].

Es la relación resultante entre el peso de un mineral en el aire (*Wa*) y el peso del mineral sumergido en agua a 4°C (*Ww*), por lo que el peso específico se caracteriza por ser matemáticamente adimensional.

$$G = \frac{Wa}{Wa - Ww}$$

El peso específico es una propiedad física que depende de la composición y estructura del mineral, en general puede decirse que los minerales no metálicos tienen un menor peso específico que los minerales metálicos, por tanto, en los primeros se encuentran entre 2,65 a 3,2 mientras que en los minerales metálicos el promedio es cercano a 5,0. El peso específico de un mineral aumenta con el número de masa de los elementos que la constituyen y con la proximidad o el empaquetamiento de la estructura cristalina.

1.3.9. Otras propiedades.

- TENACIDAD O COHESIÓN. Según el comportamiento al aplicarles un esfuerzo, los minerales pueden ser frágiles, flexibles, elásticos, dúctiles, maleables o séctiles.
- SABOR. Es una propiedad característica de algunos haluros como la Halita (NaCl) y la Silvina o potasa (KCl), en el caso de la Halita el sabor es salado y en la Silvina el sabor es amargo.
- CONDUCTIVIDAD: Es la capacidad de conducir una carga eléctrica, es importante en los elementos nativos y débil en algunos sulfuros.
- PIEZOELECTRICIDAD: es la separación o producción de cargas eléctricas que se desarrolla en los minerales como producto de la compresión en los extremos de un mineral alargado. El cuarzo y la turmalina son ejemplos de minerales con esta característica.
- MAGNETISMO: se refiere a la propiedad de ciertos minerales de atraer el hierro magnético.
- EFERVESCENCIA. Algunos grupos minerales como los carbonatos, dada su alta reactividad química, reaccionan con HCl produciendo efervescencia.

[9] Este es el símbolo para representar el peso específico.

1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS MINERALES.

Los minerales se clasificaron inicialmente en función de las características físicas y posteriormente fueron agrupados por su estructura y composición química (James Dana, 1.837).

Tal como se indicó anteriormente, sólo ocho elementos componen el 98% de la corteza continental y las combinaciones de estos elementos entre sí componen la mayor parte de los minerales de la Tierra. Los minerales formados se clasifican según la composición química y la estructura cristalina, que tal como se analizó anteriormente, determinan similitudes en las propiedades físicas de los minerales y en su ocurrencia o yacimiento.

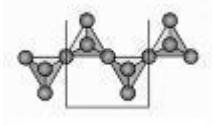
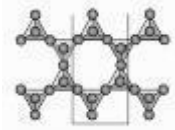
Los principales[10] grupos minerales se describen brevemente en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales Grupos Minerales

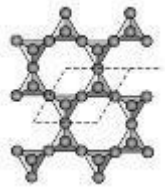
GRUPO MINERAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA GENERAL	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	EJEMPLO/ ALGUNOS USOS
Elementos nativos	Aparecen como elementos individuales (no como compuestos)	Son los elementos que aparecen en la naturaleza sin combinarse con otros elementos.	**Oro (Au), Plata (Ag), Cobre (Cu)** **Azufre (S):** elaboración de ácido sulfúrico, pólvora, abonos, insecticidas, explosivos, medicina, papel. **Grafito (C):** elaboración de refractarios, lubricante, lápices, pinturas, industria eléctrica.
Sulfuros	metal + S^{2-}	Los sulfuros se distinguen con base en su proporción metal: azufre. La mayoría de estos minerales son reconocibles porque su brillo es metálico. En general son opacos, excepto: cinabrio, el rejalgar y el oropimente. Tienen colores distintivos y raya de colores característicos. Son densos.	**Pirita FeS_2** Mena de Hierro. **Galena PbS** Mena de Plomo. **Esfalerita ZnS** Mena de Zinc. **Cinabrio HgS** Mena de Mercurio
Sulfatos	metal + SO_4^{2-}	En los sulfatos el anión es el grupo $(SO_4)^{2-}$ en el cual el azufre tiene una valencia 6+ unido a un metal.	**Barita $BaSO_4$** Lodo de perforación. **Yeso $CaSO_4*2H_2O$** Material de construcción.

[10] Es necesario indicar que los grupos mineralógicos son más de los aquí expresados teniendo en cuenta las necesidades de un Ingeniero Agrónomo, por ejemplo, en el grupo de los Sulfatos se estudian también los Wolframatos, Molibdatos y Cromatos.

GRUPO MINERAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA GENERAL	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	EJEMPLO/ ALGUNOS USOS
		En general son blandos y de colores claros.	
Óxidos	metal + O^{2-}	Los óxidos son compuestos de metales con oxígeno como anión. En general los óxidos son duros, densos y refractarios. Son minerales accesorios en rocas ígneas y metamórficas. En los sedimentos en general tienen hábito granular por su resistencia.	**Hematita Fe_2O_3** Pigmento natural y mena de Hierro. Raya: rojo indio de claro a oscuro **Magnetita Fe_3O_4** Mena de hierro, fuertemente magnético. **Corindón Al_2O_3** Gema (rubí, zafiro) y Abrasivo (*H*=9). **Ilmenita $FeTiO_2$** Mena de Titanio **Rutilo TiO_2** Mena de Titanio **Pirolusita MnO_2**
Hidróxidos		Están caracterizados por iones de hidróxido (OH^-) o moléculas de H_2O^-. Tienden a ser menos duros y de menor densidad que los óxidos. Aparecen principalmente como productos de meteorización a partir de los compuestos de hierro.	**LIMONITA FeO(OH)·nH2O.** Este término actualmente se usa para designar óxidos e hidróxidos masivos de hierro sin identificar que carecen de cristales visibles y tienen raya pardo amarillenta. La denominada limonita es normalmente el mineral goethita, pero puede contener proporciones variables de magnetita, hematites, lepidocrocita, pitticita, jarosita, hisingerita entre otros **Gohetita (óxihidróxido de hierro) FeO(OH)** tiene raya pardo amarillenta. **Lepidocrocita *-FeOOH**
Haluros	metal + Cl^-, F^-, Br^-	Los aniones característicos son los halógenos F, Cl, Br, los cuales están combinados con cationes relativamente grandes y de poca valencia. Generalmente tienen poca dureza, peso específico bajo y brillo vítreo. Los haluros son los ejemplos más perfectos del enlace iónico puro. Todos los haluros cúbicos tienen puntos de fusión de moderado a elevado, y en ese estado son malos conductores del calor y de la electricidad.	**Halita (NaCl)** o sal común, conservante en industria alimenticia, descongelante, industria textil. **Silvina (KCl)** elaboración de fertilizantes.
Carbonatos	metal + CO_3^{2-}	El anión es el radical carbonato $(CO_3)^{2-}$. Su característica principal es que reaccionan con HCl (frío o caliente) despidiendo CO_2 por lo que se observa efervescencia.	**Calcita $CaCO_3$** industria del cemento, reacciona intensamente con el HCl en frío (audible y visible). **Dolomita $CaMg(CO_3)_2$** reacción lenta con HCl en frío. **Malaquita $Cu_2[(OH)_2/CO_3]$**

GRUPO MINERAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA GENERAL	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	EJEMPLO/ ALGUNOS USOS
Fosfatos[11]		En los fosfatos el complejo aniónico $(PO_4)^{3-}$ es el complejo principal.	**Apatito** $Ca_5(F,Cl,OH)/PO_4)_3$ elaboración de fertilizantes
Silicatos	metal + SiO_4^{4-}	Nesosilicatos: un solo tetraedro de SiO_4, estructura: SiO_4^{4-}	**Olivino** $(Mg, Fe)_2SiO_4$ **Grupo del Granate**
Silicatos	metal + SiO_4^{4-}	Sorosilicatos: dos tetraedros de SiO_4, estructura: $Si_2O_7^{6-}$	**Epidota** $(Ca_2(Al,Fe)Al_2O(SiO_4)(Si_2O_7)(OH)$
Silicatos	metal + SiO_4^{4-}	Ciclosilicatos: anillos de 6 tetraedros, estructura: $Si_3O_9^{6-}$, $Si_4O_{12}^{8-}$, $Si_6O_{18}^{12-}$	**Berilo** $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ **Turmalina**
Silicatos	metal + SiO_4^{4-}	Inosilicatos: cadenas simples de tetraedros, estructura: $Si_2O_6^{4-}$ 	**Grupo de los Piroxenos Augita** $(Ca, Na)(Mg, Fe, Al)(Si,Al)_2O_6$
Silicatos	metal + SiO_4^{4-}	Inosilicatos: cadenas dobles de tetraedros, estructura: $Si_4O_{11}^{6-}$ 	**Grupo de los Anfíboles Hornblenda** $(Ca, Na)_{2-3}(Mg, Fe, Al)_5Si_6(Si,Al_2O_{22})(OH)_2$
Silicatos	metal + SiO_4^{4-}	Filosilicatos: capas (hojas) de tetraedros, estructura: $Si_2O_6^{2-}$	**Grupo de las Micas: Biotita, Moscovita, Flogopita)**

[11] Incluye Arseniatos y Vanadatos

GRUPO MINERAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA GENERAL	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	EJEMPLO/ ALGUNOS USOS
			**Grupo de Arcillas: Caolinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$** **Talco $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)**
Silicatos	metal + SiO_4^{4-}	Tectosilicatos: estructuras tridimensionales de tetraedros, estructura: SiO_2^0 	**Cuarzo SiO_2** **Feldespato Potásico (Ortosa) $KAlSi_3O_8$** **Serie de Reacción de las Plagioclasas: Albita $NaAlSi_3O_8$, Anortita $CaAl_2Si_2O_8$**

Fuente: Elaboración propia imágenes tomadas de Tarbuck y Lutgens, 2005 y http://www.geovirtual2.cl/geologiageneral.

Es necesario hacer algunas precisiones respecto a los silicatos, teniendo en cuenta que este grupo de minerales constituyen más del 90% de las rocas. Cada silicato tiene por unidad estructural el tetraedro Si – O dando origen a un ion complejo con carga eléctrica (-4) (SiO_4^{4-}), para convertirse en un compuesto neutro se produce una adición de iones de carga positiva (cationes) tales como: Al^{+3} Fe^{+3} Mg^{+2} Na^{+1} Ca^{+2} K^{+1}, cuando se logra la neutralidad eléctrica se tiene una estructura de tetraedros enlazados a través de cationes, formando cadenas simples, cadenas dobles, estructuras laminares o redes tridimensionales (ver Tabla 4), lo que explica la gran variedad de silicatos con propiedades físicas tan diversas.

La abundancia de los silicatos con relación a otros minerales es explicada por dos razones: la primera es que tal como puede observarse en la Tabla 1, en la corteza continental los dos elementos más abundantes son el Silicio y el Oxígeno, que conforman la cadena básica de los silicatos y la segunda razón es que al formarse el tetraedro de silicio, éste no es neutro eléctricamente y por lo tanto requiere cationes para lograr dicha neutralidad.

1.5. SILICATOS MÁS COMUNES.

Teniendo en cuenta la gran variedad y cantidad de silicatos se hace necesaria una clasificación básica en función de su composición química que permita diferenciarlos en campo fácilmente:

1.5.1. Silicatos ferromagnesianos.

- Contienen en su estructura iones de HIERRO, MAGNESIO o ambos.
- Presentan un COLOR OSCURO y un mayor peso específico (3,2 – 3,6).
- Ejemplos: Olivino, Piroxeno (Augita), Anfíbol (Hornblenda), Biotita y Granate.

1.5.2. Silicatos no ferromagnesianos.

- Los iones de HIERRO y MAGNESIO están casi o totalmente ausentes, por lo que su composición se asocia con Al, Na, K.
- Presentan un COLOR CLARO y un menor peso específico (2,7 en promedio).
- Ejemplos: Moscovita, Feldespato Potásico (Ortosa), Plagioclasa y Cuarzo.

II. ROCAS ÍGNEAS

Las rocas en general, son agrupaciones de minerales; en función de sus componentes, de las condiciones de formación y de los materiales que las constituyen se dividen en tres grandes grupos: rocas ígneas, formadas por la solidificación del magma[12], en condiciones que varían desde la profundidad de la Tierra, hasta las condiciones de la superficie terrestre; las rocas metamórficas que están constituidas por cristales y son producto de la recristalización en estado sólido en condiciones específicas de P y T de una roca anterior denominada protolito y las rocas sedimentarias que son producto de la alteración y reconstrucción de otras rocas en condiciones atmosféricas y, que a diferencia de las anteriores, están constituidas por fragmentos de minerales y/o de rocas o por restos vegetales y animales.

Es necesario indicar que existe un tipo de roca que debido a su origen "mixto" es estudiado tanto con las rocas ígneas como con las sedimentarias: las rocas piroclásticas, constituidas por fragmentos arrojados durante las erupciones volcánicas que son transportados, depositados y consolidados por procesos sedimentarios, este tipo de roca merece una atención especial en función de su importancia agronómica, teniendo en cuenta que dan origen a los denominados Andosoles o Suelos de ando, mismos que cubren cerca de una tercera parte de la superficie terrestre emergida.

2.1. EL MAGMA.

Teniendo en cuenta que las rocas ígneas se forman por la cristalización del magma, es preciso definir más detenidamente ese estado de la materia. El magma es definido como la mezcla de silicatos FUNDIDA a alta temperatura, con una FASE SÓLIDA en suspensión (que puede o no estar presente) y una FASE GASEOSA que alcanza valores entre el 1 y el 6% del volumen del magma, ésta última está constituida principalmente por vapor de agua (70%), y proporciones menores de CO_2 (15%), (SO_2), $(HCO_3)^-$, HF, HNO_3.Otros volátiles que pueden estar presentes en el magma son: Azufre, Nitrógeno, Argón, Cloruro, Flúor y Hidrógeno.

[12] Roca fundida que se encuentra en el interior de la Tierra a diferencia del término lava que es roca fundida que ha alcanzado la superficie terrestre.

En un sentido estricto, el término magma se refiere a la roca fundida que se encuentra en el interior de la Tierra mientras que una vez el material es extruído a la superficie terrestre recibe el nombre de lava, para efectos prácticos en adelante se hará referencia al magma como término genérico, es decir, la palabra magma se usará tanto para el magma como para la lava.

2.1.1. Tipos de Magma.

En atención a las características químicas del magma, éstos se dividen en cuatro grupos, tomando en cuenta la proporción de Hierro y Magnesio vs Silicio presentes en el mismo. Es importante resaltar que estas características químicas determinarán los minerales que se formarán y de esta manera, en suelos residuales determinarán en gran medida, la proporción y tipo de arcillas dominante en los mismos, así como su Fertilidad Nativa (Factor Capacidad + Factor Intensidad + Factor Velocidad).

Los tipos de magma a partir de la composición química son ultrabásico, básico, intermedio y ácido y es necesario aclarar que estos términos NO se relacionan con el pH que eventualmente habrá de generarse a partir de dichas rocas.

a. Ultrabásico.

El magma ultrabásico se caracteriza por cristalizar a mayores temperaturas, las cuales oscilan entre 1100° y 1400° C. Químicamente, presenta un exceso de Magnesio, Hierro y Calcio (Mg, Fe, Ca), por lo que son comunes altos contenidos de silicatos ferromagnesianos. El contenido de sílice es inferior al 45% y la viscosidad del magma es muy baja. Lo anterior implica que los suelos formados a partir de la meteorización de rocas ígneas de composición ultrabásica presentan típicamente altos contenidos de Magnesio, Hierro y Calcio y déficit de Sodio, Aluminio y Potasio.

Tal es el caso de los suelos formados a partir de las Peridotitas que afloran en la vía Centro Alegre – Marañonal, municipio de Planeta Rica, denominadas Peridotitas de Planeta Rica, unidad geológica que forma los Cerros de La Mula, Lomas de Corozal y Lomas de las Queseras, en compresión de dicha municipalidad cordobesa. También se encuentran este tipo de rocas en las colinas ubicadas en el municipio de Puerto Escondido y otros lugares del litoral cordobés, aunque su ocurrencia no se encuentra registrada en los mapas geológicos oficiales.

b. Básico.

Los magmas básicos químicamente presentan altos contenidos de Magnesio, Hierro y Calcio (Mg, Fe, Ca) y un contenido de sílice que oscila entre 45% y 52%. Lo anterior implica que los suelos formados a partir de la meteorización de rocas ígneas de

composición básica también presentan típicamente altos contenidos de Magnesio, Hierro y Calcio y déficit de Sodio, Aluminio y Potasio asociados con la presencia dominante de silicatos ferromagnesianos.

Un ejemplo de este tipo de suelos se encuentra en la misma vía Centro Alegre – Marañonal, municipio de Planeta Rica, denominadas Basaltos de Nuevo Paraíso que afloran en la región del mismo nombre formando colinas bajas, suaves y onduladas de Buenavista y Nuevo Paraíso, con suelos de coloraciones típicamente rojas.

c. Intermedio.

El contenido de sílice de estos magmas oscila entre 52% y 65%. Exhiben contenidos variables de Magnesio, Hierro, Calcio, Aluminio, Sodio y Potasio (Mg, Fe, Ca, Si, Al, Na, K) por lo tanto, las rocas formadas a partir de la cristalización de magmas de composición intermedia tienen proporciones variables de silicatos ferromagnesianos y no ferromagnesianos.

d. Ácido.

El magma ácido se caracteriza por cristalizar a las menores temperaturas del material, las cuales oscilan entre 600° y 800°C, tienen una viscosidad alta a moderada y el contenido de sílice es mayor al 65%. Químicamente, presenta un exceso de Silicio, Aluminio, Sodio y Potasio (Si, Al, Na, K), por lo que son comunes altos contenidos de silicatos no ferromagnesianos, y bajos contenidos de silicatos ferromagnesianos como Biotita y Hornblenda.

Lo anterior implica que los suelos formados a partir de la meteorización de rocas ígneas de composición ácida presentan típicamente altos contenidos de Sodio, Aluminio y Potasio y déficit de Magnesio, Hierro y Calcio.

Tal es el caso de los suelos formados a partir de las rocas presentes en el Batolito Antioqueño, por ejemplo, en la zona de Yarumal, donde los suelos tienen típicamente coloraciones blancuzcas a blancuzcas con manchas negras y texturas gruesas, dada la abundancia de cuarzo.

2.1.2. Cristalización de un Magma.

A medida que el magma reduce temperatura, los movimientos aleatorios de los iones disminuyen su velocidad, lo que conlleva a una reducción en la libertad de movimiento de estos, dando lugar a que los iones se acerquen entre sí y de esta manera las fuerzas de enlace químico confinen y coordinen los átomos en disposición cristalina ordenada.

Los primeros minerales en cristalizar tienen mayor espacio por lo tanto tienden a tener caras cristalinas mejor desarrolladas que los últimos que rellenan los espacios, generando diferencias en el hábito de los cristales.

El tamaño de los cristales está en función de tres factores principalmente: la velocidad de enfriamiento, la cantidad de sílice y la proporción de gases disueltos, por ejemplo si la velocidad de enfriamiento es muy rápida, el magma tiene a tener una alta tasa de nucleación pero una baja tasa de crecimiento, lo cual se traduce en mayor número de cristales de una misma especie mineral pero de tamaño pequeño, en contraposición, una baja velocidad de cristalización (baja velocidad de enfriamiento) conlleva a tener un mayor crecimiento cristalino.

ACTIVIDAD DEL ESTUDIANTE
Consultar la relación entre velocidad de enfriamiento del magma y
● **cantidad de sílice**
● **proporción de gases disueltos**

2.2. TIPOS DE ROCAS ÍGNEAS.

Se define como Ambiente de Cristalización al lugar del Planeta en el cual un magma se solidifica, éste define no sólo las características texturales de la roca ígnea, sino que además determina algunos de los factores de la meteorización de la roca.

De acuerdo con las condiciones de formación, ambiente de cristalización, las rocas ígneas pueden ser:

2.2.1. Rocas Ígneas Volcánicas.

También denominadas superficiales o efusivas, este tipo de roca se forma cuando el magma cristaliza en SUPERFICIE, es decir bajo condiciones de alta Temperatura y Presión atmosférica, es decir, que la lava se solidifica mediante una rápida cristalización.

Este proceso está relacionado con la transferencia de calor del magma una vez está en condiciones superficiales (lava), si la roca fundida se encuentra en ese estado es porque tiene una temperatura AL MENOS mayor a los 600°C, significa que la liberación de calor a los alrededores se tiene que desarrollar de manera rápida y, por lo tanto, los cristales en general no son observables a simple vista. Teniendo en cuenta que el enfriamiento es rápido en algunas ocasiones no existe el tiempo suficiente para formar Estructura Interna Ordenada dando origen a la presencia de vidrio volcánico u obsidiana.

En las rocas volcánicas es muy común la presencia de vesículas (huecos) que se caracterizan por no estar comunicados entre sí, lo que se traduce en baja densidad y baja permeabilidad; estas vesículas son ocasionadas por el escape de gases una vez la lava se encuentra sin Presión de confinamiento. Algunas veces las vesículas pueden encontrarse rellenas de un mineral posterior a la cristalización, siendo el más común, el grupo de las zeolitas[13].

2.2.2. Rocas Ígneas Plutónicas.

También se denominan profundas o intrusivas, teniendo en cuenta que el magma cristaliza en PROFUNDIDAD, bajo condiciones de alta Presión y alta Temperatura, dado que la temperatura en la Tierra aumenta en promedio 33°C por cada kilómetro[14], el enfriamiento del magma se desarrolla de manera lenta lo que conlleva a que los cristales son observables a simple vista.

Teniendo en cuenta que los gases se encuentran confinados, NO hay presencia de vesículas en este tipo de rocas. Tampoco en ellas se encuentra vidrio volcánico.

2.2.3. Rocas Ígneas Hipoabisales.

También denominadas PORFÍDICAS, el magma cristaliza **PARCIALMENTE** en PROFUNDIDAD Y la **PARTE restante lo hace** EN SUPERFICIE, es necesario aclarar que en ningún caso, se está indicando que la mitad cristaliza en profundidad y la mitad restante en superficie, sino que una proporción del magma cristaliza en un ambiente, y la porción restante lo hace en el ambiente opuesto, lo que conlleva a que la porción que cristaliza en profundidad tendrá un tamaño observable a simple vista (denominados fenocristales) y la porción que solidifica en superficie tendrá un tamaño no observable a simple vista (denominado matriz), esta última porción puede tener presencia ocasional de vesículas por el escape de gases. Pueden contener pequeñas cantidades de vidrio volcánico.

Teniendo en cuenta que los componentes de la matriz no pueden diferenciarse entre sí, estas rocas se estudian en conjunto con las volcánicas.

---

[13] Este grupo de minerales tiene gran uso en la industria, entre otros porque tienen la capacidad de retener el calcio de las aguas con alta dureza al pasar por la estructura. Adicionalmente revisten considerable importancia en agricultura en atención a sus altas CIC y CRH.

[14] A esta razón se le conoce como Gradiente Geotérmico: $\Delta T = 33^\circ\ C / km$

2.3. TEXTURA DE LAS ROCAS ÍGNEAS.

La TEXTURA describe el aspecto general de una roca, en este caso ígnea, en función del tamaño, la forma y el grado de cristalinidad que refleja en última instancia las condiciones de formación de la roca (ambiente de cristalización).

El tamaño de los cristales se divide en muy grueso (>30mm), grueso (30mm – 5mm), medio (5mm – 2mm) y fino (<2mm), por lo tanto, al describir la textura de la roca ígnea debe medir el rango de variación del tamaño de los cristales de cada mineral.

La forma cristalina se define como euhedral (todas las caras cristalinas formadas), subhedral (algunas caras cristalinas formadas) o anhedral (ninguna cara cristalina formada) o también como idiomorfa – hipidiomorfa o xenomorfa respectivamente.

El grado de cristalinidad se refiere a la presencia o ausencia de vidrio volcánico en la roca: holocristalino se refiere a que todos los componentes que construyen la roca son cristales, hemicristalino o hipocristalino que la roca se constituye de componentes cristalinos y amorfos (vidrio volcánico) y hialino que todos los componentes que constituyen la roca son amorfos, por ejemplo, vidrio volcánico como la obsidiana.

2.3.1. Tipos de Textura.

- AFANÍTICA: Los cristales no se observan a simple vista. Se produce por enfriamiento rápido, donde es muy común observar las vesículas por el escape de los gases. Por lo tanto, es típica de las rocas volcánicas e indica un enfriamiento rápido.
- FANERÍTICA: Los cristales se observan a simple vista y es posible diferenciar minerales entre sí. Dado lo anterior, es típica de las rocas plutónicas, por lo que en ningún caso tendrá vidrio volcánico. Las rocas con este tipo de textura cristalizan en el interior de la corteza y son expuestas posteriormente por una combinación de tectónica y erosión.
- PORFÍDICA: Se observan cristales de gran tamaño (fenocristales) dentro de una masa (matriz). Es típica de las rocas hipoabisales su ocurrencia INDICA un cambio en las condiciones del magma durante el enfriamiento que produce dos o más familias de cristales de distinto tamaño.
- VÍTREA: Se produce por el enfriamiento muy rápido que impide la formación de MINERALES solo cristalizan MINERALOIDES, es decir, los iones no están organizados en una estructura cristalina. Se produce en ambientes de cristalización volcánicos.
- PEGMATÍTICA: Bajo condiciones especiales, durante una cristalización extremadamente lenta, los cristales pueden alcanzar un tamaño grande (mayor a

2 cm) dando origen a la textura pegmatítica. Esta textura es típica de las últimas etapas de cristalización magmática.

- PIROCLÁSTICA. Cuando los materiales ígneos se cristalizan o se consolidan posteriormente a las erupciones volcánicas, esta textura también recibe el nombre de fragmental. La consolidación de los fragmentos de roca expulsados por una erupción volcánica cenizas, rocas fundidas, bloques angulosos, con textura similar a las rocas sedimentarias dado su origen combinado.

2.4. COMPOSICIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS.

Las rocas ígneas están compuestas fundamentalmente por silicatos, los demás minerales se encuentran como accesorios de éstas. Dando origen a rocas ígneas Basálticas, constituidas por silicatos oscuros, que constituyen la corteza oceánica y parte de la continental, son oscuras y densas. Rocas ígneas Graníticas caracterizadas por la presencia dominante de silicatos claros, que constituyen la corteza continental y rocas intermedias constituidas por una combinación de las dos anteriores.

2.5. PROCESOS MAGMÁTICOS.

Se refieren a los procesos que ocurren entre la generación del magma y la cristalización del último mineral, es decir, que están dominados por las reacciones de carácter termodinámico (transferencia de calor) y químico (composición del magma).

2.5.1. Serie de Reacción de Bowen.

A comienzos del siglo XX el petrólogo Norman Bowen, después de observar diferentes muestras de rocas ígneas publicó el Tratado sobre la cristalización de rocas ígneas de 1928 (The evolution of the igneous rocks), en ese texto se describían dos secuencias de cristalización de los silicatos (orden de cristalización de los silicatos) y definió que al enfriarse un magma basáltico los minerales cristalizan según un orden específico que está en función de dos factores principales: la termodinámica del proceso de cristalización (Temperatura: Cristalización = orden determinado o secuencia) y la composición del magma que cristaliza (sitio donde empieza a cristalizar).

La secuencia de cristalización propuesta recibe el nombre de Serie de Reacción de Bowen y se muestra en la Figura 6.

Durante la cristalización la composición del fundido cambia continuamente, teniendo en cuenta que al cristalizar algunos minerales el magma se enriquece en algunos elementos y se empobrece en otros (cambio en la relación de los elementos).

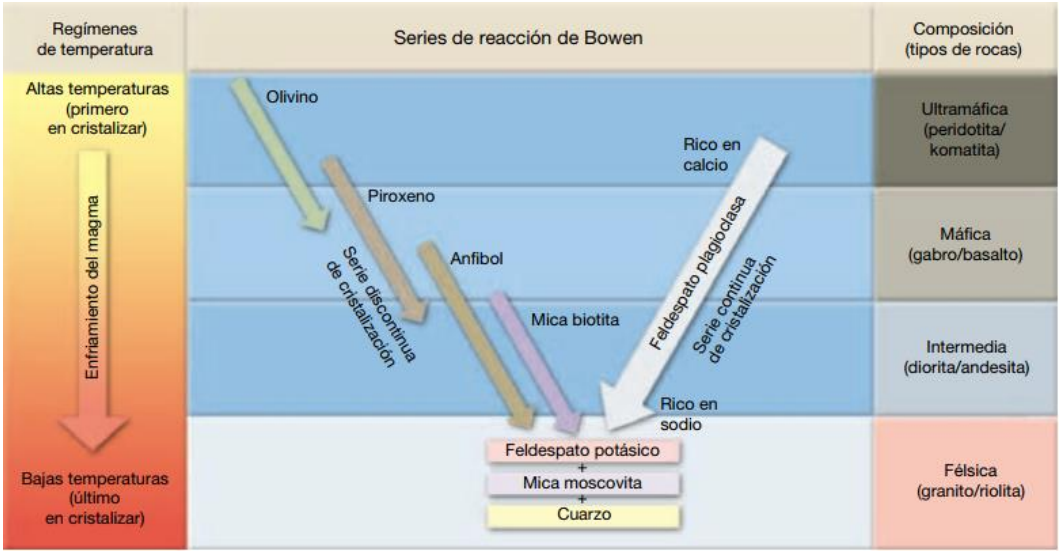


Figura 6. Serie de Reacción de Bowen.
Fuente: Tarbuck y Lutgens, 2005

Los minerales se forman descendentemente, en dos secuencias de minerales independientes entre sí: la serie continua (de las plagioclasas) y la serie discontinua (silicatos ferromagnesianos) que confluyen en una. La serie continua corresponde a las Plagioclasas, la primera en cristalizar es la Anortita (o plagioclasa cálcica) y pasa por los miembros intermedios hasta llegar al extremo de baja temperatura o sódico llamado Albita, se denomina serie continua porque para formarse la Albita, se requiere que se formen los miembros superiores de la serie, y a medida que la temperatura desciende el Sodio entra en la estructura y reemplaza al Calcio[15], esto implica que dos plagioclasas no puedan coexistir en la misma roca ígnea.

La serie discontinua tiene como consecuencia que no se requiera que se formen los primeros minerales para que los minerales de baja temperatura cristalicen, es decir, que la formación de Biotita no requiere la cristalización previa de Olivino, Piroxeno y Hornblenda. Se denomina discontinua porque puede iniciar en cualquier punto de la secuencia, es necesario indicar que la formación de minerales sólo es en sentido

[15] Termodinámicamente constituyen una solución sólida, es decir, que en este estado algunos elementos hacen reemplazamientos en la estructura de los minerales modificando la composición química de los mismos.

descendente dado que el proceso que se estaría desarrollando es el enfriamiento del magma.

Otra de las consecuencias de la serie de reacción es que no existe una roca ígnea que contenga como minerales primarios cuarzo y olivino ni dos tipos de plagioclasa diferentes[16].

La consecuencia más importante de la Serie de Reacción de Bowen se da en la formación de suelos a partir de las rocas ígneas, la estabilidad de los minerales en condiciones superficiales es inversa al orden de cristalización, es decir, una vez en superficie el Olivino se encuentra en condiciones de metaestabilidad y sufre cambios rápidamente tratando de adaptarse a las nuevas condiciones para lograr la estabilidad, mientras que el Cuarzo es estable en superficie, dadas sus condiciones de cristalización.

La Serie de Reacción explica la asociación mineral pero no la diversidad de rocas, ésta es explicada mediante la diferenciación magmática.

2.5.2. Diferenciación Magmática.

Es un proceso termodinámico que tiene como consecuencia la formación de más de un magma a partir de uno inicial (siempre básico): En una o en más etapas durante la cristalización puede producirse la separación de los componentes sólido y líquido de un magma, modificando la composición del líquido residual y haciéndolo cada vez más ácido.

Esto es, a medida que algunos minerales van cristalizando, el magma restante va cambiando de composición, de esta manera se empobrece en Fe, Ca, Mg y se enriquece en K, Na, Al y SiO_2.

2.5.3. Asimilación y Mezcla de Magmas.

Conforme el magma asciende puede incorporar alguna de las rocas de sus alrededores, este proceso se conoce con el nombre de ASIMILACIÓN, cuando un magma básico se encuentra en ascenso en una zona de rocas de composición más ácida, el primero que se encuentra a mayor temperatura que la necesaria para lograr la fusión de las rocas

[16] Excepto la zonación de cristales.

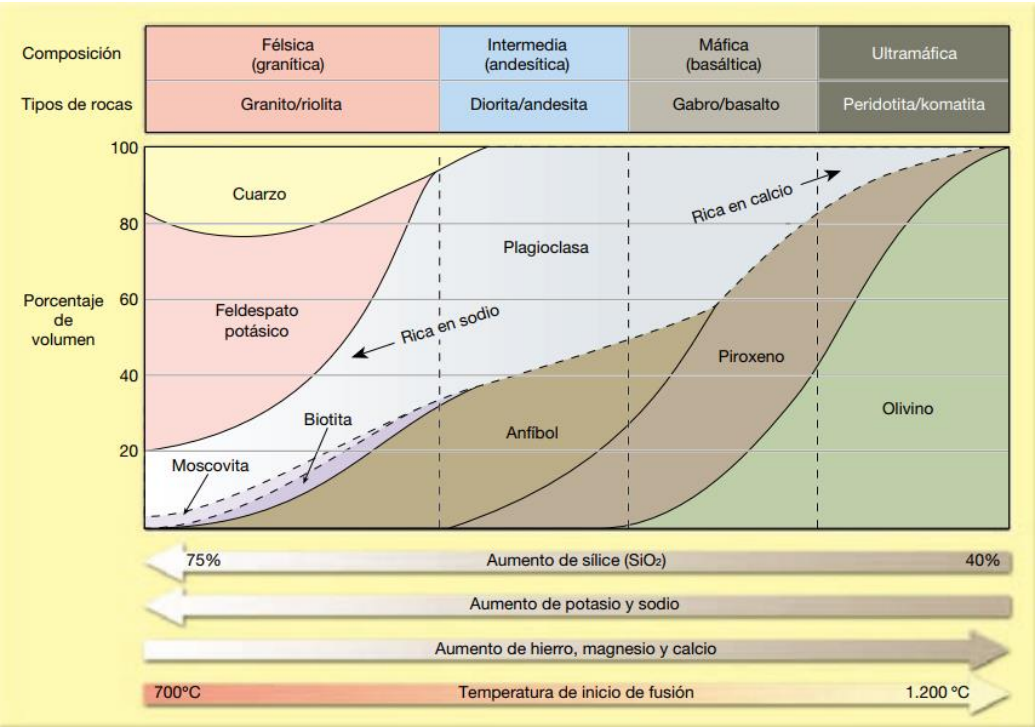
ácidas, funde las últimas y cambia la composición inicial a una intermedia. En el caso contrario la fusión no es posible y sólo quedan bloques de la roca más básica dentro de la ácida, a lo que se denomina xenolitos.

Cuando durante el ascenso dos o más cámaras magmáticas se encuentran se produce un proceso de MEZCLA DE MAGMAS cambiando composición de los dos cuerpos magmáticos.

2.6. CLASIFICACIÓN DE ROCAS ÍGNEAS.

La clasificación de las rocas ígneas se hace con base en criterios mineralógicos y también por criterios texturales, tal como puede observarse en la parte superior de la Figura 7.

La clasificación más rigurosa se realiza mediante los Diagramas de Streckeisen (1967)[17], sin embargo, para fines prácticos de otras profesiones se utiliza el diagrama que establece un porcentaje en volumen de cada mineral presente en una determinada roca, tal como puede observarse en la Figura 7, trazando líneas verticales que muestran la composición mineralógica de una determinada roca.



[17] International Union of the Geological Sciences – IUGS-

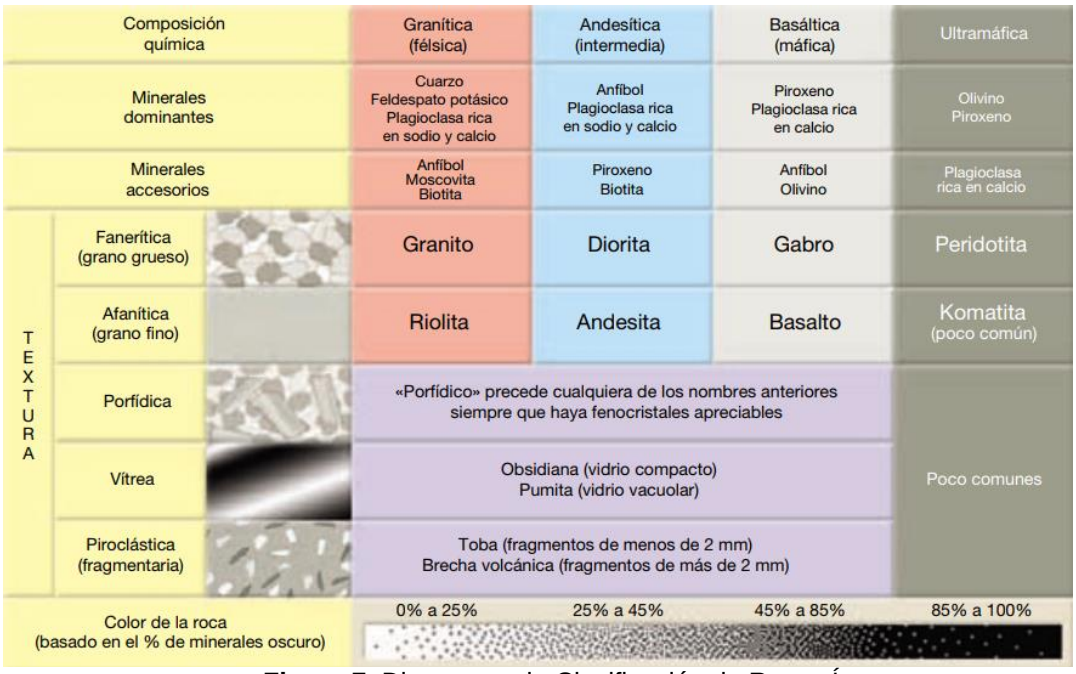


Figura 7. Diagramas de Clasificación de Rocas Ígneas
Fuente: Tarbuck y Lutgens, 2005.

La clasificación de las rocas ígneas requiere inicialmente identificar la abundancia relativa de minerales en la muestra: Minerales principales: Aquellos cuyo contenido es superior al 5% en la roca. Minerales de segundo orden: (accesorios mayores) con contenidos 5% - 2% en la roca. Minerales accesorios: Su contenido es inferior al 2% en la roca. Una vez definidos estos porcentajes, los minerales principales deben ser recalculados al 100% y de esta manera se llevan al diagrama superior de la Figura 7 para encontrar el nombre de la roca. El diagrama inferior muestra la relación entre la composición química/mineralógica y la textura.

En la parte inferior de la Figura 7 se muestra una línea que representa el Índice de Color de la roca, es una característica geológica para identificación rápida de las rocas plutónicas que representa el porcentaje de minerales oscuros presentes en una roca, obviamente este índice no puede ser aplicado a las rocas volcánicas dado que los minerales no se observan a simple vista y no pueden diferenciarse los minerales oscuros. La interpretación del Índice de Color (IC) se realiza en la vertical quiere decir que las rocas de composición máfica formadas a partir de un magma de composición básica con textura fanerítica, es decir, los gabros, tienen un porcentaje de minerales oscuros que oscila el 45% - 85%. Este Índice si se combina con el diagrama de la parte superior sirve para corroborar la mineralogía determinada por el estudiante ($IC = \Sigma$ minerales ferromagnesianos).

2.6.1. Rocas Ultrabásicas o Ultramáficas.

Compuestas por minerales ferromagnesianos, y ocasionalmente plagioclasa cálcica.

- PERIDOTITA: Roca plutónica de grano grueso (10mm – 3mm de diámetro) a medio (3mm – 1mm de diámetro) y compuesta predominantemente por olivino y piroxeno. Es la roca que compone el manto terrestre.
- KOMATIITA: Equivalente volcánico de la Peridotita. Las komatiitas son rocas volcánicas ultramáficas, que están entre las lavas más antiguas de la Tierra (3.6 Ga), por lo que son importantes en el contexto de la evolución de la Tierra primitiva pero también por su posible participación potencial en la química prebiótica.

2.6.2. Rocas Básicas o Máficas.

Compuestas predominantemente por minerales ferromagnesianos.

- GABRO: Roca intrusiva de grano grueso (fanerítica) y color muy oscuro. Compuesta por Plagioclasa Cálcica y Piroxeno ± Olivino. Es la roca constituyente fundamental de la corteza oceánica.
- BASALTO: Roca volcánica de grano fino (afanítica) y color verde oscuro a negro. Ocasionalmente contiene pequeños fenocristales de Plagioclasa Cálcica y Piroxeno ± Olivino

2.6.3. Rocas Intermedias.

- DIORITA: Roca plutónica de grano grueso, compuesta por Plagioclasa intermedia, Hornblenda y Biotita. Tiene la apariencia de la mezcla entre sal y pimienta.
- ANDESITA: Es el equivalente volcánico de la diorita, es una roca afanítica de color gris medio. Frecuentemente tiene una textura porfídica con cristales alargados de Plagioclasa intermedia y/o Hornblenda.

2.6.4. Rocas Ácidas.

- GRANITO: Roca plutónica de color claro y textura fanerítica y uniforme. Compuesta por Feldespato Potásico, Plagioclasa Sódica, Biotita, Moscovita y Cuarzo La roca tiene un aspecto rosado con manchas negras y blancas
- RIOLITA: Equivalente volcánico del granito. Compuesta por silicatos de color claro predominantemente. Es frecuente la presencia de fragmentos vítreos y vesículas (“huecos”).

2.6.5. Rocas Piroclásticas.

- TOBA: compuesta por fragmentos de tamaño fino que son consolidados luego de su caída. Como las rocas piroclásticas están compuestas por fragmentos

individuales las texturas normalmente son más parecidas a las de las rocas sedimentarias que a las de las ígneas. Las tobas pueden ser de dos tipos: toba de lapilli con tamaño de grano entre 2mm – 64mm y toba de ceniza con tamaño de grano inferior a 2mm.

- BRECHA VOLCÁNICA: compuesta por bloques angulares de tamaño mayor a 64mm.

III. METEORIZACIÓN

Se puede definir como la respuesta de los materiales rocosos (sedimentarios, metamórficos o ígneos) a las diferentes condiciones existentes en la superficie terrestre (intemperie).

También se puede definir como un proceso de reequilibrio, puesto que las rocas una vez se encuentran en superficie se adaptan a las nuevas condiciones de presión y temperatura, así como a la presencia de agua y gases en circulación.

El RESULTADO FINAL de la meteorización es la DESAGREGACIÓN DE LA ROCA in situ (en el mismo sitio), formándose una **cobertura sobre la roca inalterada que se denomina suelo.**

Como todo proceso geológico, la meteorización es un proceso DINÁMICO en el cual los materiales pasan por diversos estadios intermedios antes de alcanzar el equilibrio en las nuevas condiciones de exposición superficial.

3.1. TIPOS DE METEORIZACIÓN.

Se pueden distinguir dos tipos de meteorización en función del tipo de procesos que desintegran o atacan la roca: la Meteorización física (o mecánica), cuando se trata de procesos que implican la DESINTEGRACIÓN O PULVERIZACIÓN de la roca original. Y la Meteorización química, cuando lo que ocurre es una alteración química de la roca.

Aunque los procesos de ambos tipos se analizan por separado, en la naturaleza usualmente actúan conjuntamente, aunque en determinadas regiones climáticas tiende a dominar la meteorización física y en otras la química.

3.1.1 Meteorización Física o Mecánica.

Es la desintegración de una roca sin cambiar sus propiedades químicas ni físicas, sólo aumenta el área superficial del material, esto es, su superficie específica. Es decir, que implica una disminución del tamaño, conservando cada una de las características del material original. En este tipo de meteorización los procesos que actúan son de carácter físico mecánico y de ahí su nombre.

Este tipo de meteorización se desarrolla principalmente mediante los procesos de: *Hielo - deshielo:* El agua congelada se expande, aumentando su volumen cerca del 9%. Cuando ocurre en un espacio confinado, se ejerce gran presión en las paredes de la roca, que se rompe formando un depósito denominado canchal (Figura). En las rocas, el proceso de rotura por cuñas de hielo se denomina gelifracción.

Figura 8. Gelifracción y el depósito formado.
Fuente: Tarbuck y Lutgens, 2005.

Expansión térmica: Ocurre en aquellos lugares con diferencias importantes entre temperaturas diurnas y nocturnas, durante el día y con temperaturas elevadas, la roca se expande y durante la noche la roca se contrae, este proceso de manera repetida puede fracturar la roca, siendo más importante en zonas desérticas y obviamente, es más efectivo en las rocas que tienen un grado de fracturación importante o baja resistencia mecánica.

Crecimiento de cristales: El crecimiento de minerales a partir de soluciones circulantes en las fracturas de las rocas, puede también ejercer fuerzas expansivas que rompen la roca, por lo que también depende del tipo de roca y de su resistencia mecánica. Esto ocurre al cristalizar carbonato de calcio y más raramente yeso o sales. En el departamento de Córdoba, Colombia, es un proceso importante en la zona litoral, en donde las rocas expuestas a la acción del rompiente del oleaje son principalmente arcillolitas con alto grado de fisilidad, aumentando la magnitud de la erosión litoral.

Descompresión: La reducción en la presión de confinamiento o los cambios en la condición de esfuerzos hacen que las rocas experimenten expansión y lajamiento o fracturas paralelas a la superficie (observar la Figura 9), las cuales permiten el flujo

de agua y por lo tanto la meteorización química. También puede ocurrir por contracción durante el enfriamiento y por fuerzas tectónicas (orogenias).

Figura 9. Lajamiento por descompresión.
Fuente: Fotos tomadas por PhD. Gaspar Monsalve Mejía, Profesor Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Actividad biológica: Por efecto mecánico directo ocasionado por la acción de las raíces de las plantas (Figura 10), de los movimientos, madrigueras y caminos de organismos en el suelo; o indirecto, por emisión de ácidos orgánicos (intemperismo bioquímico), etc. Es importante indicar que muchas actividades humanas hacen parte de este tipo, por ejemplo: la utilización de explosivos en la actividad minera o en la construcción de obras civiles.

El papel fundamental de la meteorización mecánica es favorecer la meteorización química (por el aumento de área superficial) e interactuar con ella. También puede desarrollarse por agentes como el viento o la gravedad.

Teniendo en cuenta lo anterior, los factores que condicionan las acciones de la meteorización mecánica son de dos tipos:

Figura 10. Efecto de la actividad de las raíces para favorecer la desagregación del sustrato. Fotografía MSc. María Isabel Toro Quijano.

- DEPENDIENTES DEL TIPO DE SUSTRATO ROCOSO (litología, porosidad y fracturación).
- DEPENDIENTES DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES (presencia o ausencia de fluidos y rangos de temperatura)

3.1.2. Meteorización Química.

Se define como la alteración de una roca cambiando sus propiedades químicas y físicas. Este tipo de meteorización es más efectiva en regiones húmedas templadas, tropicales y ecuatoriales, en las que la disponibilidad de agua es alta y las temperaturas medias son moderadas o altas.

También se define como un conjunto de procesos complejos que alteran los componentes de las rocas (estructuras internas de los minerales, conocidos como primarios), generando nuevos minerales, denominados secundarios, así como liberando compuestos y elementos al medio (generalmente acuoso). Los nuevos minerales que se forman son en general de mayor volumen y menor densidad, las propiedades físicas de los minerales como color y dureza son las primeras en sufrir modificaciones.

Una particularidad del intemperismo químico es que los nuevos productos son estables en el medio en el que se han producido, manteniéndose inalterados hasta que el ambiente cambia.

El agente de meteorización química más importante es el agua. Pequeñas cantidades de materiales en solución dan como resultado un aumento de la actividad química de la misma.
Se desarrolla principalmente mediante los procesos de:

- DISOLUCIÓN: Sólo algunos minerales son solubles en el agua pura. Con cantidades pequeñas de ácido (ión reactivo H^+) la capacidad de disolución del agua aumenta.

  La mayoría de las rocas se altera por soluciones ácidas y produce materiales solubles en H_2O, por ejemplo:

  $$CaCO_3 + 2(H^+ HCO_3^-)_{\blacktriangleleft} \qquad Ca^{2+} + CO_2 + 3H_2O$$

  Ca^{2+}: ión soluble, se disuelve en el agua

- OXIDACIÓN: es un proceso mediante el cual un compuesto o radical pierde electrones al combinarse con oxígeno. Es un proceso muy importante en la alteración de minerales ferromagnesianos como Olivino, Augita, Hornblenda, Biotita, que al oxidarse dan origen a los óxidos de hierro, siendo importante anotar que es necesaria la liberación previa de hierro. Así,

  $$4Fe + 3O_2\blacktriangledown \qquad 2Fe_2O_3$$

  En los suelos que permanecen inundados es común la Pirita o sulfuro de hierro (FeS_2), al desecarse el humedal, por oxidación se da la transformación de sulfuro a sulfato, dando origen a los suelos sulfatados ácidos.

  La presencia de agua aumenta la velocidad de reacción.

- HIDRÓLISIS: Es el proceso por el cual una sustancia reacciona con el agua. Usualmente, el H^+ del agua disociada substituye algún catión de la red cristalina, lo cual la desestabiliza al destruir la disposición ordenada original produciendo arcillas. En condiciones naturales es frecuente que el agua contenga H^+ adicionales, condición acidulada, lo cual acelera la meteorización.

  Es el proceso principal de intemperización química de los silicatos, que conforman una parte importante de la corteza terrestre.

- DECARBONATACIÓN
- HIDRATACIÓN

Los factores que condicionan las acciones químicas son de dos tipos:

- DEPENDIENTES DEL TIPO DE SUSTRATO ROCOSO (litología, porosidad y fracturación).
- DEPENDIENTES DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES (presencia o ausencia de fluidos y condiciones de temperatura).

ACTIVIDAD DEL ESTUDIANTE
Consultar las definiciones de los procesos de meteorización química faltantes: Hidratación y Decarbonatación
● **Defina los minerales que son afectados por cada proceso**
● **Y los minerales formados**

3.2. VELOCIDAD DE METEORIZACIÓN.

La velocidad a la cual una roca se meteoriza está en función de cinco factores principales, a los cuales se denomina factores pedogenéticos:
3.2.1.

3.2.1. Tiempo.

Hace referencia al tiempo de exposición de la roca y no al tiempo de formación, es decir, al tiempo en el cual se ha desarrollado la interacción con los agentes climáticos o intemperie.

3.2.2. Tipo de Roca (Composición y Textura).

El tipo de roca determina la velocidad a la cual una roca se transforma en suelo en función de dos parámetros fundamentalmente: la composición, que hace referencia a los minerales que la conforman y la textura o disposición de los componentes de la roca. Es importante resaltar que una misma roca puede generar suelos totalmente diferentes, en función de los demás factores.

3.2.3. Elementos climáticos.

De los elementos climáticos como precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, brillo solar, los que más determinan la velocidad de meteorización son la precipitación (ver Figura 11) y la humedad relativa, dado que ambos determinan la cantidad de agua disponible para desarrollar la meteorización química.

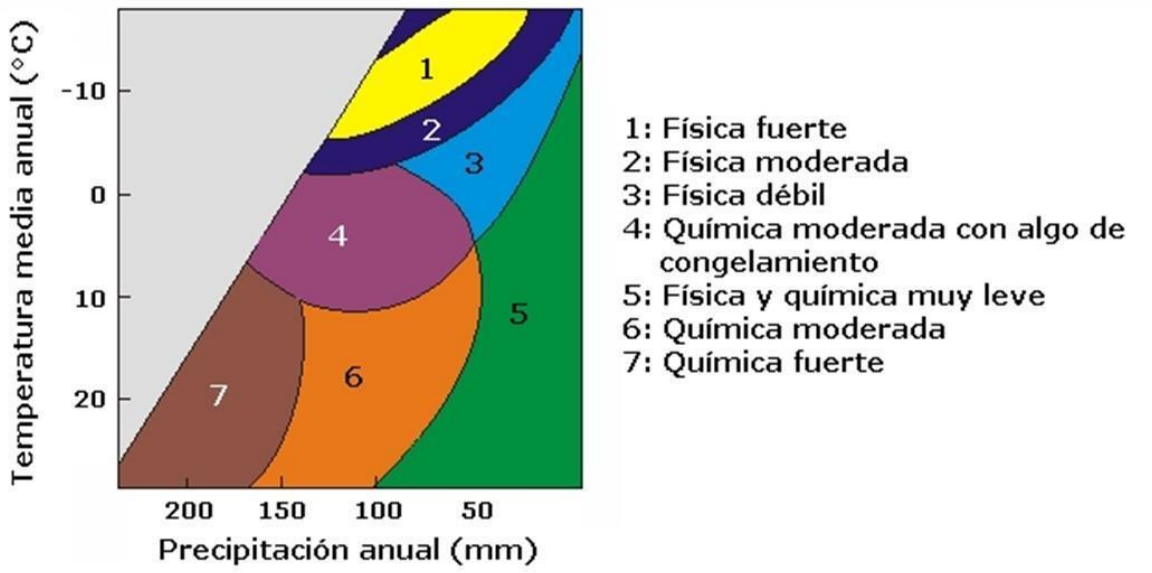


Figura 11. Tipos de meteorización dominante en función de la precipitación y la temperatura. Fuente: Mosquera, 2001.

3.2.4. Pendiente (Escorrentía).

La pendiente (topografía) influye sobre la magnitud de la meteorización dado que determina el contenido de agua del suelo. En general puede decirse que mientras mayor sea la pendiente menor será el desarrollo del suelo (manteniendo los demás factores constantes).

En pendientes altas, la escorrentía es mayor que la infiltración y por lo tanto, aunque exista agua, ésta no está disponible para desarrollar los procesos de hidratación, disolución, oxidación, hidrólisis y decarbonatación. A diferencia de las pendientes bajas a muy bajas, en donde la infiltración tiende a ser mayor y, por lo tanto, existe agua disponible para desarrollar los procesos mencionados.

3.2.5. Vegetación y Organismos.

La cobertura vegetal tiene una gran importancia en la velocidad de meteorización, pero, aunque los profesionales menos experimentados tienden a hacer una correlación entre el porte de la vegetación y la velocidad, ésta última depende de las características particulares de cada tipo de vegetación.

En una cobertura vegetal de Bosque húmedo tropical, v.g. Nudo de Paramillo, Colombia, la cobertura proporciona el mantillo que “arropa” el suelo, cuya descomposición aporta nutrientes y ácidos orgánicos que pueden acelerar el proceso de meteorización, mientras que la hojarasca superficial tiende a capturar y retener agua y liberarla de manera lenta al suelo, haciendo que el proceso de meteorización química se

prolongue en el tiempo. Sin embargo, esto no sucede en una plantación de *Acacia mangium*, donde la descomposición de la hojarasca para generar mantillo es casi nula debido no sólo a la ausencia de fauna específica para dicha función sino también a las características mismas de las hojas modificadas o filodios que produce esta especie.

Una vez se inicia la meteorización de las rocas comienza el proceso de formación de suelo, a este momento podríamos definir desde la Geología, al suelo como una combinación de materia mineral, materia orgánica, agua y aire con una alta sensibilidad a cambios ambientales. Sin embargo, tal como puede verse en la Figura 12, cada profesional tiene un concepto diferente del suelo y de sus características. Por ejemplo, para un Ingeniero Civil, corresponde más a un agregado de minerales unidos por fuerzas débiles, separables por medios mecánicos de poca energía o por acción del agua. A diferencia de las dos visiones anteriores, la primera orientada a los materiales y los procesos y la segunda a la estabilidad, mientras un Ingeniero Agrónomo estudia la relación agua: suelo: vegetación: atmósfera y definiría al suelo como un cuerpo natural resultante de una serie de interacciones dinámicas de sus componentes orgánicos e inorgánicos, que constituye el sustrato para el desarrollo vegetal.

Independiente de la ciencia o técnica que analice el suelo, es evidente que éste presenta variaciones en composición, textura, estructura y color en profundidad, lo que determina una diferenciación en horizontes (capas) que presentan más o menos las mismas características. Es necesario aclarar que los horizontes de suelo no reciben su nombre por ser horizontales, esto puede cumplirse en zonas de pendientes bajas como algunas zonas de Córdoba, Colombia, pero en zonas con algún grado de inclinación, estos horizontes son paralelos a la superficie del terreno, dado que el ingreso de agua se realiza a través de la superficie.

La sumatoria de los horizontes de suelo en un sitio recibe el nombre de perfil de suelo. Éste es el objeto de estudio y descripción central del mismo.

Hasta ahora se han analizado los diferentes mecanismos mediante los cuales se forma el suelo, ahora se estudiarán los procesos que desarrollan la pérdida de estos, y la generación de la materia prima para la formación de las rocas sedimentarias.

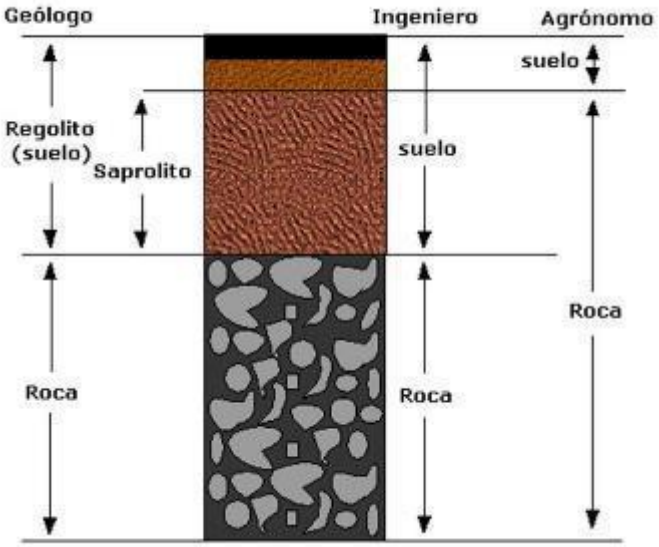


Figura 12. Diferentes visiones del suelo, la palabra Ingeniero hace referencia a otro tipo de profesional distinto al Ingeniero Agrónomo y al Ingeniero Geólogo.
Fuente: PhD. Gaspar Monsalve Mejía, Profesor Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

IV. PROCESOS EROSIVOS O DENUDATIVOS

La erosión se define como un proceso Natural mediante el cual las partículas más superficiales del suelo son desprendidas y transportadas hasta una nueva localización que conlleva a la improductividad de los suelos.

También puede definirse como el conjunto de procesos físicos de DESPRENDIMIENTO, TRANSPORTE Y DEPOSITACIÓN ejercidos por diferentes agentes (agua, viento, organismos vivos) sobre la superficie terrestre y con intensidad variable; los cuales modelan la superficie y producen geoformas, afectando de diversas maneras los diferentes ambientes.

4.1. CAUSAS.

Según Morgan (1997) "las causas de la erosión del suelo todavía son poco conocidas, aunque estudios posteriores a 1940, han dado como resultado un mejor conocimiento de los procesos mecánicos involucrados en la erosión y su relación con el medio físico, sólo actualmente se han abordado investigaciones sistemáticas sobre los factores SOCIALES, ECONÓMICOS, POLÍTICOS E INSTITUCIONALES que actúan donde y cuando se produce erosión".

Este mismo autor expone que la sabiduría popular explica la erosión como una respuesta al aumento de la presión que se ejerce sobre el suelo por el crecimiento demográfico y al consecuente abandono de grandes áreas anteriormente productivas[18], que han dejado de serlo como resultado de la erosión, salinización y alcalinización, las cuales en conjunto configuran la desertificación.

Morgan (1997) hace énfasis en señalar que diferentes coberturas vegetales permiten diferentes grados de protección y, en consecuencia, las actividades humanas mediante determinados usos del suelo pueden controlar considerablemente la tasa de erosión. En Montería uno de los mejores ejemplos de esta situación ocurre en Sierra

[18] Uno de los mejores ejemplos de esta consideración, lo constituye la más reciente teoría de la desaparición de la cultura Maya por la deforestación que generaron y que coincidió con un calentamiento climático.

Chiquita[19]. Los factores que determinan la tasa de erosión son la lluvia, la escorrentía, el viento, el suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de cobertura vegetal.

La erosión y el cambio de uso del suelo están fuertemente relacionados. Las pérdidas de suelo aumentan rápidamente hasta niveles inaceptables cuando los suelos se usan de forma irracional. En esas condiciones, los efectos de fenómenos geomorfológicos, tanto de magnitud moderada como alta, son muy fuertes. La erosión es un proceso NATURAL, pero la distribución en el tiempo y en el espacio es el resultado de la interacción de circunstancias físicas y humanas (ver Figura 13). La erosión del suelo es, por lo tanto, una parte integrante de ambos entornos: natural y cultural.[20]

Figura 13. Erosión en Sierra Chiquita, Montería, Córdoba, Colombia. Nótese la vivienda en la parte superior.
Fotografía MSc. María Isabel Toro Quijano.

En gran cantidad de regiones, la precipitación es considerada la principal forma de agua sobre el terreno. La erosión entonces es función de la cantidad, intensidad, frecuencia y duración de cada precipitación, y a su vez, de ellas dependerá el volumen

[19] Para profundizar en el tema se recomienda buscar en el Centro de Documentación de la CVS el estudio "Proyecto de Ordenamiento y Manejo de las Laderas de Sierra Chiquita en el Municipio de Montería", Informe Final Convenio CVS – Corpocaldas. 2006, libro referencia MI 455.

[20] Morgan, 1997.

de agua que desprenderá las partículas más superficiales del terreno y que posteriormente viajará sobre la superficie, trasportando las partículas desprendidas hasta el sitio donde finalmente se depositarán.

4.2. CONSECUENCIAS.

Los efectos in situ de la erosión son particularmente importantes en los suelos de uso agrícola, y se relacionan principalmente con:

- Redistribución y pérdida del suelo.
- Degradación de la estructura y pérdida de la materia orgánica y de los nutrientes.
- Reducción progresiva de la fertilidad.
- Reducción de la humedad disponible en el suelo, que finalmente puede conducir a la desertificación.

En resumen, el efecto resultante es una pérdida de la productividad que inicialmente limita las especies que pueden cultivarse y obliga a un aumento en la aplicación de fertilizantes y finalmente lleva a la devaluación y abandono de las tierras.

4.3. TIPOS DE EROSIÓN.

Los tipos de erosión se formulan básicamente, de acuerdo a la velocidad a la cual se da el proceso. Cuando él actúa como agente modelador del paisaje, sin la generación de cambios drásticos en el mismo, se considera como **Erosión Geológica o Natural.** De otra parte, cuando la erosión actúa a una tasa mayor que la impuesta por los agentes naturales, como consecuencia de actividades humanas no controladas, recibe el nombre de **Erosión Antrópica ó Acelerada**. Está principalmente asociada con la destrucción de los bosques[21] o un inadecuado uso y manejo del suelo.

La renovación de un suelo que ha perdido su primer horizonte mineral, naturalmente enriquecido en materia orgánica, constituye un proceso sumamente lento. Según investigaciones de la FAO puede tomar entre 200 y 400 años para que se forme un centímetro de suelo en un terreno ARENOSO, en tanto que la desertificación de una región donde los suelos son manejados de forma irracional, sólo toma unos pocos años.

4.4. CLASES DE EROSIÓN.

Las Clases de Erosión hacen relación al agente activo involucrado en el proceso. Así entonces se tendrán **La Erosión Hídrica**, ocasionada por la acción del agua, pluvial,

[21] Analice el caso de la zona de Amortiguación del Parque Nacional Natural Paramillo.

fluvial y marina; mismas que a su vez pueden presentar diversas subdivisiones al incrementarse el detalle del análisis en cada caso particular.

De otro lado, cuando el viento es el agente activo del proceso de desprendimiento y transporte de las partículas de la roca o del suelo se hablará de **Erosión Eólica.**

4.5. PROCESOS EROSIVOS.

A esta altura de la discusión es conveniente aclarar que los procesos de desprendimiento y transporte de material rocoso y edáfico puede darse en la superficie de las masas de dichos materiales, actuando entonces sobre determinadas partículas independientes y diferenciadas de dicha masa, en cuyo caso se hablará de erosión superficial o **Erosión** propiamente dicha. O bien, actuar subsuperficialmente, sobre masas de material con extensión y volumen considerable, y en tal caso se hablará de Erosión Subsuperficial, dentro de ella se distingue la tubificación, la karstificación, y la más conocida, los

Movimientos en Masa

Los dos tipos de erosión establecidos en atención a su modo de acción, superficial y subsuperficial se reúnen para su análisis y estudio como los procesos erosivos que se dan en la naturaleza.

4.5.1. Erosión Superficial.

La erosión superficial puede ser hídrica y eólica. Cabe aclarar aquí que, si bien ´buena parte de Colombia y en particular el Caribe colombiano exhiben una marcada alternación climática caracterizada por temporadas secas y con vientos intensos, propicios para la ocurrencia de la erosión eólica; la condición tropical del país y su ubicación en el planeta favorecen una marcada oportunidad para la incidencia de la erosión hídrica, en sus tres modalidades de pluvial, fluvial y oceánica o litoral. No obstante, en razón a la alta incidencia de la erosión hídrica en el Caribe colombiano, y por tanto la que será más extensamente analizada. La discusión comenzará por la erosión eólica.

a. Erosión eólica.

Se produce por el desprendimiento de partículas por la acción del viento y opera esencialmente en regiones ventosas y secas con escasa vegetación, como los desiertos cálidos y fríos, zonas costeras y en algunas regiones montañosas expuestas.

Es función de la cohesión de las partículas o minerales en la roca y de la ausencia de cobertura vegetal del terreno, más que de la intensidad del viento.

b. Erosión pluvial.

Corresponde a los tipos de erosión asociados con eventos de precipitación.

b.1. Erosión por goteo o por impacto y saltación pluvial.

Este proceso se debe al impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo desprotegido y al desprendimiento y desalojo de las partículas del suelo y de materia orgánica.

En algunos casos las partículas pueden ser levantadas cerca de un metro desde la superficie a la vez que son desplazadas lateralmente algo más de un metro.

Se estima que cerca de 224 ton/ha de partículas de suelo, pueden ser desalojadas del terreno en un aguacero intenso mediante este mecanismo. Como consecuencia del impacto de las gotas de lluvia se destruye la estructura del suelo y este se sella, se encostra o se compacta en grado variable, disminuyendo su capacidad de infiltración, se puede alcanzar hasta un incremento del 15% en la densidad de una capa superficial de 2,5 mm de espesor. Cuando el suelo se seca queda, muchas veces, una costra dura que dificulta el crecimiento de nueva cobertura vegetal y prolonga la exposición del suelo a la acción de la erosión, predisponiéndolo a otros procesos erosivos.

“Si bien es cierto que pendiente y longitud controlan en buena medida la velocidad del flujo de escorrentía y con ello las pérdidas de suelo, es importante, así mismo, dejar indicado el papel que desempeña en este proceso el tamaño del grano. Las partículas más finas son más difíciles de erosionar dada la cohesión de las arcillas minerales que las retienen; una vez un grano individual se encuentra en movimiento, no se deposita hasta que su velocidad caiga por debajo de la velocidad umbral de movimiento, de esta forma es necesaria menos fuerza para mantener un grano en movimiento que para que entre en él” (León Peláez, 2001).

b.1.1. Erosión laminar.

En los suelos desprotegidos donde ha actuado la saltación pluvial, el agua escurre laminarmente en un trayecto corto, arrastrando las partículas de suelo y materia orgánica removidas por las gotas de lluvia.

Mientras que las gotas de lluvia llegan a la superficie del terreno con velocidades terminales que oscilan entre los 6 y 9m/seg, la velocidad del escurrimiento asociado a la **erosión laminar** no supera los 30 cm/seg. Su característica principal es que el arrastre de partículas por la lámina de agua durante y después del evento de precipitación (ver Figura 14), ocupa áreas extensas.

Figura 14. Erosión laminar, vía Montería – Tierralta (Córdoba, Colombia).
Fuente: Fotografía MSc. María Isabel Toro Quijano.

b.1. 2. Erosión en surcos.

Según la FAO los surcos son acanaladuras en el suelo que pueden ser eliminadas mediante métodos de arado tradicional.

A medida que la lámina de agua se mueve, aumenta su velocidad pasando de flujo laminar a turbulento (v > 30 cm/seg) y la escorrentía se concentra en pequeños canales donde el agua adquiere la energía suficiente para formar canales definidos relativamente paralelos o anastomosados denominados SURCOS.

Los surcos son perpendiculares o casi perpendiculares a las curvas de nivel, tienen sección transversal en “U”. Debido a la dinámica del proceso, el arranque de partículas se desarrolla desde el sector más alto hacia abajo, ver Figura 15.

b.1.3. Erosión en cárcavas.

Según la FAO las cárcavas son ACANALADURAS EN EL SUELO QUE NO PUEDEN SER ELIMINADAS MEDIANTE MÉTODOS DE ARADO TRADICIONAL

Cuando el agua se concentra, al encontrar pequeños saltos de pendiente, socava la base de ésta y posteriormente sufre desplome por la ausencia de soporte infrayacente. De esta manera se inicia un proceso de arranque de partículas desde abajo hacia arriba, proceso que también se conoce como erosión remontante. Tienen sección transversal

en “V”, tal como se muestra en la Figura 16, y junto con la erosión en surcos recibe el nombre de erosión CONCENTRADA.

Figura 15. Erosión en surcos A. Municipio de Canalete corregimiento Popayán B. Vía Montería – Arboletes.
Fuente: Fotografías MSc. María Isabel Toro Quijano y MSc. Iván Darío Bustamante Barrera

Figura 16. Erosión en cárcavas, Concordia (Ant).
Fuente: Fotografía MSc. Jairo Herrera Arango.

De acuerdo CON SU FORMA las cárcavas pueden ser clasificadas en seis categorías diferentes, a cuya descripción se procede conforme a los planteamientos de Peralta (1977) citado por Moder (1983).

- Lineal: de forma larga y con cabeza angosta, de pocos tributarios en sus costados; puede ensancharse y dar origen a los tipos restantes.
- Bulbosa: ancha y espatulada en el extremo superior, pudiendo ser lineal en su parte baja; a menudo sigue el curso de un drenaje viejo. Tiene pequeños tributarios en todos los costados; al irse desarrollando da origen a la cárcava de tipo dendrítico.
- Dendrítica: formada por muchos tributarios en forma ramificada; puede originarse siguiendo las líneas de un drenaje natural; su cabeza puede tener forma de semicírculo.
- Enrejada: los tributarios entran al canal formando aproximadamente un ángulo de 90°; se desarrolla principalmente en zonas planas.
- Paralela: compuesta por varias cárcavas que drenan en una sola.
- Compuesta: combinaciones de dos o más formas, dándose especialmente en zonas con problemas avanzados de erosión.

c. Erosión fluvial.

La energía del flujo en una corriente produce desprendimiento y transporte de partículas tanto de las paredes del canal (denominadas bancas) ocasionando desplomes; como del fondo del canal (denominado lecho), mediante el mecanismo de socavación que se produce por el arrastre de las partículas en los sectores de mayor velocidad del flujo (curva externa del canal). El material desprendido va siendo incorporado gradualmente a la carga sólida.

La erosión de bancas produce la ampliación del canal y la erosión del lecho produce la profundización de este. El exceso de la carga de fondo en la desembocadura puede dar origen a un proceso de erosión remontante muy importante.

Es necesario resaltar que cualquier cambio en el régimen de caudales o en el trazado del canal de una corriente conlleva a un proceso de erosión. El papel de la vegetación “riparia” de las orillas, denominada bosque de galería es fundamental, dado que las raíces ejercen un efecto de arco en su conjunto, con lo cual incrementan la resistencia de los sedimentos a la fuerza de desprendimiento de la corriente. Figura 17.

Figura 17. A. Erosión fluvial en la quebrada La Balsa, municipio de Canalete. B. Efecto del bosque de galería en las orillas del río Sinú
Fuente: Fotografías MSc. María Isabel Toro Quijano y MSc. Iván Darío Bustamante Barrera

d. Erosión litoral u oceánica.

Se produce por el choque directo de las olas en los materiales continentales sin el efecto protector de las acumulaciones de arena (playas), la haloclastia tiene un papel

fundamental en este proceso. La intensidad de la erosión litoral es función de la susceptibilidad natural de las rocas a la erosión[22].

Figura 18. Erosión litoral en la antigua Punta Arboletes, límite entre los departamentos de Córdoba y Antioquia en Colombia. Fuente: Fotografía MSc. María Isabel Toro Quijano.

El escenario de cambio climático y el consecuente ascenso del nivel del mar se traduce en la intensificación de la erosión litoral, existe una fórmula empírica que indica que por cada centímetro que ascienda el mar, éste erosionará aproximadamente un metro en la horizontal de territorio continental (Regla de Brunn). Producto de la erosión litoral se da el retroceso paulatino de los acantilados produciendo las plataformas de abrasión (Figura 18).

4.5.2. Erosión subsuperficial.

4.5.2.1. Tubificación.

Este proceso fue definido por Terzaghi y Peck en 1967 en la llanura de inundación del río Misisipi y corresponde al arranque de partículas generado por la ocurrencia de flujos de filtración a través de zonas con variaciones abruptas en su permeabilidad y por ende en el diámetro de sus poros lo cual acarrea variaciones significativas en el tirante hidráulico en tramos relativamente cortos por lo que el flujo adquiere fuerza de arrastre suficiente para causar desprendimiento y transporte de partículas. Se caracteriza por el desarrollo de conductos internos que al inicio del proceso están aislados y posteriormente forman estructuras que se comunican dando origen a conductos con for-

[22] Investigue el papel fundamental de la Haloclastia.

ma de “Z” que, al coincidir aproximadamente en la vertical, generan subsidencias localizadas en el terreno las cuales desencadenan erosión remontante; por lo tanto, la tubificación se considera en algunos casos como un precursor del carcavamiento.

La consecuencia fundamental es no sólo la pérdida de la estructura del suelo sino los asentamientos diferenciales asociados, tal como se observa en la Figura 19.

Figura 19. Tubificación en el municipio de Los Córdobas, Córdoba, Colombia.
Fuente: Fotografía MSc. María Isabel Toro Quijano.

4.5.2.2. Karstificación.

La fuerte cohesión entre los minerales que componen las calizas y su dureza, hacen que estas rocas sean muy resistentes a la erosión mecánica. Sin embargo, también son rocas solubles (a través del proceso de la decarbonatación) por lo que son muy sensibles a la meteorización química.

Cuando una región **de calizas o rocas ígneas ultrabásicas** es masivamente afectada por la acción disolvente de las aguas, da lugar a un relieve característico denominado Karst. La karstificación se ve favorecida por la existencia de climas frescos y húmedos, así como de relieves planos preexistentes y suelos con abundante actividad biológica.

Tal como se muestra en la Figura 20, al inicio del proceso el agua percola aprovechando las diaclasas y los planos de estratificación, se genera disolución que crea cavernas, una vez el material superior se queda sin el soporte se producen hundimientos en el suelo (dolinas); el proceso continúa con la formación de sumideros de corriente, en los cuales las corrientes superficiales cambian ahora a corrientes subsuperficiales, es decir, en la superficie se observa como si las corrientes de agua se “perdieran”, este fenómeno es común en la zona de Sabanas de Córdoba.

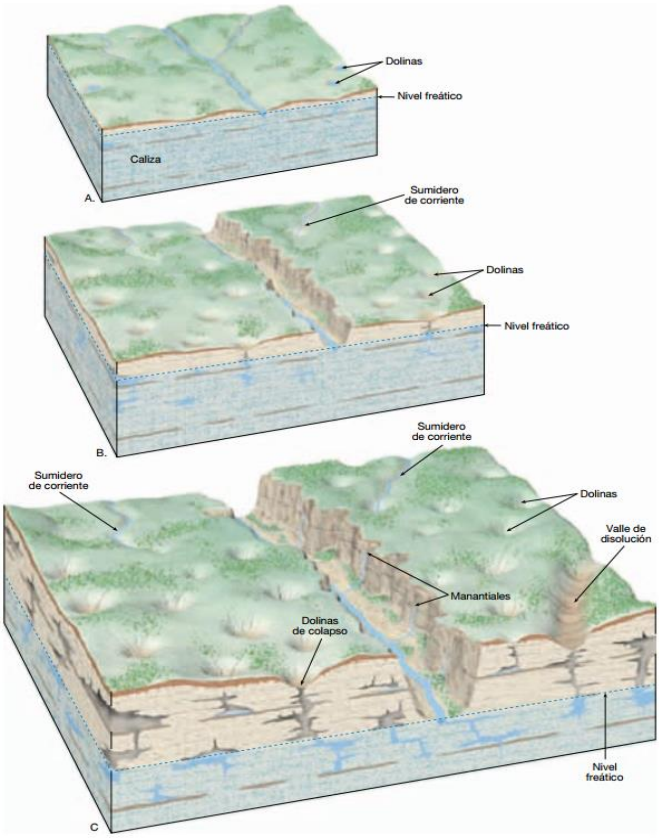


Figura 20. Secuencia de desarrollo del proceso de karstificación.
Fuente: Tarbuck y Lutgens, 2005.

4.5.3. Movimientos en Masa.

A diferencia de la erosión pluvial en la cual las partículas más superficiales se mueven de manera independiente, en los movimientos en masa las partículas (ubicadas en sectores superficiales y subsuperficiales) se mueven en conjunto.

4.5.3.1. Reptación.

Es el movimiento lento, de unos pocos centímetros por año, y sin superficie de ruptura de una porción de suelo. La reptación se desarrolla principalmente en épocas de invierno en las cuales el suelo se hidrata aumentando su volumen y por lo tanto su gravedad específica. Se evidencia por árboles o postes inclinados tal como se muestra en la Figura 21. Este proceso afecta principalmente suelos residuales, pero también puede presentarse en rocas.

Figura 21. Reptación, municipio de Canalete, Córdoba, Colombia. Nótese la inclinación de los árboles
Fuente: Fotografía MSc. María Isabel Toro Quijano.

4.5.3.2. Terracetas por sobrepastoreo.

Es el movimiento lento y sin superficie de ruptura de una porción de suelo. Se desarrolla principalmente en épocas de invierno en las cuales el suelo se hidrata aumentando su volumen y posteriormente el pastoreo del ganado forma escalones producto del pisoteo. Las terracetas por sobrepastoreo son más o menos paralelas a las curvas de nivel (ver Figura 22), recibe el nombre vulgar de erosión “pata e’ vaca”, término que además de inapropiado, ya ha caído en desuso.

Este proceso puede conllevar a la compactación de los suelos y frecuentemente al agravarse se asocia con la ocurrencia posterior de carcavamientos y deslizamientos.

4.5.3.3. Deslizamientos, deslaves, derrumbes.

Es el movimiento lento o rápido con superficie de ruptura que puede ser plana (deslizamiento planar y mecanismo traslacionales) o curva (mecanismo rotacional).

Figura 22. Terracetas por sobrepastoreo, municipio de Montería, Córdoba, Colombia.
Fuente: María Isabel Toro-Quijano**.**

Estas superficies pueden ser evidentes o inferidas (ver Figura 23) y coincidir con planos estructurales y se denominan huellas de tracción. Los deslizamientos en gran medida obedecen a una susceptibilidad natural de los materiales.

Figura 23. Deslizamiento, municipio de Canalete corregimiento de Popayán.
Fuente: Fotografía MSc. María Isabel Toro Quijano.

4.5.3.4. Desplomes.

Es el movimiento lento o rápido con superficie de ruptura no definida. Corresponde al mecanismo principal de los procesos erosivos en las orillas de las corrientes superficiales. Figura 24.

Figura 24. Desplome, río Sinú, municipio de Cereté, Córdoba, Colombia.
Fuente: Ing. Ramiro Tirado.

4.5.4. Flujos y avalanchas.

Movimiento de tipo viscoso, la mayoría de los cuales involucran mezclas de agua y fragmentos de diferente granulometría desde bloques hasta arcillas, los cuales se desplazan lenta o rápidamente a lo largo de canales o depresiones. Pueden adoptar las formas de:

- Flujos de detritos: rocas o fragmentos de rocas dentro de una matriz fina que se movilizan de forma rápida o muy rápida dependiendo de la pendiente del terreno

Figura 25. Flujo de lodo, municipio de Concordia (Antioquia, Colombia).
Fuente: HERRERA, Jairo – TORO-QUIJANO, María Isabel.

y de la proporción de materiales de gran tamaño (flujos de escombros) o de tamaño fino (flujos de lodo).

- Solifluxión: La solifluxión es un movimiento, **relativamente rápido**, donde toman importancia la presión del agua intersticial y la plasticidad de los materiales. La solifluxión es un fenómeno muy generalizado y está asociado a la escasa vegetación. En las regiones tropicales húmedas la solifluxión puede estar limitada por la abundancia de la masa forestal, por lo que, la deforestación de estas áreas puede conducir a su ocurrencia. La solifluxión puede ocurrir en pendientes muy leves y es de común ocurrencia en depósitos de acumulación (coluviones, piedemontes, y otros), en depósitos de alteración, sobre todo en margas, esquistos y pizarras, y en formaciones arcillosas y limosas susceptibles a deformarse[23].

A pesar de que el término avalanchas hace referencia a los aludes de nieve, es utilizado comúnmente para designar los flujos extraordinarios de agua con lodos y detritos asociados a sismos, erupciones volcánicas o lluvias intensas; en el caso que la avalancha se asocia con erupciones volcánicas estrictamente recibe el nombre de lahar.

[23] Tal como sucede en muchas regiones de Córdoba, Colombia; como por ejemplo en los municipios de Moñitos y Canalete.

V. ROCAS SEDIMENTARIAS

5.1. ORIGEN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS.

Para que se formen las rocas sedimentarias se requiere de los siguientes procesos:

- METEORIZACIÓN: Alteración y desintegración de las rocas en la superficie terrestre. Los productos son la “materia prima” de las rocas sedimentarias.
- EROSIÓN: Desprendimiento de material de la superficie terrestre por un agente dinámico.
- TRANSPORTE: Traslado de los productos de la erosión hasta una nueva localización, durante este proceso se puede dar mayor meteorización.
- DEPOSITACIÓN: Lugar final de disposición de los productos de la erosión y la meteorización. Condiciones de la depositación: Cambio en el sistema o el entorno, producida por una disminución de la energía del flujo o un cambio de pendiente.
- LITIFICACIÓN: Posterior a la depositación y nuevamente en condiciones de enterramiento, el sedimento se transforma en roca mediante la compactación y la cementación.

Todos los procesos anteriores son continuos.

La importancia de las rocas sedimentarias radica en que constituyen el 75% de los afloramientos de roca en los continentes, aunque sólo representan el 5% del volumen total de corteza. Adicionalmente, contienen evidencia de acontecimientos que ocurrieron en la Tierra a través de la historia, contienen fósiles, y son los principales almacenes de gas, agua y petróleo.

5.2. PRINCIPALES CONSTITUYENTES.

Los principales constituyentes son:

- CUARZO: Por su resistencia a la meteorización química.
- ARCILLAS: Sólo se refiere a la clasificación granulométrica y no mineralógica. Son láminas finas producto de la meteorización química de muchos minerales.
- FELDESPATOS Y MICAS: Su existencia refleja una erosión y depositación muy rápidos.

5.3. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS.

Las rocas sedimentarias están compuestas por fragmentos de roca o fragmentos de minerales y pueden o no contener restos vegetales y animales, o estar formadas por la precipitación a partir de soluciones químicas, por lo tanto, la composición de éstas es variable y su clasificación requiere dividirlas en función del tamaño de las partículas de los componentes (rocas sedimentarias detríticas) o de la composición de éstas (rocas sedimentarias químicas).

5.3.1. Rocas sedimentarias detríticas.

Como se indicó anteriormente, las rocas detríticas se caracterizan por tener una composición variable, que está determinada por las rocas del área fuente de los sedimentos, por lo que se dificulta su clasificación de acuerdo a su composición mineralógica por lo que deben ser clasificadas de acuerdo al tamaño de grano, tal como se muestra en la Figura 26.

Intervalos de tamaño (milímetros)	Nombre del clasto	Nombre del Sedimento	Roca detrítica
>256	Bloque	Grava	Conglomerado o brecha
64-256			
4-64	Canto		
2-4			
1/16-2	Grano	Arena	Arenisca
1/256-1/16	Gránulo	Limo	Limolita
<1/256	Partícula	Arcilla	Lutita

Figura 26. Clasificación de las rocas detríticas según el tamaño de grano.

Fuente: Tarbuck y Lutgens, 2015.

El tamaño de los clastos refleja las condiciones del ambiente de depositación DEL SEDIMENTO, de la siguiente manera:

- GRAVA: Corrientes rápidas o ambientes de alta energía. Ríos de montaña, avalanchas, litorales de alto oleaje (Sierra Nevada de Santa Marta).
- ARENA: Menor energía. Dunas, depósitos de ríos y playas.
- ARCILLA: Muy poca energía, depositación muy lenta. Lagos, ciénagas, fondos de mar adentro.

5.3.1.1. Lutita.

Compuesta por clastos de tamaño ARCILLA Y LIMO, por lo que no pueden identificarse partículas a simple vista, granos de tamaños menores de 0,02mm. Constituyen la mitad de todas las rocas sedimentarias. Son típicas de corrientes no turbulentas y tranquilas, a veces transportadas en suspensión (río Sinú). Ambiente de depositación: lagos, llanuras de inundación, ciénagas y cuencas oceánicas profundas.

Al depositarse las arcillas, se generan entre las partículas numerosos espacios vacíos en los que se localizan aire y/o agua; las partículas se disponen al azar. Al depositarse posteriormente nuevas capas, las partículas iniciales toman disposición más paralela debido al peso del material suprayacente, disminuyendo el tamaño de los poros, y expulsando parte del agua presente en ellos.

Sin embargo, al darse la cementación, el tamaño de los poros (microporos) no permiten el paso del cementante a través de ellos y por lo tanto la cementación es difícil en algunos casos, formando rocas débiles (físiles) y de baja permeabilidad, características que las convierte en el almacén de petróleo y aguas subterráneas. Algunas rocas detríticas de tamaño fino son:

- **Lutita negra:** presenta alto contenido de materia orgánica, indica un ambiente de depositación pobre en oxígeno (pantanoso), de modo que la materia orgánica no se oxida.
- **Lutita físil (shale):** se parte en capas finas de superficie irregular.
- **Lutita no físil (mudstone):** se parte en bloques o fragmentos
- **Limolita[24] (siltstone):** Compuesta por partículas tamaño LIMO (**Ø** < 0.02 mm) en su mayoría y menor proporción de arcillas, por lo tanto, es no físil, y en general podemos decir que el tamaño del grano mayor que el de la lutita.
- **Arcillolita:** Compuesta por partículas tamaño ARCILLA (**Ø** < 0.002 mm) en su mayoría y menor proporción de LIMO.

5.3.1.2. Arenisca.

Las areniscas, como su nombre lo indica están compuestas por partículas (o clastos) de tamaño ARENA, tal como se observa en la Figura 26, el rango arena varía entre 1/16 mm y 2 mm, lo que obliga a subdividir este gran rango granulométrico en tres, arena gruesa (2 mm – 0,05mm), arena media (0,05mm – 0,25mm) y arena fina (0,25mm – 0,0625mm)[25]. Si tenemos en cuenta que la forma de la partícula expresa la cantidad del transporte que ha tenido, el tipo de arenisca debe expresar además la redondez y esfericidad del clasto, así como la uniformidad del tamaño. De esta manera al nombrar el tipo de arenisca se debe incluir cada uno de los términos indicados, por ejemplo: arenisca de grano fino, con alta redondez, baja esfericidad mal seleccionada.

Por lo tanto, se hace necesario puntualizar lo siguiente:

[24] No confundir con LIMONITA.

[25] Algunos autores subdividen en arena de grano muy grueso, grueso, medio, fino y muy fino

- **Concepto de selección**: se refiere a la uniformidad en el tamaño de los clastos, indica la rapidez del cambio en las condiciones energéticas durante la depositación Figura 27. La selección hace referencia a un índice estadístico relacionado con la distribución de los clastos y que tiene consecuencias significativas en la permeabilidad y en la distribución y tamaño de los macroporos dentro de la roca y, por lo tanto, dentro del suelo formado.

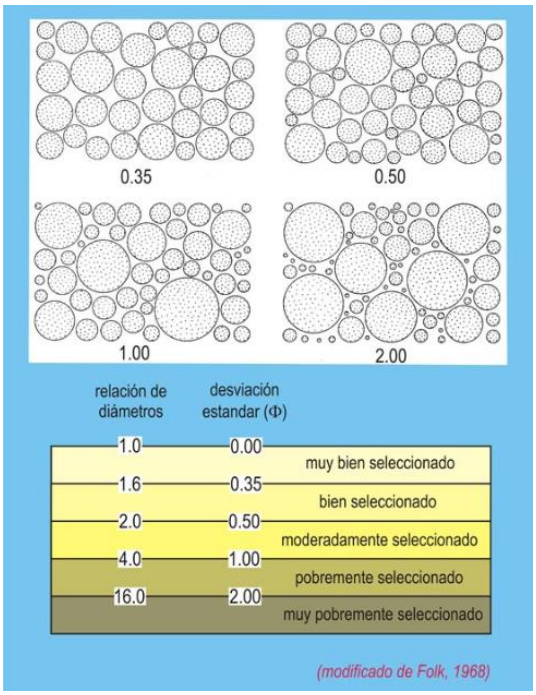


Figura 27. Selección de un sedimento

Fuente: https://webs.ucm.es/info/petrosed/rd/tex/index.html

- **Concepto de redondez**: se refiere a la proporción de aristas o ángulos en la forma de los clastos, también tiene consecuencias significativas en la permeabilidad de los suelos formados y evidencia la cantidad de transporte que ha sufrido una partícula desde su erosión hasta la depositación final. Tal como se observa en la Figura 28, la redondez de una partícula oscila entre muy anguloso y muy redondeado (valores entre 0 a 1).
- **Concepto de esfericidad**: Se refiere a la equidimensionalidad de los clastos, es decir, a lo cercano de su contorno a una esfera (Figura 28).

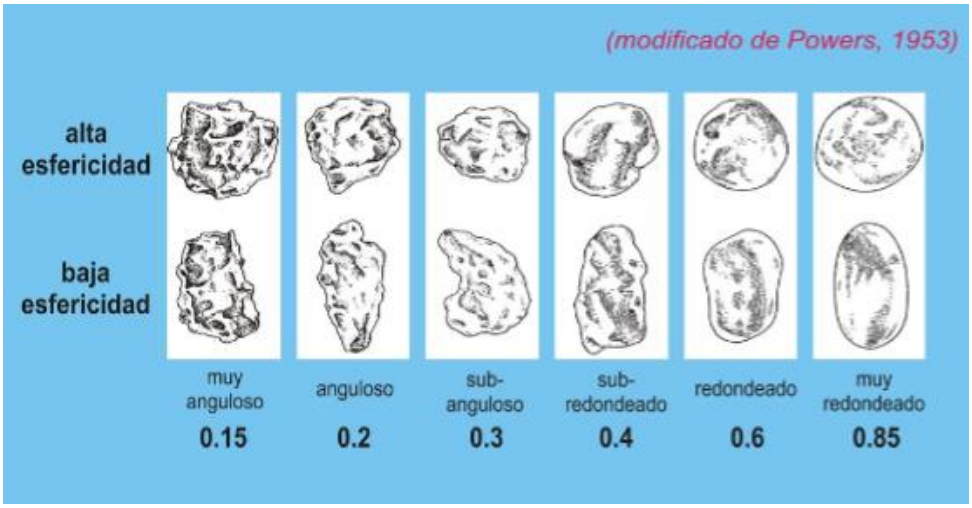


Figura 28. Conceptos de esfericidad y redondez.

Fuente: https://webs.ucm.es/info/petrosed/rd/tex/index.html

En algunos ambientes sedimentarios específicos, la mineralogía permite clasificar las areniscas de acuerdo con su composición, de esta manera se pueden distinguir tres tipos clásicos de arenisca:

- Cuarzoarenita: alto contenido de cuarzo (>90%).
- Arcosa: alto porcentaje de feldespatos (25%), además de cuarzo (75%) y mica. Se caracteriza por tener granos angulosos y mal seleccionados.
- Grauvaca: contiene cuarzo (75%), y cantidades variables en función del área fuente de feldespatos y fragmentos de roca, presenta una matriz de limo y/o arcilla (15% aprox). En general puede decirse que presenta granos angulosos y mal seleccionados que evidencian el ambiente sedimentario.

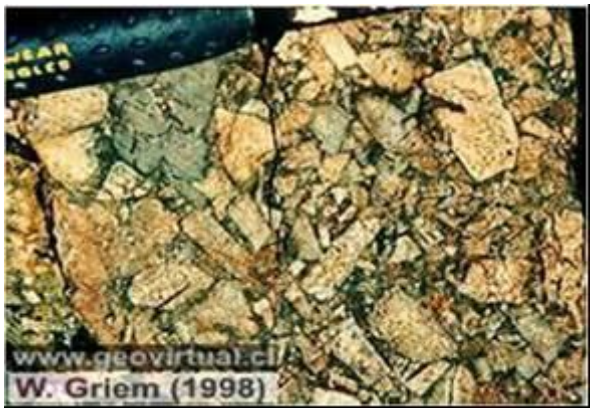
5.3.1.3. Conglomerado.

Compuesta por fragmentos REDONDEADOS de tamaño GRAVA, con altos contenidos de arena. Figura 29.

5.3.1.4. Brecha.

Compuesta por partículas ANGULOSAS de tamaño GRAVA. Figura 29.

Conglomerado



Brecha

Figura 29. Conglomerado y Brecha

Fuente: www.geovirtual.cl

Por la naturaleza de los cantos los conglomerados y brechas pueden ser oligomícticos de cantos de igual naturaleza (cuarcítica generalmente) y polimícticos (o poligénicos) caracterizados por cantos de diversa naturaleza.

5.3.2. Rocas sedimentarias químicas inorgánicas.

Se forman a partir de los materiales producto de la meteorización química que son transportados en solución y luego se precipitan sin la intervención de organismos vivos. El material transportado en solución se precipita por cambios de temperatura, pH o por saturación de la solución.

5.3.2.1. Evaporitas.

Se forman mediante la evaporación en lagunas continentales o marinas, por la precipitación química de soluciones saturadas de sales alcalinas y alcalinotérreas (SO_4^{2-} y haluros) dependiendo de la temperatura durante el proceso se producen yeso ($CaSO_4.2H_2O$), anhidrita ($CaSO_4$), halita ($NaCl$), silvina (KCl) y carnalita ($KMgCl_3.6H_2O$).

Se requiere que al precipitarse sean recubiertas por otros materiales sedimentarios de grano fino (limos y arcillas) que las protejan de disoluciones posteriores.

5.3.2.2. Caliza.

Se forman a partir de soluciones donde se precipita fundamentalmente calcita ($CaCO_3$) en zonas kársticas donde se forman estalactitas y estalagmitas o en zonas oceánicas por encima del nivel de compensación de carbonatos (CCD) a profundidades inferiores a los 3.400 m.

Dentro de los tipos de calizas inorgánicas principales encontramos:

- **Travertino:** se forma en cavernas por la precipitación lenta al entrar el agua en contacto con el aire.
- **Caliza Oolitica**: compuesta por granos esféricos de muchas capas de $CaCO_3$, formada en ambientes marinos.
- **Dolomías recristalizadas:** la dolomita sustituye a la calcita, es decir que se forman posterior al depósito de una caliza.

5.3.2.3. Silíceas.

Se forman a partir de soluciones donde se precipita fundamentalmente SÍLICE (SiO2) en áreas continentales o en zonas oceánicas este proceso se desarrolla por debajo del nivel de compensación de carbonatos (CCD) a profundidades superiores a los 3.400m. Las rocas silíceas de origen inorgánico son muy compactas y duras, y están compuestas por SiO_2 microcristalino (**chert**), y en general presentan fractura concoidea.

- **Pedernal:** SiO_2 + materia orgánica
- **Jaspe y ágata:** SiO_2 + óxidos de hierro

5.3.3. Rocas Sedimentarias Orgánicas o Bioquímicas.

Se forman de los iones trasnsportados en solución producto de la meteorización química, la diferencia con las rocas sedimentarias químicas inorgánicas radica en que los organismos ayudan en la precipitación de rocas sedimentarias bioquímicas, es decir, que los animales y plantas que viven en el agua extraen materia mineral disuelta para formar caparazones y otras partes duras, una vez que los organismos mueren los exoesqueletos se acumulan en el fondo de un lago o un océano como sedimento bioquímico.

5.3.3.1. Calizas.

La caliza que se forma por procesos bioquímicos y es mucho más común que la formada por procesos inorgánicos, está integrada por caparazones abundantes que están unidos por un cementante de origen químico (vg. Arrecifes coralinos).
Dentro de las calizas orgánicas se encuentran:

- **Coquina:** roca de grano grueso formada por caparazones y fragmentos calcáreos poco cementados, contiene mucho espacio entre poros
- **Caliza fosilífera:** roca de grano grueso formada por caparazones y fragmentos calcáreos, a diferencia de la coquina el espacio entre poros se llena con cementante y/o sedimentos de tamaño arcilla (Ø < 0.002 mm).
- **Creta**: roca blanda y porosa compuesta por caparazones de microorganismos marinos, por lo tanto, el tamaño de grano es fino a diferencia de la coquina y la caliza fosilífera.

5.3.3.2. Rocas silíceas (chert).

Se componen de cuarzo por acumulación de microorganismos de esqueleto silíceo, estas rocas pueden presentar alternancia de bandas oscuras y claras.

5.3.3.3. Rocas organógenas

Se forman por la acumulación de restos de animales y/o plantas superiores (herbáceas y arbóreas) en regiones pantanosas, lagunas o deltas y la posterior acción de bacterias anaerobias. Dentro de este tipo de rocas tenemos

- Carbón: Las bacterias que atacan la materia orgánica, la enriquecen cada vez más en C (haciéndola cada vez más energética).
- Petróleo: compuesto por hidrocarburos sólidos (asfalto, betún), líquidos (petróleo crudo) o gaseosos (gas natural).

5.4. ESTRATIFICACIÓN.

Las rocas sedimentarias se forman a medida que se acumula capa sobre capa de sedimento, estas capas son llamadas ESTRATOS y constituyen el rasgo más

característico de las rocas sedimentarias. Cada estrato tiene características texturales, composicionales y de espesor por lo que no existen dos estratos iguales. Figura 30.

Figura 30. Planos de estratificación que separan diferentes estratos en el municipio de Canalete y en la vía Montería – Planeta Rica. Note en la fotografía inferior las estructuras sedimentarias y las microfallas
Fuente: María Isabel Toro-Quijano.

La presencia de un fluido implica que los estratos se depositan horizontales o casi horizontales, aunque al interior del estrato se pueden observar estructuras diferentes.

EL PLANO DE ESTRATIFICACIÓN constituye la superficie que separa dos estratos o rocas con características diferentes y representa una separación temporal o una interrupción de la sedimentación (ver Figura 30).

5.5. LITIFICACIÓN.

Por litificación se entienden los procesos mediante los cuales los sedimentos no consolidados se transforman en rocas sedimentarias y comprende dos etapas:

- **COMPACTACIÓN:** El peso de los sedimentos superiores (suprayacentes) comprime a los más profundos, dando como consecuencia la disminución de los espacios vacíos y la expulsión de los fluidos.
- **CEMENTACIÓN:** Los materiales cementantes son transportados en solución por el agua que percola a través de los espacios entre partículas, posteriormente precipita llenando los espacios vacíos y uniendo los clastos.

  El carbonato de calcio, el óxido de hierro y la sílice son los cementantes más comunes (imprimiendo propiedades de disolución, color y dureza a la roca y al suelo residual que se genere eventualmente).

5.6. TEXTURA.

Término que engloba los aspectos geométricos de los distintos componentes de un sedimento o roca (granos, matriz y cemento), tales como tamaño y forma de estos. Figura 31.

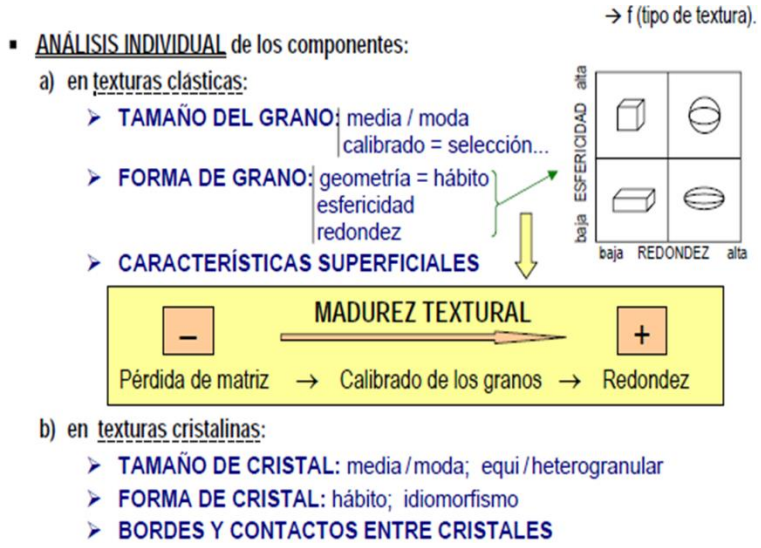


Figura 31. Elementos texturales de las rocas sedimentarias.
Fuente: Universidad de Oviedo.

Aunque existen diversos tipos de textura, los dos tipos principales son la textura cristalina y la textura clástica.

- Textura cristalina: Cuando se hace referencia al tamaño, geometría y relación espacial de un conjunto de cristales. Este tipo de textura (Figura 32) se caracteriza por no presentar un cementante que une los granos, sino que, al momento de precipitar los cristales a partir de una solución, éstos se unen unos con otros sin dar lugar a espacios vacíos que puedan ser llenados por un cementante. La textura cristalina es típica entonces de las calizas formadas por precipitación directa del carbonato de calcio y las evaporitas.

Figura 32. Esquema de textura cristalina
Fuente: Universidad de Oviedo.

- Textura clástica: Cuando se hace referencia a los aspectos texturales resultantes tras el proceso de sedimentación como consecuencia de la depositación de partículas o detritos, ésta es la razón por la cual algunos autores la denominan textura detrítica. La naturaleza de los detritos puede ser tanto lítica (fragmentos de rocas o minerales) como fragmentos de caparazones de organismos.

El análisis textural de este tipo de rocas requiere describir el tamaño (en milímetros), la selección de los granos y la forma de estos (redondez y esfericidad), tal como se muestra en la Figura 33.

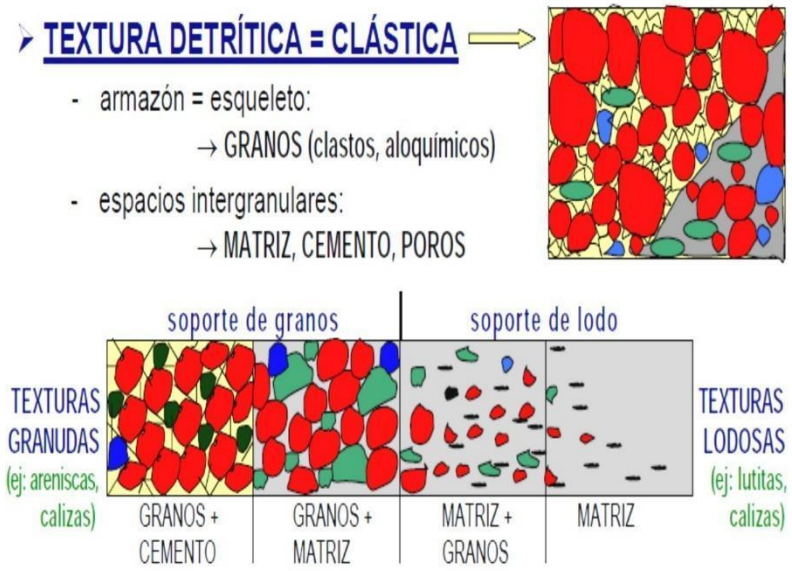


Figura 33. Esquema de textura clástica o detrítica de las rocas sedimentarias
Fuente: Universidad de Oviedo.

De otro lado también se considera la textura bioconstruida, en la cual los detritos tienen origen orgánico, como se muestra en la Figura 34, indiferentemente de la naturaleza del cementante que posean.

Figura 34. Esquema de textura clástica
Fuente: Universidad de Oviedo.

En la práctica de un Ingeniero Agrónomo, el análisis de elementos texturales de las rocas de partida resulta de extrema importancia; las implicaciones serán determinantes, entre otros, de la porosidad y permeabilidad de los suelos, es decir, en el comportamiento del agua, la aireación y el régimen térmico del suelo. Por ejemplo, a mayor selección (o uniformidad en el tamaño) de una roca sedimentaria que ha formado un determinado suelo, la permeabilidad será mayor, a diferencia del mismo tipo de roca con menor selección.

ACTIVIDAD DEL ESTUDIANTE
Consultar las definiciones de porosidad, porosidad primaria, porosidad secundaria, permeabilidad efectiva.
● **Defina los procesos**
● **Trate de relacionarlos con los conceptos de selección y redondez.**

El área donde se acumulan los sedimentos en la superficie terrestre se denomina AMBIENTE SEDIMENTARIO, está caracterizada por unas condiciones particulares y unos procesos geológicos y biológicos específicos. De esta manera, los ambientes sedimentarios dan información sobre el origen de los materiales, el tipo y la duración del transporte y el ambiente de depositación (condiciones físicas, químicas y biológicas).

Los ambientes continentales están dominados por la erosión y depositación asociada a agentes como corrientes de agua, viento y hielo, de esta manera que distinguimos ambientes sedimentarios continentales tales como fluvial, glaciar, desértico, pantanoso, lacustre, intramontañoso, entre otros.

En las zonas costeras y sus inmediaciones se ubican los llamados ambientes sedimentarios costeros y transicionales respectivamente, en éstos existe una influencia variable de los materiales de origen continental (aportes de los ríos) y marino (efecto de las olas, corrientes y mareas); los ambientes sedimentarios transicionales y costeros principales son los deltas, las playas, las islas de barrera y las lagunas costeras (o lagoon).

Los ambientes marinos se clasifican de acuerdo con su profundidad en someros (menos de 200 m) y profundos (más de 200 m), dentro de éstos se conocen los arrecifes coralinos, las plataformas continentales, las cuencas oceánicas, los taludes continentales y las llanuras abisales.

ACTIVIDAD DEL ESTUDIANTE

Complete el siguiente cuadro

	Abanico aluvial	Fluvial	Lacustre	Desértico	Manglárico	Deltaíco	Playa	Llanuras abisales
Granulometría esperada								
Composición								
Roca sedimentaria que formaría								
Forma del grano (redondez)								
Selección del material								

VI. ROCAS METAMÓRFICAS

6.1. DEFINICIÓN DE METAMORFISMO.

Se define metamorfismo como la transformación en *estado sólido* de un tipo de roca preexistente en otro, en un ambiente diferente al de formación, pero en condiciones donde la profundidad es un factor primordial (condiciones de presión no atmosféricas)[26].

Lo anterior significa que las rocas metamórficas se forman a partir de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas denominadas *protolito*, en algunos textos se puede usar erróneamente el término "roca madre", sin embargo, este término es exclusivo para la roca a partir de la cual se origina un determinado suelo. También se deduce que la transformación en estado sólido significa que la roca nunca funde, es decir, no existe fusión ni siquiera parcial de los minerales, en este caso estaríamos enfrentados a una roca ígnea.

El metamorfismo se produce a una temperatura promedio de 160°C, es decir una vez se han sobrepasado las condiciones diagenéticas o posteriores al enterramiento, esta temperatura es un promedio, por lo que es importante resaltar que la temperatura a la cual los minerales metamórficos empiezan su formación dependerá de la reactividad química (determinada por la composición química) de cada mineral presente en el protolito. Una vez se forme el primer mineral nuevo, es decir, que no estaba presente en el protolito, estamos ante el metamorfismo.

DIAGÉNESIS Procesos ocurridos después del enterramiento

▪ **160°C**

METAMORFISMO Cambios mineralógicos y texturales

El metamorfismo INICIA cuando se forma el PRIMER MINERAL que no está durante la litificación de la roca sedimentaria o que no estaba presente en el protolito ígneo o metamórfico, la formación de NUEVOS minerales depende de la DISPONIBILIDAD QUÍMICA DE LA ROCA. Es decir, aunque el límite del metamorfismo se marca como una línea recta, en realidad es una curva de forma sinusoidal, a veces

[26] Es común en algunas personas confundir el término metamorfismo con el término meteorización, sin embargo, nótese que son opuestos en sus condiciones.

dependiendo de la composición del protolito se forman minerales metamórficos antes de alcanzar los 160°C (como en el caso de los sedimentos ricos en minerales del grupo de las arcillas o de las calizas) y otras veces se forman minerales metamórficos después de esta temperatura (como en el caso de las rocas ígneas ultrabásicas).

Los cambios mineralógicos y de textura en una roca, que ocurren a T<160°C se incorporan a la diagénesis.

Según otra definición el límite inferior del metamorfismo se considera la reacción:

$$\text{caolinita} + \text{cuarzo} \rightarrow \text{pirofilita}$$

Mientras que el límite superior es la fusión de minerales, lo que depende de la composición química del protolito.

6.2. FACTORES DE METAMORFISMO.

El metamorfismo está en función de tres factores básicamente:

6.2.1. Presión.

En la presión debemos distinguir los dos tipos de presión: presión litostática y presión tectónica.

La presión litostática es aquella ejercida por las rocas situadas en los alrededores de una determinada roca, este tipo de presión aumenta con la profundidad a razón de 0,25-0,30 kb/km, su característica fundamental es que actúa en todas las direcciones con la misma magnitud, por lo tanto, los minerales en una roca sometida a presión litostática no sufren APLASTAMIENTO sino DISMINUCIÓN DEL TAMAÑO.

A diferencia de la presión litostática, la presión tectónica, también denominada presión dirigida, es la RESPONSABLE DE DEFORMAR LA ROCA: triturando, pulverizando u orientando los minerales.

En profundidad las rocas están calientes y sometidas a presiones mayores a la atmosférica, por lo que tienen un comportamiento plástico durante la deformación (pliegues), es decir, las consecuencias del aumento de presión generan cambios texturales en la roca, pero no mineralógicos.

6.2.2. Temperatura.

A diferencia de la Presión, el aumento de la temperatura genera cambios mineralógicos en el protolito.

La temperatura aumenta de manera directa con la profundidad, a razón de 30°C/km, lo que se conoce como gradiente geotérmico.

A pocos kilómetros de profundidad ciertos minerales como las arcillas se inestabilizan y recristalizan generando por ejemplo sericita/fengita y/o clorita.

6.2.3. Presencia de Fluidos Químicamente Activos.

El agua expulsada por los sedimentos durante la litificación acelera reacciones químicas, es decir, la presencia del agua favorece las reacciones químicas y es incorporada a la estructura de los nuevos minerales formados.

6.3. GRADOS DE METAMORFISMO.[27]

Definidos por WINKLER (1976) a partir de datos experimentales, se refieren a la INTENSIDAD DEL METAMORFISMO que ha influido en una roca. Generalmente el grado metamórfico se relaciona con la temperatura y/o la presión máxima del metamorfismo:

- **Grado Muy Bajo:** Sólo se generan pequeñas transformaciones en los minerales. Las condiciones son levemente mayores a las que se registran durante la litificación de los sedimentos. Facies Zeolitas.

- **Bajo Grado:** Los factores del metamorfismo generan pocos cambios en la roca original. Facies Esquistos Verdes.

- **Medio Grado:** Los cambios son significativos. Facies Anfibolita

[27] Además del concepto de grado de metamorfismo existen conceptos muy geológicos que no se mencionan: zonas metamórficas y Facies Metamórficas de Eskola (1920) que podrían confundir al estudiante. Las zonas y facies metamórficas se determinan a través de la identificación de los grupos de minerales formados simultáneamente.

- **Alto Grado:** Los factores del metamorfismo generan muchos cambios en la roca original. Facies Granulita.

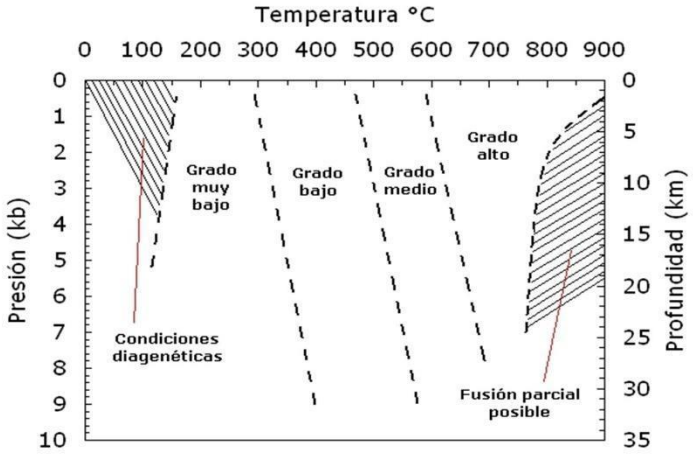


Figura 35. Grados de metamorfismo
Fuente: http://www.geovirtual.cl/geologiageneral

Tal como se muestra en la Figura 35, a medida que aumentan la presión y/o la temperatura aumenta el grado de metamorfismo y por lo tanto los cambios en la roca original o protolito, de esta manera las rocas de muy bajo grado de metarmorfismo guardan muchas semejanzas con el protolito mientras que las rocas de alto grado de metamorfismo han perdido casi todos los rasgos de la roca original.

6.4. CONSECUENCIAS DEL METAMORFISMO.

6.4.1. Cambios Texturales.

Durante el metamorfismo suceden varios tipos de cambios texturales:

- Compactación de los minerales: el aumento de presión aumenta la densidad.
- Realineación y orientación: si existen presiones dirigidas (en una o varias direcciones), se produce la orientación de los minerales en una dirección perpendicular al esfuerzo principal o a la vector suma de los vectores de dirección. Figura 36.

Figura 36. Orientación de minerales
Fuente: http://www.geovirtual.cl/geologiageneral

- Foliación: Estructura planar repetitiva en la roca. Puede ser de varios tipos:
    - Pizarrosidad, es la tendencia de una roca a partirse en placas debido a la orientación de los minerales, es típica de las pizarras y filitas.
    - Esquistosidad, es la orientación de minerales visibles en la roca. Es la textura típica de muchos esquistos, aunque no es exclusiva de este tipo de rocas
    - Bandeamiento, bajo ciertas condiciones termodinámicas, los minerales durante el metamorfismo se separan en función de sus colores, dando origen a acumulaciones de minerales claros y oscuros en la roca. Denota un alto o muy alto grado de metamorfismo.
- Recristalización.

6.4.2. Cambios Mineralógicos.

Las reglas de asociación en las rocas metamórficas no obedecen la SERIE DE REACCIÓN DE BOWEN, es decir, en este tipo de rocas, aunque existen reglas de asociación específicas para cada tipo de metamorfismo, no aplica Bowen, pudiendo ocurrir que existen rocas con olivino y cuarzo. Figura 37.

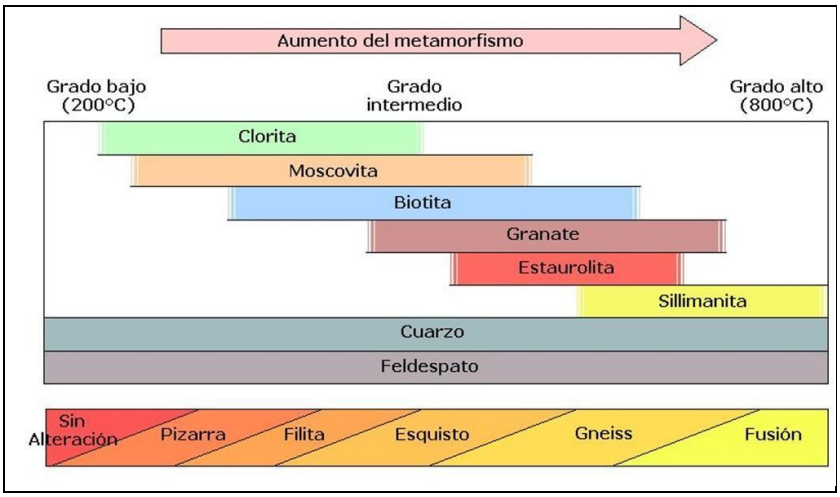


Figura 37. Diagrama simplificado de composición mineral de las rocas de metamorfismo regional
Fuente: http://www.geovirtual.cl/geologiageneral

6.5. TIPOS DE METAMORFISMO.

Existen tres tipos principales de metamorfismo respecto a la temperatura y la presión:

- Metamorfismo de contacto: Presión baja, temperatura media a alta
- Metamorfismo regional: Temperatura media - alta, presión media alta.
- Metamorfismo dinámico: Alta presión con temperaturas relativamente bajas

6.5.1. Metamorfismo de contacto: 10^5 años.

Como su nombre lo indica es aquel que se produce cuando una roca se encuentra cerca del magma y se calienta, pero no se funde, la roca que rodea el cuerpo intrusivo se denomina roca CAJA (Figura 38).

Este tipo de metamorfismo se caracteriza por un aumento de temperatura que produce recristalización de algunos minerales, y no existe orientación de minerales porque la presión tectónica (o dirigida) no está presente por lo que se producen pocos o nulos cambios texturales. Este tipo de metamorfismo, por lo tanto, ocupa zonas pequeñas, siempre alrededor de cuerpos intrusivos la cual se denomina AUREOLA DE CONTACTO (Figura 38).

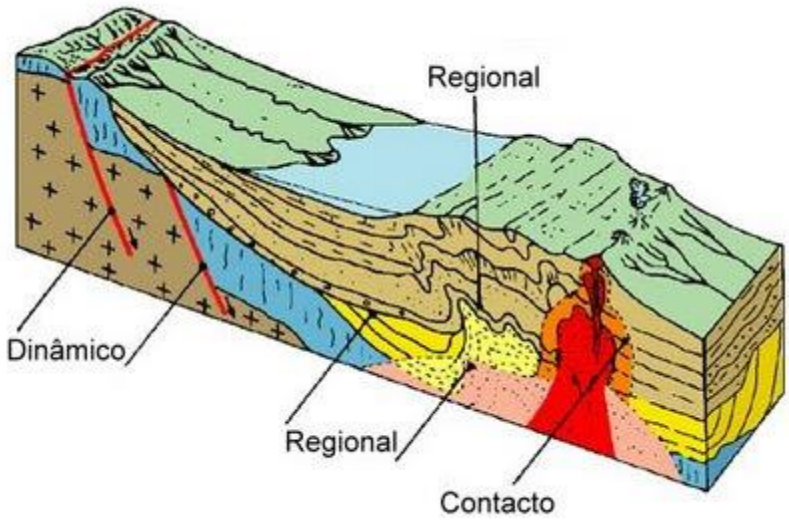


Figura 38. Esquema de los tipos de metamorfismo. Fuente: http://cienciasdelatierra2011.blogspot.com

La extensión de la aureola de contacto está en función de tres parámetros fundamentalmente: 1) de la dimensión del cuerpo intrusivo, 2) de la diferencia de temperatura entre el cuerpo intrusivo y las rocas encajantes y 3) de la reactividad de la caja.

La roca formada no tiene foliación y es casi siempre una cornubiana (de apariencia similar al basalto), también mármol y skarn.

6.5.2. Metamorfismo regional: 10^7 años.

Durante el levantamiento de las cordilleras existen grandes presiones dirigidas, aumento en la presión litostática y en la temperatura, produciendo cambios mineralógicos y texturales en las rocas.

Ocupa zonas muy extensas en la raíz de las cordilleras en cuerpos típicamente alargados, por lo que constituyen la mayoría de las rocas metamórficas.

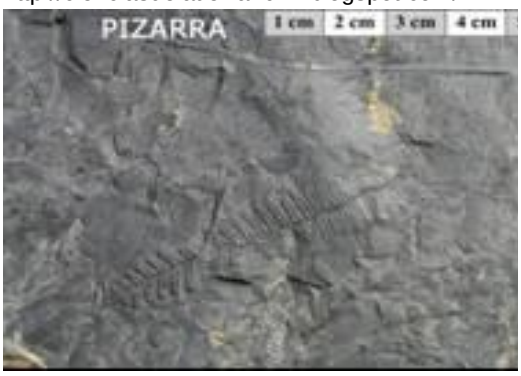
Las rocas presentan foliación y existe una gran variedad de intensidades del metamorfismo, pudiendo observar gran variedad de asociaciones minerales y texturas variadas. Figura 38.

PIZARRA:
Roca metamórfica foliada de grano muy fino y brillo mate, con tendencia a romperse en láminas. Es característica del bajo grado de metamorfismo.

Puede contener fósiles, comúnmente tiene colores oscuros producto del metamorfismo de arcillolitas con altos contenidos de materia orgánica que al sufrir metamorfismo se transforma en grafito.
Las Pizarras son típicas para el grado metamórfico bajo según WINKLER.

Contienen principalmente albita, clorita, epidota y actinolita.
Protolito: arcillolitas, rocas plutónicas y vulcanitas básicas, sobre todo gabros y basaltos.

http://cienciasdelatierra2011.blogspot.com/



http://www.ucm.es/info/diciex/programas/index.html. Universidad Complutense de Madrid

FILITA:

Roca metamórfica foliada de grano fino y brillo SEDOSO, los minerales no son identificables, aunque se observa esquistosidad.

El brillo sedoso está asociado principalmente con la presencia de filosilicatos tales como sericita/fengita y/o clorita.

www.regmurcia.com

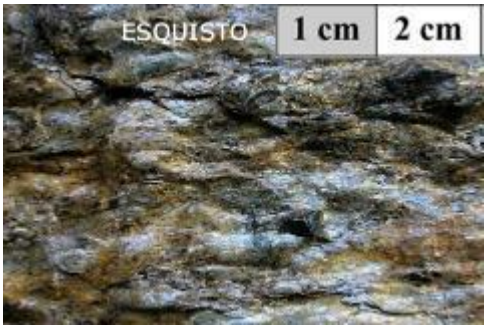
ESQUISTO:

Roca metamórfica foliada de grano MEDIO a GRUESO (los minerales se observan, aunque no se identifiquen), puede romperse en láminas o placas.

Bajo a medio grado de metamorfismo.

Existen numerosos tipos de esquistos: micáceos, cloríticos, moscovíticos, granatíferos, con sillimanita, con estaurolita.

Teniendo en cuenta que la clasificación de esquisto es básicamente una clasificación textural, normalmente se deja claro cuál es el mineral predominante.



http://www.ucm.es/info/diciex/programas/index.html. Universidad Complutense de Madrid

Esquisto micáceo: www.foro-minerales.com

ANFIBOLITA:

Roca metamórfica constituida principalmente por anfíboles.

Textura tipo esquistosidad.

Es del grado metamórfico medio a alto según WINKLER y se constituye principalmente de anfíbol.

Protolito: plutonitas y vulcanitas básicas , sobre todo los gabros y los basaltos.

www.foro-minerales.com

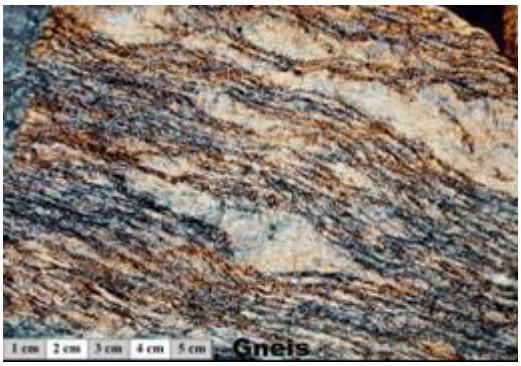
NEIS O GNEIS:

Roca metamórfica con bandeamiento, generada por alto grado de metamorfismo.

El tamaño de los minerales aumenta a medida que aumenta el grado de metamorfismo.

Los gneises se caracterizan por la alternancia de bandas claras y oscuras, producto de la segregación metamórfica.

http://cienciasdelatierra2011.blogspot.com/



http://www.ucm.es/info/diciex/programas/index.html. Universidad Complutense de Madrid

CUARCITA:
Roca metamórfica compuesta principalmente por Cuarzo recristalizado.

Es una roca típicamente sin foliación

www.prehistoriacuaternaria.net

MÁRMOL:
Roca metamórfica cristalina de grano grueso constituida en más del 50% de calcita.

Es una roca metamórfica no foliada.

http://cienciasdelatierra2011.blogspot.com/

Figura 39. Diferentes rocas metamórficas.
Compilación: María Isabel Toro Quijano

6.5.3. Metamorfismo Dinámico: 400°C – Tº ambiente.

La transformación de minerales se produce principalmente por la presión dirigida y un aumento pequeño de la temperatura, por lo que predominan los cambios texturales. Corresponde a un tipo de metamorfismo asociado a deformaciones de tipo mecánico cerca a las fallas activas.

En las zonas de falla existen dos tipos de comportamiento mecánico: en superficie la roca se tritura y en profundidad la roca se deforma (foliación). Esto da origen a tipos de

roca diferenciados básicamente por la posición en la zona de falla respecto a la profundidad.

- SALVANDA, también llamado jabón de falla.
- BRECHA: Roca metamórfica generada por quebramiento en zona de falla cerca de superficie.
- MILONITA: Roca metamórfica generada por deformación en zona de falla y en profundidad, se observa la orientación de algunos minerales.
- MÁRMOL.

VII. ANOTACIONES DE GEOMORFOLOGÍA.

7.1. BREVE INTRODUCCIÓN.

La geomorfología explica la génesis y la evolución de las formas del relieve y el modelado de la superficie terrestre.

Es la disciplina que se relaciona estrechamente con factores pedogenéticos formadores del suelo (clima, relieve, material parental, tiempo).

En especial para la Ingeniería Agronómica suministra datos de carácter práctico: condiciones de drenaje, susceptibilidad a la erosión, presencia de materiales de construcción.

7.2. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS.

La evolución del paisaje tiene un desarrollo complejo bajo las fuerzas de erosión o denudativas (exógenas) y tectónicas o de levantamiento (endógenas). Los procesos geomorfológicos, es decir aquellos que moldean la superficie se pueden definir brevemente de la siguiente manera:

7.2.1. Denudación.

A su vez se divide en:

- METEORIZACIÓN: Desintegración o alteración de la roca (in situ o ex situ)
- EROSIÓN: Arranque de roca o materiales meteorizados, implica pérdida progresiva de elementos constitutivos del suelo.

7.2.2. Agradación o Acumulación.

Es una consecuencia de la denudación y contribuye a la nivelación general de la superficie terrestre. La acumulación, excepto donde se involucra el agua subterránea, es el resultado de una pérdida en la capacidad de transporte de los materiales.

7.2.3. Diastrofismo.

Es un proceso endógeno, porque las fuerzas responsables se originan a cierta profundidad. El diastrofismo eleva o construye la superficie terrestre, impidiendo que los

procesos de degradación puedan reducir finalmente la superficie terrestre al nivel del mar. Se divide en:

- Procesos orogénicos: Fuertes movimientos horizontales que provocan la deformación y plegamiento de los sedimentos o rocas hasta formar grandes cordilleras o plegamientos.
- Procesos epirogénicos: Movimientos lentos de hundimiento o levantamiento producidos por fuerzas verticales, son apreciables en las regiones costeras (cambios en el nivel del mar)

7.2.4. Pliegues.

Son deformaciones u “ondulaciones” de las rocas desarrollada en profundidad, donde tienen un comportamiento dúctil (compresión). Se presentan en rocas que presenten disposición en capas (estratificación o foliación). La respuesta del material depende de la temperatura, la presión confinante y la presencia de fluidos. Figura 40.

Tipos: Dependen de la intensidad de la deformación y de las características propias del material: simétricos, asimétricos y tumbados, entre otros.

Clasificación: Anticlinales, sinclinales, monoclinales.

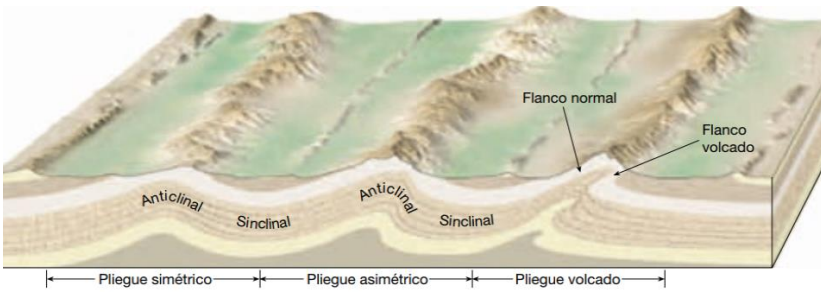


Figura 40. Diagrama simplificado la clasificación de los pliegues
Fuente: Tarbuck y Lutgens, 2005.

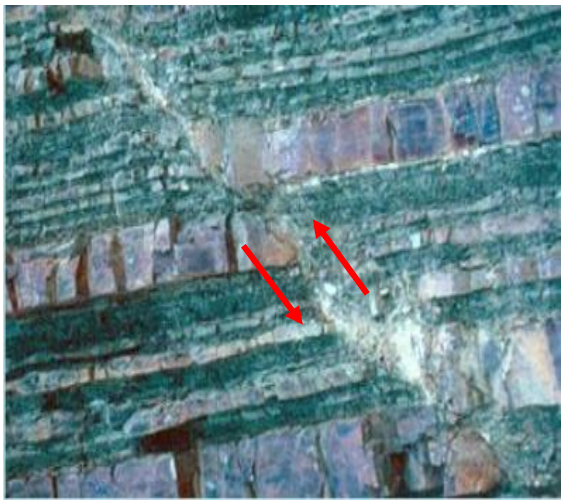
7.2.5. Fallas.

Ruptura en la corteza terrestre a lo largo de un plano, con desplazamiento a ambos lados del plano de falla (Figura 41) y se sobrepasa el límite de resistencia mecánica de las rocas por lo que se genera deformación de éstas. Cuando el esfuerzo tectónico ocurre cerca de la superficie, las rocas se fracturan o trituran produciendo lo que geológicamente se conoce con el nombre de salbanda o jabón de falla, un material arcilloso que se encuentra a ambos lados de la falla; es importante aclarar que la extensión de esta deformación a ambos lados del plano de falla puede alcanzar desde algunos centímetros hasta algunos kilómetros.

Los tipos de fallas dependen de la posición del plano de falla: verticales, horizontales e inclinadas.

Las fallas con desplazamiento vertical se dividen en normales e inversas. Las fallas normales se caracterizan porque el bloque superior desciende y generalmente tienen inclinaciones mayores a 60°, aunque pueden ser horizontales; son el resultado de esfuerzos de tensión que alargan la corteza por lo que son comunes en centros de expansión (bordes tectónicos divergentes). En las fallas inversas y cabalgamientos el bloque superior asciende e implican procesos de acortamiento cortical como resultado de esfuerzos compresionales por lo que son comunes en zonas de subducción y bordes convergentes. La diferencia principal entre éstas es que en las fallas inversas la inclinación es mayor a 45° mientras que en los cabalgamientos suele ser menor a los 45°.

Falla Normal



Falla Inversa

Figura 41. Ejemplos de fallas normal e inversa.
Fuente: PhD. Gaspar Monsalve Mejía, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Las fallas con desplazamiento horizontal pueden ser sinestrales y dextrales en las que el movimiento se produce de forma paralela al plano de falla como resultado de esfuerzos cortantes. Suelen ser lineales y de gran tamaño, compuestas por varios tramos paralelos entre sí que pueden servir de control estructural para las corrientes.

7.2.6. Diaclasas

A diferencia de las fallas, en las diaclasas se produce ruptura sin desplazamiento apreciable, y suelen producirse en grupos que son aproximadamente paralelos[28], la mayor importancia de estas estructuras para el Ingeniero Agrónomo radica en que favorecen la infiltración de agua a niveles más profundos y por lo tanto aceleran la formación de suelo a partir de las rocas con diaclasas, así mismo, pueden favorecer la ocurrencia de deslizamientos.

7.2.7. Vulcanismo.

Se refiere a la salida de magmas a la superficie terrestre modificándola.

ACTIVIDAD DEL ESTUDIANTE
Consultar el papel del vulcanismo como agente geomorfológico
● **Defina los tipos**
● **Trate de relacionarlos con el proceso edáfico**

7.2.8. Efectos Topográficos de los Organismos.

Los organismos vivos incluyendo el hombre, modifican profundamente la superficie terrestre.

7.2.9. Influencia del clima sobre los Procesos Geomórficos.

Existe una estrecha relación entre las condiciones climáticas y la formación de relieve. Por ejemplo, las calizas en regiones húmedas son frágiles, pero en regiones secas son fuertes y dan origen a acantilados, por lo tanto, la topografía en rocas calcáreas de zonas húmedas es redondeada y en zonas secas tiende a ser angulosa.

Dentro de una región climática puede haber variaciones locales de los factores climáticos, de esta manera dan origen a diferencias geomorfológicas.

[28] El origen de las diaclasas se da por contracción al cristalizar las rocas ígneas o por descompresión y cambios en la distribución de esfuerzos.

7.3. GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL.

En casi todo el mundo, las aguas de escurrimiento son el agente geomórfico predominante, exceptuando áreas glaciares.

7.3.1. Ríos y Valles.

El término valle se ha utilizado para definir depresiones de origen tectónico: Valle de la Muerte, Valle del río Jordán, que son accidentes no generados por la erosión pluvial.

En sentido estricto valle es LA PORCIÓN DE LA TIERRA COMPRENDIDA ENTRE UNA O VARIAS MONTAÑAS, CUYAS FORMAS SON DEFINIDAS POR LA ACCIÓN DEL AGUA CORRIENTE, por lo general están atravesados por ríos permanentes o estacionales. LA FORMACIÓN SIEMPRE ES COMPLEJA.

Ejemplo: VALLE DE LA MUERTE:

- Localizado al E de la Sierra Nevada (USA)
- Temperatura promedio= 50°C
- Precipitación promedio= 48mm/año
- Evaporación promedio= 3 800 mm/año
- Altura sobre el nivel del mar= - 85 msnm (sitio más bajo del hemisferio Occidental)
- Área total= 13 000 km2

7.3.2. Corriente.

encauzado de cualquier tamaño, desde el arroyuelo más pequeño hasta el río más grande. Se prefiere el término río para referirse a una corriente principal a la cual fluyen varios afluentes.

7.3.2.1. Velocidad de una corriente.

Determina si el flujo es laminar o turbulento y por lo tanto la capacidad de erosión.

- Pendiente
- Caudal
- Características del cauce: forma (menor perímetro) y rugosidad

7.3.2.2. Desarrollo de un Valle.

- Profundización: Mediante acción hidráulica; abrasión del piso del valle; perforación de hoyos de remolino a lo largo del piso del valle y en la base de las cascadas y meteorización del lecho del río. Figura 42 (a).

- Ensanchamiento: Por erosión lateral y el subsecuente desplome de las bancas por acción de la corriente al socavar la parte inferior. Figura 42 (b).

- Alargamiento: Por erosión remontante, aumento del tamaño de sus meandros y por ascenso o descenso del nivel del mar. Figura 42 (b).

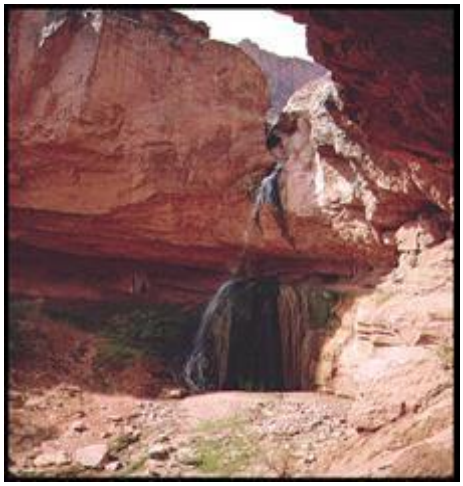


Figura 42. a) Profundización de un valle. b) Valle del río Sinú, inundaciones 2007.
Fuente: a) Internet. b) Vista aérea captada por María Isabel Toro-Quijano.

7.3.2.3. Nivel Base.

Es la menor cota a la cual una corriente puede erosionar o profundizar el lecho, representa el límite inferior de la erosión vertical.

- Nivel base absoluto: corresponde al nivel del mar
- Nivel base local o transitorio: lagos, capas de rocas resistentes o corrientes fluviales que actúan como nivel base para sus afluentes.

ACTIVIDAD DEL ESTUDIANTE
Consultar las implicaciones de los cambios en el nivel base
● **Y sus consecuencias en el nivel freático**
● **Y las consecuencias en los procesos erosivos superficiales**

7.3.2.4. Capacidad de Transporte.

Es la carga máxima de partículas sólidas que puede transportar una corriente (función de la velocidad y del caudal). COMPETENCIA: Es el tamaño de grano máximo que una corriente puede transportar. La VELOCIDAD indica el tamaño de grano máximo. LA COMPETENCIA aumenta en un valor igual al cuadrado de su velocidad, si la velocidad se duplica, la fuerza del impacto del agua aumenta cuatro veces.

A medida que aumenta el caudal, lo hace la cantidad de sedimento suspendido. El aumento es exponencial: si el caudal aumenta 10 veces, la carga suspendida puede aumentar en un factor de 100 o más.

7.3.2.5. Acumulación Fluvial.

Es el proceso constructivo sobre la superficie terrestre que resulta del depósito de materiales que han sido transportados por el agua como agente principal de transporte y sedimentación. La acumulación en muchos casos es el resultado de una pérdida de la capacidad de transporte de la corriente como resultado de la disminución de velocidad del flujo, pero también puede ser consecuencia de un exceso de la carga en el flujo. Figura 43.

La carga en una corriente se refiere al tipo de movimiento de las partículas dentro del flujo, de esta manera la carga puede viajar suspendida en el flujo (carga en suspensión) en el fondo de la corriente (carga de fondo) donde se mueve por saltación – arrastre – rodamiento o la carga puede estar disuelta como iones dentro del flujo (carga en solución).

Figura 43. Tipos de carga en una corriente y las formas de movimiento.
Fuente: https://geolodiaavila.com/tag/sedimentacion/

7.3.2.6. Relieves resultantes de la acumulación fluvial.

7.3.2.6.1. Llanura de inundación.

Es el área del río cuyo objetivo fundamental es acumular los excesos de caudal durante épocas de niveles máximos (crecientes). Consta de las siguientes partes: el dique, las cubetas de inundación y de desborde (basin) y las ciénagas (Figura 44).

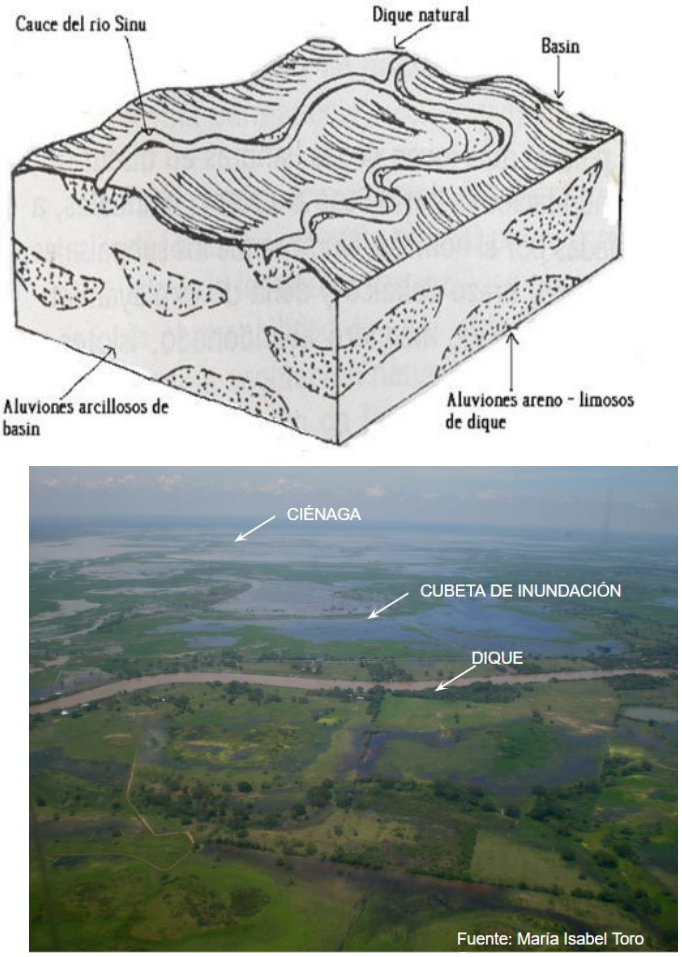


Figura 44. a) Diagrama simplificado de la distribución de geoformas en el río Sinú b) Valle del río Sinú durante las inundaciones de 2007.
Fuente: a) Reyes y Torres, 2005. b) Vista aérea captada por María Isabel Toro-Quijano.

La principal característica de los materiales en una llanura de inundación es la distribución granulométrica, teniendo en cuenta que durante épocas de caudales máximos, el flujo transporta en suspensión partículas que pueden alcanzar un tamaño arena, cuando la lámina de agua se desborda sobre las orillas, al perder velocidad, el flujo deposita inicialmente las partículas de mayor tamaño (arenas) como consecuencia de la pérdida de capacidad de transporte; después deposita los limos y finalmente las arcillas.

Lo anterior no significa que todas las partículas de tamaño limo se distribuyen a la misma distancia de la orilla, dado que el caudal de desborde en todas las inundaciones es diferente, la distribución granulométrica se da en la horizontal, pero no siempre en la vertical.

Esta es la razón por la cual, el dique está constituido principalmente por material arenoso, y constituye una pequeña elevación al lado de las orillas. La intervención del dique con estructuras impermeables como carreteras (piense en la vía Montería – Santa Cruz de Lorica) modifica las condiciones de drenaje naturales y la dinámica del sistema fluvial, condiciones no sólo físicas sino químicas de los suelos (investigue sobre los suelos sulfatados ácidos). Figura 44.

7.3.2.6.2. *Abanicos aluviales o conos de deyección.*

Se forman cuando la corriente termina su curso en el valle principal; el cambio brusco de pendiente en la corriente determina una disminución significativa en la capacidad de transporte, lo que origina DEPOSITACIÓN DE LA MAYOR PARTE DE LOS MATERIALES TRANSPORTADOS.

- Tiene forma de abanico o cono
- El caudal líquido[29] se distribuye en un sinnúmero de cauces pequeños en torno al punto de intersección de la corriente con el valle principal
- Textura bloques gruesos y gravas en el ápice y materiales finos en su parte más baja (determinando las condiciones de drenaje).

7.3.2.6.3. *Deltas.*

Se forman cuando un río DESEMBOCA EN UN LAGO[30] O EN EL MAR y deposita la carga sólida por efecto de la disminución en la capacidad de transporte (disminución de la Velocidad).

- Tiene forma de abanico
- La corriente al llegar al mar deposita en primer lugar el material más grueso (ápice) y el material más fino es llevado más allá de la desembocadura.

[29] Es necesario aclarar que en una corriente existen dos tipos de caudal: el caudal líquido, compuesto por el agua y el caudal sólido que corresponde a la carga de sedimentos.

[30] Como es el caso del Mar de La Plata en Argentina.

Es importante aclarar que no todos los ríos tienen deltas, esta es una característica geomorfológica que depende del caudal sólido. Figura 45.

Figura 45. Vista aérea del delta del río Sinú durante las inundaciones de 2007.
Fuente: Vista aérea captada por María Isabel Toro-Quijano.

7.3.2.6.4. *Relieves resultantes de la dinámica costera*

El agua marina actúa como agente geológico y realiza procesos de meteorización, erosión, transporte y sedimentación. El Oleaje y las corrientes marinas movilizan y redistribuyen sedimentos. La mayor parte de estos sedimentos procede de los continentes y llega al mar a través de sistemas fluviales, en zonas tropicales los sedimentos autóctonos son importantes como resultado de la erosión de los corales.

7.3.2.6.4.1. Relieve submarino.

Es semejante en todos los océanos, la diferenciación se hace por variación de la pendiente: plataforma continental, talud, llanura abisal, dorsal oceánica. Figura 46.

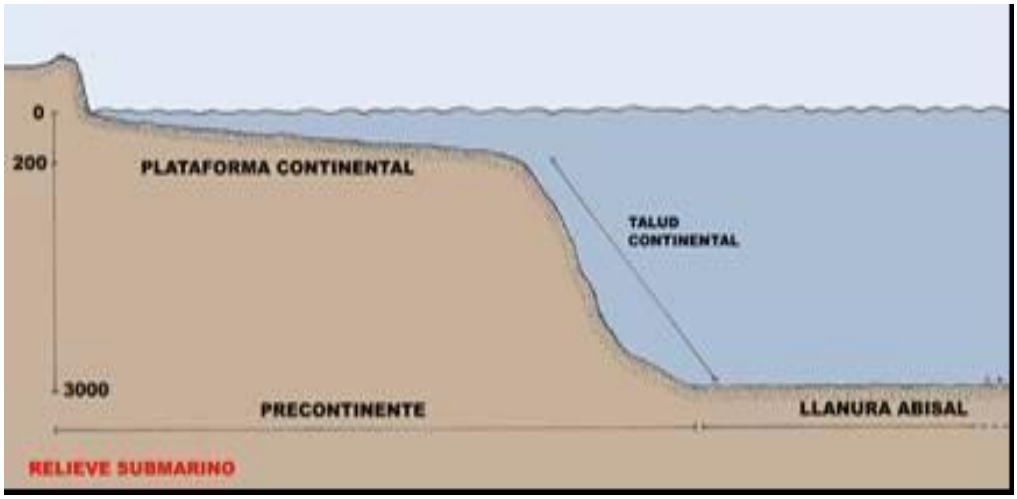


Figura 46. Diagrama del relieve submarino
Fuente: Tarbuck y Lutgens.

7.3.2.6.4.2. Relieve costero.

Los procesos de la dinámica costera son más efectivos en las zonas litorales, lo cual se traduce en una variación rápida espacial y temporal de las costas.

El oleaje, las corrientes costeras, como la deriva litoral y las mareas, producen erosión en las áreas expuestas a la máxima energía de estos flujos y la redistribución continua de los sedimentos.

7.3.2.6.4.3. Geoformas erosivas.

Acantilado: Pendiente mayor de 20° que da al mar, y es producido por éste mediante la acción erosiva que las olas producen en la base mediante socavación (Figura 47). El origen de esta geoforma es una combinación entre la tectónica activa y la meteorización física. En Colombia se distribuyen así: Caribe, 32% de la línea de costa corresponde a acantilados, mientras que en el Pacífico 27% de la línea de costa son acantilados.

Figura 47. Acantilado erosivo en el municipio de Los Córdobas
Fuente: Fotografía MSc. María Isabel Toro-Quijano.

7.3.2.6.4.4. Geoformas de acumulación.

- **Deltas:** Progresión de sedimentos continentales, producto del gran caudal sólido de un río, son típicas donde la amplitud de las mareas no es significativa (Figura 45).
- **Estuarios:** Cuerpo de agua costero semicerrado con una conexión libre con el mar y dentro del cual el agua del mar se diluye significativamente con el agua dulce proveniente del drenaje terrestre.
- **Playas:** Zona de material grueso granular no consolidado, se extiende hacia tierra desde la más baja marea hasta un marcado cambio en el material o hasta la línea. de vegetación permanente. En Colombia se distribuyen así: en el Caribe, el 68% de la línea de costa corresponde a playas, mientras que en el Pacífico el 73% de la línea de costa son playas.
- **Flecha:** Zona de material grueso granular no consolidado, unido al continente en uno de sus extremos. Evidencia la dirección neta de la deriva litoral (corriente que transporta los sedimentos) dado que en el sentido en el que se forman o crecen las flechas coincide con la dirección neta de la deriva litoral.

Es importante indicar que la ocurrencia de las playas depende de la disponibilidad de material arenoso proveniente de la descarga fluvial, si analizamos el litoral cordobés desde el municipio de Los Córdobas hasta el municipio de San Antero, la característica geomorfológica principal son los acantilados y no las playas, es decir que predominan las formas erosivas frente a las de acumulación. Independientemente de cuántos espolones sean construidos, el balance de sedimentos no permite la acumulación de arenas.

A manera de resumen y ejemplificación de lo antes expuesto, se presenta la Figura 48.

Modelan las formas del relieve, se deben a la acción de diversos procesos que ocurren sobre la Tierra, mismos que corresponden con *los procesos sedimentarios*

Estos procesos forman parte del ciclo de las rocas y están en gran medida controlados por el ciclo del agua y el clima dominante en cada región. La forma como ocurren es clave para comprender los diversos ciclos bio-geoquímicos. Ver: Panorámica de procesos sedimentarios & modelado relieve

Agentes que modelan el paisaje: gravedad, hielo, agua corriente, viento, oleaje y corrientes marinas. Cada uno actúa en determinados **ambientes** y da lugar a **procesos** característicos.

Los procesos exógenos (***"modeladores" ó destructivos"),*** dan lugar a **dos tipos de relieve**: las **formas erosivas**, (donde domina la erosión o remoción de material) y las **formas acumulativas** (donde domina la acumulación de material).

Agentes	*Procesos / Ambiente*	Formas del Relieve Erosivas	Formas del Relieve Acumulativas
Gravedad	*deslizamiento de masas, inestabilidad laderas*	"cicatrices de deslizamientos"	Caídas/flujo de detritos, avalanchas, deslizamientos
Hielo	*Glaciares*	circos, horns, aristas, valles en U	Morrenas, drumlins, eskers
Agua	*Fluviales* (fluvio-aluvial)	circos y terrazas de erosión, valles en V	Abanicos aluviales, terrazas de acumulación, bancos de ríos
Viento	*Eólicos* (desértico)	Erosión diferencial, yardangs, facetas de erosión, pavimento del desierto	Dunas, barjanes, loess
oleaje y corrientes marinas	Costero/mixto	Terrazas de erosión y acantilados	Terrazas de depósito, bancos de arena, tómbolos, deltas
oleaje y corrientes marinas	Plataforma y talud continental	Arrecifes, (atolones, guyots)	Abanicos abisales

Figura 48. Resumen de las Formas del relieve erosivas y acumulativas
Fuente: UNAM.

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO, EXPERIENCIAS EN EL CARIBE COLOMBIANO

Texto de apoyo para un curso de Edafología Física

MÓDULO II: CONSTITUCIÓN FÍSICA DEL SUELO

Iván Darío Bustamante Barrera
María Isabel Toro Quijano
Mónica Cecilia Cantero Benítez

2022

Descripción de un Perfil de Suelo, Canalete, Córdoba, Colombia

Foto Robert Smith Valencia Agresoth. 2018

DIEZ LUSTROS

Después de casi diez lustros
de andar mirando, excavando, estudiando el suelo.
De amarlo y enseñar a mis discípulos a hacerlo.
Finalmente me siento viejo y cansado
con ya muy pocas fuerzas para acariciarlo,
con mis manos, pies y todos mis demás sentidos
en días de febril trabajo deductivo

Dios me ha ordenado: ¡Tú tienes que hacer algo más!
Y a su vez. Yo me he preguntado: ¿Qué puedo hacer?
La pluma entre mis manos se hace frágil y blanda,
derritiéndose en palabras de cariño,
de sincera admiración hacia la Madre Natura.
A todo lo que, en el Universo, el Dios Bueno
un día nos regaló a todos los vivientes.
En este Paraíso que Él nos dio.
Y que más de uno
no cuida con cierto esmero.

Por eso mi deseo vital consiste en que
al final de mi existencia, pueda yacer tranquilo
en la colosal y sobrecogedora eterna noche
que reina en la inmensidad
del oscuro, insondable y retador.
Tan enigmático como sorprendente,
cual es ese medio poroso,
al cual toda la gente, sabios e iletrados,
sencillamente llaman suelo.

Iván Darío Bustamante Barrera
Ivándebebé
Abril 18 /2022.

VIII. INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO

"Y DIOS tocó la roca y
nos regaló el suelo"
Bustamante, 2007.

El suelo es un cuerpo natural que puede generar las más variadas percepciones y sentimientos, mientras para el ama de casa es ese material absurdo que echa a perder la limpieza de los pisos de su casa y percude la ropa de sus niños; para el Geólogo constituye el producto de alteración de las rocas que conforman la corteza terrestre; para el Ingeniero de Minas constituye el material que, en buena parte de los casos, le separa de alcanzar el mineral de su interés profesional; para el Ingeniero Constructor es el recurso que puede facilitarle en algunas ocasiones la fundación y asiento de sus obras, o bien requerir de todo su ingenio para hacerlo objeto de diferentes y variados trabajos de tipo geotécnico que garanticen que ese material proporcione el grado de competencia que asegure la estabilidad de la construcción proyectada. Entretanto, para el Ingeniero de Producción Agrícola representa el recurso-sustrato básico y primario de la empresa agropecuaria y para el productor agrario constituye, bien, la causa de su zozobra y preocupación continua por la limitante que puede entrañar a la productividad de su trabajo, o bien, su motivo de orgullo y aparente "tranquilidad económica". De otro lado, el profesional de las ciencias ambientales ve al suelo como el elemento primario del medio físico que da base y sustento a los diferentes ecosistemas y exhibe considerable sensibilidad al influjo de los diferentes factores que actúan sobre ellos.

Ensayemos ahora una primera definición de lo que es el suelo, podemos entonces visionarlo como un material mineral en diferentes grados de meteorización o edafización, el cual se encuentra en íntima entremezcla con materiales orgánicos, provenientes de restos, secreciones y deyecciones de origen animal y vegetal en una variada gama de niveles de descomposición, evolución y labilidad. Dichos materiales sólidos se encuentran en un arreglo espacial de alta variabilidad en dimensiones, direcciones y continuidad de sus espacios vacíos, los cuales imparten un carácter poroso al sistema, en el cual se encuentran circulando permanentemente y a diferentes velocidades diferentes fluidos, líquidos y gaseosos, de características químicas desde las más simples, iónicas, hasta complejas cadenas carbonadas, pasando por sales minerales

comunes en las diferentes zonas, en algunas más abundantes que en otras, en obediencia a diversas condiciones del entorno.

8.1. EL SUELO COMO INDIVIDUO.

El suelo es un cuerpo natural complejo por cuanto constituye el resultado de la acción conjunta y continua de los cinco factores naturales que intervienen en su formación, cuales son:

a. El material de origen, roca madre o material parental;

b. El clima del entorno;

c. La acción de los organismos vivos, incluyendo plantas, animales y al hombre;

d. La influencia del relieve y forma del terreno.

e. El tiempo que han actuado los cuatro factores antes señalados.

De lo anterior se desprende que el suelo nunca será un producto acabado y definido, sino por el contrario siempre estará sometido a una continua evolución que bien podrá marchar incrementando o deprimiendo su capacidad productiva, por lo que es de vital importancia la gestión que el hombre haga del mismo, con miras a que él incremente o al menos conserve las propiedades y características que lo califican como sustrato fundamental para la continuidad de la vida en el planeta.

El suelo es la corteza excitada de la tierra, en donde continuamente se dan los procesos más diversos, con diferentes tendencias e intensidades, pero confluyendo todos a hacer de él el sustrato en el cual prospera una flora, captadora y transformadora de la energía del cosmos haciéndola aprovechable para toda la fauna, a través de las más variadas cadenas alimenticias, en las cuales interviene el hombre de forma diversa, atendiendo a diferentes objetivos, por lo cual se podrá afirmar que el suelo constituye el fundamento del establecimiento y desarrollo de la especie humana, siendo por tanto de innegable importancia la dimensión social y económica del mismo, consideradas la cuarta y quinta dimensiones del suelo, en adición a las tres dimensiones físicas que le son inherentes, dada su condición de cuerpo natural.

El suelo es entonces un medio de vida, que además de todo lo señalado anteriormente, reviste características de continuidad cubriendo por tanto toda la superficie del planeta. Sin embargo, en ese extenderse del suelo en todas las direcciones cardinales resulta estando sometido a diferentes intensidades de acción de los cincos factores implicados en su formación, por lo tanto, el grado de desarrollo, el

nivel de productividad y en resumen, los atributos del suelo cambiaran a través de los diferentes rumbos que se consideren. Por lo anterior se puede afirmar que el suelo es un medio heterogéneo, o lo que es lo mismo, cada sitio geográfico exhibe un suelo diferente al que presenta el sitio vecino. Existe entonces una relación biunívoca entre sitio terrestre y el suelo que lo cubre, de allí que se afirme que el suelo es el primer elemento cartografiable de la naturaleza. Esto es, el suelo es un individuo, que como tal requiere un tratamiento configurado de acuerdo con las particularidades que presenta en cada sitio y por tanto fija la base de la denominada “Agricultura de Precisión”

8.2. EL SUELO, UN SISTEMA CERRADO.

Al ser un medio de vida heterogéneo, el suelo brindará a través de las distancias diferentes oportunidades para que determinadas formas de vida vegetal se establezcan en él, y dado que el suelo es el cuerpo natural poroso que capta, almacena y cede humedad, determina junto con el agua, la composición y diversidad florística del ecosistema, la cual a su vez establecerá, por el principio de oportunidad alimenticia y de medios de anidamiento y recuperación, la composición y diversidad faunística del ecosistema. No obstante, la flora y la fauna a su vez actuaran sobre el suelo y el agua, y de producirse alguna alteración en el comportamiento de alguna de ellas, por ejemplo, por talas, quemas, cambio climático, caza o reproducción exagerada o acción de enemigos naturales, los dos recursos llegarán a recibir tal influencia, en razón a que la composición o composiciones iniciales de los dos componentes que se discuten ha o han sido alteradas, y ambos cambiarán su comportamiento, buscando ahora un nuevo nivel de equilibrio con la flora y la fauna existente. De allí entonces que se pueda afirmar que el suelo es el principio y fin, el alfa y el omega del ecosistema, ya que, si bien inicialmente lo determina, también es impactado por todos los eventos que en él ocurran. El suelo es un sistema cerrado, el cual a la vez que impronta los seres que viven en él, al mismo tiempo, tales seres marcan la evolución y desarrollo del mismo.

8.3. EL SUELO Y SU EQUILIBRIO CON LOS FACTORES DE FORMACIÓN.

Cuando el hombre entra al ecosistema y con el objetivo de ampliar la frontera agrícola inicia la aplicación progresiva de tecnología, bajo la forma de desmonte, desbroce y adecuación de terreno, avenamiento y riego, produce un impacto en todos los componentes del sistema, que entonces en ese estado de alteración, buscan un nuevo nivel de equilibrio, y ahora el ecosistema inicial se convierte en un agroecosistema; en estas nuevas condiciones el suelo conserva sus características de principio y fin de toda actividad productiva que en el agroecosistema se desarrolle, y por tanto se constituye en factor central de la oferta ambiental que dicho entorno le presenta al

hombre, y a la cual él debe ajustar su demanda productiva. Bajo el enfoque que se acaba de discutir, el suelo constituye entonces el recurso primario y fundamental de toda actividad agropecuaria.

En su permanente evolución, el suelo busca estar en un equilibrio dinámico y complejo con todos los factores activos del entorno presentando un conjunto de atributos, producto de dicho nivel de equilibrio; se dice entonces que el suelo presenta un determinado grado de evolución o madurez, acorde con la intensidad de acción de tales factores activos, en razón a que se mantiene en “equilibrio metastable”, equilibrio con múltiples factores a diversos niveles de intensidad espacial y temporal, con las condiciones del entorno.

8.3.1. El Perfil del suelo.

Un primer contacto con el suelo, en un barranco o en un talud de carretera indica como él está conformado por una serie de capas, más o menos paralelas a la superficie del terreno, con diferentes colores, apreciaciones de porosidad, presencia de raíces, rasgos de actividad de macroorganismos, etc.; estas capas reciben el nombre de horizontes, y al conjunto de la totalidad de los mismos se le denomina perfil de ese suelo. Precisamente, las condiciones de ese perfil característico de ese suelo son las que señalan su individualidad, por lo que cabe, a esta altura de la discusión establecer que, si bien existen suelos semejantes, nunca se dan dos suelos idénticos, corroborando con ello el concepto de individualidad, materia central de éste capítulo.

El grado de desarrollo y nitidez de los horizontes constituye un criterio inequívoco del nivel de evolución de cada suelo. Tratar de puntualizar cuantos horizontes puede llegar a tener un perfil de suelo puede resultar ser una tarea casi imposible, así que al nivel de tratamiento del asunto que nos ocupa bastará por el momento con señalar que los suelos en general presentan tres tipos de horizontes, nominados como A, B y C. Los horizontes A son los más superficiales y se caracterizan por su coloración más oscura, producto de la acumulación de la materia orgánica en ellos, la cual proviene de la descomposición de raíces que mueren en esos primeros centímetros del perfil y de la serie de residuos animales y vegetales que se descomponen sobre la superficie; sin embargo el grado de oscuridad inicial del horizonte A disminuye gradualmente con la profundidad, a consecuencia de otra característica propia del mismo, cual es el lavado más o menos intenso de partículas finas y elementos químicos que en él se da. Inmediatamente debajo se observa el horizonte B, tomado del vocablo inglés “bench”: sumidero, cuya característica dominante es ser el nivel donde se acumulan, con mayor o menor intensidad, los diferentes materiales que se han lavado desde el horizonte A; por tal razón el horizonte B tiende a tener coloraciones intensas, más no necesariamente oscuras, aunque también pueden darse en algunas ocasiones, tal es el caso de los

espodosoles y los ultisoles; la presencia de raíces en él es mucho más escasa que en el A, y a simple vista es notorio que la porosidad en éste ha reducido su diámetro. Finalmente, en lo más profundo del perfil se encuentra el horizonte C, constituido por materiales desmenuzados, pero que, o bien se separan el uno del otro con suprema facilidad, o bien se encuentran firmemente unidos conformando una masa compacta, la cual al ser partida por las manos y vuelta a unir no muestra con claridad la línea de sutura, como si se tratara de una masa de jabón.

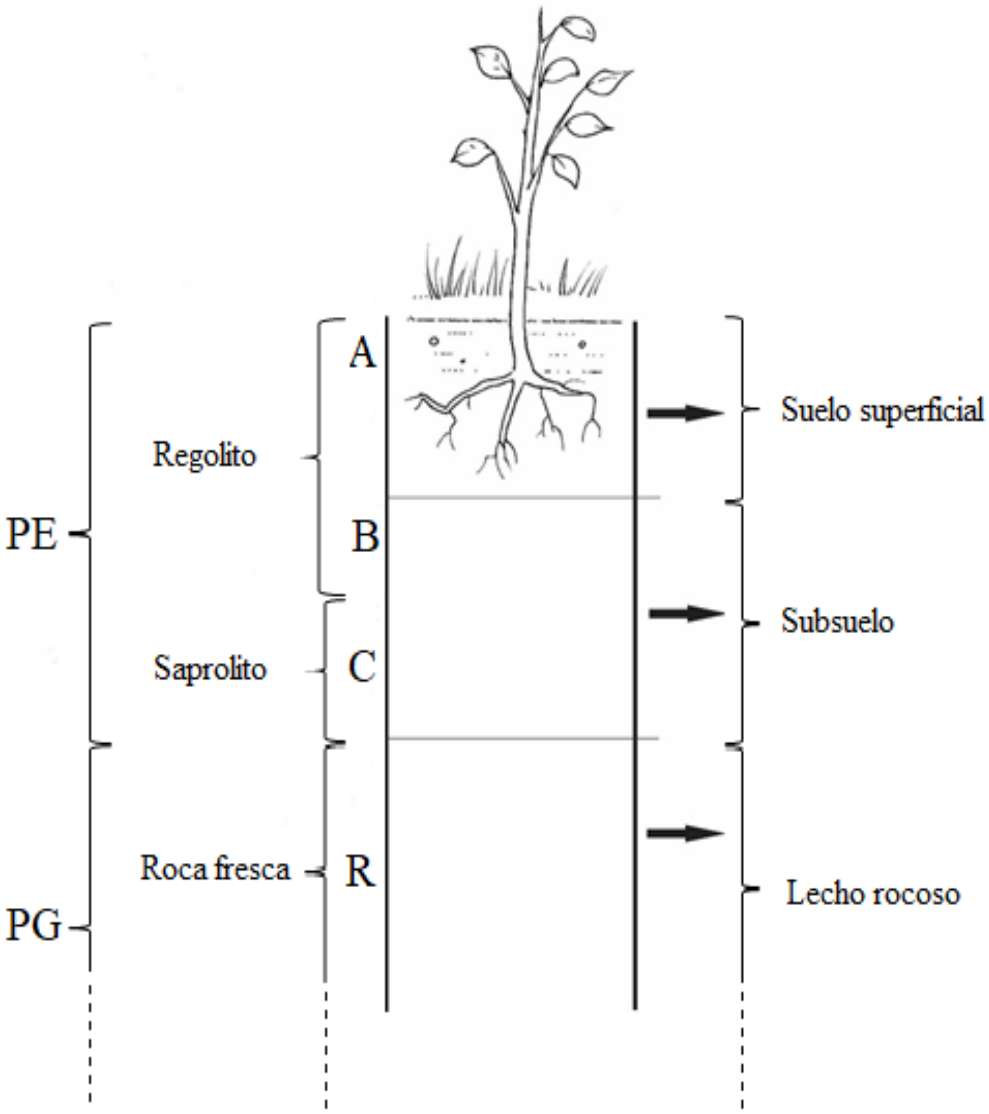
En el perfil de suelo se dan entonces tres horizontes característicos o centrales, A, B y C, entre los cuales pueden encontrarse y ser diferenciados o no otros que actúan como transicionales entre los tres primeros y que por la misma razón reciben el nombre de intermedios o de transición.

8.3.2. Suelos Trasportados y Residuales.

Subyaciendo al horizonte C es normal encontrar roca fragmentada y en algunas ocasiones maciza, y se dice que allí termina el perfil de suelo o perfil pedológico y comienza, hacia profundidades mayores, hasta el centro de la tierra, el perfil geológico o estratigráfico, que bien puede o no, a partir de la roca más superficial de la columna estratigráfica, haber dado origen al suelo que le suprayace; cuando el suelo proviene de dicha roca se le denomina residual, y en el caso en el cual no guarde ninguna relación con dicha roca, y simplemente yazca sobre ella se dice que se trata de un suelo transportado, bien por acción del agua, la gravedad o el viento, recibiendo respectivamente los nombres de aluvial, coluvial o eólico y algunas otras nominaciones alusivas al agente o agentes combinados de trasporte de materiales.

La razón de la existencia de estos dos tipos de suelos estriba en el hecho de que en la evolución de la corteza terrestre siempre se da la confrontación de dos procesos inherentes a la dinámica de esta, cuales son, la meteorización y la erosión.

La meteorización o intemperismo hace referencia a la acción de los agentes meteorológicos, o en su caso, de los agentes que actúan en la intemperie, con el fin de alterar la roca fresca, convertirla en roca saprolizada o “saprolito”, el cual merced a la acción de los agentes bióticos y climáticos dará lugar al “regolito” o suelo. A esta altura de la discusión debe establecerse claramente que, mientras en la roca fresca, tanto más profunda mientras más intenso sea el clima circundante, solo se encuentran minerales primarios, esto es, inalterados, y comienza desde allí hacia profundidades mayores el perfil geológico o estratigráfico, Figura 49. En el saprolito coexisten minerales primarios y secundarios, o alterados, y desde dicho nivel hacia profundidades cada vez menores hasta la superficie se extiende el perfil edafológico.



PE: Perfil Edafológico
PG: Perfil Geológico o Columna Estratigráfica.

Figura 49. Perfiles en el estudio del suelo. I.D. Bustamante B. R.S. Valencia A.

Ahora bien, la erosión hace relación al proceso mediante el cual, el viento y/o el agua disgregan el suelo que ha generado la meteorización y posteriormente lo trasportan, partícula a partícula, a otro lugar. Así entonces, los suelos residuales se dan "in situ" como relicto ó residuo de la acción de la meteorización y la erosión en un sitio determinado del terreno. De otro lado, los suelos trasportados se conforman con los materiales que habiéndose originado en un sitio son desprendidos de allí por acción de la erosión y se trasladan, por agentes como el agua, el viento, el hielo y la gravedad a otro punto diferente.

8.3.3. Pérdidas y Ganancias.

La anterior discusión nos lleva obligadamente a establecer los dos conceptos, íntimamente relacionados entre sí, cuales son, las pérdidas y las ganancias. En las Ciencias de la Tierra se aplica el concepto de pérdida al hecho de salida o egreso de materiales desde un sitio determinado de la corteza terrestre, en tanto que el concepto de ganancia se aplica al ingreso o llegada de materiales a un punto dado, normalmente, en atención a la acción de la gravedad, las zonas altas se asocian con zonas de pérdida, en tanto que las bajas corresponden a zonas de ganancia. En las zonas de pérdida los suelos son claros, poco profundos, con baja dotación de nutrimentos y materia orgánica, y exhiben texturas gruesas, por lo que su drenaje natural puede ser rápido, muy rápido y hasta excesivo. De otro lado, en las zonas de ganancia los suelos suelen ser profundos, oscuros, de texturas medias a finas, con dotación relativamente alta de nutrimentos y materia orgánica, por lo que correlativamente su drenaje natural es imperfecto, pobre y hasta encharcado.

8.3.4. Meteorización e Intemperismo.

Debe aclararse aquí la diferencia entre los dos vocablos: meteorización e intemperismo; la meteorización hace relación a la acción de los agentes meteorológicos, el intemperismo se refiere a la acción de los agentes de la intemperie; finalmente, tanto el intemperismo como la meteorización resultan siendo lo mismo, pero el intemperismo se centra en las primeras capas de ese material rocoso que está tendiendo a edafizarse, en tanto, la meteorización es una acción más profunda, más en el trópico no tiene mucho sentido dicha diferenciación ,en el trópico meteorización e intemperismo son fundamentalmente el mismo concepto, el termino intemperismo fue acuñado por los franceses y en Latinoamérica lo han adoptado bastante los técnicos mexicanos en tanto que el termino meteorización se emplea más a nivel internacional, siguiendo las escuelas rusa, alemana y norteamericana. En el trópico las acciones son profundas porque el clima es muy intenso y en relación a ello se tiene la anécdota muy reciente y muy cercana e importante para nosotros en Córdoba: En la angostura de Urrá donde está construido en estos momento la ataguia o cortina de contención de Urrá I, la roca fresca como tal, sin ninguna acción de intemperismo ni de meteorización se encontró a 36.2 metros de profundidad, lo que significa que desde esa profundidad hacia arriba más o menos se presentaba algún grado de meteorización e intemperizacion por eso se tuvo que excavar y dinamitar hasta ese nivel para poder cimentar dicha cortina.

8.3.4.1. Tipos de Meteorización.

De acuerdo al tipo de agente activo, se tendrán diferentes tipos de meteorización, así entonces se hablará de la **meteorización o intemperismo físico**, caracterizado por las acciones de tipo físico y mecánico como exfoliaciones, rompimientos y fracturas de los materiales rocosos ocasionados por los agentes meteorológicos a través de los diferentes estados y niveles de actividad de los mismos, las cuales logran la disgregación del material parental, inicialmente consolidado, esto es, la *"pedopreparación"* , cuyo objetivo es incrementar la superficie específica del material de origen, con lo cual se facilita la entrada en

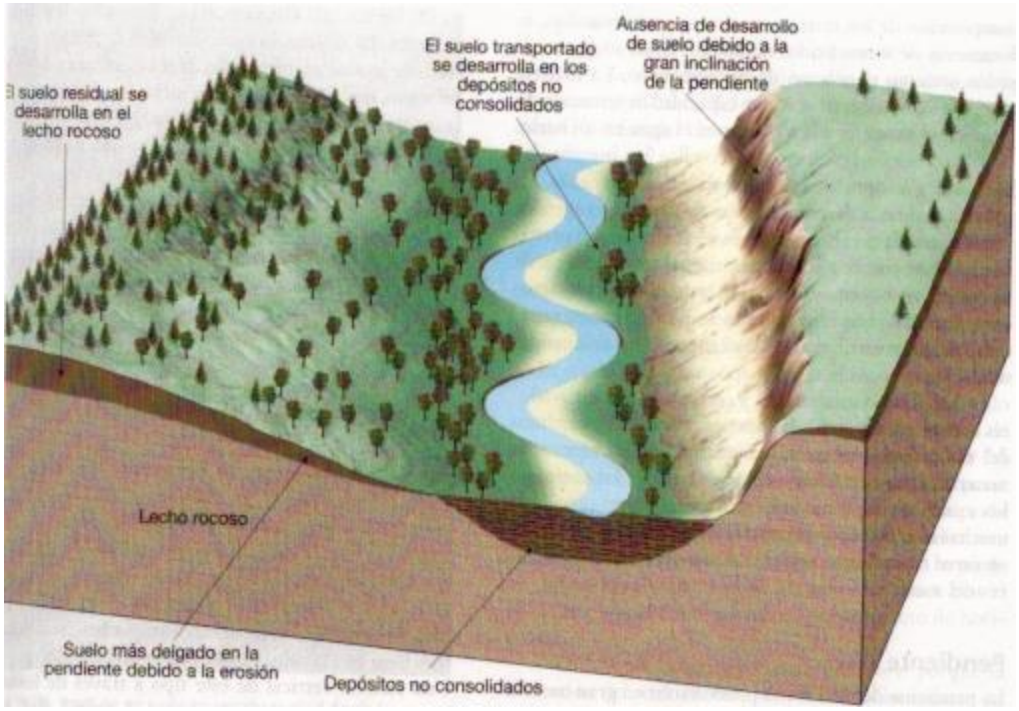


Figura 50: Las Pérdidas desde las zonas con suelos residuales generan ganancias en las zonas donde se depositan los materiales involucrados en el proceso de pérdida y que son transportados, en este caso por el agua que fluye en una corriente. Gráfica tomada de: Ecología y medio ambiente EL TIEMPO. Colombia.

acción de otro tipo de meteorización cual es la **meteorización o intemperismo químico,** cuya actividad apunta a alterar la composición química de los minerales primarios presentes en la roca original; paralelamente con ésta actividad, algunos organismos pioneros como algas, hongos, líquenes y algunas plantas rústicas comienzan a medrar en ese medio pedopreparado, aportando sus restos y deyecciones al mismo, como primeros aportes orgánicos al medio edáfico en evolución, lo cual representa la meteorización agenciada por los organismos vivos, cada vez más complejos, a la cual se le conoce como **meteorización biogénica.** Los tres tipos de intemperismo coexisten, con intensidad variable a través de todo el ciclo evolutivo del

suelo, siendo cada vez más tenue y sutil la línea divisoria entre los intemperismos químico y biogénico.

8.3.4.2. Procesos de Meteorización.

Como ha quedado establecido, **la meteorización física** busca incrementar la superficie especifica de los materiales, para que el agua fundamentalmente empiece a circular a través de ellos, facilitando que las raíces empiecen a penetrarlos para que las algas los líquenes y los hongos comiencen a establecerse en ellos. Los procesos de meteorización física se agrupan como:

1. Gelifracción: fraccionamiento por acción del hielo, muy poco común entre nosotros; más común la
2. Termoclástia: ó sea el fracturamiento de materiales por la acción del calentamiento y enfriamiento sucesivo del mismo;
3. La Hidroclástia: el rompimiento de materiales por acción del agua;
4. La Erosión: entendida como el desprendimiento y transporte partícula a partícula de materiales;
5. La Bioclástia: es el rompimiento de materiales por acción de agentes bióticos por ejemplo raíces, y/o animales que oradan dentro de un material sus rutas y medios de anidamiento, algunos la refieren como bioerosión.

La Meteorización Química como ya se estableció, está enfocada hacia la descomposición y alteración de los materiales. Actúa más rápidamente que la meteorización física y obviamente incrementa su velocidad proporcionalmente con la superficie específica que se haya logrado durante la pedopreparación. Diferentes procesos de esta meteorización químicas son:

1. La Hidrólisis, en desarrollo de ésta, la molécula de agua se rompe en presencia de una sal para formar ácidos y bases, algunos ejemplos son (1) un silicato cálcico en presencia de agua forma ácido silícico e hidróxido de calcio; por su parte (2) un aluminosilicato de potasio en presencia de agua forma ácido alumino-silícico e hidróxido de potasio;

$$Ca\ Si\ O_3 + 2HOH \leftrightarrow H_2\ SiO_3 + Ca\ (OH)_2 \quad (1)$$

$$KAlSi_3O_3 + H_2O \leftrightarrow HAlSi_3O_8 + KOH \quad (2)$$

*2. La Hidratación***,** en ésta no hay rompimiento de la molécula de agua y su molécula como tal entra a formar parte del nuevo compuesto conservando sus características. (3)

Es el caso de la hematita, un óxido de hierro anhidro con color característico rojo intenso, el cual, en presencia del agua, ésta se adhiere al óxido anhidro, por lo cual el compuesto inicial comienza a tomar una coloración amarillenta, pasando de ser hematita a ser limonita, óxido de hierro trihidratado.

$$2Fe2\,O3 + 3H2O \leftrightarrow 2Fe\,2O3.3H2O \quad (3)$$

Hematita Limonita

Igualmente, estos fenómenos de hidratación afectan a muchos otros compuestos como son óxidos de aluminio, de manganeso, óxidos alumino silicatados, lo mismo que sustancias orgánicas, debiéndose entender que la hidratación es un paso más en los procesos físicos y químicos de meteorización, en el sentido que los materiales que se hidratan, reducen su densidad y/o se hacen más suaves y consecuentemente más susceptibles a otros procesos de alteración.

3. La carbonatación y decarbonatación: Es una de las reacciones que más abunda en la naturaleza, puesto que continuamente en ella estamos produciendo CO_2, así entonces las raíces expiden CO_2 , los hongos, las algas, los líquenes y otras formas de vida están produciendo continuamente CO_2, éste último en un momento dado, por Ley de Acción de Masas, comienza a actuar sobre productos de hidrólisis por ejemplo (4) sobre aquel hidróxido de calcio producido en la ecuación (1) y forma bicarbonato de calcio, o (5) el hidróxido de potasio obtenido en la ecuación (2) se combina y forma carbonato de potasio y una molécula de agua.

$$Ca(OH)_2 + 2CO_2 \leftrightarrow Ca(HCO_3)_2 \quad (4)$$

$$2K\,OH + CO_2 \leftrightarrow K_2CO_3 + H_2O \quad (5)$$

Pero lo más importante y de resaltar es que los procesos de meteorización e intemperismo químico ocurren en forma simultánea, puede ocurrir por ejemplo (6) que una ortoclasa al mismo tiempo que empieza a trabajar el agua en un proceso de hidrólisis entre a reaccionar también ese CO_2 que están produciendo diferentes organismos preexistentes, llegando después de esta reacción de carbonatación e hidrólisis combinadas a producir una caolinita que es un mineral arcilloso muy importantes y

profuso en la corteza terrestre, abundante por ejemplo en la zona de Planeta Rica, Córdoba, además se obtiene cuarzo y carbonato de potasio.

$$2KAlSi_3O_8 + CO_2 + 2H_2O \leftrightarrow H_4Al_2Si_2O_9 + 4SiO_2 + K_2CO_3 \quad (6)$$

Ortoclasa *Caolinita* *Cuarzo*

Otro ejemplo de esta simultaneidad de reacciones se tiene en un hecho bastante frecuente en el suelo, (7) un fosfato tricálcico que es generalmente insoluble, que está en el suelo, pero en forma no disponible para las plantas, por acción del CO_2 producido en el suelo y una acción combinada de hidrolisis, llega a producir fosfato monocálcico que, si es soluble y disponible para las plantas, adicionado de bicarbonato de calcio.

$$Ca_3(PO_4)_2 + 2CO_2 + 2H_2O \leftrightarrow 2CaHPO_4 + Ca(HCO_3)_2 \quad (7)$$

4. La oxidación: Cuando hay una alta actividad de oxígeno, como consecuencia de una adecuada aireación en el medio, se da una tendencia en los iones metálicos presentes a ganar protones, por ejemplo (8) el óxido ferroso se combina con el oxígeno que se encuentra abundante en el medio, por Ley de acción de Masas, y se llega a producir óxido férrico.

$$4FeO + O_2 \leftrightarrow 2Fe_2O_3 \quad (8)$$

óxido ferroso *óxido férrico (hematita)*

Sin embargo, no siempre las oxidaciones resultan beneficiosas para el suelo, tal es el caso de los llamados suelos sulfato-ácidos o sulfatados ácidos, los cuales se originan por la “adecuación” para agricultura de antiguas zonas costeras inundadas, ricas en Pirita (FeS_2) singenética, como ocurre en las abundantes y profusas áreas de humedales en Córdoba, al igual que en la cuenca del Bajo Río Guayas, Ecuador, donde el ingreso intempestivo del oxígeno a los perfiles inicialmente anóxicos, generan el cambio

$$FeS_2 + O_2 \rightarrow FeSO_4$$

Y posteriormente se da:

$$FeSO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + Fe_xO_y$$

La ocurrencia de ácido sulfúrico en el medio desarrolla valores de pH tan bajos como 1 ó 2, haciendo imposible el desarrollo de vegetación de interés económico en el medio, a no ser que se empleen ingentes cantidades de enmiendas calcáreas, lo cual resulta impráctico, costoso y podo técnico. Una situación bastante diferente se da cuando los suelos sulfato-ácidos se generan como consecuencia de escurrimientos superficiales y/o flujos subsuperficiales desde áreas donde se desarrolla o se desarrolló la actividad minera de explotación del mineral de azufre (S_2), cual es el caso de algunas áreas vecinas a la ciudad de Tunja, Boyacá

5. La reducción: Es el proceso opuesto a la oxidación y se da cuando un aceptor común de electrones en el suelo, como es el oxígeno, se encuentra en cantidades limitadas, consecuentemente, (9) en un suelo encharcado el Fe_2O_3, hierro férrico, podrá aceptar un electrón y ser biológicamente reducido, en tanto que el C puede ser anaeróbicamente oxidado.

$$2Fe_2O_3 - O_2 \rightarrow 4FeO \qquad (9)$$

óxido férrico (hematita) *óxido ferroso*

Este proceso tiene común ocurrencia en zonas del suelo con drenaje deficiente, donde el agua ocupa el espacio poroso del mismo, o donde las partículas son tan finas que el ingreso de oxígeno a los intersticios entre las mismas se hace demasiado lento. Cabe señalar finalmente que como consecuencia de la evolución rápida del CO_2 de la materia orgánica que se descompone rápidamente se puede generar una caída del tenor de O_2 en el medio, que puede conducir a procesos de reducción en el mismo.

6. La Solución: La condición de solvente universal inherente al agua, en atención a su carácter dipolar, resulta ser de mínimo impacto en las reacciones que conduzcan a la solución de los minerales presentes en las rocas. No obstante, el CO_2 que puede tener lugar en el medio que se edafiza, como producto de la actividad biótica puede incentivar la capacidad solvente del agua; igualmente, las mínimas trazas de compuestos como HNO_2, HNO_3, H_2SO_4 y H_2SO_3 logran un incremento notable en la capacidad solvente del fluido inicial; algo similar puede comentarse acerca de algunos ácidos orgánicos, los cuales, aunque producidos en pequeñas cantidades, en desarrollo de la incipiente actividad biótica circundante logran significativos incrementos en la capacidad solvente del agua. Finalmente, las combinaciones del agua presente con sales solubles también incrementan la velocidad y eficiencia de las reacciones de solución que se dan en la edafogénesis.

8.4. ATRIBUTOS DEL SUELO.

Como ya se ha señalado anteriormente, cada suelo exhibe en un momento dado una serie de atributos que lo tipifican y determinan su potencial productivo, tales atributos se dividen en características y propiedades, en razón a que mientras las primeras constituyen atributos relativamente estables, cuyo cambio puede tomar el tiempo que dura una generación humana; las propiedades por su lado son altamente dinámicas y pueden expresar cambios drásticos en el lapso de muy poco tiempo. Independientemente de lo anterior, tanto las propiedades como las características, todos los atributos del suelo hacen relación a sus condiciones físicas, químicas, biológicas y nutricionales.

Todos los atributos del suelo son de innegable importancia y, cual más cual menos, todos influyen en el comportamiento integral de ese sustrato fundamental para el crecimiento y desarrollo de las plantas superiores; no obstante, mientras bajo las condiciones del ecosistema revisten primordial importancia las propiedades y características biológicas; en el agroecosistema, en los suelos manipulados en mayor o menor grado por el hombre; son las propiedades y características del ambiente físico las que determinan el comportamiento químico, biológico y nutricional del suelo. Es de tal magnitud la importancia de los atributos físicos del suelo en los terrenos intervenidos por el hombre, que cuando ellos presentan algún nivel de degradación, su rehabilitación debe comenzar con labores enfocadas al mejoramiento del ambiente físico del suelo, que posibilite subsiguientemente rehabilitaciones en los demás aspectos, de tal forma que una vez alcanzado el grado deseado de recuperación pueda ser viable el mantenimiento o conservación de tales condiciones.

8.5. EL SUELO Y LA ROCA.

Hasta finales del Siglo XIX, el suelo era materia de estudio para Químicos y Geólogos, mismos que lo definían como producto de descomposición de la roca, sin embargo, la palabra descomposición quizás tenga que ser tomada con mayor detenimiento.

En realidad, la descomposición o alteración es el tránsito de materiales de composición compleja a otros de composición más simple. Como todo en la naturaleza es reversible en mayor o menor grado, debemos establecer paralelamente a lo anterior que la Síntesis es la formación de compuestos más o menos complejos, a partir de la mezcla y reacción entre otros compuestos mucho más simples.

En el orden de ideas que se trae, tendremos que corregir la visión de 1895, y establecer que en realidad en el suelo, en todo momento se conjugan procesos de descomposición y síntesis, de degradación y agradación, lo cual redunda en que, en el

trascurso de la evolución del suelo, los compuestos originales den paso a la ocurrencia de nuevas sustancias, más o menos complejas que las originales, en obediencia a factores como: el material parental, el clima, el relieve y la actividad biótica, incluida la antrópica, circundante al sitio en consideración.

Cabe aclarar aquí, que a medida que se profundiza, desde la superficie del terreno hasta niveles progresivamente más considerables, la actividad de los diferentes factores antes mencionados reflejará variaciones, dando ocurrencia a que en cada profundidad dominen o no determinados procesos de evolución del suelo, ésta es la razón de lo que denominaremos “horizonación” o generación de horizontes diferentes a medida que se profundiza en la columna edáfica, los cuales, como ya quedo establecido anteriormente, son capas más o menos homogéneas a través de la extensión de cada uno de ellas y paralelas a la superficie del terreno; y a la sumatoria de dichos horizontes la conoceremos como perfil característico de ese suelo, o simplemente, perfil de suelo, el cual lo diferencia de los suelos vecinos, y por ende constituye la carta de identidad de cada unidad de suelo.

8.6. SUELOS MINERALES Y ORGÁNICOS, Horizontes Minerales y Orgánicos.

Existen suelos orgánicos y suelos minerales, al tiempo que también se dan horizontes orgánicos en suelos minerales, y obviamente, horizontes minerales en suelos minerales. Éste aparente galimatías encuentra su explicación, teniendo en cuenta de que en todo suelo coexisten materiales minerales y orgánicos, bajo los siguientes términos:

- Un horizonte mineral es aquel en el cual priman los materiales minerales sobre los orgánicos. En un horizonte mineral los materiales minerales ocupan del 65% al 95% del volumen del horizonte, mientras los materiales orgánicos ocupan de un 5% a un 35% del volumen total del horizonte.
- En un horizonte orgánico dominan los materiales orgánicos sobre los minerales, en estos horizontes orgánicos los materiales minerales solamente ocupan del 5% al 35% del volumen total y los materiales orgánicos ocupan del 65% al 95% del volumen del horizonte.
- En un suelo mineral predominan los horizontes minerales con las condiciones porcentuales en su composición que se acaban de señalar, sin embargo, en la zona más superficial de los perfiles de estos suelos minerales, pueden encontrarse uno o varios horizontes orgánicos, generalmente con espesores más o menos reducidos.
- En un suelo orgánico priman los horizontes orgánicos sobre los horizontes minerales. Al igual que en los suelos minerales, los horizontes orgánicos suprayacen a los horizontes minerales, pero en este caso particular, los horizontes orgánicos exhiben espesores apreciables.

Para terminar este punto se debe dejar establecido que existen horizontes orgánicos de suelos minerales, los cuales en tal caso reciben el nombre genérico de horizontes O; y también horizontes orgánicos de suelos orgánicos, los cuales en tal caso reciben el nombre genérico de horizontes H. Sin embargo, se debe aclarar que más del 98% de los suelos emergidos en la corteza terrestre son minerales, escasamente un 2% de los suelos que cubren la tierra que habitamos son orgánicos, éste curso entonces estará abocado al estudio de los suelos minerales, aclarando que los suelos minerales pueden presentar algunos horizontes orgánicos que se estudiarán posteriormente.

8.7. HORIZONTES MAESTROS Y HORIZONTES TRANSICIONALES.

Ahora bien, qué es un horizonte maestro y que es un horizonte transicional. Esta condición puede darse tanto en horizontes minerales como en horizontes orgánicos y

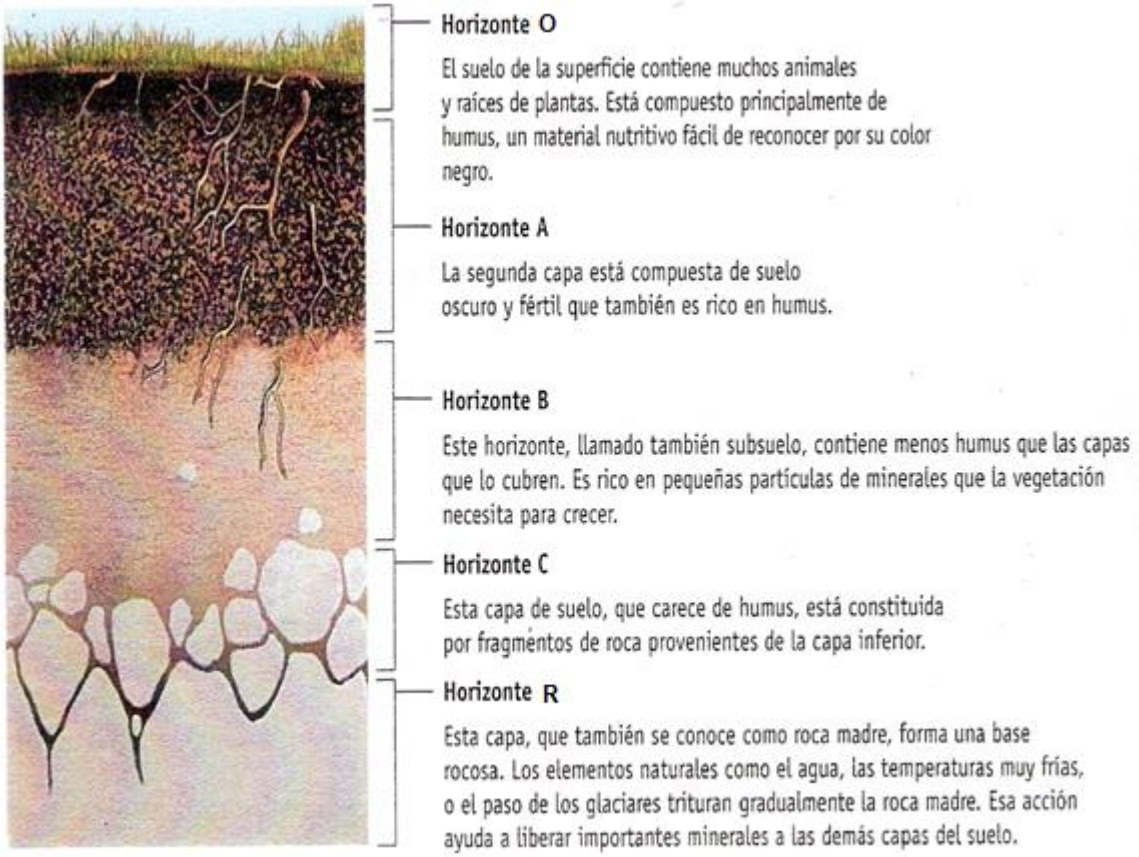


Figura 51. Nominación generalizada de horizontes del suelo. Gráfica adaptada de: Ecología y medio ambiente EL TIEMPO. Colombia.

hace relación al hecho de que en un horizonte central o maestro se da un proceso en particular, y por decirlo así, dicho horizonte se especializa en el proceso referido, lo cual a su vez le imparte unas condiciones características a esa capa de suelo en lo que se

refiere a color, textura, porosidad y permeabilidad del material que lo conforma. Es así como se podrá observar un horizonte A, un horizonte B, un horizonte C o un horizonte W, relativo a la condición de “Weatering”, para hacer referencia a la condición de saprolito, o roca en sus primeros estadíos de alteración.

De otro lado en el horizonte transicional coexisten dos o más procesos en acción, aunque insinuándose la aparente dominancia de uno de tales procesos sobre el o los otro(s), por lo cual las condiciones de color, textura, porosidad y permeabilidad del material constituyente no serán tan definidas, y en la nominación siempre se referirá inicialmente la condición dominante y en segundo lugar, la condición o proceso sucedáneo, es así como se encontrarán descripciones de perfiles de suelo donde se refiera la existencia de horizontes AB, AC, BC, CA , CB ó WC.

Una variante a lo anterior son los horizontes como A&B, A&C, B&C, C&A, C&B ó W&C. También son horizontes transicionales o intermedios pero dentro de ellos las condiciones de color, textura, porosidad y permeabilidad del material edáfico se encuentran en plena dominancia en algunos puntos del horizonte, en tanto que en otros puntos, la condición sucedánea es la que se observa y no la “dominante”, se dice entonces que en ese horizonte la variación se da en “sequums” o “secuencias”, en tanto que en los horizontes transicionales referidos en el párrafo anterior se dice que la variación se da en forma aleatorizada.

8.8. HORIZONTES Y PERFILES EN EL CAMPO.

A esta altura de la discusión debe estar clara la amplia variabilidad de los perfiles y de sus horizontes al recorrer la corteza terrestre siguiendo las diferentes orientaciones geográficas, como muestra de ello, en las figuras 52 a 67 se presentan una colección de condiciones de perfiles de suelo observables en diferentes sitios de los Departamentos de Córdoba y Antioquia, Colombia.

Figura 52. Peridotita sujeta a intervención antrópica, Nuevo Paraíso, Planeta Rica, Córdoba *(Zona de afloramientos ultramáficos) Foto: Estudiantes UNICOR.*

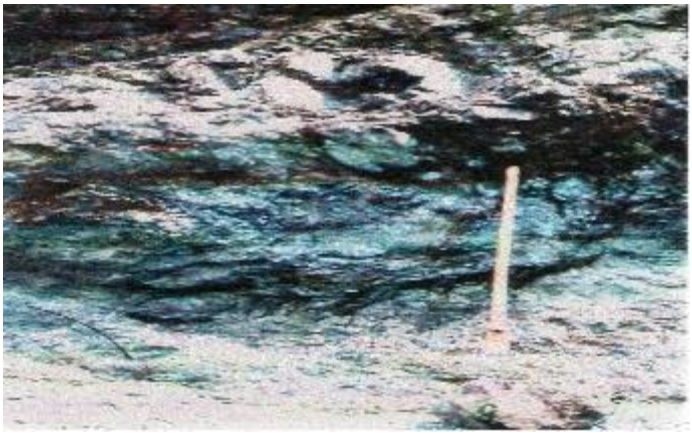


Figura 53. "Serpentinización" en peridotita: Generación del mineral secundario (alterita) denominado serpentinita, como producto de reacciones de hidratación e hidrólisis de compuestos de hierro presentes en el olivino, mineral dominante en la peridotita. Nuevo Paraíso, Planeta Rica, Córdoba, Colombia (Zona de afloramientos ultramáficos) Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 54. Generación de saprolito y colonización de este por organismos pioneros y oportunistas, dando lugar a la generación de un primer horizonte mineral Ap, subyaciendo a un Horizonte Oi incipiente. Nuevo Paraíso, Planeta Rica, Córdoba (Zona de afloramientos ultramáficos) Foto: Estudiantes UNICOR.

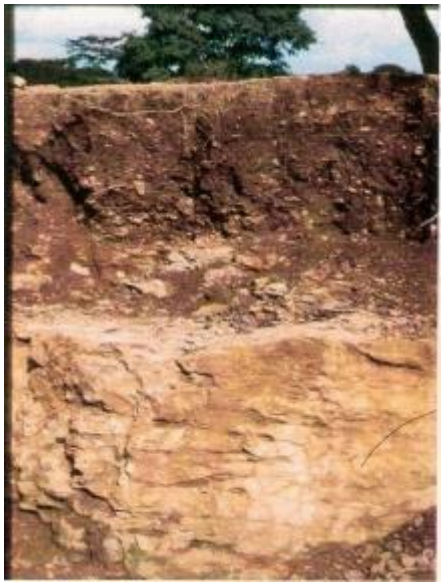


Figura 55. Génesis de suelo calcimórfico a partir de calizas de la "Formación Cerrito", Corregimiento Loma Azul, Planeta Rica, Córdoba, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 56. Talud de carretera exhibiendo un Oxisol generado a partir de arcillolita con cementante mangánico, de la "Formación Buenos Aires", presenta rasgos evidentes de procesos de tubificación. Corregimiento de Palotal, vía La Apartada – Ayapel, Córdoba, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 57. Inceptisol argílico ocurrente en la zona de terrazas disectadas bajas del Río Cauca, Corregimiento de Guarumo, Caucasia, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 58. Inceptisol gleyco observable en la llanura de inundación del Río Cauca, zona de basin. Se resalta el “sepultamiento” observable a los 17 cm. Corregimiento Las Malvinas, Caucasia, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 59. Inceptisol gleyco observable en la llanura de inundación del Río Cauca, geoforma de orillares. Corregimiento Las Malvinas, Caucasia, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

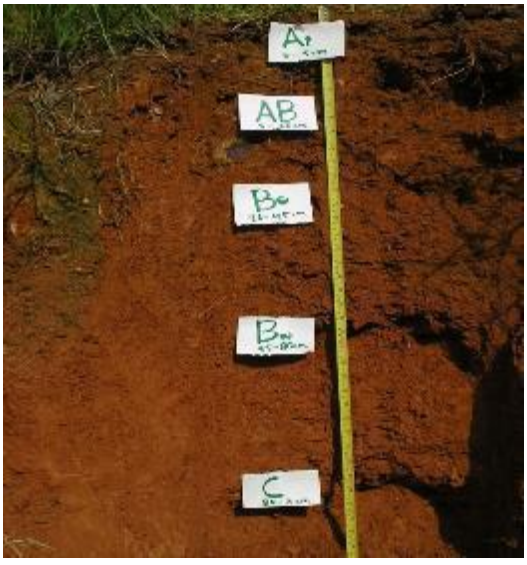


Figura 60. Oxisol observable en la Hacienda “El Brillante”, acceso este a la cabecera municipal de Cáceres, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 61. Proceso de Rehabilitación de materiales espólicos, relictos de operaciones de minería de aluvión, con la emergencia de algunos especímenes micóticos del orden *falal,* mediante el establecimiento de cobertura con *Acacia mangium*, por espacio de doce años, con ocupación bovina nocturna durante los últimos dos años en la vereda de Río Rayo, Tarazá, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 62. Ocurrencia de musgos, como pioneros sobre saprolitos provenientes de esquistos, en el bosque de niebla que caracteriza a la zona del “Alto de Ventanas”, cubriendo un área de metamorfismo de contacto caracterizada por la presencia de esquistos ceríceos y cloríticos. Alto de Ventanas, Yarumal, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 63. Entisol generado a partir de esquistos ceriscíticos, cubiertos por pastos introducidos. Alto de Ventanas, Yarumal, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 64. Vereda Tobón, Yarumal, Antioquia, Colombia: Interfase de “Aureola de Contacto” dominada por grawacas, entre el Batolito antioqueño (granitos y granodiorita) y la zona metamórfica que se extiende desde allí hacia el norte y occidente del Departamento de Antioquia, en la cordillera central colombiana, siendo observable hasta el corregimiento de Puerto Valdivia, en la vía Medellín – Costa Atlántica, y siguiendo aguas arriba el curso del Río Cauca hasta la localidad de Bolombolo, Venecia, Antioquia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 65. Inceptisol ándico en la región de Llanos de Cuivá, Yarumal, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 66. Granitos y granodioritas que conforman el Batolito Antioqueño se cubren de líquenes, los cuales realizan las primeras aportaciones orgánicas al material saprolizado, facilitando el establecimiento de la vegetación de helechos y quenopodiáceas que, como se aprecia en la gráfica, actúan como vegetación oportunista en ésta génesis de suelo. Vereda Curvas de Bogotá, Yarumal, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

Figura 67. Perfil modal de la región de valles altos dentro del área del Batolito Antioqueño, Inceptisol argílico grueso. Vereda Las Mirlas, Yarumal, Antioquia, Colombia. Foto: Estudiantes UNICOR.

IX. COMPOSICIÓN DEL SUELO

“El suelo es una entidad dinámica,
y el dinamismo es vida”
ZSABOLCS, 1994

Tradicionalmente hemos reconocido que en la naturaleza, la materia se encuentra en tres estados o fases; sólida, líquida y gaseosa, sin embargo desde los años 70 se habla de la condición plásmica de la materia, desde el año 2000 se habla del condensado Bose – Einstein, material precursor de los llamados “Trajes inteligentes” y el 16 de febrero de 2004 se reporta la síntesis en laboratorio de un nuevo condensado, conocido como Ferviónico, constituido por micropartículas cargadas eléctricamente y con propiedades anticancerígenas en humanos. Independientemente de lo anterior, el histograma que se representa en la Figura 68, hace referencia a la distribución porcentual “ideal” de volúmenes en un suelo franco y según él, está conformado, mitad a mitad, por espacio sólidos y espacios vacíos, alternativamente, llenos de agua o aire, como lo indican las dos saetas direccionales. Esto conduce a pensar que el análisis de suelo clásico en Laboratorio solo reportará acerca de una mitad (50%) del suelo y que por tanto su interpretación ha de estar sujeta a la justa estimación que se haga del comporta miento del otro 50%, relativo a los espacios vacíos restante, bien ocupado por agua, o por gases, o en la relación en la cual se comporten dichas dos fases en él.

Centremos ahora el análisis en el 50% ocupado por la fase sólida, completando así las tres fases ocurrentes en el suelo, en ella están presentes los minerales presentes y/o derivados del material parental, pero también tienen ocurrencia, si bien en proporción “aparentemente” minoritaria, los materiales orgánicos, mismos que pueden encontrarse en cualesquier estadio de evolución húmica, o en plena actividad biótica, cabrá entonces decir que dentro de la fase sólida que se discute se encuentra incluida una fase biótica, de allí que sea aceptado que el suelo se defina como un medio natural tetrafásico, y ésta cuarta fase es la que precisamente agencia los procesos responsables de que el suelo se comporte como un medio de vida.

Analicemos ahora, uno a uno, los diferentes constituyentes del suelo, a saber:

9.1. FASE SÓLIDA DEL SUELO.

A. FRACCIÓN INORGÁNICA: Aquí tendremos que distinguir entre los **Minerales Primarios** o presentes en la roca inalterada, como el olivino, el piroxeno y / u horblenda en la peridotita; el feldespato alcalino, el cuarzo, la biotita y la moscovita en el granito,

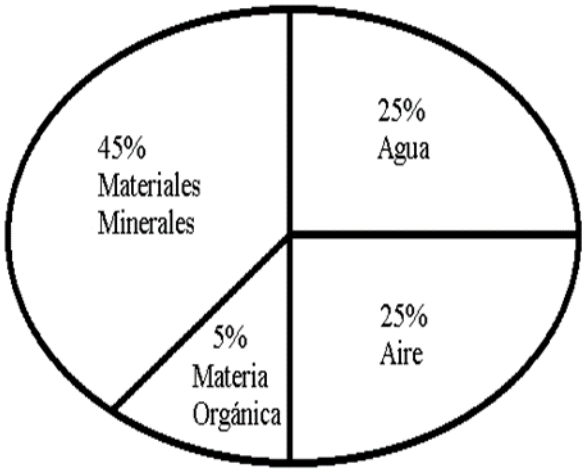


Figura 68. Histograma de Distribución Porcentual Volumétrica en un suelo franco "ideal". Gráfico I.D. Bustamante B.

etc. Y los **Minerales Secundarios**, generados por diferentes procesos de meteorización o intemperismo y que por lo tanto están ausentes en la roca fresca, en tanto que observan una ocurrencia incrementada en tanto dicho material se saproliza y posteriormente genera el suelo. Por tanto, es posible establecer que mientras en la roca fresca sólo es posible encontrar minerales primarios, en el suelo se observarán minerales secundarios, eventualmente acompañados por aquellos minerales primarios que sean más resistentes al intemperismo, como el cuarzo y algunos feldespatos. Cabe resaltar finalmente a este respecto que los minerales secundarios son denominados como **"alteritas"** por algunos autores europeos, llamando con ello la atención sobre el hecho de que no son más que productos de alteración por intemperismo.

B. FRACCIÓN ORGÁNICA.

B.1. Fracción Inanimada = Materia Orgánica: A pesar de su bajo porcentaje de ocurrencia volumétrica, gracias a su carácter de material finamente dividido, dicha condición le imparte una considerable superficie específica (cm^2 / gr) ó (cm^2 / cm^3), lo cual la hace responsable de una intensa actividad dentro del medio edáfico y es por ello que impacta, casi que en forma exclusiva, la agregación del suelo, la capacidad de retención de humedad y por ende los regímenes hídrico, térmico y gaseoso del suelo.

Como sí esto fuese poco la materia orgánica del suelo, mediante procesos de mineralización constituye la fuente única de nitrógeno nativo en el suelo, así mismo, mediante procesos semejantes la materia orgánica es fuente importante de fósforo y azufre nativos en el suelo. Finalmente, la materia orgánica es sustrato alimenticio de la biota del suelo.

Los últimos señalamientos del párrafo anterior llevan a concluir que la materia orgánica es un constituyente “transitorio” ó “consumible” en el funcionamiento del suelo que dada su incuestionable importancia hace perentorio su manejo, con miras a incrementar o al menos mantener sus tenores en el suelo. Nos encontramos entonces ante un material edáfico, extremadamente complejo, cambiante en mayor o menor proporción a través del tiempo y el espacio, y lo que es más, íntimamente entremezclado con la fracción mineral, lo cual dificulta su separación, con fines de estudiarlo, sin que se corra el riesgo de alterar su composición y naturaleza, haciéndose aún más complejo el panorama si se tiene en cuenta que es un material altamente dinámico, esto es, en continua evolución, en el cual, por la misma razón, resulta difícil establecer límites precisos entre sus diferentes niveles de evolución. En el desarrollo evolutivo de la materia orgánica del suelo deben señalarse tres estadios cuales son: Biomasa – Necromasa – Humus, o de otra forma: Humus Verde – Humus Nutriente – Humus verdadero.

No obstante lo anterior y teniendo en cuenta que, como ya se ha establecido el tipo de humus producido es función del tipo de clima y de vegetación circundantes, existe acuerdo en denominar como “Humus verde” a aquel en el cual es factible distinguir la naturaleza de los residuos originales, dado que su descomposición ha sido impedida, bien por una baja concentración de nutrientes en el medio, requeridos por los mismos organismos que agencian la descomposición, o bien por una baja temperatura o por una baja aireación o por la presencia de compuestos fenólicos o similares que inhiban el crecimiento bacterial, su color es más pardo que negro y generalmente ocupa la capa más superficial del perfil del suelo, sobre todo en condiciones de clima frío, y en suelos con baja potencialidad química y nutricional.

Una siguiente fase de evolución del humus, es el denominado humus nutriente en el cual su color es más negro que pardo y se hace más difícil determinar la naturaleza de su material originario, su composición fundamental son azucares, almidones y algunas sustancias nitrogenadas solubles, por lo cual sirve de sustrato alimenticio a los microorganismos del suelo, de donde deriva su nombre; una posterior y última fase evolutiva la constituye el humus verdadero, neutro o de mantenimiento, en el cual resulta totalmente imposible discernir acerca de los materiales originarios, de color negro intenso exhibe una alta persistencia en el suelo y una naturaleza química bastante compleja , por demás bastante difícil de estudiar dada la intensa entremezcla del material , con la fracción mineral del suelo.

Los estudiosos de las ciencias forestales, por su parte han sugerido el uso de los términos *mull* y *mor*, siendo aplicable el primero a aquel horizonte, bastante notorio en suelos de bosque de coníferas, caracterizado por un enriquecimiento en material húmico íntimamente mezclado con materiales minerales y que generalmente suprayace a los horizontes minerales de los suelos forestales, por su parte con el término *mor* se designa a aquel horizonte superficial de los suelos forestales, caracterizado por la ausencia casi total de material mineral y la dominancia, también total o casi total de residuos orgánicos fácilmente identificables en cuanto a su origen, por lo anterior comúnmente se hacen las equivalencias entre *mull* y humus neutro, y entre *mor* y humus verde.

Además de lo anterior, la ciencia forestal también ha acuñado la nominación de horizontes orgánicos de los suelos minerales bajo los indicativos L(Litter), F (Forna, Fermentación) H (Humificada) para referirse a una primera capa dominada por "Litter" "Mulch" hojarasca o mantillo, en fin, material orgánico susceptible de ser descompuesto o humus verde; una segunda capa subyacente donde se comienzan a dar con mayor o menor intensidad los procesos de descomposición de los residuos y donde naturalmente tiene presencia dominante el humus nutriente; por último, la capa H presenta un enriquecimiento de material humificado o humus verdadero, estable o neutro y por debajo de ella se encuentran los típicos horizontes minerales.

La anterior clasificación, proveniente de la pedología alemana fue modificada por el Soil Survery Staff del USDA, asimilándola inicialmente a las equivalencias Oi, Oe, Oa, para horizontes orgánicos de suelos minerales y a las nominaciones Hi, He, Ha, aplicables a horizontes orgánicos de suelos orgánicos, en las cuales los subíndices tienen la siguiente significación:

i = Fibrist, condición de residuo orgánico en estado predominantemente fibroso, fácilmente reconocible en cuanto a su naturaleza y origen.

e = Henist, condición de fermentación, residuo orgánico en estado de descomposición medio, en el cual el reconocimiento de su naturaleza y origen se hace medianamente difícil.

a = Saprist, condición de descomposición total o completa, los residuos originales están totalmente alterados y resulta imposible identificar su naturaleza y origen.

En concordancia con lo anterior, los horizontes Oi ≈ Hi presentan predominio del humus verde, en tanto que el humus nutriente domina en los horizontes Oe ≈ He, correspondiendo finalmente los horizonte Oa ≈ Ha a capas de acúmulo de humus neutro o estabilizado.

B.2. Fracción Animada = Fase Biótica: Dentro del suelo, sobre él y alrededor de él se dan las más disímbolas formas de vida, desde las grandes unidades animales (GUA), mamíferos, entre ellos el hombre, los más diversos roedores, insectos, miriápodos, rotíferos, protozoos, bacterias, hongos, actinomicetos y nemátodos. Cada uno de ellos se enmarca dentro de una o más de las siguientes funciones: Consumir, Excretar, Desintegrar, Descomponer ya sea: Otros especímenes animales o vegetales, sus residuos, excretas y restos corporales, o de otra forma: biomasa y necromasa, para que finalmente otras formas de vida, más especializada se encarguen de Sintetizar y Mineralizar las formas más elaboradas del Humus. Figura 69.

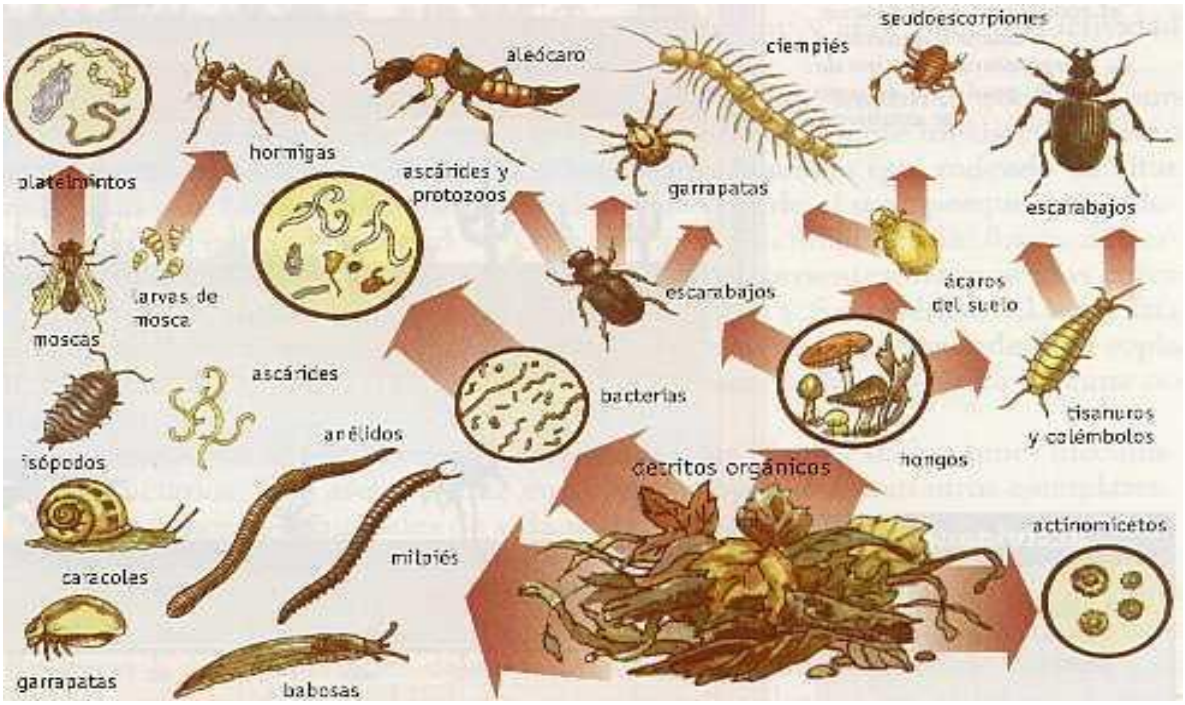


Figura 69. Esferas de Actividad Biótica sobre el binomio Biomasa: Necromasa (Foto: Internet)

En realidad, la evolución de la biomasa hacia el humus, totalmente agenciada por la fase biótica, pasando por el estadio de la necromasa, guarda marcada similitud con los procesos de intemperismo, dado que inicialmente se busca que los materiales de partida sean finamente fragmentados, buscando un incremento significativo en la superficie específica de los mismos, la cual permita el desarrollo de un sinnúmero de reacciones de superficie o interface que conducen a la descomposición y/o síntesis de cada vez nuevos y renovados materiales, los cuales en razón a su finura presentan progresivamente una actividad físico-química incrementada.

9.2. FASE LÍQUIDA DEL SUELO.

El agua presente en el espacio poroso del suelo se dice que se encuentra contenida en el mismo, solamente cuando ocupa completamente la totalidad de los espacios vacíos del suelo, y en tal caso se dice que el suelo está saturado. En el preciso momento en el cual comienza el agua presente en el suelo a coexistir así sea con la más mínima proporción de gases se dice que el suelo se encuentra insaturado, y en tal condición, merced a fenómenos de adhesión y cohesión, la matriz sólida del suelo comienza a manifestar una atracción por el agua, que en tal condición se dice retenida por el suelo, dicha atracción o succión se estima en unidades de presión, en realidad la succión (τ) no es más que una presión vectorialmente negativa.

Pero el agua que ingresa al suelo por el proceso de infiltración subsiguiente a la aplicación de la misma, bien por lluvia o por alguna técnica de riego artificial, inmediatamente infiltra comienza un proceso de redistribución en el perfil y en desarrollo de dicho proceso el agua evoluciona químicamente al entrar a diluir en mayor o menor grado los diferentes materiales sólidos presentes en el suelo; en tal condición ya se habla de la solución del suelo, misma que tendrá la función de llevar hacia las raíces y hacia los diferentes organismos que medran en el suelo, los nutrimentos requeridos por ellos, se dirá entonces que la primera función de la fase líquida en el suelo es la de servir como intermediaria entre la matriz sólida del suelo y los órganos y organismos vivientes en el suelo.

De otra parte, la solución del suelo que llega a un punto de absorción de una raíz ingresa al complejo de torrentes xilemático y floemático de la misma, constituyéndose en la responsable de la turgencia de esa planta. Una segunda y última función de la fase líquida del suelo es la de mantener la turgencia de la vegetación, misma que es indispensable para el transporte ascendente de solutos y descendente de fotosintatos en la planta.

9.3. FASE GASEOSA DEL SUELO.

La atmósfera que respiramos se comunica en la interface suelo: aire, mediante los poros que afloran a la superficie del terreno, con el espacio vacío del suelo, dependiendo parcialmente la tasa de abastecimiento gaseoso por el suelo, de la presencia y abundancia de agua dentro de ese espacio poroso. No obstante, dado el tipo e intensidad de reacciones bioquímicas que priman a uno y otro lado de la frontera referida, la composición cuantitativa de ambas atmósferas presenta diferencias tan interesantes como dinamizadoras. Así, por ejemplo, gracias a la respiración de la profusión de organismos que viven en el suelo y a la oxidación de los materiales orgánicos que se da permanentemente en el mismo, el contenido de CO_2 en la atmósfera edáfica supera en mucho al nivel del mismo gas que se registra en la atmósfera externa (0.03 % en volumen). De otro lado, en atención a la alta actividad biótica en el suelo los

tenores de oxígeno en éste (10 – 12 % en volumen) son bastante inferiores al 20% atmosférico externo. Igualmente, con base a la significativamente amplia gama de diámetros porales en el suelo y a las relaciones de succión (τ) que se dan en él, la humedad relativa de la atmósfera del suelo en la mayoría de las condiciones comunes, exceptuándose situaciones de per-aridez, es de 100% independientemente del grado de humedad ambiental atmosférica externa. Diferencias de concentración de los diferentes gases presentes en las dos atmósferas actuarán como dinamizadoras de flujos difusivos de Fick, que tenderán a equilibrar la especiación gaseosa a lado y lado de la superficie del terreno. Sin embargo, las particularidades físicas, físico-químicas y bioquímicas ya reseñadas y que se dan a ambos lados de esa frontera tienden por otro lado a mantener los gradientes de concentración, fuerzas motrices de los flujos difusivos.

9.4. COMPLEJO BIO-COLOIDAL DEL SUELO.

En 1843, Gasparin refiere la ocurrencia en el suelo de las dos fases por actividad: “suelo activo y suelo inerte”, conceptos éstos que en los años 1980’s reviven en Orston, Costa de Marfil, Africa como “plasma y esqueleto del suelo”. Dada la condición coloidal del humus y la arcilla, ambos conforman el plasma, en tanto que limos y arenas constituyen el esqueleto del suelo. Así entonces, la condición coloidal va de la mano con la intensa actividad físico-química del humus y la arcilla, en buena parte fundamentada en la considerable superficie específica de ambos constituyentes, acompañada con el desarrollo de cargas eléctricas en sus superficies expuestas, lo cual posibilita la ocurrencia de fenómenos de adsorción, agregación, contracción – expansión, cohesión, adhesión, consistencia e intercambio iónico. De otra parte, sí se comparan las presencias porcentuales tan diferentes entre arcillas y humus, fácilmente llevaría a pensar en una dominancia de las primeras sobre el último; más, a la luz de la gran diferencia en la superficie específica de los dos materiales y a favor del humus, se concluiría que un parámetro compensa al otro y por ende el impacto de cada uno de ellos sobre la actividad físico-química del suelo resulta semejante.

En conclusión, el estudio del medio suelo debe enfocarse desde una visión bio-coloidal, esto es, tratar de ver al suelo más allá de la sola presencia de arenas, limos y arcillas y detenerse a pensar en el considerable dinamismo que entraña el suelo, fundamentado en la íntima relación que se da entre esas tres fracciones y la materia orgánica, relación que en buena parte es agenciada por la fase biótica, la cual se potencia fundamentalmente en el complejo coloidal del suelo. Por esto mismo el suelo no es, como por mucho tiempo se creyó, una caja negra a la cual se le aplicaba nutrimentos y produce cosechas, los elementos que se aplican al suelo desencadenan entonces una serie de reacciones en el complejo bio-coloidal del medio edáfico, las cuales finalmente se traducen en la solubilización y correspondiente disponibilidad de los diferentes nutrimentos para la biota y las plantas que medran en ese suelo, llevándolas

progresivamente a lograr un climax de actividad y productividad. Así entonces, el enfoque del suelo como medio de vida implica necesariamente esa visión bio-coloidal.

9.5. DEFINICIÓN AMPLIADA DEL SUELO.

A nivel de la presente altura argumental que se posee en atención a los hechos expuestos hasta este punto, se puede establecer que el Suelo es un Cuerpo natural, único, tetrafásico, pentadimensional, anisotrópico, tortuoso, dinámico, esto es, en continua evolución; elástico, resiliente, compartido entre una fase que actúa como plasma y otra que funciona como esqueleto, que proporciona: anclaje, agua, nutrimentos y aire a los diversos organismos que viven en él.

Se dice que el suelo es un cuerpo natural en razón a que es producto de procesos naturales sobre materiales y organismos igualmente naturales que permanentemente ciclan en el sistema cerrado que es el suelo, generando con ello el crecimiento y el desarrollo del perfil que lo identifica e individualiza y por ésta misma razón se establece como cuerpo único, ya que no existen dos suelos que sean idénticos, sino semejantes.

El suelo es tetrafásico en atención a poseer, adicionalmente a las tres fases físicas clásicas, sólidas, líquidas y gaseosas, la fase biótica, íntima e intrincadamente mezclada con las tres primeras, hasta el punto de imposibilitar su aislamiento, sin correr el riesgo de alterar el suelo original. Igualmente, el suelo es pentadimensional pues junto a las tres dimensiones físicas comunes de alto, ancho y profundo posee la dimensión económica como primer recurso productivo para el hombre, y además la dimensión social que lo lleva a ser la base de cualquier asentamiento humano.

El suelo es anisotrópico por cuanto, dada la geometría y distribución espacial de los poros, cualquier partícula, por ejemplo, de agua, que consideremos en un perfil de suelo tendrá en cada instante una dirección dominante hacia la cual orientará su movimiento en detrimento de las otras dos posibles. Sí se compara un sistema realmente isotrópico como es el entramado de tubos de un radiador, donde cualquier partícula de agua tiene igual probabilidad de circular en una cualquiera de las tres orientaciones posibles (x, y ó z); en el suelo que es el ejemplo acabado de un medio anisotrópico, dicha partícula tendrá en cada posición solo una dirección dominante para su siguiente movimiento. Igual significación tendrá el calificativo del suelo como medio poroso tortuoso, esto es, caracterizado por una extrema variabilidad en la geometría, orientación y dimensiones de los poros a lo largo del recorrido de cada uno de ellos circunvalando la matriz del suelo. Figura 70.

Como señaló el Profesor Zsabolcs en 1994, el suelo es dinámico, continuamente está evolucionando bajo el influjo de los más variados agentes y condiciones, constituye pues un centro de intensa actividad y por ello nunca puede considerarse como un

producto terminado, siempre estará en equilibrio con las condiciones, cambiantes, del entorno. Ese mismo atributo de intenso dinamismo presupone que el suelo se comporte como un sistema elástico, el cual continuamente se aviene a los cambios que se dan en

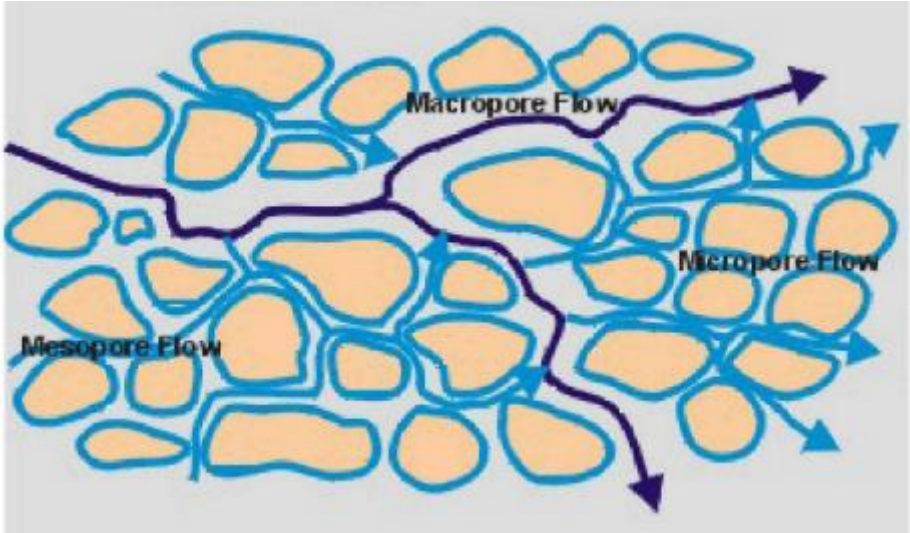


Figura 70. Diversidad poral y tortuosidad del sistema poroso (Foto: Internet)

las condiciones circundantes; y más aún que elástico el suelo exhibe algún grado de resiliencia, dependiendo fundamentalmente de las características que revista su complejo bio – coloidal, la referida resiliencia en el suelo posibilitará, siendo alta, que el mismo se recupere en relativamente corto tiempo de impactos negativos que haya podido recibir.

Como quedó dicho al final de la sección anterior, mientras el complejo bio – coloidal tiene el desempeño de fase plásmica del suelo, al binomio: limos + arenas le corresponde el rol de esqueleto infraestructural del suelo, seno de las muy variadas reacciones del plasma que física, química y biológicamente hacen posible el arraigo y la evolución vital de los diferentes organismos que se desenvuelven en este medio de vida que es el suelo.

9.6. IMPORTANCIA DEL SUELO.

9.6.1. El Suelo sustrato y sustento de la biomasa captadora de energía cósmica.

La importancia del suelo estriba principalmente en que él constituye el sustrato sobre el cual prospera y ha prosperado desde el Período Silúrico hasta el presente, las primeras plantas y posteriormente toda la biomasa vegetal captadora, procesadora y almacenadora de la energía radiante del sol y que hoy se nos brinda como combustibles fósiles, como energía calórica en los materiales vegetales secos y como energía química en los alimentos vegetales y animales frescos.

9.6.2. El Suelo transformador de sustancias.

Continuamente sobre el suelo crece la vegetación captadora de CO_2 y purificadora del aire, dentro del suelo evoluciona la necromasa producto de los materiales caídos sobre él, convirtiendo al suelo en el segundo sumidero de carbono de la naturaleza, al retener bajo las diferentes formas húmicas las grandes cadenas carbonadas que de otra forma hubieran ido a parar a la atmósfera externa con los consabidos efectos ambientales negativos. De otro lado, en el intrincado sistema poroso de cada suelo discurre toda la humedad que, habiéndose precipitado desde la atmósfera, se infiltra posteriormente en el suelo observando diferentes regímenes de velocidad, así como la acción de la biota del suelo que se traduce en el mejoramiento de su calidad, de ésta manera se hace posible establecer que la calidad del agua y del aire dependen en buena parte de la actividad filtrante y depuradora de sustancias que tiene el suelo.

9.6.3. El Suelo, sistema regulador de acuíferos y del régimen pulsátil de los ríos.

El suelo como medio poroso que capta, almacena y cede humedad se constituye en el envase natural del agua y por tanto se constituye en sector fundamental dentro del ciclo hidrológico que impacta factores tan decisivos como la capacidad de infiltración del agua en el suelo, la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, el escurrimiento, la capacidad de percolación y de flujo lateral y por ende impacta la dinámica freática, la recarga de acuíferos y el régimen pulsátil de las corrientes superficiales.

9.6.4. El Suelo, banco de germoplasma universal.

El suelo siempre tiende a estar bajo la protección de una cobertura vegetal determinada, dentro de cada condición ecosistémica, la razón para que ello ocurra, es la permanencia de semillas en las diferentes profundidades del suelo, bajo todas las condiciones climáticas y en los más diversos estadios de latencia, lo cual es documentado periodísticamente por la nota que registra la Revista CAMBIO en su edición Nº 625, agosto de 2006, Sección RADAR; “ 20.000. Número de años de antigüedad de la semilla de palma datilera, hallada en el monte bíblico de Masada, que una profesora israelí acaba de hacer germinar en Jerusalén”. Un hecho del día a día nuestro lo constituyen aquellas construcciones que en su fase inicial de excavaciones para fundación sufren una pausa en su desarrollo, con lo cual la vegetación prospera a los pocos días de suspendidos los trabajos, la razón es la misma.

9.6.5. El Suelo, archivo histórico de la humanidad.

Dada su condición de piel excitada de la tierra, sujeta a procesos erosivos por agentes hídricos y eólicos, el suelo cubre la mayoría de los vestigios de culturas antiguas, preservándolas en todo caso de su deterioro por los agentes del intemperismo. En tal sentido son célebres muchos casos como las pirámides de Keops en Egipto. El palacio de Petén en Guatemala, Chichen Itzá en Yucatán, México y el Templo Mayor en pleno Zócalo de la Ciudad de México, DF. Aún más, en su perfil, el suelo guarda las huellas y rasgos que han imprimido en él las diferentes técnicas de manejo a las cuales ha estado sometido, como ejemplo de esta situación se refiere al lector a las zonas cubiertas por materiales espólicos que han quedado en las zonas de minería aurífera de aluvión. O en un contexto más agrícola se remite al autor a algunas de las áreas cubiertas por cultivos de caña azucarera bajo riego por espacio de más de 30 años en el Valle geográfico del Río Cauca en Colombia, donde se hacen palpables los rasgos de la salinización de perfiles. Similares situaciones son visibles en áreas dedicadas al cultivo de la papa en el altiplano cundiboyacense y en muchas áreas dedicadas al cultivo del banano de exportación en el Urabá antioqueño y en la Zona Bananera del Magdalena.

9.6.6. El Suelo, soporte físico de todas las actividades humanas.

Independientemente de la visión que se tenga del recurso, y del uso, consciente ó inconsciente que se haga del mismo, toda actividad que desarrolle el hombre siempre tendrá como su apoyo, el suelo, de allí la importancia de sus dimensiones cuarta y quinta: social y económica, respectivamente.

X. GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DEL SUELO

"Excavar es abrir un libro escrito en el lenguaje que los siglos han hablado dentro de la tierra."

Spyridon Marinatos

El suelo es un cuerpo natural dinámico, resultante de la interacción de los factores climáticos y biológicos que actúan sobre los materiales de la corteza terrestre, transformándolos a través del tiempo, y generando el perfil pedológico, más o menos diferenciado en horizontes, según las características del relieve y la mayor o menor intensidad de los procesos físicos, químicos y biológicos involucrados.

Todas las personas que tienen a la Biblia como el Libro Sagrado de su Credo Religioso están inclinadas a asumir la palabra Génesis como sinónimo de comienzo, o de principio de algo, debe aclararse que en las Ciencias de la Tierra el mismo vocablo se emplea para significar generación, formación, "producción" de un cuerpo o de una situación dados, involucrando por tanto la serie de pasos y estadios implicados en ese desarrollo, así, más que a un instante, la palabra génesis en éste caso, hace referencia a un amplio espectro de situaciones interactuantes en el tiempo y el espacio; por tal razón, en algunas circunstancias, y no con poca redundancia se le iguala a la expresión "Génesis y Evolución"

No obstante, y como guía para la siguiente discusión, conviene puntualizar aquí acerca de las diferencias implícitas en la evolución que puede tener un suelo en ausencia o en presencia de un elemento tan dinamizador de procesos como es el hombre. En consecuencia, queda establecido el uso del término Génesis para hacer referencia al suelo sometido a la acción de los diferentes agentes formadores del mismo, en ausencia del hombre, en tanto que el vocablo Agrología hará relación a la serie de cambios que sufre el suelo, cuando a la acción de los agentes naturales comunes se une la actividad antrópica. Se entenderá entonces que, merced al efecto dinamizador del hombre, mientras la Génesis pedológica, o Pedogénesis, es relativamente lenta, la "velocidad" con la cual se dan los cambios agrológicos es relativamente mucho mayor y será factible hablar de la Agrología como la evolución propia de los "suelos manejados por el hombre".

Independientemente de lo planteado en el párrafo anterior, tanto la Génesis como la Agrología hacen relación al *"modus operandi"* de los diferentes factores de formación de suelos en cada caso particular, por tanto, al nivel de objetivos del presente curso, se hace imprescindible su conocimiento con el mayor detalle para poder tener una aproximación efectiva a la constitución física, química , biológica y nutrimental del suelo, todo lo cual confluirá en el funcionamiento general de dicho individuo.

X.1. FACTORES DE FORMACIÓN DE LOS SUELOS.

Los factores pedogéneticos o factores de formación de suelos son agentes y/o fuerzas que interactúan dentro del marco de condiciones que delimitan y/o caracterizan cada sitio de la corteza terrestre para generar procesos, transformaciones o modificaciones en naturaleza, tiempo y espacio en los materiales generadores de los suelos, hasta el punto que pueda afirmarse que el suelo es el resultado del equilibrio metastable que mantienen en todo momento, entre sí y con él, los factores que actúan sobre el medio edáfico.

La literatura científica mundial establece que son cinco los principales factores responsables de la pedogénesis, el orden de importancia de estos cinco factores, según su mayor o menor influencia en los mecanismos de la formación de los suelos, no es fácil de determinar, ya que varía de acuerdo con las características de cada factor y a las condiciones individuales del sitio del terreno que se esté considerando. Los factores de formación del suelo son: el material de origen, material de partida o material parental, el clima, el relieve, los agentes naturales o bióticos y el tiempo. A continuación, la discusión detallada de cada uno de ellos.

X.1.1. Material parental.

El material parental, de partida, o de origen constituye "la materia prima" del proceso de edafización, esto le confiere una importancia significativa a éste factor dentro del desarrollo del individuo suelo, puesto que, en atención a su mayor o menor estabilidad a las condiciones climáticas, de relieve y actividad biótica del entorno determinará en buena parte "la velocidad" de edafización, esto es, el tiempo que tomará el proceso de pedogénesis a través de los diferentes estadios de evolución de ese suelo; o dicho de otra forma, el material parental determinará el grado de evolución o desarrollo que será factible observar en un suelo dado, en atención a las condiciones del entorno.

El material parental puede ser mineral u orgánico, dentro de los primeros habrá que distinguir entre residuales y transportados, los cuales serán discutidos en el párrafo

siguiente. Dentro de los materiales parentales orgánicos se diferenciarán los materiales de turba, fácilmente distinguibles en su composición de materiales vegetales y animales, dado el incipiente grado de descomposición que caracteriza a las turberas; y los materiales de “muck” o acumulaciones humíferas, imposibles de diferenciar en cuanto a su composición vegetal o animal, dado su avanzado nivel de evolución, diversidad de labilidades y entremezcla. Figuras 71 y 72.

Figura 71. Turbera, obsérvese la nitidez entre los diferentes componentes de la muestra, (Foto: Internet)

Figura 72. Acumulación humífera o “Muck”, los materiales constitutivos no son distinguibles, la entremezcla y evolución es intensa, caso común en áreas de manglar (Zona de Histosoles) (Foto: Internet)

Desde el primer capítulo se estableció que el presente estudio estaría focalizado prioritariamente a los suelos minerales y consecuentemente con ello vamos a estudiar

los materiales parentales minerales, divididos, como ya se dijo en el párrafo anterior, en residuales y transportados. Los materiales parentales residuales podrán ser ígneos; materiales parentales residuales sedimentarios; materiales parentales residuales metamórficos, según sea una roca ígnea, una sedimentaria ó una roca metamórfica, respectivamente, la roca que ocupe la zona más superficial de la columna estratigráfica del sitio en consideración y por tanto sea la roca que sufre la acción de los agentes meteorizantes o de intemperismo.

Es importante anotar aquí que la fertilidad nativa del suelo, tanto en relación con su factor capacidad, como a su factor intensidad y su factor velocidad, estarán en relación directa con la composición y especiación química del material de origen. En ese orden de ideas, los suelos provenientes de rocas ígneas ultramáficas y máficas tendrán una mayor presencia de elementos como el calcio, el magnesio y el hierro, en tanto que tenderán a presentar deficiencias en potasio; todo lo contario ocurrirá en aquellos suelos derivados de rocas ígneas félsicas. De otro lado, en el caso de materiales parentales provenientes de rocas sedimentarias, la composición química de los materiales cementantes tendrá un impacto significativo en la fertilidad nativa de los suelos resultantes. Finalmente, los suelos generados a partir de materiales metamórficos se caracterizarán por presentar perfiles con un grado considerable de heterogranularidad y con amplia variabilidad espacial en su profundidad efectiva.

De otro lado, se tendrán los materiales parentales transportados por diferentes agentes, como el agua, y en tal caso se hablará de materiales parentales aluviales, lacustres, fluvio-lacustres, de marisma, deltáicos y deltáico – estuarinos; del mismo modo cuando la gravedad se involucra con el agua en el proceso de transporte de materiales se referirán como aluvio-coluviales y coluvio-aluviales, aunque si el transporte es agenciado únicamente por la fuerza de gravedad se denominarán como materiales coluviales o simplemente coluviones. Cuando el agente de transporte es el viento, dichos materiales eólicos se dividirán entre dunas, Figura 73, relacionada con materiales gruesogranulares; loess, los cuales involucran fundamentalmente materiales medios a finos; y cenizas, haciendo referencia a materiales finos a muy finos hasta impalpables. Finalmente cuando el agente de transporte es el hielo, se hablará de materiales glaciares y entre ellos es común diferenciar los materiales de morrenas, (huellas de glaciares en tránsito asemejando huellas de un arado), caracterizados por su granulometría gruesa a muy gruesa y su emplazamiento en áreas con pendientes pronunciadas; los planos laborables ubicados en áreas con pendientes leves y con granulometría media a fina y los “Glacis” ubicados en áreas bajas y cóncavas, con granulometría fina predominante. Cabe aclarar finalmente que los eventos de transporte no necesariamente son únicos, aislados y episódicos; generalmente son poliepisódicos y materiales previamente depositados son retomados, removidos, retransportados y redepositados posteriormente

en otros lugares. Igualmente se dan “sepultamientos” por depositaciones sucesivas sobre la misma área.

Figura 73. Depositación de arenas medias y gruesas en dunas (Foto: Internet)

Entonces podrá decirse que el material parental de un suelo mineral está constituido por el conjunto de rocas y sedimentos transportados por el agua, por la gravedad, el hielo o por el viento, en específico revisten especial interés los conocidos como cenizas, lapilli, pómez y otros materiales piroclásticos, aportados por las erupciones volcánicas ocurridas en diferentes épocas, principalmente durante el Cuaternario. Los materiales de cenizas pueden haber sido transportados por el viento o removidos por las aguas de escorrentía y luego transportados por las corrientes que drenan las áreas más altas, formando depósitos recientes, medios o antiguos, gruesos o delgados, a lo largo de su recorrido, según como haya sido la dinámica eólica y/o fluvial durante el proceso de depositación y la relación espacio: temporal con las emisiones volcánicas de los piroclastos. La anterior disyuntiva ha generado al enfrentamiento entre vulcanólogos y sedimentólogos con el objeto de discernir acerca del carácter volcánico o sedimentario de las llamadas “cenizas volcánicas” ocurrentes en más de una tercera parte de la corteza terrestre emergida, correspondiente al área cubierta por los suelos de ando o andosoles.

Como ha quedado establecido desde el comienzo de esta sección, existen diferencias en la estabilidad de los materiales parentales a las condiciones de exposición a la acción del intemperismo o meteorización. Dicha estabilidad está directamente relacionada a las sentencias establecidas por las Series de Reacción de Bowen, con lo cual los materiales ricos en cuarzo o ácidos son más estables o resistentes al intemperismo que aquellos bajos en el mismo mineral, o básicos y hasta ultrabásicos.

Los materiales parentales ácidos, con más del 25% de cuarzo y a veces hasta el 50%, como son aquellos derivados de granitos, granodioritas y tonalitas dan lugar a suelos sueltos a friables, ricos en minerales primarios, sobre todo cuarzo y algunos feldespatos sódicos, moderada a excesivamente drenados, con bajos factores capacidad, intensidad y velocidad de fertilidad nativa, colores de baja intensidad en razón a sus bajos tenores de hierro. Por su parte, en tales suelos, los minerales secundarios como las arcillas tienen reducida presencia y se tipifican como arcillas 1:1, difórmicas o canditas en los climas cálidos; y esmectitas, 2:1 o trifórmicas y micas hidratadas o 2:1 sustituidas, en climas fríos y en climas áridos.

De otra parte, los materiales parentales básicos o bajos en cuarzo, y correlativamente altos en olivino, anfíboles, piroxenos y feldespatos cálcicos, como son la peridotita, el gabro, el basalto y la diabasa, caracterizados por coloraciones oscuras dan lugar a suelos de colores con matices oscuros e intensos, con una baja presencia de cuarzo y una considerable presencia de minerales secundarios como arcillas y hierro libre, que se oxida o se reduce, en obediencia a la dinámica hídrica del medio, la fertilidad nativa es media a alta; las canditas y haloisitas, del tipo difórmico o 1:1, dominan en la fracción arcilla cuando el suelo evoluciona en condiciones de buen drenaje; en tanto que cuando se dan condiciones de drenaje imperfecto a impedido o se registran estaciones marcadas de sequía la montmorillonita, típica arcilla 2:1, domina el complejo arcilloso

En atención a la fracción significativa que cubren sobre la corteza terrestre emergida, a la variedad de franjas latitudinales y altitudinales en que lo hacen, y correlativamente su importancia en la agricultura mundial, los suelos de ando o derivados de ceniza volcánica merecen una mención especial.

Las cenizas volcánicas están constituidas esencialmente por fragmentos calificados mecánicamente como impalpables, de vidrio volcánico, feldespatos cálcicos y cálcico-sódicos y minerales ferromagnesianos del tipo de la biotita, de relativamente rápida intemperización, entremezclados con cantidades variables, generalmente bajas de cuarzo. La mayoría de las cenizas volcánicas, sobre todo las ocurrentes en las vecindades de la Cuenca del Pacifico, específicamente en la región de Los Andes, son andesíticas, y por tanto tienen composición moderadamente básica. De allí el nombre de Andosoles para el orden de suelos generado a nivel mundial a partir de esos materiales.

Como se señaló anteriormente, las cenizas son transportadas por el agua y/o el viento y al depositarse “sepultan” el material que les subyace, suelo o roca. Cuando el agente de transporte es el eólico se genera una morfología de depositación denominada como depositación en domos, Figura 74, bastante común en el Triángulo Cafetero Colombiano. Una vez depositada la ceniza, a través de las más diversas condiciones climáticas, dada la alta inestabilidad a la meteorización de sus materiales constitutivos,

de forma relativamente “rápida” se genera un mineral secundario conocido con el nombre genérico de “alofana” con el cual se tipifica una arcilla, en principio un silicato de aluminio con diversas variaciones a esa composición básica, carente de estructura cristalina fija, esto es, una arcilla amorfa, por cuanto no difracta la luz en el microscopio petrográfico. Entretanto, al tiempo que la arcilla referida comienza a generarse, organismos pioneros como algas, líquenes, musgos y algunas plantas oportunistas empiezan a medrar en dicho sustrato, alguna fauna primaria anida en dicha cubierta vegetal al tiempo que los restos de cubierta y ocupantes de la misma realizan el consabido tránsito a necromasa y humus con el transcurrir del tiempo, el cual en éste caso particular es significativamente reducido en atención a la considerable riqueza mineral de las cenizas. Dada la finura del material mineral, éste llega a alcanzar una intensa entremezcla con el humus producido, lo cual les imparte a estos suelos unas características especiales, como las siguientes:

a. Perfiles generalmente gruesos, de color oscuro en sus horizontes superficiales, friables y con límites nítidos entre horizontes.
b. A pesar del color oscuro referido, los contenidos de humus no son necesariamente altos por lo general, y el humus presente, muy fino e intrincadamente entremezclado con la ceniza impalpable, es altamente estable a la descomposición microbiana.
c. Baja densidad aparente, atribuible a la alta microporosidad que imparte la entremezcla alofana: humus, la cual a su vez es responsable de una relativamente baja capacidad de infiltración, incrementada con el nivel de secamiento del suelo, pudiendo llegar a comportarse como material hidrofóbico irreversible cuando alcanza el nivel de seco a la estufa, debido a la alta presencia de grasas y ceras en el humus.
d. La alta microporosidad de los andosoles los lleva a exhibir una considerable capacidad de retención de humedad, la cual, en razón a que se trata de materiales “sepultantes” les comunica una alta susceptibilidad a los movimientos en masa, incrementada en temporadas de lluvias y en terrenos con algún grado de inclinación que resulte ser más ó menos susceptible a la acción de la gravedad.
e. Si bien los agregados estructurales no son muy estables, los suelos de ando presentan una baja susceptibilidad a la erosión hídrica, en razón a la finura de sus agregados y a la intensa entremezcla humus: alofana, condición ésta que se traduce en que en muchas ocasiones los taludes que involucran a estos suelos exhiban inclinación superior a los 90º.
f. Naturalmente presentan alta capacidad de intercambio catiónico, CIC, sin embargo, como consecuencia de las condiciones de acidez alta a extrema, prevalente en los trópicos, dicha CIC suele verse disminuida bajo tales condiciones.
g. Carecen casi totalmente de adhesividad y plasticidad cuando el material está húmedo. En consecuencia, cuando logran rebasar el Límite Líquido (L_l), se hacen

muy propensos a generar flujos de lodo.

Figura 74. Depositación de cenizas volcánicas en domos sobre lomeríos (Foto: Internet)

X.1.2. Clima.

Aunque todos los componentes del clima impactan la génesis del suelo, al nivel de este trabajo, la atención será focalizada a los agentes: agua, temperatura y viento. Es innegable la importancia del agua, bajo sus diferentes acepciones, pluvial, de escurrimiento, freática, de congelamiento, vapor de agua, humedad ambiental, gradiente de evapotranspiración, todas apuntando a su papel como agente de intemperismo físico, químico y biótico, en tanto que la temperatura se encuentra involucrada, como ya se ha señalado, en los tres tipos de meteorización mencionados. Finalmente, el viento cobra importancia en todos ellos, como agente modificador instantáneo de condiciones de temperatura y humedad ambiental.

El clima influye en la formación de los suelos a través del control, vía humedad y temperatura, de muchas de las reacciones químicas y físicas que se suceden en el proceso evolutivo, además funciona como incentivador y modificador del componente orgánico, a través de sus diferentes estadios de biomasa, necromasa y humus y aún llega a afectar al factor relieve, puesto que actúa directamente en la modelación de las

formas de la superficie terrestre. Cabe aclarar que el clima, si bien es menos variable que el material parental, no es un factor estable, por lo que puede llegar a exhibir cambios considerables en períodos de tiempo, equivalentes a la edad de algunos suelos.

El agua es el agente central de la “gelifracción” o “crioclastia”, merced a la cual la roca es fracturada por acción de la presión que ejercen los cristales de hielo que llegan a formarse en el seno de la roca. La mayoría de las reacciones químicas se suceden en medio acuoso; las plantas toman elementos nutritivos desde la solución del suelo, el agua es protagonista de primer orden en la formación de los tejidos orgánicos, adicionalmente el agua es el medio de lavado y trasporte en solución y suspensión de materiales dentro del perfil de suelo, no dejando de lado el hecho de que el agua es el agente más activo en el desarrollo de los procesos erosivos que impactan al suelo. Figura 75.

La relación agua: perfil de suelo puede sumarizarse así:

1. La concentración del ion hidrógeno en el suelo aumenta al aumentar la precipitación (reducción del pH, por acción de lavado del perfil)

2. La profundidad de los carbonatos y elementos solubles se incrementa en áreas lluviosas.

3. Los contenidos totales de nitrógeno en el suelo son más altos en las regiones caracterizadas por alta precipitación.

4. La formación de minerales arcillosos se incrementa en los climas húmedos.

La temperatura ambiental es factor determinante de los procesos evapotranspirativos que afectan al suelo y a su cobertura vegetal, por lo que se constituye en factor determinante del régimen hídrico del suelo, además actúa como catalizador en las diferentes reacciones químicas que se dan en el medio edáfico, es factor determinante de la intensidad y tipo de cobertura vegetal del terreno, y correlativamente con ello determina la velocidad, durabilidad y labilidad de los diferentes estadios evolutivos de la materia orgánica de cada suelo.

Como ya se señaló, el viento es otro componente del clima que tiene influencia directa e indirecta en el estado y evolución de los suelos. Al igual que el agua, el viento es un agente importante de transporte, por lo que puede acarrear materiales que pueden estar evolucionando en un sitio determinado y/o participando en una determinada reacción, hacia otros sitios distintos adonde pueden llegar a modificar la reacción que se pueda estar dando en ese segundo lugar.

Figura 75. Minutos antes de la tormenta. Sector de “El Charco”, Planeta Rica, Córdoba, Colombia. (Foto: R.S. Valencia A, 2013.)

La dirección y magnitud de los vientos influye en los desplazamientos y acumulación de residuos orgánicos y minerales poco densos, los más susceptibles a la acción eólica, modificando así el aporte de materiales orgánicos a la superficie de los suelos y consecuentemente la evolución de éstos.

Si bien, como ya se ha señalado, el clima determina la densidad y tipo de cobertura vegetal, también impacta la velocidad de evolución húmica de la misma, como se aprecia en las Figuras 76 y 77 se palpa la influencia sobre el %N de la Temperatura promedia anual y la humedad ambiental, estimada a través del Índice de insaturación ó coeficiente de Meyer, QNS, expresado como:

QNS = Ppt. anual (mm) / Déficit de saturación de humedad ambiental (mm Hg)

Cabe aclarar que en el eje de ordenadas se presenta en las dos gráficas en referencia el %N total en el suelo, por cuanto se considera a dicho guarismo como representativo del tenor de materia orgánica del suelo, como que dicha materia es

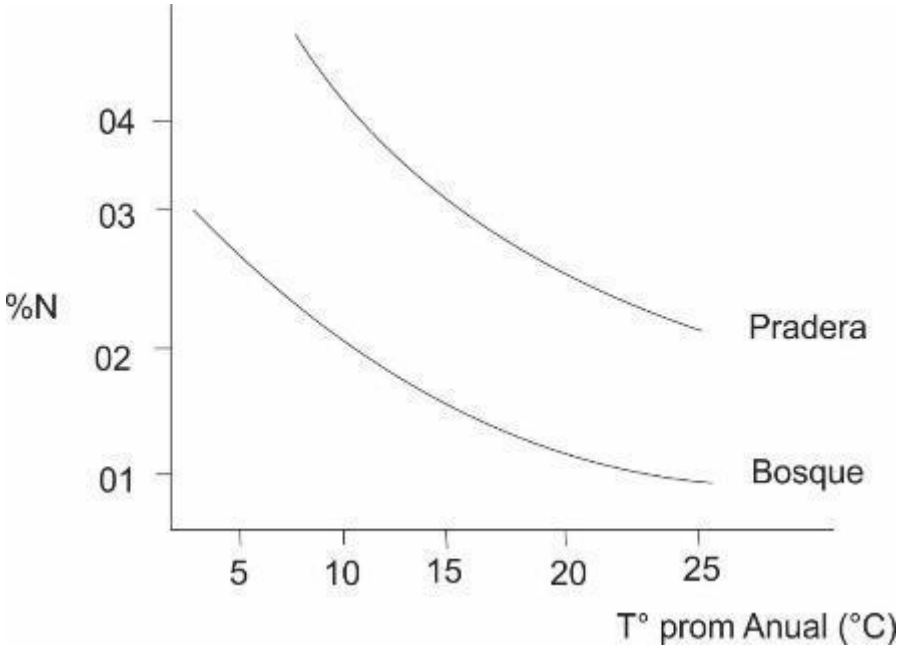


Figura 76. Variaciones del N total en función de la Temperatura promedia anual (Tomado de: Ortiz Villanueva, B. 1975)

la única fuente natural de nitrógeno con la cual cuenta el suelo. Finalmente debe resaltarse que en las dos gráficas que se analizan siempre el tenor de N (%) es mayor bajo cubierta de pastos que bajo cubierta forestal, éste hecho será analizado en detalle cuando se discuta la incidencia del Factor Biológico sobre la formación del suelo.

Cabe resaltar finalmente a éste respecto que si bien condiciones de alta temperatura y precipitación media anual propician la generación de altos volúmenes de biomasa, también son responsables de una considerable tasa de evolución húmica, lo que a la postre redunda en un menos tenor de materia orgánica en el suelo que evoluciona bajo esas condiciones de extrema precipitación y temperatura, como ejemplo se puede comparar el tenor húmico de los suelos de la sabana de Bogotá y de la sabana cordobesa y sucreña.

En la Figura 78 se presenta la relación existente entre la precipitación media anual y la reacción del suelo, pH. Debe aclararse aquí que el simple guarismo que refleja el pH merece, al igual que la temperatura de un animal, un análisis detenido, por cuanto refleja en una simple cifra una serie de hechos que inciden sobre el parámetro en referencia, así entonces el pH de un suelo puede ser impactado por factores tan diversos como: la actividad biótica, el tipo de cobertura vegetal con sus exudados radiculares que le son inherentes, el nivel de precipitación y temperatura de la temporada climática a la cual esté sometido el suelo, la especiación iónica de la solución del suelo, los niveles y períodos de inundación que afecten al terreno, y como se señala en la figura en

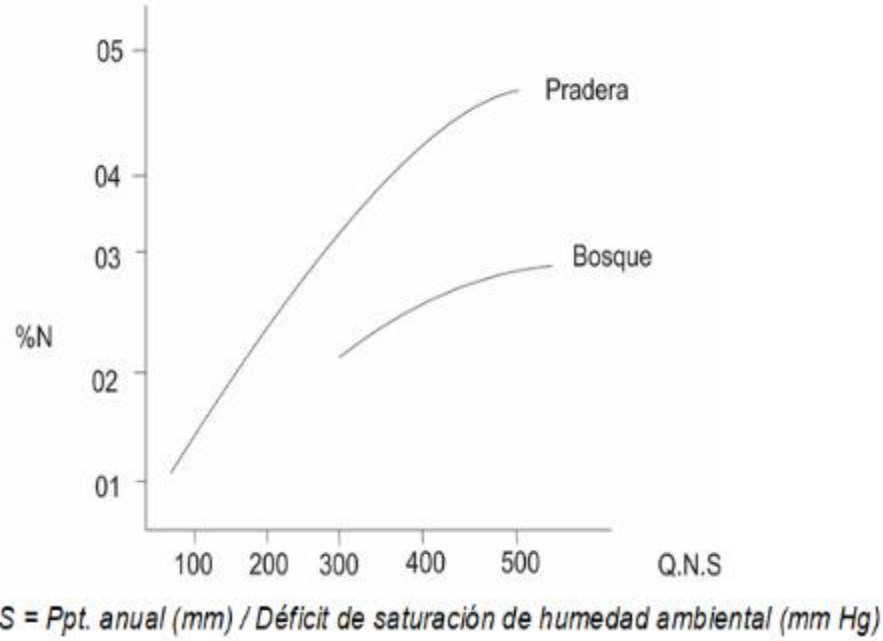


Figura 77. Variaciones del N total en función de la humedad ambiental (Tomado de: Ortiz Villanueva, B. 1975)

discusión, el nivel de precipitación pluvial anual a la cual está sometido el suelo en cuestión.

Como puede observarse en la Figura 78, a medida que se incrementa la precipitación promedia anual, se reduce el pH del suelo a una tasa apreciable a niveles de precipitación anual inferiores a 670 mm/año, QNS=202; a partir de dicho nivel, la relación de cambio entre las dos variables se reduce ostensible y simultáneamente se incrementa la presencia de iones H^+ (meq/100gr = cmol/Kgr) en el complejo de cambio del suelo.

La situación referida en el párrafo anterior tendría la siguiente interpretación: Al incrementarse la precipitación, una mayor cantidad de agua estará disponible para los flujos percolantes a través de los perfiles de suelo, por lo cual se registrarán mayores niveles de lixiviación en ellos, merced a los cuales los suelos perderán, entre otros, los iones básicos, dando paso a un enriquecimiento secular en iones H^+ en reemplazo de los iones que han sido desplazados a profundidad. Además, a niveles de precipitación anual inferiores a 670 mm/año, QNS= 202, la cobertura vegetal y por ende la interceptación radical es muy reducida, lo cual redunda en tasas incrementadas en la lixiviación de bases y por tanto en la acidificación del perfil de suelo.

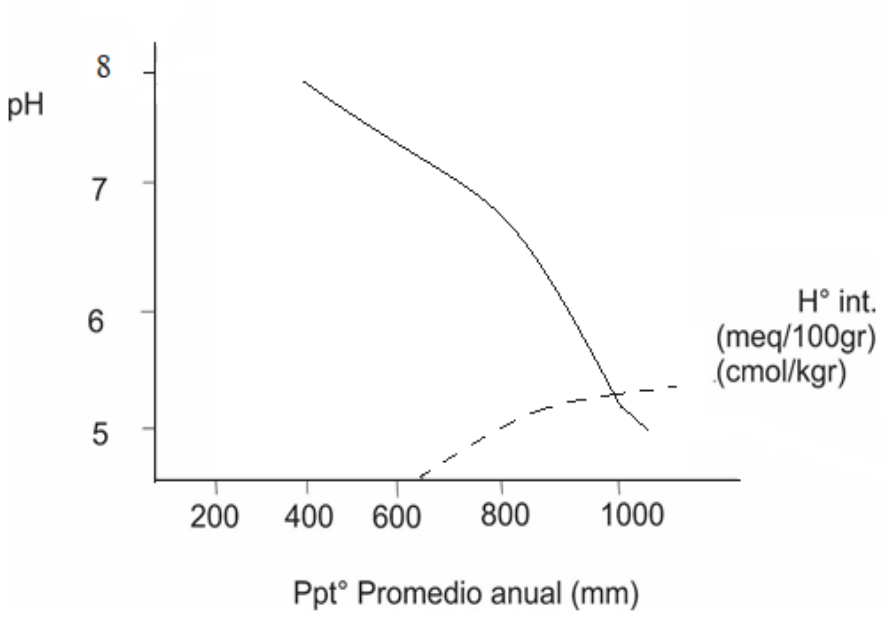


Figura 78. Variaciones del pH del suelo en función de la precipitación promedia anual (Tomado de: Ortiz Villanueva, B. 1975)

Según reporta Ortiz Villanueva (1975), Jenny y Leonard estudiaron a través de los Estados Unidos de América la CIC de los suelos derivados de loess y ubicados sobre la isoterma 11ºC, sus datos se presentan en la gráfica de la Figura 79, en la cual puede apreciarse como la CIC se incrementa hasta el nivel de 670 mm/año, QNS = 202, mientras los iones básicos saturan el complejo de cambio, esto es, en ausencia de iones H^+ en el mismo; sin embargo, a partir de dicho nivel de precipitación la lixiviación ya referida comienza a reducir la presencia de bases en el complejo, y a cambio se tiene una presencia cada vez incrementada de hidrogeniones (H^+), nótese la simetría y oposición de signo, entre las dos curvas referentes a la presencia de los dos tipos de especies iónicas. Figura 79.

Finalmente, en la Figura 80 se presenta la relación contenido de arcilla en el suelo obtenido y la Temperatura media anual circundante al mismo durante su génesis y evolución, obtenidas a lo largo de la isolinea de QNS = 400. En dicha gráfica puede apreciarse como se incrementa el porcentage de arcilla a medida que se tienen condiciones climáticas más intensas, condición insinuada por Boussingault, 1850's y refrendada por la "Ley de Zonalidad de Suelos" de Docuchaiev, 1880's, además de lo anterior puede apreciarse como, obedeciendo a las Series de Reacción de Bowen, ya señaladas en el aparte respectivo a Rocas ígneas, las rocas con un mayor contenido de minerales ferromagnesianos, básicas como el basalto, son más propensas a generar arcillas que aquellas ricas en cuarzo, ácidas como el granito. En resumen, como se señaló al comienzo de este aparte, los tipos de arcilla serán influidos integralmente por

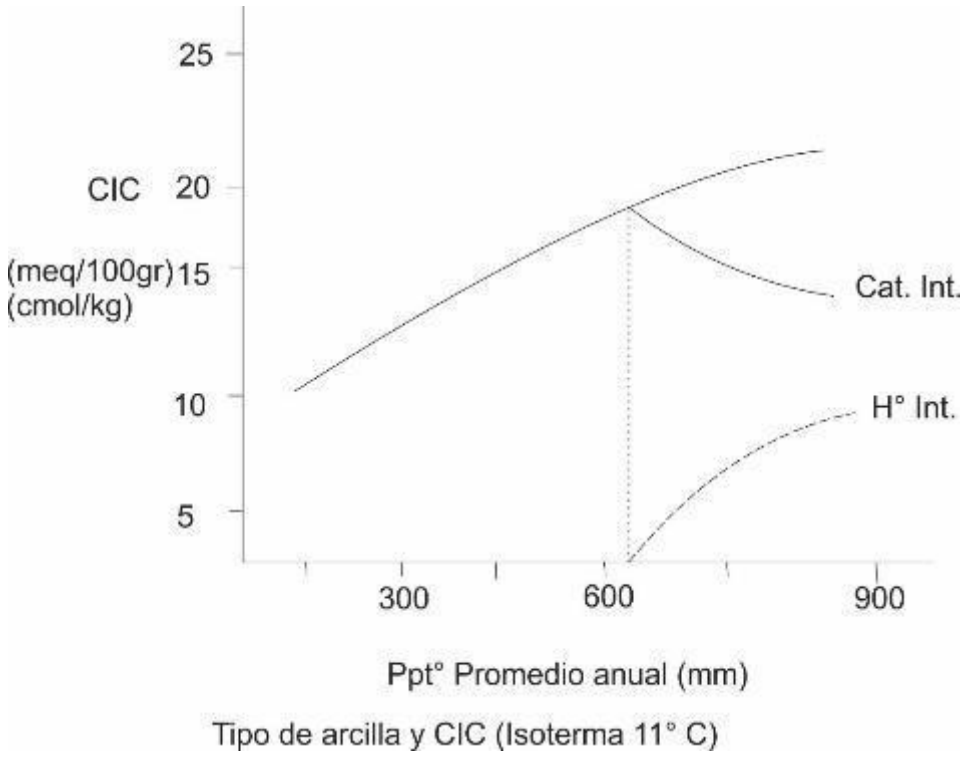


Figura 79. La Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo en función de la precipitación promedia anual (Tomado de: Ortiz Villanueva, B. 1975)

las condiciones de material parental, térmicas, pluviométricas y de drenaje natural que rodeen la evolución de cada suelo, aunando a lo antes dicho el hecho de que mientras más intensas sean las condiciones climáticas circundantes mayor será el grado de evolución de la arcilla obtenida, el cual se extiende desde las micas hidratadas, de muy bajo grado de evolución, pasando por las esmectitas y las canditas y culminando en las muy evolucionadas arcillas tropicales.

X.1.3. Factor biótico.

Analicemos ahora el factor biótico en relación con la pedogénesis, es natural que tanto animales como vegetales estén involucrados en una dinámica de aportes de residuos de actividad orgánica y por lo tanto de generación de necromasa y humus que es por decirlo así la sangre de ese suelo, ya se ha dicho que hace parte del plasma de este. Así entonces aquellas plantas y/o animales medrando sobre ese suelo tienen unas apetencias nutrimentales que, como apenas es obvio van a generar desbalances nutrimentales en la solución del suelo. De otra parte, la acción mecánica de las raíces, a medida que crecen y engrosan su diámetro, al igual que el pisoteo animal son responsables de presiones sobre el cuerpo poroso que es el suelo, que obviamente impactan su evolución.

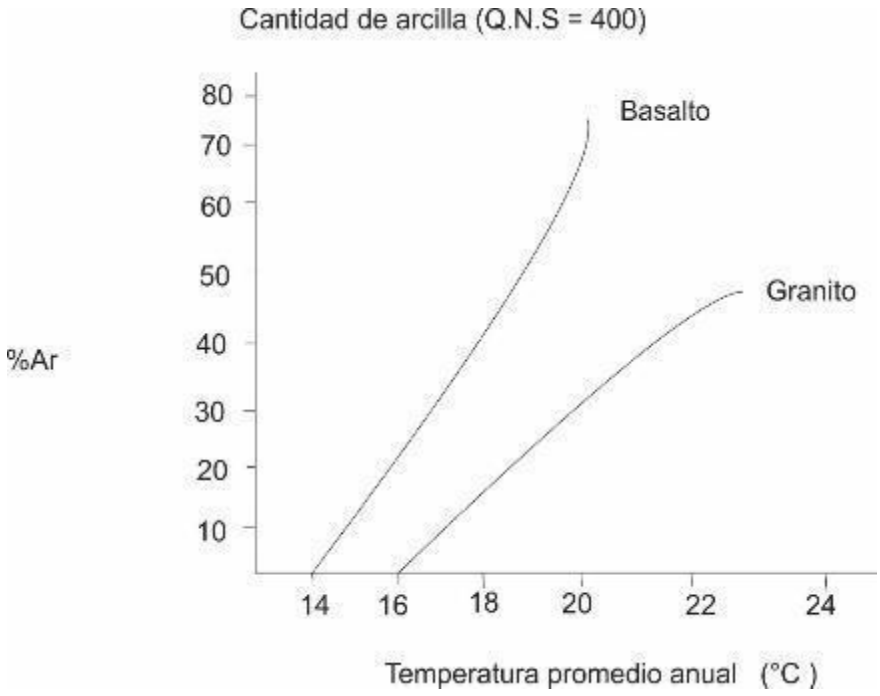


Figura 80: La Cantidad de Arcilla del suelo derivado de rocas ígneas básicas y ácidas en función de la Temperatura promedia anual (Tomado de: Ortiz Villanueva, B. 1975)

Desde la sección anterior se tiene pendiente el análisis de las diferencias en el tenor de materia orgánica del suelo bajo las dos coberturas naturales de bosque y pradera, en el contexto colombiano será factible asimilar ese par de situaciones a un suelo que evoluciona en la región del Bajo Vaupés, bajo bosque y otro que se da, bajo pradera, en el contexto de sabana dominante en los límites entre los departamentos de Meta y Guaviare, pues bien bajo el suelo de bosque las raíces penetran hasta una profundidad considerable, afectan en volumen significativo de suelo al tiempo que fracturan materiales a profundidad, propiciando que el agua percolante ejerza su acción de lavado sobre una columna de suelo de espesor comparativamente considerable, de otra parte, en el caso del suelo de pradera las raíces se concentran en los primeros centímetros del perfil, donde exhiben considerable profusión y de ese volumen relativamente reducido toman la dotación de nutrimentos que requiere el rebrote, el crecimiento y el desarrollo de la sabana; en el caso del bosque, por su parte, todos los nutrimentos son extraídos desde grandes profundidades y terminan combinados en fotosintatos que se alojan en sus tejidos aéreos. Finalmente, el bosque puede ser incinerado, liberando espacios para la agricultura, y entonces estos nutrimentos que estaban presentes en sus hojas y troncos vuelven a ingresar al suelo como cenizas, y comienza un nuevo ciclo; o el bosque es talado y exportada su madera, con lo cual es bien poco el reingreso de nutrimentos al suelo. En el caso de la pradera algún pasto muere a causa de sobremaduración, en tanto, otro pasto es consumido por animales, los cuales producen además de sus restos corporales, una cantidad de deyecciones y entonces los nutrientes vuelven al suelo; en razón a dicho reciclaje intenso de

nutrimentos se genera una mayor acumulación de humus en el suelo bajo la cobertura de pradera que en el suelo forestal. A la situación referida que exhibe el suelo bajo cubierta forestal se le ha denominado modernamente como suelo aéreo, en razón al uso que el indígena realiza aprovechando dicha situación, según la cual el árbol trae hasta su parte aérea los nutrimentos que sus raíces han extraído de profundidades considerables, y al incinerar el tejido vegetal él está llevando a la condición de cenizas aquellos nutrimentos provenientes de las profundidades, merced a los cuales puede realizar su cosecha de agricultura trashumante por ese ciclo, que lo impulsará a continuar la misma práctica de roza-tumba-quema-cosecha en un área vecina en el siguiente período agrícola, y así sucesivamente por espacio de 20 a 30 años cuando vuelve al lugar inicial, y éste ha recuperado su cobertura inicial, para repetir la práctica, misma que ha dado en denominarse técnicamente como de " Barbechos mejorados". Y, en resumen, lo que "el hombre blanco común" ve como deforestación, el "nativo" lo visualiza como supervivencia, en tanto que el científico lo conceptúa como reciclaje nutrimental. Figura 81.

De la anterior exposición se desprende que existen diferencias marcadas en las proporciones de eluviación que se registran bajo las dos coberturas naturales que se discuten, siendo mayor la que se da bajo cubierta forestal. Sí a éste mayor lavado de perfiles bajo bosque se adiciona el hecho de un menor reciclaje nutrimental bajo tal cobertura se podrá concluir que bajo cubierta de bosque se registra una mayor nitidez

Figura 81. Varias facetas del reciclaje nutrimental en ausencia de quema, cercanías de Leticia, Amazonas, Colombia (Foto: I.D. Bustamante B. Enero 2011)

en la diferenciación de horizontes, al tiempo que la riqueza nutrimental de los mismos es inferior a la que puedan llegar a tener los horizontes constitutivos de perfiles desarrollados bajo cubierta de pradera.

Figura 82. Vegetación secundaria en el bosque pluvial tropical, cercanías de Leticia, Amazonas, Colombia (Foto: I.D. Bustamante B. 2011)

La mayor intensidad de lavado en los perfiles forestales conduce a que los caudales percolantes bajo tales condiciones tengan reacción ácida, lo cual propicia que la microbiota edáfica en tales condiciones esté dominada por los hongos, en tanto que bajo condiciones de pradera estará constituida fundamentalmente por bacterias. La diferenciación de la población microbiótica del suelo conducirá a su vez a que, bajo cubierta forestal el humus que se forme sea fundamentalmente acido; mientras que las bacterias que abundan bajo la cubierta de pradera forman fundamentalmente humus básicos. Figuras 82 y 83. No obstante, en las praderas habiendo bacterias también se encuentran hongos, pero de todas maneras las bacterias predominan sobre los hongos y el humus generado entonces es más bien un humus neutro; esta condición lleva finalmente a que los suelos desarrollados bajo pradera presenten mayor potencialidad nutrimental cuando se utilizan para cultivo que los suelos que se desarrollaron bajo cubierta de bosque.

Independientemente de la alta variabilidad y dinamismo que reviste el grupo de agentes bióticos en su accionar pedogenético, dentro de ese amplio universo de agentes bióticos que se suceden sobre un mismo sitio, en obediencia a la sucesión de situaciones que llegan a generarse en períodos de tiempo relativamente cortos, como puede ser el tránsito de biomasa aérea forestal a mantillo u hojarasca de bosque, con la consecuente proliferación de diferentes tipos de organismos cada vez más adaptados a cada condición que se da en la sucesión ecológica, merece especial atención la actividad

Figura 83. Vegetación típica de sabana tropical en período de estiaje, Campo Rubiales, Meta, Colombia (Foto: I.D. Bustamante B. 2013)

antrópica, como depredador-consumidor por excelencia, y por ende, como acelerador y modificador de los procesos naturales ecosistémicos, responsable por tanto de situaciones como por ejemplo de la tasa y calidad de materia orgánica que ingresa al suelo, las condiciones físicas de porosidad y resistencia del suelo, lo mismo que el régimen hídrico de éste y la especiación iónica y concentración de la solución del suelo. Figura 84.

X.1.4. Factor relieve.

El relieve hace relación al conjunto de formas que configuran la superficie terrestre, en él se destacan dos parámetros, cuales son la topografía y la pendiente, ambos impactan significativamente la acción de los demás factores, principalmente el clima y la cubertura vegetal. En consecuencia, será factible palpar en el terreno la marcada influencia que ejercen la topografía y el relieve en ciertos atributos del suelo como:

1. Profundidad del suelo; a medida que decrece la pendiente, los suelos tienden a ser más profundos.

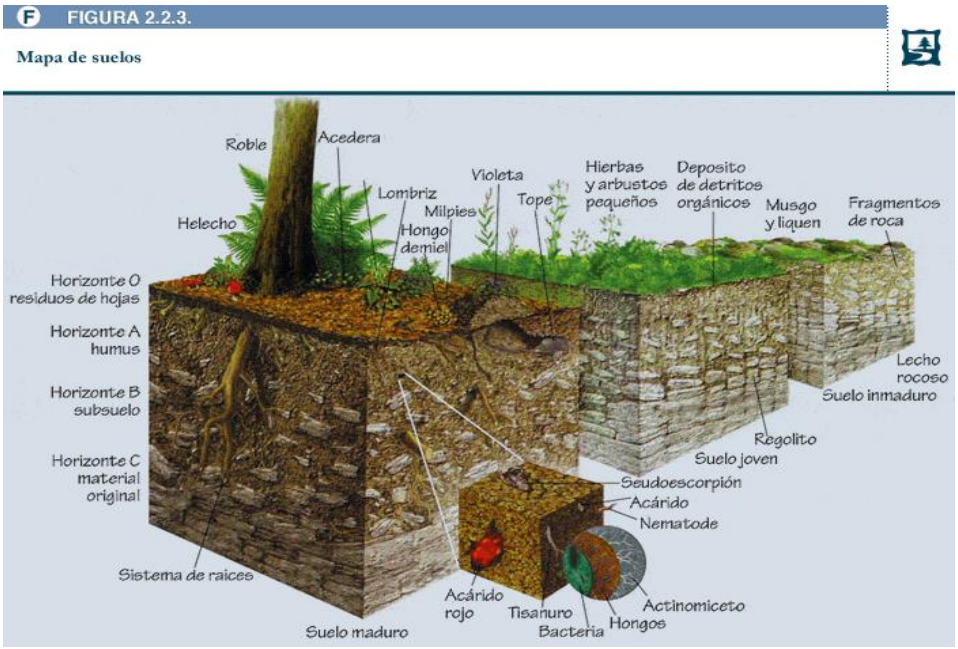


Figura 84. Evolución Biótica en el suelo (Foto: Internet)

2. Espesor y diferenciación de los horizontes; los procesos pedogenéticos funcionan a mayor profundidad en condiciones de pendientes mínimas y buen drenaje, lo cual genera horizontes más espesos y con límites nítidos entre ellos

3. Contenido y condición de la materia orgánica; en condiciones de escasa pendiente y buen drenaje la materia orgánica evoluciona de forma expedita, en tanto que, si el drenaje se hace imperfecto a pobre, la biomasa tiende a acumularse.

4. Régimen hídrico del perfil de suelo; en las zonas con alta pendiente el drenaje natural está constituido principalmente por el drenaje externo, aunque el drenaje interno es generalmente moderado a bueno, en tanto en las zonas de escasa pendiente el movimiento del agua dentro del perfil es lento en la mayoría de las ocasiones.

5. Colores en el perfil; el desarrollo de colores se genera más rápidamente y en tonalidades más firmes en áreas con pendientes considerables.

6. Reacción del suelo; Salvo en muy escasas ocasiones, las áreas planas se asocian con acumulación considerable de cationes y consecuentemente baja presencia de iones hidrógeno, lo cual se refleja en pH altos en esas condiciones; en tanto que en las zonas con pendientes apreciables se favorece el lavado de sales solubles, por lo que la concentración de hidrógenos aumenta y consecuentemente el pH disminuye.

La relación entre relieve y clima es abundante en sus implicaciones, bajo las condiciones del trópico cobra validez la “Ley Altitudinal de Francisco José de Caldas”,

según la cual se da una reducción de 1°C por cada 100 metros que se ascienden sobre el nivel del mar; así mismo se da el efecto topográfico sobre la distribución de columnas de precipitación, según la cual las columnas de lluvia se incrementan a medida que el punto en consideración incrementa su altitud; igualmente, la fuerza y dirección delos vientos tiene influencia altitudinal.

Finalmente cabe destacar el efecto que tiene la catena ò toposecuencia, esto es, la sucesión de cotas altitudinales a lo largo de un transecto, sobre la distribución de la flora, su configuración morfológica, sobre todo en lo que toca a inserción e inclinación de hojas, flores y frutos, y sobre la fauna. Así mismo, la relación formación: evolución de la materia orgánica exhibe una marcada influencia altitudinal: climática.

Por último, merece mención la relación biunívoca que se registra entre relieve y litología, en atención a que la evolución del relieve funciona ceñida a la susceptibilidad de la litología a los procesos erosivos, modeladores de relieve. Pero a su vez las condiciones de relieve determinan los tipos y grados de erosión superficial susceptibles de darse, y por ser dichos procesos renovadores de la superficie terrestre y modificadora de los procesos pedogenéticos, a los cuales interrumpe y secuencia, se destaca la relación mencionada en un comienzo.

Aunque ya se ha insinuado antes, cabe resaltar aquí el papel que juega el relieve y la pendiente sobre la dinámica del agua sobre y en el perfil de suelo, así entonces, la configuración del terreno determinará la fracción de la precipitación que escurrirá sobre el terreno y la fracción que se infiltrará, por lo cual será determinante para definir si la evolución del perfil se desarrollará con suspensiones y renovaciones sucesivas por efecto de la erosión, misma que generará entonces zonas de pérdida y áreas de ganancia. Finalmente, cuando las condiciones de relieve y baja pendiente determinan una muy baja escorrentía y una considerable infiltración, la evolución y el desarrollo de ese suelo no sufrirá interrupciones por efecto de la erosión, y por tanto los procesos pedogenéticos evolucionarán en un mismo cuerpo del suelo, y los movimientos del agua en el perfil del suelo serán fundamentalmente de tipo vertical, dando lugar a dinámicas de migración de sustancias y elementos, estudiadas como translocaciones y conocidas ampliamente como procesos de eluviación y lixiviación, mismos que al disminuir su velocidad generarán fenómenos de acumulación ó iluviación.

X.1.5. Factor Tiempo.

Antes de abordar este tema, tenemos que considerar que el suelo, como sujeto altamente dinámico que es, siempre se encuentra en equilibrio metastable con los diferentes factores que lo impactan. Se entiende un equilibrio metastable como aquel que se da sobre un sujeto, por acción de varios agentes activos con intensidad variable

en el tiempo y el espacio, por lo que el equilibrio en referencia resultará variando a través de las dos entidades mencionadas. De lo anterior se desprende que el tiempo, desde el punto de vista del comportamiento del suelo, resulta adquiriendo un desempeño relativo en función de los demás factores que actúan en la pedogénesis.

Igualmente se colige del párrafo anterior que el individuo suelo es sujeto de cambios múltiples a través del tiempo y el espacio; por tanto, se hace necesario en éste momento conceptualizar acerca de la catástrofe, definiéndola como el cambio repentino y de duración variable en una o varias de las condiciones circundantes a la evolución de un suelo. Correlativamente con lo antes expuesto, se establece como “Tiempo cero” al instante en el cual se completa una catástrofe y obviamente comienza una nueva fase evolutiva en el suelo.

Siendo entonces el tiempo un factor pedogenético relativo, será necesario distinguir entre el tiempo cronológico, susceptible de medirse mediante una diversidad de dispositivos y por tanto expresable en cantidades finitas, a diferencia del tiempo pedológico, relacionado con la intensidad con la cual actúan los diferentes factores pedogenéticos sobre un suelo y de acuerdo al cual los suelos se tipifican como: no suelo ó material de partida, reciente, juvenil, viril, maduro y senil, haciendo relación al grado de evolución de cada perfil en concordancia con la intensidad de acción de los diferentes factores pedogenéticos. Por tal razón “un suelo puede lograr su madurez en un período relativamente corto, o mantenerse como juvenil durante un período de tiempo relativamente amplio”

Sin embargo, conviene hacer claridad acerca de los términos: juvenil, viril, maduro, senil, etc. con los cuales se denomina la edad pedológica ó grado de evolución de un suelo, algo muy diferente a la edad de un humano, la cual es progresiva con el tiempo cronológico. En el suelo, la edad pedológica no avanza con el tiempo cronológico, simplemente es relativa al tiempo pedológico, esto es, a la intensidad con la cual han actuado los factores pedogenéticos.

Dada la variabilidad de condiciones e intensidad de acción de los factores pedogenéticos en el campo será de esperar encontrar una considerable variedad de perfiles. Desde el simple horizonte C, con algún grado de saprolización, pasando por el perfil A-C, en el cual la acción de organismos pioneros han logrado un incipiente desarrollo de vegetación oportunista y la consecuente acumulación de necromasa y humus que se generará; siguiendo a un perfil AB – C, en el cual comienzan a observarse en los últimos centímetros del horizonte A, algunos rasgos de iluviación de materiales finos, que aparentemente han eluviado desde los centímetros más superficiales del mismo horizonte, todo esto sin que aún se dé una diferenciación clara de un horizonte B, como si es observable en un perfil A – B – C; ó aún más en un perfil A_1 – A_2 – B – C, con

rasgos claros de virilidad en su evolución; ó lo que es más, el caso de perfiles del tipo: $A_1 – A_2 – B_1 – B_2 – C$; ó hasta del tipo: $A_1 – A_2 – A_3$ - $B_1 – B_2 – B_3 – C_1 – C_2 – Bw – W$, sintomático de un considerable grado de evolución.

No obstante, cuando se recorre el campo es común observar en la mayoría de los casos en zonas cubiertas por suelos residuales, un perfil que se repite en las cuatro orientaciones cardinales, dicho perfil se denomina como “Perfil modal”, por cuanto marca la moda, es el que exhibe la mayor frecuencia en el lugar. Sin embargo, dentro de la población de perfiles modales, es posible entresacar algunos perfiles con espesores reducidos en su primer horizonte, en razón a que lo han perdido por acción de la erosión; a esa colección de perfiles que se desvían de la moda, por exhibir un menor espesor en su primer horizonte, o en algunos casos, hasta carecer totalmente de él, se les agrupará bajo el término de “Perfil truncado” ó “Fase por erosión”. Igualmente pueden registrarse Fases por salinidad, sodicidad, drenaje, pedregosidad, gravillosidad, etc.

A manera de resumen de todo lo expuesto en relación a los factores pedogenéticos conviene aquí destacar que las condiciones que impactarían positivamente la velocidad de evolución del suelo serán: los climas húmedos, las altas temperaturas, la cubierta de bosque, por cuanto ella inducirá a incrementar la profundidad alcanzada por el flujo percolante, el material parental de alta permeabilidad, no consolidado y bajo en calcita, dada la considerable insolubilidad de dicho mineral (Solubilidad $CaCO_3$= $0.0131gl^{-1}$), la topografía plana aunada con el drenaje moderado a bueno. Para ejemplificar la alta resistencia de la caliza a la meteorización conviene señalar como en la Fortaleza de Kamenetz, en Ucrania, antigua Unión Ruso soviética, que habiendo sido abandonada en 1669 a raíz de la incidencia de la peste bubónica en esa zona, fue visitada por personal de National Geographic, alrededor de 1970, esto es, aproximadamente 300 años después de haber sido abandonada y en las losas de esa fortaleza que eran fundamentalmente de caliza se reportó suelo con profundidad efectiva entre 10 y 40 centímetros de espesor.

X.2. PROCESOS DE FORMACIÓN DE LOS SUELOS.

Un Proceso pedogenético, proceso formador de suelo, no es más que una combinación secuenciada de modificaciones y reacciones que involucran, en una diversidad de grados a los diferentes materiales y condiciones que tienen que ver con la evolución del suelo. Los Procesos de Formación de Suelos son cuatro básicamente, a saber:

2.1 Ganancias. Hace relación a todas las adiciones o llegada de materiales al perfil de suelo, ya sean en fase líquida, sólida o gaseosa.

2.2 Pérdidas. Incluye todos los procesos a través de los cuales se dan salidas o egresos, con alcance significativo, de materiales constitutivos desde el perfil de suelo, ya sea desde la superficie o de cualquiera de sus horizontes, subsuperficiales.

- *2.3 Translocaciones*. Hace relación al movimiento de materiales, minerales u orgánicos, dentro de un perfil determinado de suelo, generalmente en sentido descendente, aunque algunas veces ascendente.

- *2.4 Transformaciones.* Agrupa todas las alteraciones y modificaciones que pueden llegar a sufrir los materiales constitutivos del suelo, ya sean minerales u orgánicos.

Cada uno de los cuatro procesos pedogenéticos fundamentales agrupa una serie de procesos específicos, entre los cuáles se describen algunos a continuación:

X.2.1. Ganancias.

Dentro de éstas se agrupan procesos específicos como:

- ***10.2.1.1. Enriquecimiento:*** Hace relación a la adición, natural o antrópica, de materiales a un suelo.

- ***10.2.1.2. Acumulación*****:** Término genérico aplicable para indicar la adición de partículas minerales u orgánicas a la superficie del suelo.

- ***10.2.1.3. Cumulización:*** Es la acumulación sucesiva y episódica de desechos orgánicos en diferentes estadios de evolución húmica y humus verdadero entremezclados, sobre la superficie de un suelo mineral, puede llegar a alcanzar espesores hasta de 30 cm.; popularmente a cada episodio de depositación se le conoce como "camada", en el Caribe colombiano se denomina "tapón" y/o "taruya".

X.2.2. Pérdidas.

Éstas son de dos tipos, a saber:

- ***10.2.2.1. Lixiviación:*** Constituye la pérdida definitiva e irreversible de iones en solución desde el perfil de suelo a través de las aguas de percolación, la cual

culmina su recorrido en las aguas freáticas, por lo que llega a alimentar el freático externo o aguas superficiales y finalmente el océano.

- ***10.2.2.2. Erosión:*** Es la pérdida de partículas materiales minerales y orgánicas desde el horizonte superficial del suelo, en respuesta a la acción de desprendimiento y posterior transporte que ejercen sobre el terreno el agua o el viento.

X.2.3. Translocaciones.

El movimiento de materiales dentro de un perfil de suelo puede revestir algunas especificidades como las siguientes:

- ***10.2.3.1. Eluviación:*** Egreso y movimiento descendente de materiales en suspensión y/o solución, desde un punto ubicado a profundidad relativamente reducida en el perfil de suelo, con rumbo dominantemente vertical, hasta otro punto más profundo; este proceso es responsable de la generación de los horizontes conocidos como álbicos.

- ***10.2.3.2. Iluviación:*** Ingreso o arribo de materiales procedentes de niveles más superficiales hasta puntos más profundos del perfil, es un proceso que se da como consecuencia del anterior cuando ese flujo descendente cargado de partículas en suspensión encuentra una porosidad más reducida en su trayectoria, con lo cual se reduce su velocidad de flujo y se empiezan a acumular materiales allí entonces se genera un horizonte iluvial el cual, según el material acumulado, puede tener características que lo lleguen a tipificar como horizonte espódicos, argílicos, etc.

- ***10.2.3.3. Decalcificación*****:** Proceso en el cual emigran los carbonatos de calcio desde uno o más horizontes del perfil de suelo.

- ***10.2.3.4. Calcificación:*** Arribo acumulativo de carbonato de calcio en un horizonte subsuperficial del perfil de suelo; la acumulación referida llegará a generar el llamado horizonte cálcico, el cual cuando coincide con condiciones de cementación por el mismo material, llega a formar el horizonte conocido como petrocálcico.

- ***10.2.3.5. Salinización:*** Proceso por el cual se da una acumulación de sales solubles en un sitio del perfil, generalmente en la superficie del suelo; las sales más comunes son los sulfatos y los cloruros de calcio, magnesio, sodio y potasio.

- ***10.2.3.6. Desalinización:*** Salida de las sales solubles ocurrentes en el ó los horizontes salinizados.

- ***10.2.3.7. Alcalinización:*** También conocida como proceso de sodización; consiste en la acumulación de iones de sodio en los sitios de intercambio del complejo coloidal de un suelo.

- ***10.2.3.8. Desalcalinización:*** Desplazamiento y posterior lixiviación de las sales de sodio existentes en un horizonte; generalmente sucede de los horizontes A y el desplazamiento se dirige generalmente hacia los B, procurando el despeje de la zona de raíces.

- ***10.2.3.9. Lavado:*** Es el egreso mecánico de partículas minerales existentes en un horizonte; generalmente sucede desde los horizontes A hacia los B, procurando el mejoramiento químico de la zona de raíces.

- ***10.2.3.10. Podzolización:*** Consiste en la emigración química de aluminio, hierro y materia orgánica desde un horizonte superficial por acción de aguas percolantes a bajas temperaturas, lo cual acarrea la concentración de silicio en el horizonte remanente o residual.

- ***10.2.3.11. Laterización:*** Consiste en la emigración química del silicio fuera del perfil de suelo por acción de la percolación abundante y con temperatura alta, lo cual genera la concentración residual de sesquióxidos, dicha situación conjugada con procesos de eluviación: iluviación intensos, característicos en condiciones de clima bimodal, acarrea la formación de horizontes óxicos; los cuales cuando ocasionalmente se cementan debido a fluctuaciones extremas en el régimen pluvial de la zona, dan lugar a las condiciones conocidas como de lateritas y plintitas.

- ***10.2.3.12. Leuxinización:*** Es el “empalidecimiento” o reducción en la intensidad del color de los horizontes del suelo, la cual se da como consecuencia de la reducción de un elemento cromógeno tan significativo como el material orgánico, ya sea por mineralización o por transformación hacia otras sustancias menos oscuras.

- ***10.2.3.13. Melanización:*** Es el oscurecimiento de los horizontes, generalmente superficiales, del suelo como consecuencia de la mezcla de materiales oscuros, generalmente productos orgánicos, con los materiales minerales.

X.2.4. Transformaciones.

Entre éstas se destacan los siguientes procesos:

- ***10.2.4.1. Descomposición:*** Más conocida como alteración, hace referencia a la evolución de materiales minerales inicialmente complejos hacia otros más sencillos.

- ***10.2.4.2. Síntesis:*** Hace relación a la combinación interactiva de compuestos simples para dar lugar a sustancias de complejidad incrementada.

- ***10.2.4.3. Humificación:*** Se denomina así a la evolución, oxidación lenta e incompleta según Frederick Hardy, 1975, de los materiales orgánicos, para dar lugar a la ocurrencia de un compuesto intermedio relativamente estable y con atributos característicos, al cual se le conoce como humus verdadero.

- ***10.2.4.4. Mineralización*****:** En sentido contrario al proceso que se acaba de discutir, en ésta los materiales orgánicos evolucionan tan rápidamente que las condiciones carbonadas iniciales desaparecen en el transcurso del proceso, dando paso a la ocurrencia de los constituyentes minerales simples.

- ***10.2.4.5. Ferruginación:*** En desarrollo de éste proceso, el hierro presente en los minerales primarios es liberado y se distribuye en el perfil imprimiéndole a éste coloraciones rojizas en condiciones anhidras que pueden cambiar a tonalidades cada vez más amarillas a medida que aumenta el grado de hidratación de los óxidos iniciales, mismos que, en atención a su dimensión reducida se combinan fácilmente con el humus presente, impartiendo coloraciones pardas y pardo-rojizas a pardo-amarillentas al suelo.

- ***10.2.4.6. Gleysación:*** En sentido contrario al proceso que se acaba de discutir, cuando el hierro liberado de los minerales primarios se desenvuelve dentro de un ambiente hidromórfico y/o anóxico sufre procesos de reducción química, los cuales imparten al suelo coloraciones grises, verdosas y hasta azuladas. Es un proceso que es inherente a las condiciones de suelos con limitaciones en el drenaje interno de sus perfiles.

Los factores y procesos pedogenéticos que recién se acaban de discutir actúan con intensidad mutuamente condicionada en cada sitio de la corteza terrestre y a través de las cuatro orientaciones cardinales dejan el rastro de hasta el más mínimo detalle de su accionar por medio de su impronta, en el conjunto de rasgos observables en el perfil del individuo suelo generado. Consecuentemente, a continuación, se presenta una discusión centrada en los rasgos característicos observables en un “perfil ideal” que involucre todos los horizontes de posible ocurrencia en un suelo. Figura 80.

X.3. EL PERFIL DEL SUELO.

Debe recordarse primero la discusión que ya se dio anteriormente con el fin de diferenciar entre horizontes orgánicos y horizontes minerales; lo mismo que entre suelos orgánicos y suelos minerales. Téngase en cuenta que un perfil de suelo mineral puede o no incluir uno o varios horizontes orgánicos

Hasta finales de los años 80's del siglo pasado fue de uso común la notación que se señala en el costado derecho de la gráfica de la Figura 85, donde se entremezclan notaciones alemanas y norteamericanas. En contraposición a ello, en el costado izquierdo de la misma gráfica se señala la notación netamente norteamericana, de uso adoptado ampliamente a nivel mundial desde comienzos de los años 90's del siglo ya referido.

Se debe resaltar en el costado derecho como las nominaciones "Aoo" y "Ao", coinciden con las notaciones contenidas en varios textos alemanes acerca de "Suelos Forestales", donde se emplean las letras "L","F" y "H" para significar respectivamente los horizontes que normalmente se reconocen como de mantillo o litera, "Aoo" para los norteamericanos y "L" del latín "*litter",* de acumulación de materiales orgánicos "verdes" o "reconocibles fácilmente en cuanto a su origen" para la escuela alemana. Actualmente tal nominación correspondería a un horizonte orgánico nominado O_i, para significar la acumulación de materiales orgánicos en condición "fibrística"= fácilmente reconocible en cuanto a su origen, esto es, condición de humus verde.

De otro lado la nominación norteamericana antigua de "Ao" equivaldría a la suma de las notaciones alemanas de "F" y "H", derivadas en su orden de los vocablos: förnia = fermentación y humus, dada la intrincada entremezcla en la cual se encuentran éstos dos estadios evolutivos de la materia orgánica en el campo. Actualmente ellos serían signados respectivamente como O_e y O_a, correspondientes a los estados "henísticos" = de fermentación evolutiva de la biomasa ó nivel de humus nutriente, en el cual es posible distinguir algunos rasgos de origen, y "saprísticos" = de evolución climax, hasta un nivel de relativa estabilidad ó nivel de humus verdadero, en el cual resulta imposible formular algún planteamiento acerca de las particularidades de la biomasa original.

En la eventualidad de que se tratara de un perfil de suelo orgánico, los horizontes recibirían la nominación, como horizontes orgánicos de suelo orgánico, como H_i, H_e y H_a, haciendo referencia a la alta ocurrencia de tejidos (latin: *histos*) en los mismos; en vez de horizontes orgánicos de suelos minerales, a saber: O_i, O_e y O_a, donde la O hace referencia al significativo contenido de material orgánico en tales horizontes, que

suprayacen a una colección de horizontes minerales. No obstante, tanto horizontes H_x como O_x coinciden en el hecho de que por estar constituidos en gran parte por material carbonado, por ende, inestable, siempre se evalúan y refieren en su espesor, medido desde abajo hacia la superficie, indicando con ello, (por ejemplo: 0-+2cm; +2-+5cm; +5-+8) que el material observado hoy, puede no serlo mañana. Por la misma condición, los estudios topográficos consideran el nivel del terreno a aquel en el cual comienza el horizonte mineral más superficial A_1, enriquecido en materia orgánica, dando comienzo, con la profundidad, al perfil pedológico. carbonado, por ende, inestable, siempre se evalúan y refieren en su espesor, medido desde abajo hacia la superficie, indicando con ello, (por ejemplo: 0-+2cm; +2-+5cm; +5-+8) que el material observado hoy, puede no serlo mañana. Por la misma condición, los estudios topográficos consideran el nivel del terreno a aquel en el cual comienza el horizonte mineral más superficial A_1, enriquecido en materia orgánica, dando comienzo, con la profundidad, al perfil pedológico.

Consecuentemente, a partir de la tercera línea de la gráfica que se analiza comienza los horizontes minerales con el nominado A_1, caracterizado por la condición de que, siendo un horizonte mineral, presenta un enriquecimiento de humus íntimamente mezclado con las partículas minerales que lo conforman, como ya se estableció en el párrafo anterior, a partir de éste la estimación de espesor se practica en sentido descendente, (por ejemplo: 0 – 08 cm; 08 – 23 cm; 23 – 45cm, etc..). Retomando el concepto de transicionalidad esbozado en las páginas anteriores, éste sería un horizonte transicional entre los horizontes orgánicos suprayacentes, de existir tales, hacia los horizontes minerales que habrán de subyacerle a éste en la profundidad. Conviene anotar que, en atención a su relativamente alto contenido de materia orgánica, misma que le imparte coloraciones oscuras, popularmente se conoce a este horizonte con las nominaciones de “capa vegetal” en el Caribe colombiano y “capote” en la zona andina de Colombia.

Siendo la eluviación el proceso central del primer horizonte mineral, al horizonte A_1, le sucede con el avance en la profundidad el horizonte maestro A_2, con actividad central de emigración de elementos, partículas y sustancias con dirección vertical dominante, dicho horizonte recibe la nominación de E en la nueva metodología de nominación, en atención al proceso de eluviación central o maestro en el mismo. A este último le sucede en profundidad “idealmente” el horizonte A_3, transicional al B, también nominado AB, caracterizado como zona de acumulación.

Los horizontes B comienzan con el B_1, transicional a A, también nominado BA, para dar paso seguidamente al B_2, el horizonte central o maestro de este grupo, donde el proceso dominante es la iluviación, hasta el punto de que algunos textos refieren la

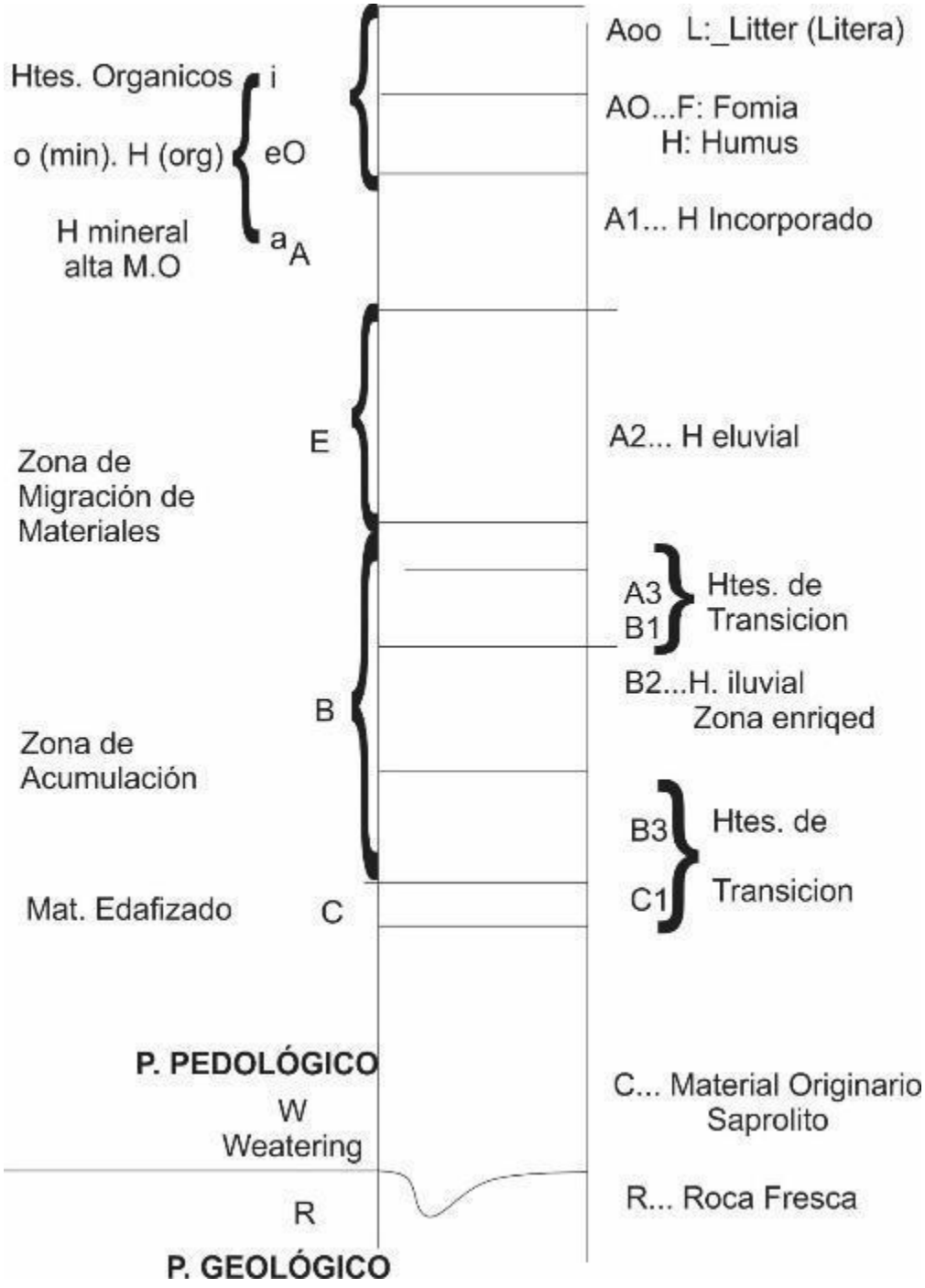


Figura 85. Perfil “ideal” del suelo (Gráfico: ID. Bustamante B.)

nominación de B, misma que se ha mantenido desde el siglo pasado, a la traducción del inglés “Bench”= Sumidero, Zanja, Trinchera, Zona de Acumulación. Finalmente, el grupo es concluido con el horizonte B_3, también nominado BC, transicional al C.

Los horizontes C se caracterizan por presentar materiales edafizados, esto es, más que saprolizados, con marcada dominancia de minerales secundarios, pero sin ningún tipo de estructuración, o agrupación en agregados o grupos de partículas edáficas, dada la carencia casi total de sustancias húmicas, por lo cual su condición de agrupación oscila entre la monogranularidad y la masividad. No obstante, dentro de ellos es factible distinguir un primer horizonte, C_1, transicional a B, también nominado CB, para pasar luego al central C_2, el cual puede suprayacer a un C_3, también nominado Cw, transicional a la condición de saprolito, W (del inglés Weatering= Intemperización= Meteorización).

La condición de saprolito, W, de ser observable, presenta límites muy difusos y ondulados, por lo cual se hace muy difícil diferenciar las tres condiciones W_1, W_2 y W_3, de manera similar como se ha descrito para los horizontes A, B y C. Otra condición que conduce a que W generalmente no sea reportado es el hecho de que generalmente se ubica por fuera de la Sección de Control, generalmente de un (1) metro de profundidad, cual es la base de la descripción de perfiles en el campo.

Finalmente, para cerrar esta discusión del perfil del suelo, cabe resaltar la condición de que C ó W, según el espesor y la evolución del perfil en consideración, pueden o no presentar relación con el material subyacente R, dando lugar respectivamente a la condición de suelo residual y transportado.

Como comentario general relativo al perfil ideal que se acaba de discutir, conviene destacar que en las condiciones del Departamento de Córdoba son observables suelos orgánicos en las localidades de “El Cerrito”, Montería; “La Pozona”, Cereté , donde se les llama localmente suelos de basura o de taruya, y en la zona deltáico-estuarina ubicada fundamentalmente al este de la actual desembocadura del Río Sinú, en comprensión de los municipios de San Bernardo del Viento principalmente y en el extremo noroeste de San Antero.

Por su parte, horizontes orgánicos de suelos minerales son observables en Córdoba, en algunos sectores aledaños a las márgenes de la Ciénaga Grande del Bajo

Sinú; en zonas localizadas de algunos sitios al sur, suroeste y oeste del municipio de Valencia como El Limón, Santo Domingo, Mate' maíz, Tucurá y Jaraguay; lo mismo que en el Cerro Murrucucú y la Serranía del Paraguas, en el centro sur del municipio de Tierralta.

Cabe ahora señalar que los siete horizontes: O, A, E, B, C, W, R que conforman el perfil ideal que se acaba de discutir son los reconocidos a partir del año 2000 por el Soil Survey Staff del USDA, agrupando los orgánicos en O, la transición de orgánicos a minerales en A, la eluviación en E, la iluviación en B, la pedopreparación en C , la saprolización en W y la condición de roca fresca inalterada en R.

Es de resaltar en el párrafo anterior como los primeros seis horizontes mencionados, O, A, E, B, C, W, llevan la impronta de los cinco factores pedogenéticos y por ende conforman el perfil pedológico, en tanto que R constituye el sector superior del perfil estratigráfico o geológico que se extiende desde él hacia la profundidad.

X.3.1. Nomenclatura de horizontes transicionales.

Ya fue referida la nominación de horizontes transicionales como: AB, BA, AC, CA, BC, CB, CW y WC, significando la condición dominante del primer horizonte nominado y subordinada del segundo horizonte nominado, en igual sentido podrán tenerse los horizontes EB, BE, EC y CE.

No obstante, la nominación señalada en el párrafo anterior hace relación a situaciones en las cuales ocurre una entremezcla (50% + x), y (50% - x), entre las dos condiciones entre las cuales se transiciona. En algunos casos en el campo puede darse el caso de que en algunos sectores del horizonte domine una condición y en otros la otra condición que configura la transición con la primera referida, en tales casos son usuales las nominaciones como: A&B, B&A, A&C, C&A, B&C, C&B, C&W, W&C, E&B, B&E, E&C y C&E, señalando siempre de primero la condición dominante y, en segundo lugar, la condición subordinada.

X.3.2. Subíndices.

Los subíndices son letras minúsculas y/o números arábigos que se inscriben seguidamente a las letras mayúsculas nominantes de un horizonte en particular, con el fin de señalar la ocurrencia en él de algún proceso en específico, o bien una condición

de los materiales o del horizonte que merece ser detallada. Ejemplos de subíndices son algunos como: 1, 2, i, e, a, ya referidos al discutir los horizontes minerales A, B, C y W, y los orgánicos O y H, respectivamente.

Otros subíndices de uso común con el horizonte A serán: u, h, p y f; para denotar condición de incipiencia (*unknown*) en el desarrollo del horizonte, o bien acumulación de humus (*h*) en el mismo; o alteración de este por actividad antrópica (*tropos*) (*p*) y finalmente la condición de congelamiento (*frost*) que puede darse en el mismo, al igual que en un B ó un C. En el horizonte E, en condiciones de escaso desarrollo y diferenciación, puede emplearse el subíndice u. Figura 86.

Por su parte, con los horizontes de acumulación, B, de acuerdo a las peculiaridades que revista el proceso referido serán usuales subíndices como: w, h, ir, t, g, sq, o, u y s, para denotar acumulación de materiales heredados del saprolito (*weatering*); acumulación de materiales ricos en hierro (*ir*); acumulación de arcilla iluvial (*t*); acumulación de material en condiciones de gleyzación (*g*) Figura 87, con presencia de moteamientos superior al 30%; acumulación de material de hierro en condiciones de sesquióxido (*sq*, esto es la forma general Fe_2O_3; Mn_2O_3 y Al_2O_3); acumulación de material en condiciones de oxidación (*o*); acumulación de material en acumulación insipiente (*u*= *unknown*); acumulación de material en una zona de espesor reducido (*s*=*stretch*). De los

Figura 86. E_u, suprayaciendo a B_t (Foto: Internet.)

Figura 87. Sector de un horizonte Bg (Foto: Internet.)

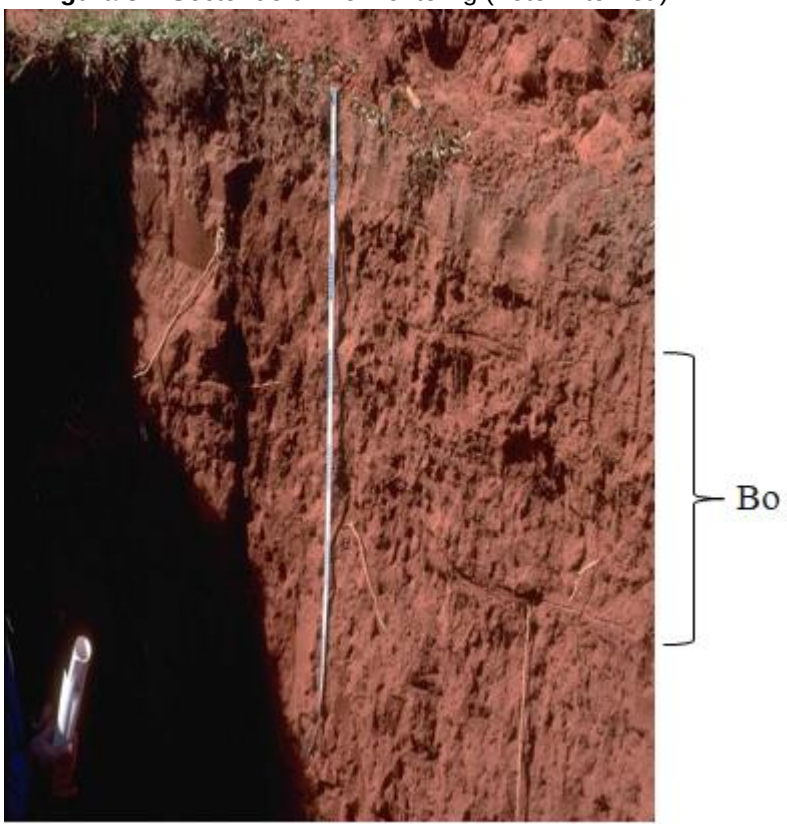


Figura 88. Perfil típico de un suelo del Orden “Oxisol”. Obsérvese el espesor del horizonte B_o, óxico. (Foto: Internet.)

nueve subíndices que se acaban de señalar, en la actualidad han caído en desuso los subíndices: ir y sq, para ser reemplazados por el simple o, conocido como el horizonte óxico, diagnóstico del orden de los oxisoles. Figura 88.

X.3.3. Límites entre horizontes.

Los límites entre horizontes pueden ser planos, ondulados, definidos y difusos. Figura 89.

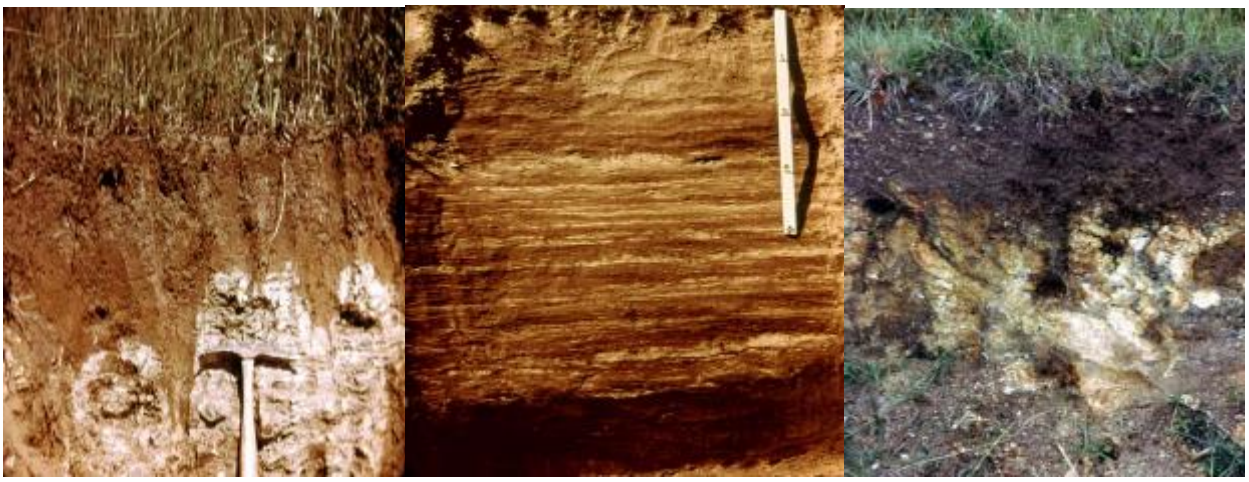


Figura 89. Sector superior: límites nítidos, ondulados y planos. Sector inferior: Límite difuso (Fotos: Internet.)

X.3.4. Otros subíndices.

De ex – profeso se han aislado los subíndices que se presentan a continuación para resaltar el hecho de que no corresponden de forma rígida a un horizonte en particular y que más bien hacen relación a procesos que impactan al perfil de forma integral, ellos son:

10.3.4.1. "b" Relativo a la condición de sepultamiento (*buried)* y consecuente discontinuidad litológica, caso muy común en áreas con dominancia de suelos transportados. Figura 90.

Hasta 1980 aproximadamente se designaban las discontinuidades litológicas mediante el uso de numeración romana progresiva, por lo que la situación esbozada en la Figura 42 se presentaría partiendo de la superficie del terreno como: IC, IA, IIC, IIA, IIIC, IIIA, IVC, IVA.

10.3.4.2. "k" Relativo a la acumulación singenética o alogenética, propia del sitio o externa a él, de materiales calcáreos. Figura 91.

10.3.4.3. "m" Condición de cementación química, bajo tal condición el horizonte se torna extremadamente duro y recibe el prefijo de "Petro cálcico y/o gypsico". Figura 92.

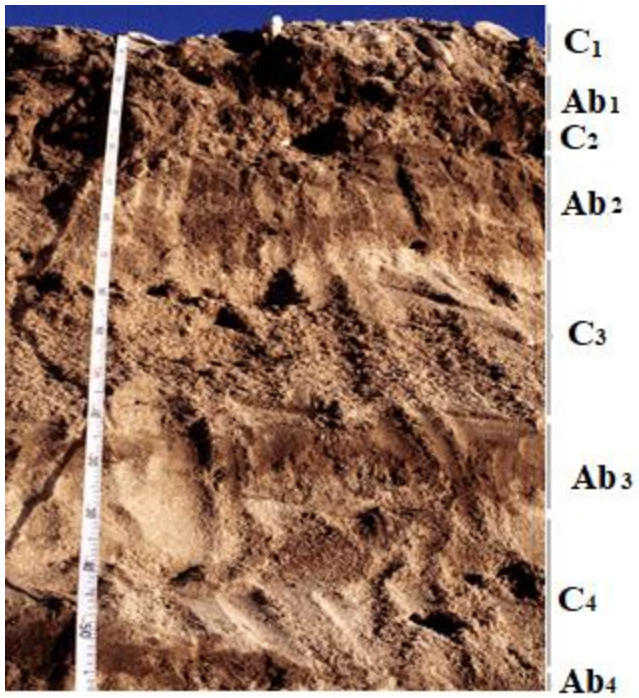


Figura 90.
Cuatro sepultamientos sucesivos en un Entisol, el cual escasamente desarrolla un horizonte A antes de que se dé un nuevo evento de sepultamiento (Fotos: Internet.)

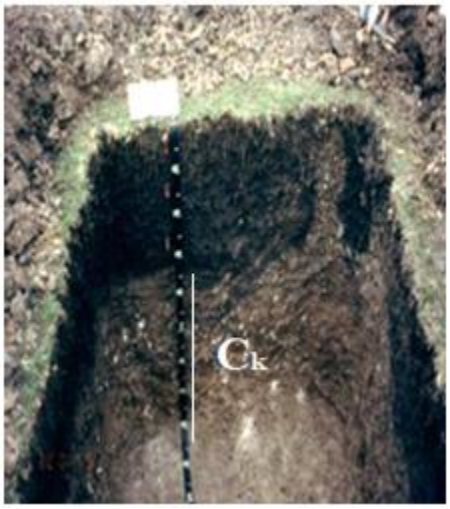


Figura 91. Material parental calcáreo, condición singenética, (Fotos: Internet.)

10.3.4.4. ***"cs"*** Condición de acumulación singenética o alogenética, propia del sitio o externa a él, de materiales ricos en sulfato de calcio, o yeso.

10.3.4.5. **"pn"** Desarrollo del proceso de plintización, como consecuencia de episodios de intensa sequía. Figura 93. En Córdoba se tiene un área amplia en la que se registra este fenómeno, y se extiende desde Buenos Aires La Manta –

Mundo Nuevo, en jurisdicción de Montería hasta Arenoso y Medio Rancho, en Planeta Rica.

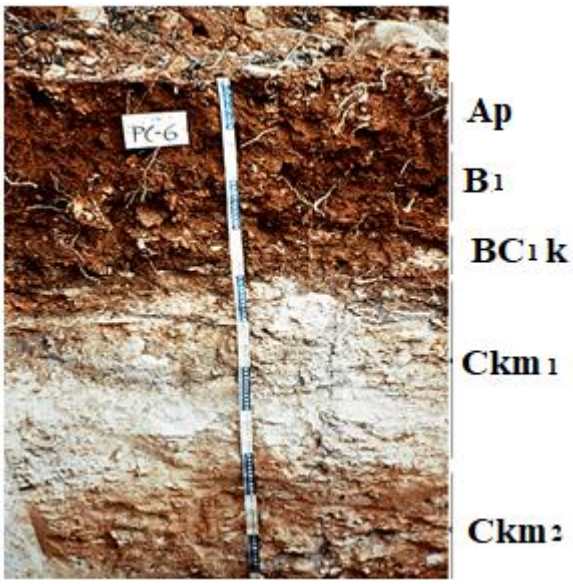


Figura 92. Desarrollo de condición calcárea a tres profundidades y petrocálcica a dos, (Fotos: Internet.)

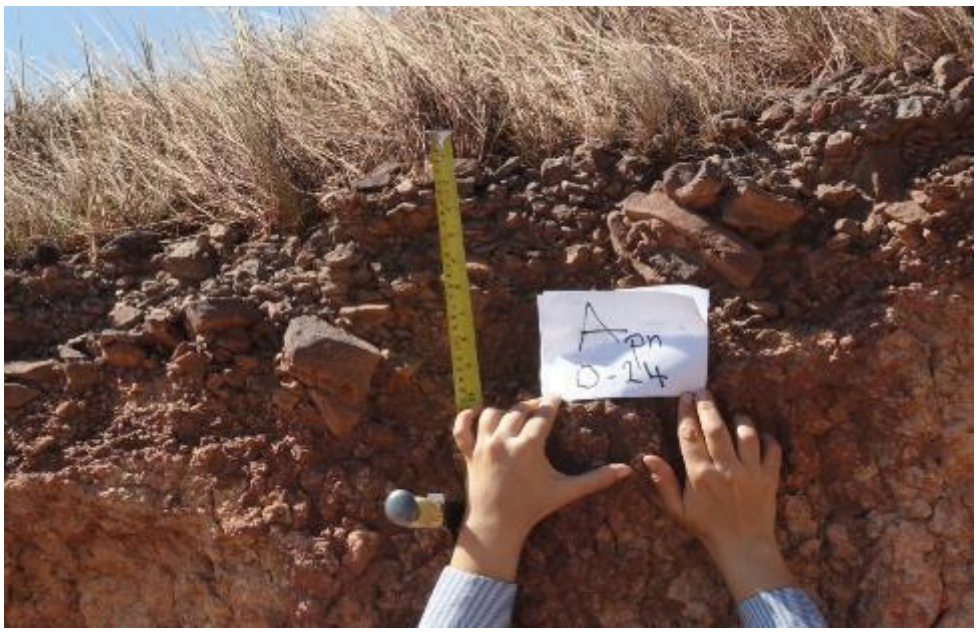


Figura 93. Plintización en horizontes A y B, Campo Rubiales, Meta, Colombia (Fotos: ID Bustamante B, 2013.)

10.3.4.6. "f" Condición de congelamiento, "frost", al momento de realizar la descripción

10.3.4.7. "cn" Desarrollo de concreciones, como consecuencia de episodios de intensa sequía acompañados de efectos de concentración de solutos y sólidos en

suspensión. También pueden darse concreciones orgánicas, sobre todo en praderas establecidas por el hombre y poco disturbadas por espacios considerables de tiempo. Figura 94

10.3.4.8. ***"sa"*** Condición de acumulación de sales más solubles que el carbonato de calcio.

10.3.4.9. ***"si"*** Condición de acumulación de compuestos silícicos. En cercanías a la casa principal de la Hacienda Capellanía, en Lorica, Córdoba se registra un horizonte B cementado por silicio, el cual ha sido nominado como $B_{sim.}$

10.3.4.10. ***"x"*** Desarrollo de la condición de "fragipan" por acción de fuerzas físicas sobre el perfil. Puede signarse entonces un A_{px} , para señalar un horizonte A intervenido y compactado por el hombre con sus implementos y/o animales. Figura 95.

10.4. AMPLIACIÓN DEL CONCEPTO DE PERFIL DE SUELO.

Hasta el presente la idea del lector acerca de lo que es un perfil de suelo es una visión bidimensional, pero ya se ha dicho que:

1. El suelo es un cuerpo natural, y

2. El suelo es el resultado de la acción de los cinco factores pedogenéticos, actuando a través de las cuatro orientaciones cardinales.

En consecuencia, el suelo como cuerpo natural, que se extiende sobre la corteza terrestre siguiendo las cuatro orientaciones geográficas, es un cuerpo que posee físicamente las tres dimensiones propias de cualquier cuerpo natural, por tanto, ocupa un volumen, y es precisamente a través de ese volumen que se suceden los diferentes procesos pedogenéticos ya señalados. Así, cuando se recorre un terreno a través del cual el perfil del suelo no presenta cambios drásticos en sus horizontes, en realidad se está recorriendo una colección de columnas de suelo semejantes.

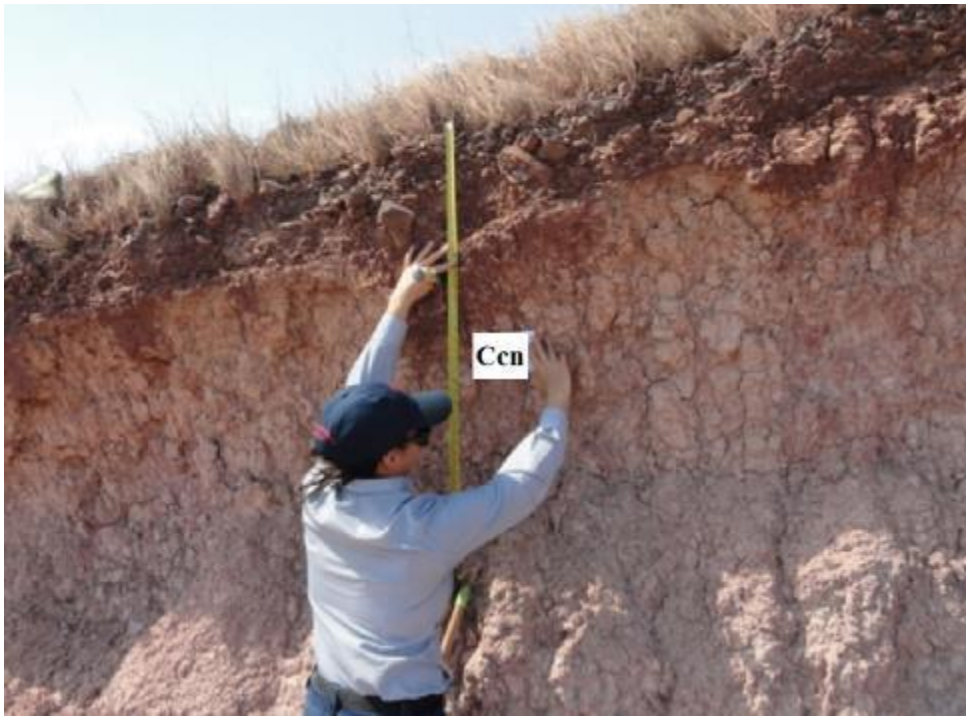


Figura 94. Concresionamiento férrico en horizonte C, Campo Rubiales, Meta, Colombia (Fotos: ID Bustamante B, 2013.)

Figura 95. Condición de “fragipan” entre 12 y 23 cm de profundidad, Serie Edificio, Universidad de Córdoba, Montería, debido a labranza con rastra pesada a similar profundidad año tras año (Fotos: Alumnos Suelos I, 2006B.)

Por tanto, puede asumirse a partir de este punto a cada unidad de suelo, observable en el campo, como una colección de volúmenes satisfactoriamente semejantes de suelo. Ahora bien, que magnitud debe abarcar cada volumen de suelo,

para que tengan validez las inferencias que se lleguen a formular acerca de él, a partir de observaciones de campo.

La anterior inquietud nos lleva al concepto de **pedón**, el cual, según el Soil Survey Staff, 1960, se visiona como el volumen mínimo de material edáfico que permita el estudio satisfactorio del suelo, de acuerdo a ello éste estaría limitado en su extremo superior por el contacto con la atmósfera, en su extremo inferior por su contacto, un tanto vago, con la roca fresca, en tanto que su configuración lateral lo orilla a exhibir extensión seccional entre 1 y 10 m^2, dependiendo de la ocurrencia o ausencia de "secuums" laterales, según los cuales los horizontes sean intermitentes o cíclicos y consecuentemente se repitan con intervalos lineales entre 2 y 7 metros, siguiendo las ocho orientaciones de la "rosa de los vientos", por lo que adquirirá una sección transversal de tipo aproximadamente hexagonal. No obstante, con el objeto de simplificar, y en atención a que lo más común es la ausencia de "secuums", se adopta la convención de asignarle una sección transversal de forma hexagonal y área de $1m^2$.
Dentro del pedón se distingue una primera porción superficial, en contacto con los agentes meteorológicos a la que se denomina como **epipedón** y en la cual abundan las raíces y la biota edáfica. A él le sucede en la profundidad el **subepipedón** caracterizado por un mayor contenido de arcillas y una menor presencia de materiales orgánicos. Como sector más profundo se localiza el **endopedón,** en el cual nuevamente el contenido de arcilla disminuye, al igual que los componentes orgánicos, los minerales secundarios ceden importancia frente a los primarios y finalmente limita con la roca fresca.

Teniendo claro el concepto de pedón se hace fácil establecer que cada unidad de suelo no es más que la colección de pedones razonablemente semejantes, o polipedon, que ocupan por tanto un área definida y debidamente delimitada, lo cual la aisla y diferencia de los polipedones adyacentes, dando lugar al Mapa de Unidades de Suelo.

Una última precisión es acerca del concepto **"Solum"**, definido por el Soil Survey Staff en 1962, como "el perfil incompleto de suelo desarrollado por las fuerzas formadoras de suelo, fuerzas edafizantes, y en el cual se desarrolla la mayor parte de la actividad biótica que tiene lugar en el mismo". Una definición tan amplia como difusa que merece ser precisada con base al concepto de **"Sección Control"**, la cual se define como una porción de perfil de suelo con espesor variable y dependiente de factores como la destinación de los resultados del estudio de suelos, prácticas de manejo de suelos imperantes en la zona, cultivos a establecer, etc. No obstante, una Sección Control de 100 cm = 40" de profundidad es aceptada en la mayoría de las condiciones, siempre y cuando no se establezcan requerimientos específicos diferentes.

10.5. EL MUESTREO DE SUELOS.

En este punto de la discusión el lector tiene la suficiente claridad para conceptuar que en la mayoría de estudios de suelo, el estudio del mismo se centra en una porción del perfil, ya que, como es frecuente en los suelos tropicales, el estudio del perfil completo resulta impráctico y/o de costo prohibitivo, por lo que consecuentemente es abordable solo por la ruta de la inferencia basada en la experiencia del profesional reconocedor de suelos. Ahora bien, de forma relativamente independiente de lo anterior, la colecta de muestras, con destino al trabajo analítico de laboratorio presentará algunas variantes, de acuerdo a la finalidad del estudio que se esté desarrollando; así entonces, en estudios de morfología, génesis y clasificación de suelos se hará indispensable la colecta de muestras por cada horizonte genético involucrado en el perfil modal de cada unidad de suelo que ocurra dentro del área de estudio, según el nivel de escala y detalle que se trabaje, fijados a su vez por los requerimientos establecidos para cada caso particular, como puede suceder con los levantamientos agrológicos enfocados al establecimiento de cultivos como la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.)

De otro lado, en los estudios de Fertilidad y Productividad de Suelos, mismos que se realizan con mayor frecuencia, focalizados como están a la producción de un cultivo determinado, caracterizado por una profundidad determinada de raíces, el muestreo alcanza la profundidad fijada por la capa de raíces del cultivo determinado; independientemente de los horizontes involucrados en el espesor en referencia.

No obstante, el número de muestras que se deben colectar en cada predio son independientes de la extensión de éste y quedan fijadas entonces por la cantidad de unidades de suelo ocurrentes en el mismo. Con el fin de cuantificarlas se recomienda dividir el terreno en sectores, de acuerdo con su fisiografía o formas del terreno en cada uno. Una vez sectorizado por fisiografía el lote, se debe establecer en cada sector, una red de pozos o “cajuelas” de observación de dimensiones 0.4 m x 0.4 m x 0.4 m, en razón de densidad de dos por cada hectárea de terreno o superior sí así lo requiriese el nivel de precisión fijado para el estudio.

En cada pozo de observación se estudiará número de horizontes, espesor, color, textura, estructura y consistencia de cada uno de ellos, y según las condiciones, profundidad al gley, de ser observable. Las observaciones anteriores conducirán a formar tantos grupos de pozos como unidades de suelo ocurran en el lote.

Seguidamente se recorre cada grupo de pozos y en cada uno de ellos se colecta del área central de la profundidad de muestreo fijada, sobre la pared de 0.4 m x 0.4 m de cada pozo, una submuestra de 250 gr de suelo, misma que se deposita temporalmente

en un recipiente de colecta. Cuando se termina el recorrido del grupo de pozos que se trate se agita vigorosamente la colección de submuestras contenidas en su almacenamiento momentáneo, buscando homogenizarlas; de la mezcla final se toman sendas muestras de 1000gr cada una, la primera se destina al Laboratorio, en tanto que la segunda constituye la contramuestra o duplicado, con finalidad de posibles cuestionamientos a la calidad de los resultados que reporte el Laboratorio.

La muestra que se envía al Laboratorio se empaca en bolsa doble transparente, ubicando entre las dos bolsas, totalmente aislada del suelo una etiqueta en la cual deben detallarse: Fecha de muestreo, Área muestreada, Historia del lote, Ubicación del lote (Nombre, finca, vereda y nominación dada a la colección de pozos similares).

Se aclara, las muestras que se envían al laboratorio y las que se guardan como contramuestras deben secarse al aire antes de cerrarlas, sí una muestra va a ser transportada húmeda, dicho transporte debe hacerse en el menor tiempo posible después de colectada la muestra, con el fin de evitar las alteraciones que se pueden dar en el complejo orgánico por efecto de los procesos anaeróbicos que se dan en las bolsas cerradas, por tanto, las contramuestras deben secarse al aire, evitando el contacto con barreduras de piso y cenizas de cigarros, principales contaminantes de las mismas.

XI. COLOR DEL SUELO

"Suelos negros producen pan blanco"

Proverbio Noruego

La primera aproximación que tenemos con el individuo suelo es el contacto visual. En ese primer acercamiento la impresión que se puede tener del suelo es la de un material que impacta nuestra retina con el matiz de su color, el color es entonces la primera manifestación que puede ser captada por nuestros sentidos. Sin embargo, el color del suelo es algo que aparentemente maneja tanto la gente que puede ser tomado, no sin cierta ligereza, como de mínima importancia. No obstante, además de ser el primer y más notorio indicio para la diferenciación de horizontes en un perfil, es una de las principales bases de clasificación de los suelos. Por añadidura, el color del suelo determinará el comportamiento de los regímenes hídrico, gaseoso y térmico del mismo. Por tanto, es distinto el calentamiento de un suelo claro que el de uno oscuro. En términos generales tiene que establecerse que el color de un suelo es índice de los procesos físicos, químicos y biológicos que se están sucediendo en ese suelo. Pero también el color puede ser una manifestación del material parental del cual provenga, de ahí que se defina el color como una característica que bien puede ser heredada o adquirida, según dependa o no del material de origen; por tanto, el color será índice del grado de evolución de cada suelo. Finalmente, haciendo alusión al proverbio que encabeza este escrito, el agricultor siempre asocia la oscuridad de su suelo con el grado de productividad de este, llegándose a decir en la sabana del norte de Colombia que "Las tierras claras son tierras matahombres", para resaltar su baja productividad. Igualmente, las coloraciones que imparten al suelo los contenidos excesivos de sales o las condiciones de drenaje deficiente fundamentan la creencia popular que asocia el color del suelo con su capacidad productiva. De forma similar, el avance de los procesos erosivos en un suelo generalmente se asocia con la reducción de la intensidad de su color, por tal razón en la Sabana Sucreña se dice popularmente que "Cuando los suelos palidecieron se acabó la productividad de la agricultura en la región de San Pedro, Sucre."

En el suelo ocurren prácticamente todos los colores, hasta la fecha los únicos colores que no se han reportado en suelos son el azul y el verde puros, pero de resto, todas las mezclas que se puedan imaginar ocurren en los suelos. Sin embargo, finalmente el color del suelo es el resultado de la mezcla de colores de sus constituyentes, a este respecto hay que decir que el color del suelo depende de forma

obvia y fundamental del color de los constituyentes de este y de la superficie específica de cada uno de ellos, por lo que los más finos serán los de mayor impacto en el color resultante. De este punto surge el concepto de elemento cromógeno, el cual hace relación a los componentes más finos y por ende con mayor impacto en el color del suelo, en ese orden de ideas el humus será el elemento cromógeno por excelencia, seguido por los óxidos de elementos metálicos como Fe^{+3} y Mn^{+3}, anhidros e hidratados en su orden, la montmorillonita, el resto de esmectitas, las micas hidratadas, las canditas, los feldespatos y el cuarzo.

Los factores que influyen en la apreciación del color del suelo son la calidad e intensidad de la luz incidente, la rugosidad de la superficie reflectora y la humedad de la muestra. Con el fin de estandarizar la evaluación del color del suelo se ha establecido emplear como única fuente de luz la solar directa, misma que se da en días radiantes entre las 09:00 y las 15:00 horas. Las condiciones de rugosidad de la muestra de suelo deben ser las que se obtienen por la simple disgregación de la masa de suelo, siguiendo sus planos naturales de fragilidad.

Adicionalmente, la percepción de color que puede experimentar el ojo del observador del suelo, resulta impactada por la humedad que éste registre en ese momento, en atención a que las propiedades de refracción del suelo y del aire son bastante similares, lo cual genera que se registre una alta reflexión desde el suelo seco, dando una sensación de claridad; por el contrario, en atención a la similitud entre las propiedades de refracción del suelo y del agua, la reflexión desde un suelo húmedo será menor que cuando está seco, por lo que el suelo aparentará como más oscuro. Debido a lo anterior, cuando se describe el color de un suelo debe aclararse la condición de humedad en la cual se encuentra. Además, en levantamientos de suelos que buscan la clasificación de estos, se impone la norma de evaluar el color en seco y en húmedo.

11.1. MODIFICACIONES AL COLOR DE LOS SUELOS.

Ha quedado establecido que el color de un suelo es el resultado de la mezcla de los colores de sus componentes, así pues, conceptualmente, el color del suelo será la sumatoria de todos los productos obtenidos de multiplicar la proporción volumétrica porcentual de cada componente (% Vol)*i* por su superficie específica respectiva, (Se)*i* lo cual se expresaría como:

$$\text{Color aparente} = \Sigma\ (\%\ \text{Vol.})\ i.\ (\text{Se})i$$

No obstante, la mezcla de materiales no siempre impacta el ojo del observador con un color uniforme, en tales condiciones se establece que se están dando modificaciones al color del suelo, las más comunes son: los moteamientos, las variegaciones o vaciamientos, las concreciones, los cutanes y las crotovinas. Sin excepción, tales modificaciones se encuentran dispersas al azar dentro del color dominante, mayor al 50% del volumen del suelo, de lo que habrá de denominarse matriz (M) del suelo y constituyen indicios de condiciones y procesos que se han dado en el sitio donde hoy son observables.

11.1.1. Moteamientos.

Basicamente obedecen a condiciones intermitentes entre oxidación y reducción, comúnmente conocidas como condiciones redoximórficas, Figura 96, fundamentalmente ligadas a la dinámica hídrica del perfil y su impacto sobre los compuestos de hierro y manganeso del suelo. Debiéndose aclarar que los rasgos de gleyzación que se llegan a generar en tales condiciones son difícilmente reversibles, por lo que persisten mucho tiempo después de que el campo ha sido drenado. La notación de esta situación incluye la evaluación del **color de la matriz** (M) del suelo y **de los moteados** (m), y en relación con éstos debe evaluarse su **porcentaje** (%) de ocurrencia; su **tamaño**, (Finos, Ø < 2 mm), (Medios, Ø = 2 – 5 mm), (Gruesos, Ø = 5 – 20 mm), (Muy gruesos, Ø = 20 – 76 mm), (Extremadamente Gruesos, Ø > 76 mm); su **contraste** (Débil, Distinto y Prominente); Su **forma** (Cilíndrico, Irregular, Esférico, Reticular, Dendrítico, Laminar y Fibroso).

Figura 96. Sector de Horizonte gleyzado (Foto: Internet)

11.1.2. Vaciamientos ó variegaciones.

Corresponden a otra huella de procesos redoximórficos, en desarrollo de los cuales, sustancias en condiciones de reducción y por ende con alta solubilidad, fluyen a través de un volumen de suelo, y al sobrevenir la oxidación de estos, con la consecuente reducción de su movilidad, se genera una huella del flujo referido. Figura 97. Se describen detallando los aspectos de: Tipo, color, abundancia, ubicación y contraste.

Figura 97. Vaciamiento ferruginoso.
Fuente: www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm

11.1.3. Concreciones.

Las condiciones redoximórficas generan, bajo condiciones de reducción, incrementos episódicos en la solubilidad y movilidad de los materiales, al igual que las variaciones en la solubilidad de las sales, mismos que en tales condiciones se pueden concentrar en algunos puntos determinados, favorecidos por las condiciones de porosidad del suelo, dando paso a las concreciones, cuando sobrevienen las condiciones de oxidación, al igual que los vaciamientos se describen a través de su: Tipo, color, abundancia, ubicación y contraste. Figura 94.

11.1.4. Cutanes y Crotovinas.

Son revestimientos de los poros por materiales arcillosos y orgánicos, respectivamente que ocurren como consecuencia de condiciones redoximórficas y de solubilidad en el perfil de suelo. Figuras 98 y 99, se evalúan a través de su: Tipo, color, abundancia, ubicación y contraste.

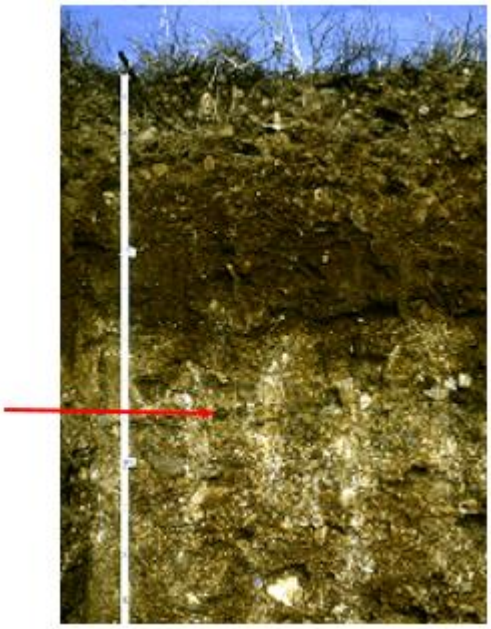


Figura 98. Cutanes en perfil hidromórfico, **Figura 99.** Crotovinas

Fuente Figura 98: http://edafologia.ugr.es/hidro/media/esta2p.gif

Fuente Figura 99: http://www.cals.uidaho.edu/soilorders/i/Incept_05b.jpg

11.2. EL COLOR Y LA TAXONOMÍA DE LOS SUELOS.

Como ya quedó establecido, el color es un índice de su grado de evolución, Hurst, 1977; Harden, 1982. Pero antes de todo debe recordarse como la Clasificación Natural de los Suelos estaba fundamentada en el color de estos, así:

Gran Grupo.	Color
Chernozem	***Negro***
Sierozem	***Gris***
Krasnozem	***Rojo***
Podzol	***Gris ceniza***
Latosol	***Rojo***
Podzoles pardo grisosos	***Pardo grisáceo***
Podzoles pardo rojos	***Pardo rojizo***

Podzoles pardo amarillos…….. Pardo amarillento
Suelos forestales grises……. Gris
Andosoles…….. Negro
Suelos Chestnut…….. Castaño

Igualmente en diferentes niveles de la moderna Taxonomía de Suelos (Soil Survey Division Staff, 2014) el color del suelo es una característica diferencial para la definición de horizontes diagnósticos, como los epipedones mólico, úmbrico, antrópico, melánico y ócrico; así como algunos horizontes subsuperficiales, entre ellos el ágrico y el sómbrico; de igual forma permite la identificación de los regímenes hídricos del suelo, como el ácuico, el ústico y el údico y de las condiciones redoximórficas. En consecuencia, el color se constituye en criterio diferenciante para algunos subórdenes, grandes grupos, subgrupos y familias de suelos.

Cuadro 1. Colores asociados con algunos componentes minerales y orgánicos del suelo.

Componente	**Formula**	**Notación Munsell**	**Color**
Goetita	FeOOH	10YR 8/6	amarillo
Goetita	FeOOH	7.5YR 5/6	marrón fuerte
Hematita	Fe_2O_3	5R 3/6	rojo
Hematita	Fe_2O_3	10R 4/8	rojo
Lepidocrocita	FeOOH	5YR 6/8	amarillo rojizo
Lepidocrocita	FeOOH	2.5YR 4/6	rojo
Ferrihidrita	$Fe(OH)_3$	2.5YR 3/6	rojo oscuro
Glauconita	$K(Si_xAl_{4-x})(Al,Fe,Mg)O_{10}(OH)_2$	5Y 5/1	gris oscuro
Maghernita	$-Fe_2O_3$	2.5YR-5YR	rojo
Sulfuro de hierro	FeS	10YR 2/1	negro
Pirita	FeS_2	10YR 2/1	negro (metálico)
Jaroisita	$K\ Fe_3\ (OH)_6\ (SO_4)_2$	5Y 6/4	amarillo pálido
Humus		10YR 2/1	negro
Calcita	$CaCO_3$	10YR 8/2	blanco
Dolomita	$CaMg\ (CO_3)_2$	10YR 8/2	blanco
Yeso	$CaSO_4.\ 2H_2O$	10YR 8/3	marrón muy pálido
Cuarzo	SiO_2	10YR 6/1	gris claro

Fuente: modificado del NRCS-USDA (2002).
Nota: esta información es de referencia ya que otros factores pueden influir sobre el color de suelo.

Fuente: www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm

11.3. EL ORIGEN DEL COLOR DE LOS SUELOS.

Cada componente del suelo impacta su color, en el Cuadro 1 se hace una referencia acerca de los colores dominantes de algunos constituyentes comunes en los suelos.

En términos generales, donde hay luz hay color, ésta está constituida por ondas electromagnéticas que se propagan a unos 300.000 kilómetros por segundo, por tanto, nuestros ojos reaccionan a la incidencia de la energía lumínica y no a la materia en sí que se esté observando.

Las ondas electromagnéticas, de acuerdo a su longitud de onda **(λ)**, tienen diversos comportamientos, así ondas de longitud muy corta corresponderán a las ondas de comunicaciones, como radar, telecomunicaciones, TV, radio, etc; en tanto que las ondas de amplia longitud harán parte de los flujos térmicos, mas, en el sector central de dichas longitudes se formarán distintos tipos de luz, como infrarroja, en las longitudes cercanas por encima de 770 nm (nanómetro = 1 nm = 10^{-9} m), visible, entre 380nm y 770 nm . Ver Tabla 5, y ultravioleta con longitudes de onda ligeramente inferiores a 380 nm.

Tabla 5. Longitudes de onda del Espectro Visible.

COLOR	LONGITUD DE ONDA (λ) (nm)
Púrpura (Violeta)……..	380 – 450
Azul……	450 – 490
Verde……..	490 - 570
Amarillo……	570 - 600
aranja (Amarillo rojizo=Rojo amarillento)…	600 - 620
Rojo……..	620 - 750

Cuando un rayo de luz incide sobre un objeto, éste refleja hacia su entorno la fracción de luz correspondiente al sector del espectro que no absorbe. El observador interpreta estas radiaciones electromagnéticas que el objeto propaga e impactan su pupila, con la palabra "COLOR". Cuando el objeto absorbe todos los colores contenidos en la luz blanca, el objeto se califica como negro. En la Figura 100 se esquematiza la

descomposición de un haz de luz blanca, la cual, sin tener color, los contiene a todos, Isaac Newton, (1642- 1727).

Cuando un haz de luz blanca atraviesa el prisma óptico (Prisma de Newton) genera la descomposición del espectro visible de forma semejante a la que se presenta

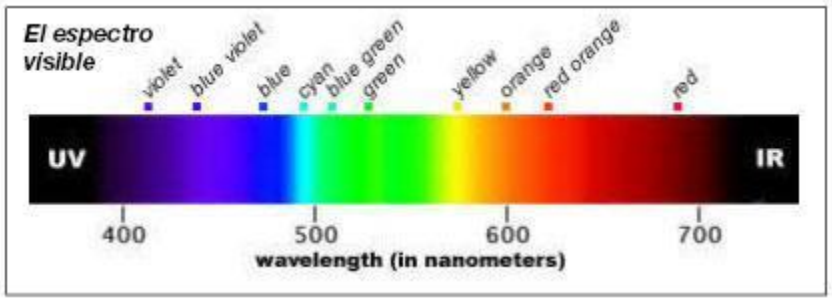


Figura 100. Descomposición de la luz blanca en las cinco franjas de (λ) **(380-750 nm)** del espectro visible.
Fuente: http://www.fotonostra.com/grafico/index.htm.

en la Figura 100, igual a la que el lector puede observar en el arco iris, obtenido naturalmente por la difracción de la luz blanca a través de las moléculas de agua en fase gaseosa, presentes en la atmósfera momentos después de una tormenta, donde dichas moléculas hacen las veces de prisma óptico. Los griegos denominaron el fenómeno natural en referencia, con el nombre que hoy se le conoce para personificar en él a Iris, la mensajera de los dioses, la cual descendía en él entre los hombres, agitando sus alas multicolores.

De forma similar a lo que ocurre en la naturaleza, se puede observar en la Figura 101 como entre las cinco franjas de color se dan las correspondientes transicionalidades, en las cuales el dominio de una franja cede gradualmente ante la siguiente que se considere, aumentando o disminuyendo la longitud de onda (λ). De otro lado cabe anotar que es distinta la sensación que se experimenta cuando se observa un objeto al cual se le ha pulido su superficie o no, así mismo es diferente la sensación experimentada cuando la superficie del objeto se encuentra con o sin impurezas. Lo anterior conduce a discutir las propiedades del color.

11.4. PROPIEDADES DEL COLOR.

Las propiedades del color son tres: 1) Matiz, 2) Brillo y 3) Intensidad, a saber:

1. Matiz, Tono (Hue) Se define como la banda espectral que impacta mayoritariamente al ojo del observador, entonces se hablará de matiz rojo, rojo amarillento, amarillo rojizo, amarillo, verde, etc.

2. Brillo: También conocido como luminosidad, claridad o valor, es definido como la cantidad de luz emitida o reflejada por una superficie, por lo que puede tomarse como el grado de acercamiento o proximidad con el blanco ideal.

3. Intensidad, Saturación o Pureza: corresponde a la gradación que tiene un color entre el negro (ausencia de todo color) y el blanco (presencia de todos los colores), puede visionarse también como la intensidad cromática o pureza de un color o como el grado de manifestación de un color. Figura 101.

Figura 101. Comparación entre:
1) Matiz, Tono o Hue:
2) Brillo, Claridad, Valor o Luminosidad y
3) Intensidad, Saturación o Pureza.
Fuente: http://www.fotonostra.com/grafico/index.htm.

11.5. ESTIMACIÓN DEL COLOR DE LOS SUELOS.

Los suelos al igual que muchos otros objetos reflejan luz de una variedad de longitudes de onda (λ) (nm), por tanto es posible determinar cuantitativamente la contribución de las diversas longitudes de onda a la luz total reflejada, haciendo uso de un espectroreflectómetro, mediante el cual se compara el espectro reflejado por el objeto en estudio con el reflejado con una muestra patrón de óxido de magnesio (MgO), el cual es iluminado simultáneamente con la muestra y se asume como el patrón poseedor del blanco ideal. Sin embargo, este método resulta dispendioso en extremo para aplicarlo al estudio de los suelos, y sólo se justificaría su empleo para zanjar alguna duda que surgiera en relación con el color de un suelo evaluado por métodos de campo más

expeditos. Independientemente de que existan personas con algunas limitaciones en su visión, el vocabulario que se emplea para describir la impresión de color que se experimenta en la pupila de cada uno es un tanto difuso, así será fácil que un mismo suelo sea descrito como “Pardo rojizo” por un observador, en tanto que otros lo llamarán “Rojo parduzco” o hasta “Rojo oscuro” y “Rojo”. Se hace necesario entonces tener algún método que estandarice la estimación del color del suelo.

Como se acaba de señalar, las solas palabras se quedan cortas para describir certeramente el color del suelo, se impone el uso de algún dispositivo que viabilice, ojalá cuantitativamente, la evaluación del color. La primera respuesta la presenta el “Disco de Colores” fundamentado en el principio del Disco de Newton, Figura 102, según el cual, si se gira dará lugar a una visión del color blanco (presencia de todos los colores). Éste dispositivo consiste en un disco compuesto por cuatro hojas conformantes del círculo, con los colores básicos de los suelos: rojo, amarillo, negro y blanco; el aporte de cada hoja al círculo puede modificarse a voluntad; una vez se gira el disco, en el cual previamente se ha ajustado el aporte de cada uno de los cuatro colores, se generará una visión que se espera ajuste con la muestra en estudio, de no ser así, se practica otro ajuste entre las cuatro hojas y se vuelve a girar, así sucesivamente hasta lograr la coincidencia más aceptable, cuando el color de la muestra será presentado en términos de los cuatro porcentajes, con los cuales los colores antes referidos conforman el disco que acaba de girar. Se ha encontrado que no es posible lograr el ajuste perfecto entre el color de la muestra y la visión que arroja el disco de colores, lo cual ha sido explicado desde la óptica física como derivado de las diferencias en reflectancia que se originan en el hecho de que mientras la muestra permanece estática el dispositivo esté girando, además por las condiciones de rugosidad diferentes entre las dos superficies que se comparan.

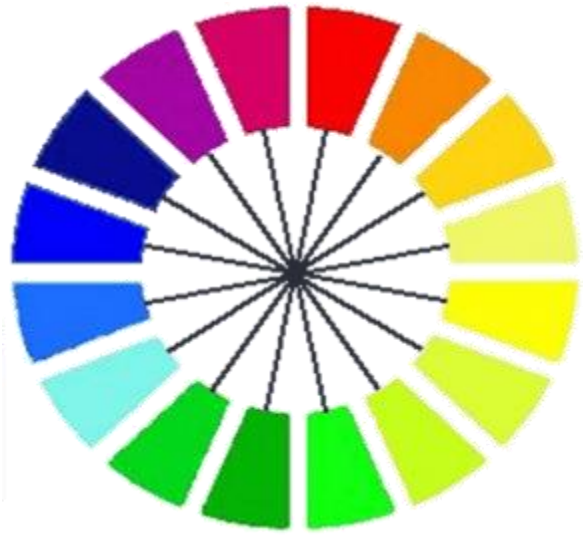


Figura 102. Principio del Disco de Newton.
Fuente: http://www.fotonostra.com/grafico/index.htm.

Desde finales de la década de 1930's y comienzos de la de los 1940's, el arquitecto norteamericano Norman Munsell, quien previamente se había dedicado al estudio de los colores de los vegetales y de diversos materiales, presentó a consideración las Tablas para Evaluación de Color de los Suelos, las cuales están constituidas por una colección de "chips" de colores estándar de suelos que se plantean con fundamento en las tres propiedades del color, ya discutidas, y que dentro de éste enfoque reciben el nombre de coordenadas de color. Las Tablas Munsell están conformadas por una serie de hojas o "sheet", donde cada una de ellas corresponde a un Matiz, Tono (Hue) específico que se señala en la parte superior derecha de cada página. En cada "sheet" se incluye una colección de placas o "chips" con colores que conservan el mismo matiz, pero difieren en su brillo y/o en su pureza, separadas por alvéolos circulares que tienen la función de enmascarar la muestra en estudio, ordenados sistemáticamente de acuerdo con la claridad, luminosidad (Value) la cual escala en sentido vertical, columnas, en fichas numeradas en forma ascendente, a manera del numerador de una fracción, desde el negro hasta el blanco. Por su parte, las divisiones de Pureza, Intensidad, Saturación (Chroma) se presentan en sentido horizontal, filas, en la parte inferior de la hoja, incrementándose de izquierda a derecha, a manera de denominador de una fracción, escalando desde la casi ausencia de color (cercano al negro) hacia la manifestación cada vez más nítida del mismo. Figura 103.

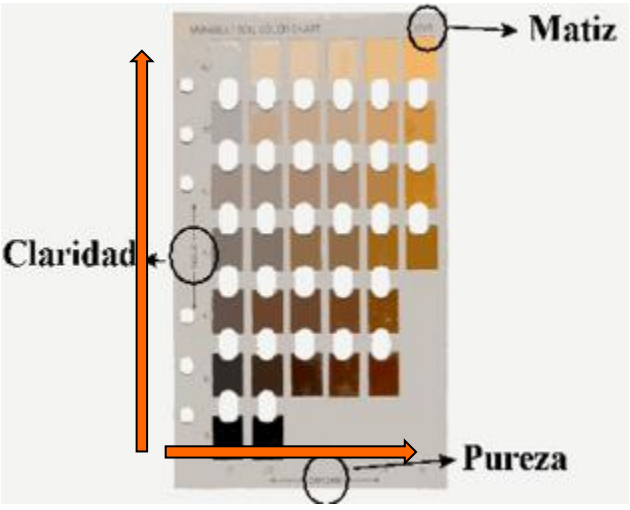


Figura 103. Hoja correspondiente al matiz 10YR de las Tablas Munsell
Fuente: www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm

Dentro del Sistema Munsell, el Matiz, (Hue) o Tono se expresa en una escala angular con un ángulo de 36º entre cada "Punto de Cambio". Círculos Periféricos en Figura 104. En correspondencia con los cinco tonos básicos: Rojo (R), Amarillo (Y), Verde (G), Azul (B) y Púrpura (P) o Violeta, más las cinco transiciones correspondientes entre los cinco básicos: YR, GY, BG, PB y RP, para un total de diez (10) "Puntos de Cambio" a través de los 360º que mide el ángulo central del círculo. Adicionalmente, el

espacio de transicionalidad, que involucra tres puntos de cambio, dos básicos, extremos, y el de transición, central, y abarca un ángulo de 72º, el cual al fraccionarse en ocho (8) ángulos de 9º cada uno, acota la transicionalidad en ocho (8) espacios, correspondientes al 12.5% de la variación entre básicos, o al 25% de la variación entre el tono transicional, central y los dos básicos, extremos; consecuentemente cada espacio es distinguido por números entre cero (0) y diez (10) dispuestos antes de la letra correspondiente y creciendo en una escala lineal con relación de 2.5:1 entre ellos. Figura 104.

No obstante, bajo condiciones de campo. Figura 105, independientemente de las limitaciones visuales que puedan darse en el observador, se han reportado variaciones entre diferentes personas de hasta 2.5 unidades de Matiz (Hue), una unidad de Claridad o Brillo y una unidad de Saturación o Intensidad. NRCS. 2002 reporta errores de hasta9% en la estimación de Matiz y de hasta 45% en la valoración de Brillo e Intensidad.

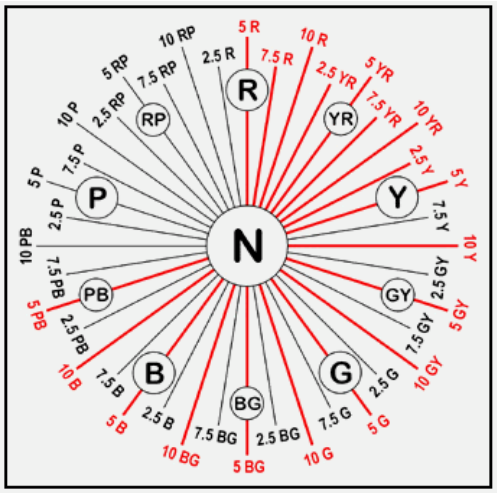


Figura 104. Distribución de Matices en la Tabla Munsell para describir el color del suelo (modificado de Munsell Color Company, 1976) **NB**: Radios en color rojo, lo mismo que el centro "N" (Neutro= Ausencia de algún Matiz) corresponden a condiciones de Matiz ocurrentes en los suelos.
Fuente: www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm

En atención a este panorama de variabilidad se ha diseñado un dispositivo electrónico, sensor de color, con aproximación a una unidad de Matiz, Brillo e Intensidad. Adicionalmente, el dispositivo en referencia tiene la ventaja del almacenamiento de datos de color, con miras a posteriores procesamientos de correlación y análisis interactivo con otras variables edáficas.

Colores de Gley: Un caso especial de estimación de color en el campo lo constituyen los suelos con drenaje natural deficiente, bajo tales condiciones redoximórficas las coloraciones particulares que llegan a producirse se caracterizan por sus matices: N, 10Y, 5GY, 10GY, 5G, 10G, 5BG, 10BG, 5B, 10B y 5PB. Los niveles de brillo escalan a través de 2.5, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 en tanto que su intensidad es baja, cubriendo los niveles 1 y 2.

Colores intermedios: La Tabla de Munsell constituye en realidad una carta promedia de vuelo, por lo que será posible registrar colores que tengan niveles fraccionarios de brillo o de intensidad, p.e: 7.5YR 5.4/3 ó 7.5YR 5/3.2.

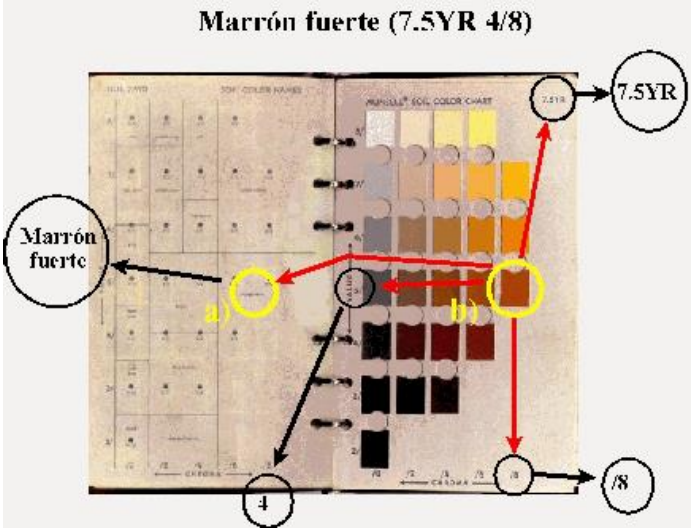


Figura 105. Ejemplo de estimación del color del suelo en campo. Presentación de Resultados : a) Color Munsell y b) Notación Munsell.

Fuente: www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm

11.6. SIGNIFICADO DEL COLOR DE LOS SUELOS.

Como ha quedado establecido desde el comienzo de este Capítulo, el color del suelo es la manifestación de los diferentes procesos que han ocurrido y/o están ocurriendo en el mismo, por tanto, el color se constituye en indicio de condiciones geológicas, grado de evolución mineral y orgánica, posición fisiográfica, actividad climática, dinámica biológica, funcionalidad oxido-reductora e influencia del medio biofísico en el suelo, como se señala brevemente a continuación.

Color Negro: Está asociado con la incorporación y evolución húmica de la materia orgánica y generalmente se asocia con condiciones de fertilidad alta con tenores suficientes de iones como Ca^{2+} y Mg^{2+} y K^{+} y correlativamente se asocian con grados de estructuración moderadamente estable a estable y alta actividad biótica. Una excepción se da en presencia de altos contenidos de Na^{+}, cuando se genera una dispersión del complejo coloidal del suelo, involucrando el humus, por lo cual el suelo manifiesta un intenso color negro, aún con bajos tenores de humus, y una muy baja permeabilidad, con la generación profusa de áreas cenagosas como sucede en el sector de Playas de

Mireya, al este del Delta de Tinajones, que luego se prolonga en dirección al oriente, a lo largo de la Espiga de Mestizos, siguiendo el curso de “Caño Salado”, en el extremo norte del Departamento de Córdoba, Colombia, por lo que llega a constituirse como uno de los vivarios naturales del caimán aguja (*Crocodylus acutus*) de relevancia mundial.

Color Rojo: Se relaciona con procesos de meteorización intensa de minerales ricos en hierro y manganeso, bajo condiciones de alta temperatura, períodos frecuentes de sequía y evolución rápida de la materia orgánica, por tal razón es índice de suelos con fertilidad baja, acidez significativa y baja actividad biótica.

Color amarillo a marrón amarillento claro: El color amarillo se asocia con el dominio de condiciones aeróbicas, pero en presencia de humedad suficiente para permitir la hidratación de los óxidos, principalmente férricos que se producen; de otro lado, las coloraciones marrones se relacionan con niveles bajos a intermedios de meteorización, con bajos tenores de acumulación de humus y condiciones variables de fertilidad.

Color blanco o presencia de colores de baja intensidad: Se da por la acumulación de ciertos minerales de baja coloración cercanos al blanco, como es el caso de la calcita, la dolomita, el yeso, y algunos silicatos como la caolinita y Sales altamente solubles (p.e: cloruros, nitratos de Na^{+} y K^{+}).

Color gris: Es indicativo de ambientes anóxicos, donde bacterias anaeróbicas reducen el Fe férrico y el Mn^{4+} dando lugar a las formas reducidas (Fe^{2+} y Mn^{2+}) las cuales son incoloras y solubles e imparten una coloración gris sobre los minerales presentes, la cual llega a extenderse por toda la superficie si las condiciones de anoxia se prolongan por un tiempo considerable. Cuando cesa el estado de saturación con agua, tanto Fe como Mn se oxidan tomando las áreas vecinas a los poros, coloraciones naranjas a rojiza y violeta, respectivamente con brillo y durabilidad acorde con la velocidad de secamiento, en razón a la generación de compuestos de diferente estructura química.

Color verde: Se asocia con la presencia de óxidos de Fe^{2+} incompletamente oxidados, que acompañan normalmente a los materiales altamente calcáreos propios de los suelos lacustres recién desecados y que rápidamente transforman su color a blanco en forma irreversible si prevalecen las condiciones de oxidación.

Colores azules: En zonas costeras, deltaicas y/o pantanosas, con presencia significativa del anión sulfato, y prevalencia de condiciones de drenaje impedido a encharcado, dicho anión es utilizado por las bacterias anaeróbicas como aceptor de electrones, liberándose S^{2-}, que cuando se combina con Fe^{2+} precipita como FeS, de color negro que al prolongarse el período de anoxia se transforma en pirita (FeS_2)

singenética que imparte un color azulado metálico al suelo. Al drenar estos suelos se forma la jaroisita ($KFe_3(OH)_6\ (SO_4)_2$) , que se caracteriza por su color amarillo pálido (5Y 6/4). Por hidrólisis de la jaroisita se genera ácido sulfúrico (H_2SO_4) que desencadena una caída en el pH del suelo, hasta niveles de pH alrededor de 3.0, condición que es conocida como de suelo sulfato-ácido que limita considerablemente el crecimiento de la mayoría de las plantas, y que tienen una presencia considerable en el Departamento de Córdoba, Colombia.

Adicionalmente, la coloración azulada se asocia con la presencia de algunos minerales como:

- Óxidos hidratados de Al (Aloisita).
- Fosfatos ferrosos hidratados (Vivianita).

Finalmente cabe resaltar el papel de la materia orgánica en la dinámica del Fe y el Mn en suelos saturados con agua. En razón a que todas las bacterias, inclusive las que reducen las formas oxidadas de Fe y el Mn requieren de una fuente de alimento, la cual no es otra que la materia orgánica; las bacterias anaeróbicas reductoras se desarrollan preferentemente en las vecindades de concentraciones de materia orgánica, como son las raíces muertas, en consecuencia, en dichas zonas se desarrollan preferentemente los moteados grises.

11.7. MANEJO DEL COLOR DE LOS SUELOS.

El manejo del color del suelo “per se” no resulta práctico. Cuando se emplean coberturas con la finalidad de provocar escurrimiento o brindar aislamiento al sol o al impacto de las gotas de lluvia, o controlar malas hierbas, si bien el color de la superficie del suelo se está modificando, ese no es el objetivo de la práctica en cuestión y más bien, en cada caso, el cambio de color resulta siendo un objetivo adicional, ya que no secundario. Un caso anecdótico se encuentra en las zonas templadas, en las cuales, con el fin de favorecer el calentamiento del suelo cubierto por la nieve, en los comienzos de la primavera, se ideó la rastra pesada, tan ampliamente utilizada en el caribe colombiano, con el fin de trazar franjas de terreno en las cuales se destruye la nieve con el implemento, con el objeto de reducir el albedo (Energía reflejada/ Energía incidente) de la superficie del terreno, con lo cual se viabiliza la eliminación de la nieve, al lograr una mayor absorción de calor y posibilitando consecuentemente la preparación del terreno para la temporada de primavera.

XII. TEXTURA DEL SUELO

"Entonces Yavé Dios formó al hombre del polvo de la tierra"

GÉNESIS, 2.3, 7

Como reza el pasaje bíblico que encabeza este capítulo, la tierra, esto es el suelo, está constituido por partículas muy finas, *el polvo*, y otras moderadamente finas, moderadamente gruesas y gruesas. Coexisten entonces los miembros de una familia de partículas diferenciadas por su diámetro. La segunda aproximación que tenemos con el individuo suelo es el contacto táctil, tocar el suelo, experimentar sensaciones como su aspereza, suavidad, plasticidad, adhesividad y cohesividad. El vocablo textura hace relación a esa experiencia táctil que se acaba de mencionar, pero, en realidad, ¿cuáles factores afectan la experiencia en cuestión?

Cuando tomamos una muestra de mano de un suelo, el material que manipulamos es en realidad una serie de agrupaciones de partículas, y en definitiva lo único que podremos inferir en ese momento es que entre dos suelos que se comparen, existen diferencias en la durabilidad o estabilidad de las mencionadas agrupaciones de partículas, a las que denominaremos "agregados del suelo". Sí disgregamos cualquiera de esos agregados podremos ver que en la conformación de este concurren partículas minerales y orgánicas de los más variados diámetros y formas, desde las más tangibles, aparentes, visibles y palpables hasta otras decididamente impalpables y no aparentes al ojo desnudo.

En realidad, la durabilidad de cada agregado estará influida por la presencia porcentual de cada tipo de partícula mineral, establecido en atención a su diámetro, pero, no debe olvidarse que en dicho agregado también confluyen partículas orgánicas, las cuales, como ha quedado establecido anteriormente impactan considerablemente la estabilidad de cada agregado, pero, éste no es el tema de interés central en éste momento, y además, en atención a su importancia y complejidad, la fracción orgánica del suelo será estudiada en un capítulo aparte, volvamos entonces a la experiencia táctil y de ella podremos decir que depende directamente de la proporción porcentual de las diferentes partículas minerales en un suelo.

12.1. EL SUELO FINO Y SU IMPORTANCIA.

Pero las partículas minerales de un suelo abarcan un universo relativamente amplio de diámetros, y todos ellos impactan el comportamiento mecánico del mismo, es necesario entonces establecer un acotamiento a esa variabilidad que posibilite un análisis estandarizado de la textura de todos los suelos; tal objetivo se logra con base al concepto de “Suelo Fino”, definido como el grupo de partículas minerales con diámetro inferior a 2 mm, en tanto que aquellas partículas de diámetro superior a 2 mm, recibirán el nombre de fragmentos gruesos del suelo, y actuarán como modificadores de la clase textural definida para el suelo fino y por tanto, en el comportamiento mecánico integral del suelo.

Concluyendo entonces la discusión anterior, es necesario establecer claramente la textura como la relación porcentual de partículas de diferentes diámetros en el suelo fino, las cuales podrán o no estar acompañadas de fragmentos gruesos, que en tal caso modificarán la textura; no obstante, la textura con modificaciones o no, impactará el comportamiento mecánico del suelo, por lo cual a la textura también se le conoce como composición mecánica del suelo, o también como composición granulométrica del suelo.

Conviene en este nivel de la discusión establecer la diferencia entre textura de un suelo y textura de una roca; se ha establecido la primera en el párrafo anterior, en cuanto a la segunda recordamos como describe el aspecto general de la roca, en función del tamaño, la forma y el ordenamiento o disposición de los cristales, lo cual refleja en última instancia las condiciones de formación de la roca o ambiente de cristalización.

Sí se tiene en cuenta la inmutabilidad y amplio espectro de impactos de ésta característica del suelo sobre su comportamiento general, tendrá que aceptarse que la textura es indiscutiblemente el atributo edáfico de mayor importancia, así entonces la textura será determinante en la economía hídrica, la erodabilidad (*susceptibilidad del suelo a ser erosionado*), la permeabilidad, la fertilidad nativa y la consistencia del suelo, consecuentemente con lo anterior constituye una importante base de clasificación del mismo.

12.2. CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS MINERALES DE LOS SUELOS.

A este nivel de la discusión se visiona el suelo fino como una colección amplia de granos minerales con diámetro inferior a 2 mm y abarcando una gama amplia de diámetros por debajo del acotamiento referido ¿Cómo establecer cuál es el nivel mayor de las partículas finas y cuál es el límite inferior al cual se extienden las gruesas, y consecuentemente, en cuál franja de medida se ubican los granos intermedios? Obviamente tendrá que aceptarse que en un campo de variabilidad tan continua como el que se refiere, se hace necesario establecer límites discretizantes arbitrarios para

delimitar las clases por tamaño, separatas o separados del suelo, cuales son, en el orden de diámetros mayores a mínimos, la arena, el limo y la arcilla; consecuentemente existe una amplia gama de sistemas de clasificación granulométrica. En la Tabla 6 se presentan dos sistemas de calificación de diámetro de granos, el Sistema Internacional y el del USDA. Como puede apreciarse en la Tabla referida, éste último sistema pone especial atención en la calificación de los diferentes tamaños de arenas, como base que han sido para los estudios de erodabilidad auspiciados por el USDA, por lo cual ubica las fracciones más erodables entre 0.1 mm y 0.02 mm. Finalmente, los dos sistemas coinciden en ubicar la fracción arcilla a niveles inferiores al diámetro de 0.002 mm = 2 *ų.* No obstante, llama la atención, por lo nemotécnico, el escalafón establecido por el Sistema Internacional, razón por la cual es el sistema más empleado por los científicos del suelo. Correlativamente con lo anterior los fragmentos gruesos del suelo, (Ø >2 mm) se denominan gravas cuando su diámetro se ubica entre 2 mm y 20 mm= 2 cm; y como piedras cuando su tamaño supera los 20 mm= 2 cm

Tabla 6. Sistemas de clasificación granulométrica de amplio uso en América.

SITEMAS DE CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL SUELO FINO

Separado	Φ USDA (mm.)	Φ Sist. Internacional (mm.)
A. muy gruesa	2 - 1	
A. gruesa	1 - 0.5	2 - 0.2
A. media	0.5–0.25	
A. fina	0.25-0.1	0.2 –0.02
A. muy fina	0.1 – 0.05	
Limo	0.05-0.02	0.02-0.002
Ar	<0.002	<0.002

12.3. SIGNIFICANCIA DE LAS SEPARATAS DE LOS SUELOS.

Entonces el suelo fino, (Ø < 2 mm), se divide, de acuerdo con un escalafón de diámetros, diferente para cada uno de los diferentes sistemas de clasificación, en arenas (A), limos (L) y arcillas (Ar); pero ¿cuáles son las implicaciones de cada tipo de partícula en el comportamiento mecánico del suelo? Las arenas (A) (Ø= 0.02 – 2.0 mm.) en proporción significativa en un suelo le impartirán al mismo una baja cohesión, alta porosidad macro, y por ende una alta capacidad de drenaje, todo lo cual se traducirá en un suelo de bajo requerimiento de labranza y con baja retención de humedad. Serán las " Tierras Invierneras" de las que hablan nuestros campesinos sabaneros. Por su parte, los suelos con alto contenido de arcilla (Ar) (Ø<0.002 mm) se caracterizarán por sus altas Pegajosidad, Plasticidad, Tenacidad, y Capacidad de Retención de Humedad (CRH), por lo que popularmente se les llama en la sabana colombiana como "Tierras de Barro ó Tierras Veraneras". Aún más, tales partículas finas son las únicas del suelo que presentan calor de humedecimiento, esto es, desprenden una determinada cantidad de calor cuando se humedecen; precisamente ésta es la base para el método de estudio de tipos de arcilla presentes en un suelo, denominado como Análisis Térmico Diferencial (ATD). Por su parte los limos (L) (Ø= 0.02 – 0.002 mm.) le imparten al suelo, dadas las características morfológicas de sus partículas, la suavidad al tacto, el brillo cuando se encuentran entre húmedos y mojados, la formación de rizos cuando se frotan en condición de húmedos y el encostramiento cuando secos. En suelos con presencia significativa de limos las labranzas que se practiquen deben ser "gruesas" evitando la pulverización excesiva del suelo, lo cual lo llevaría a presentar una alta erodabilidad tanto hídrica como eólica y una considerable tendencia al encostramiento.

En la Figura 106 se señala como a medida que se reduce el diámetro de las partículas que constituyen el suelo fino, se incrementan las propiedades inherentes a las partículas de alta superficie específica, como el calor de humedecimiento, la pegajosidad, la plasticidad y la tenacidad.

12.3.1. Los suelos pesados y livianos.

En nuestro medio, productores agropecuarios y operadores de maquinaria agrícola hacen referencia tradicionalmente a suelos pesados y livianos, en atención a su facilidad de laboreo, por lo que los primeros corresponden a los suelos con altos contenidos de arcilla, y los segundos a aquellos con presencia significativa de arenas. Es necesario aclarar estos conceptos, ya que en realidad sí se analiza el peso de cada uno de éstos suelos por unidad de volumen, el mayor peso corresponderá al suelo arenoso en tanto que el arcilloso tenderá a presentar un valor bajo para la relación en referencia, a no ser que se encuentre compactado en extremo.

12.4. TÉCNICAS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS.

Para las diferentes disciplinas involucradas con el suelo como individuo que soporta estructuras vivas y/o inanimadas es fundamental el conocimiento de la distribución por tamaño de las partículas que lo constituyen, por tanto, existen una gran cantidad de métodos de estudio de dicho parámetro, bien en atención al estudio de las partículas en cuanto a su medida, su forma, su densidad, su composición química y su superficie específica.

-

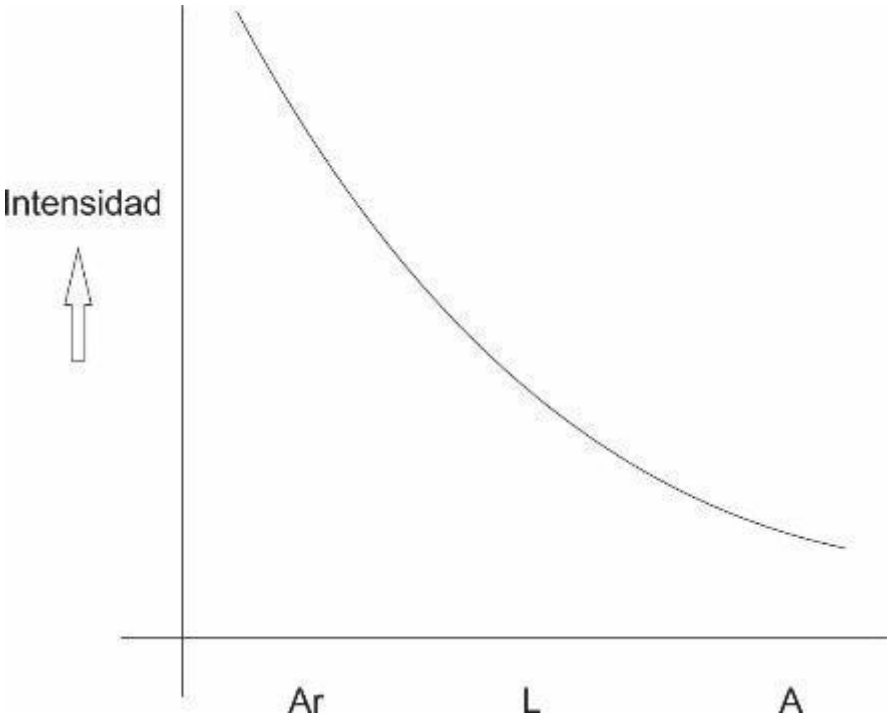


Figura 106. Incremento en las propiedades de Cohesividad, Pegajosidad, Plasticidad, Tenacidad, Capacidad de Retención de Humedad (CRH) y Calor de humedecimiento, con la reducción del diámetro de partícula (mm.)

El método más sencillo, o de campaña consiste en desterronar una muestra de mano de suelo y frotarla entre las manos, en condición inicial preferiblemente seca y observar entonces sí tintinea, se desliza entre los dedos o mancha la mano cuando seca, como indicio de arenosidad, limosidad o arcillosidad, respectivamente; o bien, una vez húmeda sí se separa en granos, se reúne en una masa brillante y suave, misma que estando con una humedad un poco menor, posibilita la formación de olas o crespos de material entre los dedos índice y pulgar; o sí se comienza a adherir a los dedos, es moldeable y permite la formación de cintas que resisten la vibración de la mano una vez superpuestas al dedo índice, como indicio de un dominio de las arenas, los limos o las arcillas. Igualmente, sí dicha muestra fluye con facilidad una vez entra en condición de saturación, la fluidez de esta estará en proporción directa con la presencia porcentual de arcillas en la misma.

En todos los métodos de Laboratorio se requiere inicialmente de una dispersión intensa de la masa del suelo que garantice que después de la misma, cada grano se comporte de forma individual. Una vez lograda dicha condición se procede a la cuantificación de la presencia de cada fracción de tamaño que puede darse por medio del tamizado que bien puede practicarse en seco o en húmedo, según su contenido de arena sea bajo o alto, respectivamente; sin embargo, las fracciones finas requieren ser analizadas por técnicas de sedimentación, fundamentadas a su vez en la “Ley de Sedimentación de Partículas Esféricas en Medios Viscosos”, formulada por Stokes en 1851.

Entre los métodos específicos se encuentran técnicas tan diversas como el Elutriador; el Tubo de Agitación; el Cilindro de Sedimentación de Wiegner, el cual invo lucra suspensiones de diferentes densidades; el método Fotoeléctrico, el cual se fundamenta en el uso de un sensor de turbidez, el método de la Pipeta y el método del Hidrómetro. Figura 107.

Los dos últimos métodos referidos son los de uso más frecuente en Colombia y fundamentalmente consisten en la dispersión inicial de la muestra, por agentes químicos y mecánicos, previa la oxidación de la materia orgánica presente en ella, su disposición subsecuente en una columna de sedimentación como la esquematizada en la Figura 108. Y seguidamente, una vez la columna entra en reposo, considerado el tiempo cero,

Figura 107. Hidrómetro graduado en gr/L presentes en la suspensión circundante al bulbo, de uso común en el Método del Hidrómetro o de Bouyoucos. Foto I.D. Bustamante B, 2001.

Figura 108. Columna de sedimentación en desarrollo del método de análisis de Textura por el Método del Hidrómetro o de Bouyoucos. Foto I.D. Bustamante B, 2001.

se realizan lecturas con el hidrómetro, Figura 107, suspendido en la columna, Figura 108, a los 40 segundos y a las dos horas, cuando se asume, según la Ley de Stokes que se han sedimentado los granos con diámetro superior a los limos, en el primer tiempo, y con diámetro superior a las arcillas, en la segunda lectura.

Por su parte, en el Método de la Pipeta, siguiendo una serie de tiempos preestablecidos, se toman muestras con una pipeta a unos niveles predeterminados de profundidad dentro de la columna de sedimentación. Y a partir de éstas alícuotas se calculan los porcentajes de arena, limo y arcilla.

Conviene a esta altura de la discusión dejar establecido lo siguiente: Todo suelo presenta arenas, limos y arcillas. Mas, la detección de cada separata dentro de la muestra que se analiza depende de la superficie específica de cada una de ellas, así entonces para que una muestra señale indicios de arcillosidad basta con un contenido de arcilla superior a 20%, en tanto que se requiere un contenido de limos superior a 40% para hacerse perceptible dicha separata en la muestra bajo análisis, y se hace necesaria una presencia superior a 53% de arenas para que la muestra se insinúe como arenosa. Figura 109. Analizando el triángulo en el sentido de las manecillas del reloj, se nota como el contenido de arcilla se incrementa de 0 a 100% por el lado izquierdo, el porcentaje de

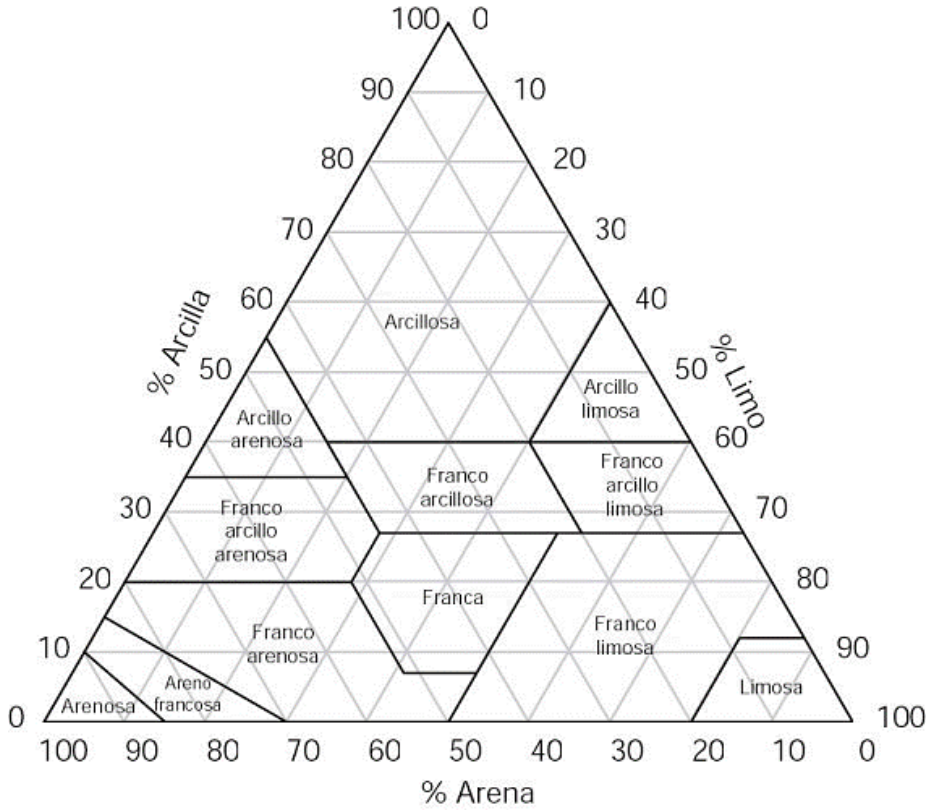


Figura 109. Triángulo Textural, según USDA.
Fuente: futuroagronomo.blogspot.

limos crece de 0 a 100% descendiendo por el lado derecho, y finalmente las arenas crecen ce 0 a 100% recorriendo la base del triángulo de derecha a izquierda, allí son observables los límites mínimos requeridos para la manifestación aparente de cada separata. En atención a que la superficie específica de cada una de ellas es inversamente proporcional al porcentaje mínimo requerido para insinuar su presencia.

Así las cosas, resulta relativamente fácil conocer el porcentaje de cada separata presente en la muestra de suelo, de la cual conocemos su peso seco, empleando el método del densímetro, según el cual, la lectura de los 40 segundos corresponde a la suma de arcillas + limos suspendidos (gr/L) en ése instante, en la columna de sedimentación a la profundidad circundante al bulbo del densímetro , y que la lectura de las 2 horas se relaciona únicamente con la cantidad de arcillas suspendidas alrededor del bulbo de lectura en ese momento; calculadas entonces esas cantidades serán convertibles a los porcentajes respectivos con respecto al peso seco inicial de la muestra, con tales porcentajes se podrá acceder al triángulo textural, marcar en cada uno de sus lados, los valores de ocurrencia de la respectiva separata, por cada uno de esos tres puntos, se traza entonces una línea paralela al lado anterior del triángulo, siguiendo el avance según las manecillas del reloj; el punto en el cual se intercepten las tres líneas

paralelas a cada uno de los tres ejes, marcará la clase textural correspondiente entre las doce comprendidas en el triángulo.

Una observación es obligada en el triángulo y es la siguiente: De las doce clases texturales contempladas, siete involucran el término franco, en algunas otras versiones denominadas como “migajón” o como “marga”. El término franco ó migajón ó marga, honra la tendencia de transicionalidad tan común en los suelos, así entonces se define al suelo franco o de migajón ó marga como aquél que posee características intermedias que conjugan la aspereza de la arena, la suavidad del limo, la cohesividad y la plasticidad de la arcilla. En ningún momento se está afirmando que involucre un contenido igualitario de 33.33% de cada una de las tres separatas. Recuérdese nuevamente, el impacto de la superficie específica de cada separata en su manifestación en el comportamiento textural de un suelo. Sin embargo, el suelo Franco clásico es poco frecuente, y generalmente se va a presentar una dominancia de una o dos separatas sobre el comportamiento tripartito que involucra el término franco, así entonces será frecuente encontrar reportes acerca de suelos con textura franco arcillosa, franco arcillo arenosa, franco arcillo limosa, franco limosa, franco arenosa y arenoso franca = areno francosa. De otro lado, honrando la transicionalidad del medio suelo serán comunes las texturas arcillo arenosa y arcillo limosa, completando las doce clases las que podrían denominarse como texturas extremas, Arcillosa (Ar) (Ar > 40 – 55 %); Limosa (L) (L > 81 – 88 %) y Arenosa (A) (A > 85 – 90 %).

La razón por la cual las texturas extremas no presentan un valor único como límite de su ocurrencia se fundamenta en que la composición granulométrica de un suelo es una típica función triángulo, en la cual interactúan simultáneamente tres variables, dando por resultado varias combinaciones distintas de porcentajes para una misma clase textural, a manera de ejemplo se refieren los datos consignados en la Tabla 7.

Tabla 7. CLASES TEXTURALES

Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase
65	25	10	Franco Arenoso
45	40	15	Franco
20	60	20	Franco Limoso
28	37	35	Franco Arcilloso
25	30	45	Arcilloso

Para finalizar la presente exposición es conveniente aclarar que hasta aquí se han mencionado los términos arena, limo y arcilla estricta y académicamente hablando, haciendo referencia a su granulometría y consecuentemente a su comportamiento mecánico. En ningún instante se han visionado los tres términos básicos antes referidos en sentido relacionado con su mineralogía, el cual, cabe aclarar puede ser bien diferente, y oscurecer un tanto la discusión. Consecuentemente se señala como en la Figura 110 el cuarzo domina en la arena y en los limos gruesos, igualmente, algunos silicatos primarios como los feldespatos, la hornblenda y las micas ocurren frecuentemente en las arenas, pero en los limos tiende a exhibir una mínima presencia y a desaparecer casi que totalmente en la fracción arcilla. De otro lado, como era de esperarse la fracción arcilla está dominada por silicatos secundarios, muchos de ellos con diámetros inferiores al límite máximo coloidal (Ø = 0,5 μ = 0.0005 mm.), aunque algunos otros minerales secundarios como las llamadas “Arcillas Tropicales” (Óxidos de hierro, manganeso y aluminio) podrán ocurrir también en la fracción mecánica arcilla y a exhibir preponderancia en la fracción granulométrica de los limos, y aún en las arenas muy finas, finas y hasta medias. Llama finalmente la atención de como las partículas finas y muy finas de cuarzo, feldespato, hornblenda y micas pueden tener ocurrencia dentro de las arcillas gruesas y muy gruesas.

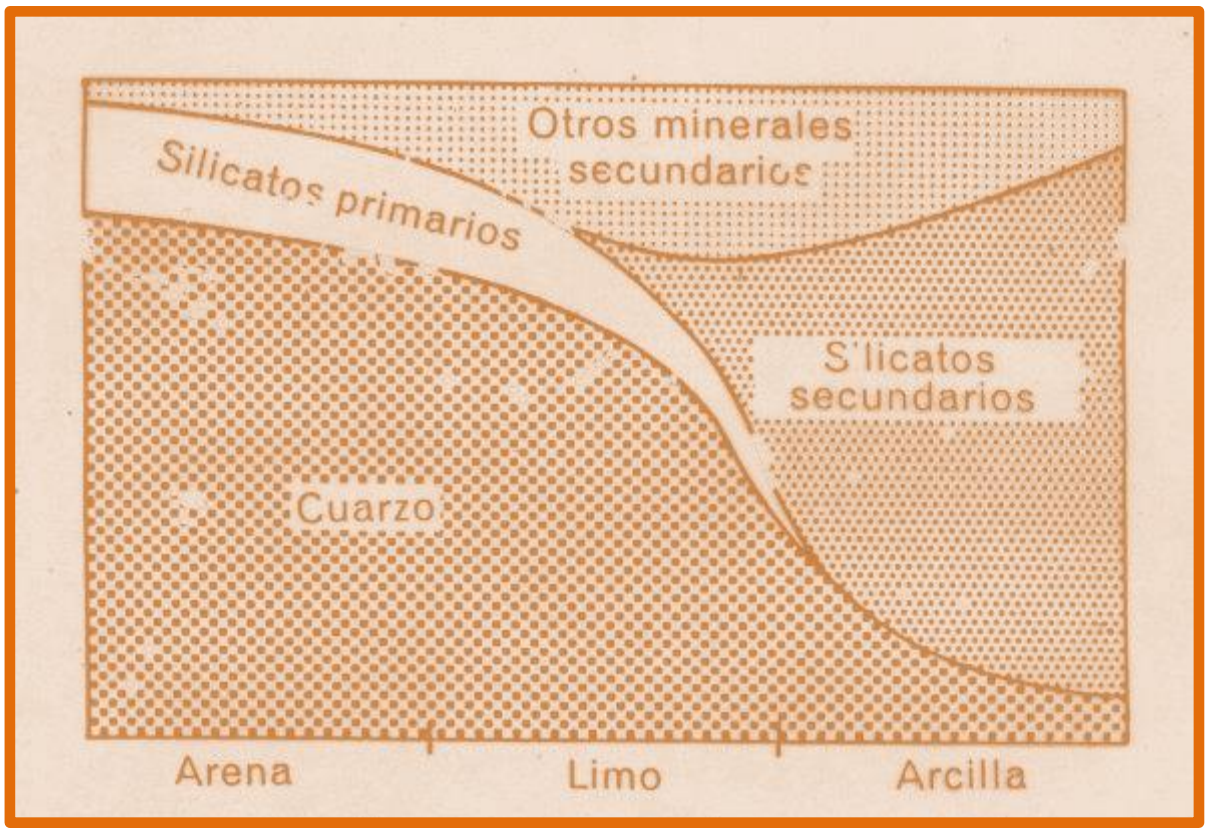


Figura 110. Relación entre diámetro de los granos del suelo fino y su naturaleza mineralógica.
Fuente: Buckman & Brady. Naturaleza y Propiedades de los Suelos. 2004.

Concluyendo entonces, una arcilla vista desde el punto de vista mecánico (Ø < 0.002 mm = 2 µ) puede involucrar fragmentos finos de cuarzo, cuando lo de esperarse sería que todas las partículas de arcilla implicaran solamente minerales secundarios. Así mismo, en la fracción arena (Ø = 0.02 – 2.0 mm), de la cual se esperaría que estuviese constituida por cuarzo y feldespatos, todos ellos minerales primarios resistentes a la meteorización, se podrán encontrar algunos secundarios como las denominadas “Arcillas Tropicales”

XIII. ESTRUCTURA DEL SUELO

"La variabilidad del suelo es continua en el tiempo y en el espacio"

S.W Boul,F.D. Hole & R.F.McCracken,1991

Nuestro conocimiento del suelo hasta el momento presente no va más allá de una simple lista de materiales que presentan unos atributos característicos de diámetro y color, una experiencia bastante similar a la que vive un constructor al comienzo de una obra. En tales condiciones se requerirá del feliz concurso del arquitecto para que defina el arreglo espacial que habrá de dársele a los materiales referidos, con miras a tener una obra con una funcionalidad determinada; así entonces, si bien un edificio de oficinas, un bloque de aulas universitarias y una torre de estacionamientos estén construidos con materiales similares, la funcionalidad de las tres edificaciones es bien diferente.

13.1. ARQUITECTURA DEL SUELO.

Lo anterior nos avoca al estudio de la Arquitectura del Suelo, entendida como conformada por el arreglo espacial de las separatas del suelo fino y las fracciones gruesas del mismo, si existen en él, y la funcionalidad correlativa del mismo, como derivada de la disposición espacial ya referida. La estructura hace relación al arreglo espacial que van a tomar esas separatas del suelo, arenas, limos y arcillas, combinados en diferentes proporciones y disposiciones, cuál será la forma de tales agrupaciones de granos, cuál será el grado de coincidencia entre las caras de las partículas que conforman una agrupación determinada; cuál será la continuidad de la coincidencia entre caras de dichas agrupaciones de partículas. Y correlativamente, cómo discurrirán los flujos de agua y/o aire a través de los espacios vacíos ocurrentes entre partículas y entre grupos de partículas; cómo se va a comportar ese conjunto de grupos de partículas frente a la penetración progresiva de una raíz que hiende el suelo, o ante una herramienta que trata de cortar el suelo o de tundirlo o por qué no, de compactarlo. Todo este último conjunto de funcionalidades o comportamientos dinámicos del suelo constituye la dinámica del suelo, y serán objeto de estudio en los próximos capítulos.

13.2. GÉNESIS DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO.

Centrando ahora la discusión en las agrupaciones de granos, las cuales se conocen como agregados, a primera vista llama en ellos la atención, su forma, su tamaño y su durabilidad, denominados en forma técnica como tipo, clase y grado, respectivamente. Pero. ¿Y cómo se forma la estructura del suelo dentro de los procesos pedogenéticos propios de cada suelo?

En términos estrictamente pedogenéticos, el suelo inicialmente es aparente únicamente a través de su saprolito, caracterizado por fragmentos minerales moderada a medianamente meteorizados, en esos estadios iniciales empiezan a medrar en el algunos organismos pioneros y en fases subsiguientes, ciertas plantas pioneras que funcionan como sustrato y anidamiento de algunas formas igualmente rústicas y oportunistas de vida animal, con lo cual se dan las primeras aportaciones de materia orgánica al medio, sin embargo simultáneamente a ésta situación, las partículas minerales y orgánicas presentes se comportan en forma independiente. Bajo estas condiciones, se dice que el suelo se encuentra en una condición de aestructuralidad, es decir, carente de estructura. Esa condición aestructural puede revestir dos modalidades, la primera denominada como monogranular o de grano simple, semejante al caso de la arena, en la cual cada grano se escapa independientemente entre los dedos de la mano que pretende reunirlos, o sea cuando cada grano exhibe un deslinde total con su vecino; todo lo contrario ocurre en la condición aestructural masiva, donde las caras de cada grano se corresponde con las de sus vecinos, por lo que se da un empaquetamiento total, semejando al jabón, el cual sí se abre por un determinado plano, no queda huella aparente de la fisura practicada, después de cerrarla.

Estando el suelo en condición de aestructuralidad, las fuerzas de Van der Waals que existen entre las partículas, lo mismo que las fuerzas electrostáticas que se registran entre aquellas cargadas eléctricamente, como son las partículas orgánicas y de arcilla en estado coloidal (Ø < 0,5 μ = 0,0005 mm) desarrollan una “insinuación de agrupaciones” denominadas originalmente como “Domains” o “Dominios”. Se aclara, en tal condición se da aproximación de partículas más no coincidencia de caras entre ninguna pareja de ellas.

En la fase siguiente, conocida como de formación de “clods” o “nubes” se incrementa el acercamiento entre partículas y es más, algunas de ellas alcanzan a establecer ocasionalmente contacto físico entre algunos puntos de su superficie, coincidente con los correspondientes de su vecina. Seguidamente, los “clods” o “nubes” se compactan progresivamente, dando paso a la formación de “crumbs”, “micropeds”, “flocs” o “flóculos” en los cuales la atracción electrostática entre las partículas es aparente, involucrando en sus espacios intersticiales a otras partículas eventualmente sin carga eléctrica. Figura 111.

Los “crumbs”, “micropeds”, “flocs” o “flóculos” son relativamente inestables, ya que su existencia se fundamenta única y exclusivamente en la existencia de la atracción electrostática, por tanto, la agitación del medio resulta contraproducente a la perdurabilidad de los “micropeds”. Sí sobre dos “micropeds” vecinos se extiende eventualmente una delgada capa de sustancias orgánicas, ésta actuará como agrupador encapsulante de dicho grupo, el cual a su vez podrá involucrar a más y más “crumbs”, dando lugar a un “ped”, considerado la mínima expresión de un agregado, del cual es copia reducida. Así entonces la reunión de “n” “peds” relativamente semejantes dan lugar a un “agregado” palpable y visible al ojo desnudo, el cual presenta atributos de forma, tamaño y estabilidad que son dependientes de las condiciones características del ambiente que ha circundado el proceso de estructuración que recién culmina con la formación de cada uno de ellos.

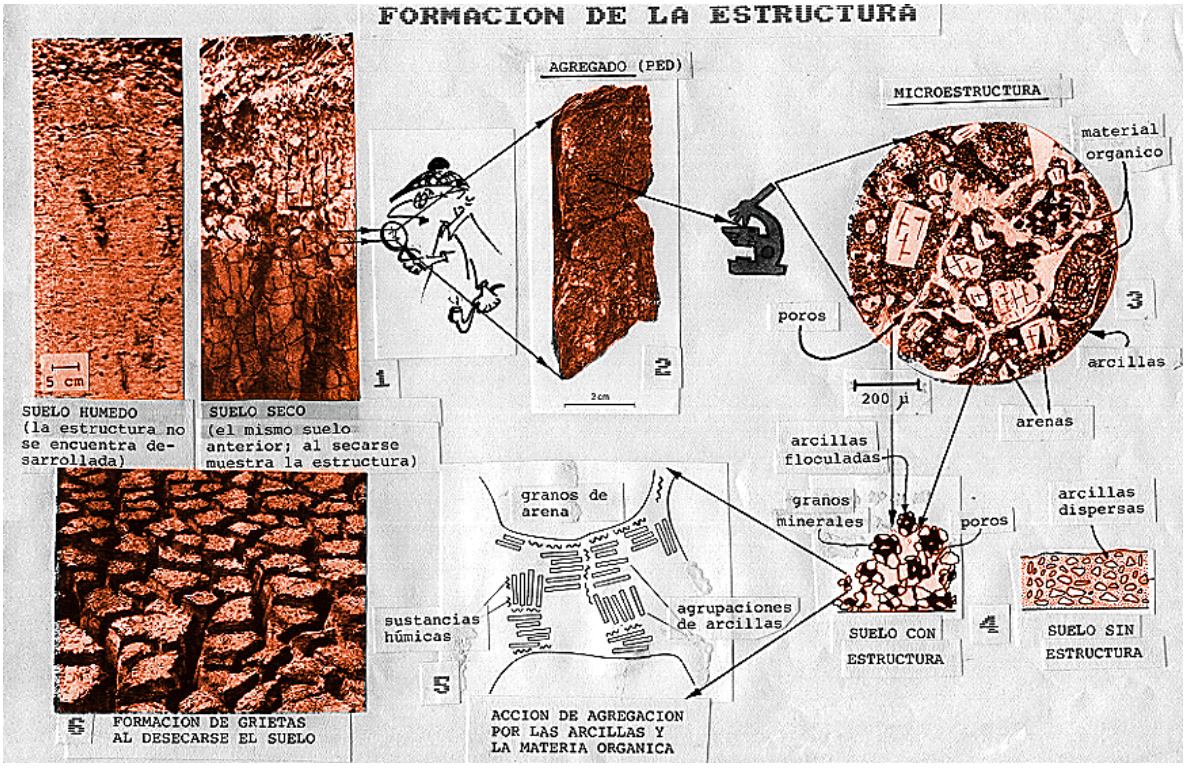


Figura 111. En la génesis de los “peds” se involucra material inerte (A, L). La M.O y la Ar actúan como agentes cementantes, aunque puede darse el concurso de cementantes como cal, yeso y arcillas tropicales. La floculación es condición necesaria mas no suficiente para que se dé estructuración. La dispersión o defloculación de los coloides da al traste con la estructura.
Fuente: Internet.

13.2.1. Formas (Tipos) de agregados del suelo.

Como ha quedado establecido en la sección anterior, los agregados surgen de la reunión de peds, los cuales a su vez han devenido desde la condición de “crumb”,

proveniente a su vez del “clod” obtenido a partir de algún “domain”. Cabe ahora formular la interrogante: ¿Por cuál razón los agregados tienen formas diferentes?

Cada agregado tiene una forma que hace relación a las condiciones que rodearon su génesis, tiene límites precisos y se separa de su agregado vecino por planos de “clivaje” o fragilidad distinguibles y relativamente semejantes, los cuales no se dan bajo condiciones de aestructuralidad o estructuración simple. La forma de cada agregado

Cuadro 2. Códigos para los Tipos de Estructura del Suelo. FAO, 2009

RS	**Estructura rocosa**	
	SS	**Estructura estratificada**
SG	**Grano simple**	
MA	**Masiva**	
PM	**Masiva porosa**	
BL	**En Bloques**	
	AB	**Bloques angulares**
	AP	**Bloques angulares (forma de paralelepípedo)**
	AS	**Bloques angulares y subangulares**
	AW	**Bloques angulares (en forma de cuña)**
	SB	**Bloques subangulares**
	SN	**Bloques subangulares en forma de nuez**
PR	**Prismática**	
PS	**Prismática subangular**	
WE	**Forma de cuña**	
CO	**Columnar**	
GR	**Granular**	
WC	**Por Moldes de lombrices**	
PL	**Laminar**	
CL	**Aterronado**	
CR	**Desmenuzable**	
LU	**Grumoso**	

tiene sus raíces en la orientación espacial que han tenido los granos en el “domain” inicial. Cuadro 2. Así entonces, cuando los granos se orientan en el “domain” alrededor de un punto, los agregados obtenidos podrán ser esferoidales. Figuras 112 y 113 o nuciformes. Figuras 114 y 115; en tanto que, si se orientan alrededor de un eje vertical, los agregados obtenidos podrán ser de los tipos prismático y columnar. Figuras 116, 117. Y 118. Y finalmente sí se orientan rodeando un eje horizontal, el tipo obtenido será laminar. Figura 119.

Cabe aclarar que mientras las estructuras esferoidales se dan en presencia de moderados a altos contenidos de materia orgánica. En las estructuras nuciformes (en forma de nuez) la presencia de dicho componente orgánico es moderado a bajo.

Dentro de las estructuras blocosas o nuciformes, derivadas al igual que las esferoidales de “domains” orientados alrededor de un punto central, habrá que distinguir entre las estructuras en bloques subangulares y angulares, ya que mientras las primeras se registran en ambientes con tenores orgánicos moderados a bajos, las últimas son propias de condiciones en las cuales dichos tenores son predominantemente bajos, motivo por el cual las arcillas llegan a presentar un considerable protagonismo en la agrupación de los peds conducente a la generación de los agregados finales. Figuras 114 y 115

Figura 112. Estructura Esferoidal Migajosa, con agregados porosos, de forma redondeada (no se ajustan a agregados vecinos). Típica de los horizontes A en praderas prístinas y/o de muchos años, con óptimo manejo. Fuente: Internet.

Por su parte, cuando los granos originales se orientan en el “domain” inicial alrededor de un plano vertical, se generan estructuras prísmáticas, caracterizadas por aristas agudas y definidas, la mayoría de las veces esculpidas por los flujos ascendentes y descendentes de solutos en áreas con ocurrencia de algún grado significativo de hidromorfismo. Generalmente se asocian con la presencia de arcillosidad con grados medios a bajos de expandibilidad y la ocurrencia de diferencias marcadas en los regímenes hídricos del perfil a través del año. Figura 116.

Figura 113. Estructura Esferoidal Granular. Agregados sin apenas poros en su interior, de forma redondeada (no se ajustan a los agregados vecinos). Es similar a la migajosa pero los agregados no presentan porosidad externa. Típica de los horizontes A y generalmente bajo pastos. Fuente: Internet.

Diferente a las anteriores, las estructuras columnares presentan redondeamientos en sus caras superiores imprimiéndoles a los agregados morfología "mástica" (semejante a las mamas animales), atribuida a la acción persistente de flujos cargados de sales. Su ocurrencia no es muy frecuente y la mayoría de las veces se hace aparente en forma discontinua dentro de un área, obedeciendo a la ocurrencia de depresiones y en general sitios de marcada actividad salina, especialmente de tipo sódico, dada su eficiencia como dispersante de los materiales coloidales. Figuras 117 y 118.

Finalmente, en las estructuras de tipo laminar, los granos originales se orientaron inicialmente siguiendo los dos ejes horizontales, dando lugar a "peds" y consecuentemente agregados de forma alargada y no necesariamente homogénea, pues en su desarrollo lateral se ven interrumpidos por la presencia de los obstáculos que pueden presentar los granos gruesos y las fisuras generadas por alguna estructura vegetal.

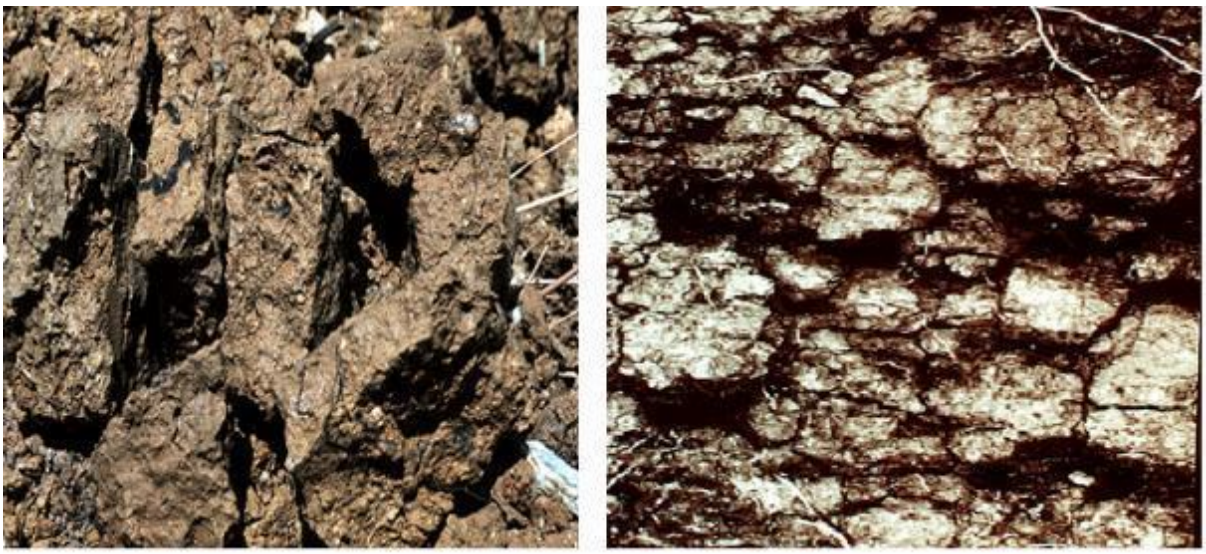


Figura 114. Estructura Angular (o en bloques angulares). Hace parte de las estructuras blocosas o nuciformes. Presenta agregados de forma poliédrica, con superficies planas, de aristas vivas y con vértices. Las caras del agregado se ajustan muy bien a las de los agregados vecinos. Típicamente se da en los horizontes arcillosos, como son los horizontes B. Fuente: Internet.

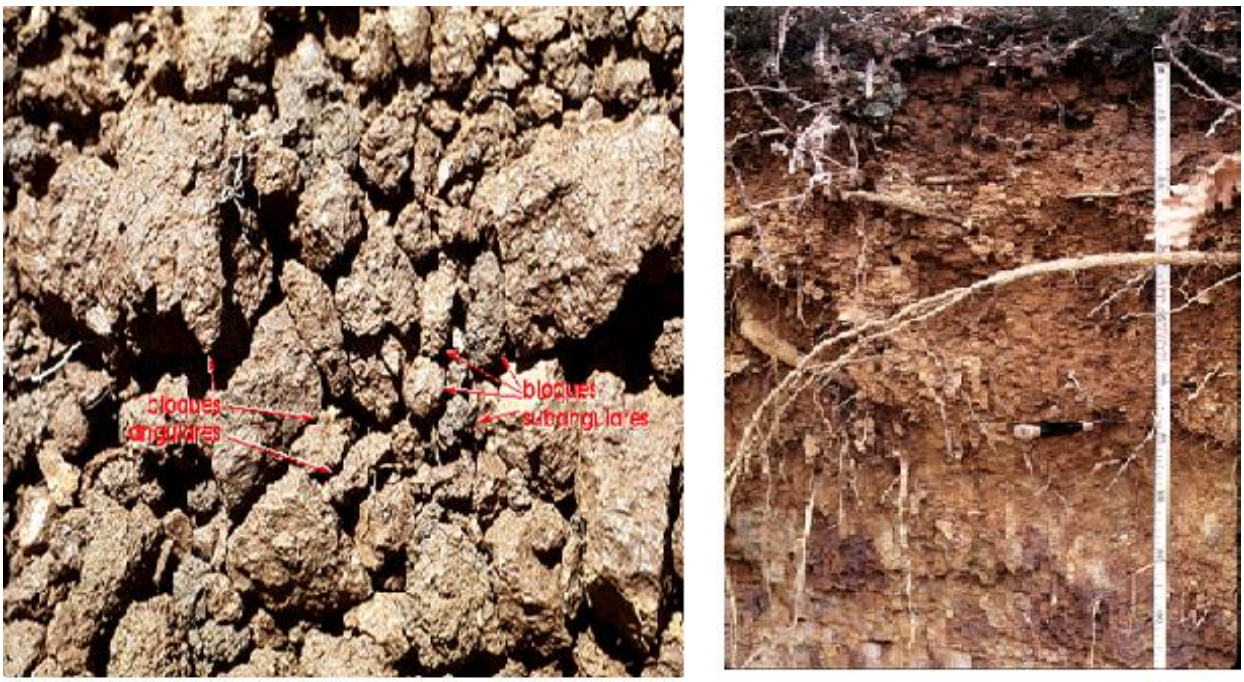


Figura 115. Subangular (o en bloques subangulares). Presenta agregados de forma poliédrica, con superficies no muy planas, de aristas romas y sin formación de vértices. Las caras del agregado se ajustan moderadamente a las de los agregados vecinos. Típicamente se da en los horizontes arcillosos, pero con moderada influencia de la M.O como son los AB y BA. Fuente: Internet.

Figura 116. Prismática. Cuando los bloques se desarrollan en una dirección (vertical) más que en las dos horizontales. Presente en los horizontes más arcillosos, como horizonte B y en ocasiones horizontes C_1. Fuente: Internet.

Figura 117. Columnar. Prismas con su cara superior redondeada. Morfología “mastica”. Estructura muy escasa.
Fuente: Internet.

Figura 118. Estructura Columnar conservada dentro de un área con fuerte actividad sódica
Fuente: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/30160/25._Natrico.jpg

La cobertura de bosque bajo pluviosidad significativa favorece su desarrollo, lo mismo que la alta presencia de algunos materiales como las arcillas tropicales, con la formación de *"clay skins"* los limos con el desarrollo de costras y las arenas finas a medias que llegan a ser abundantes en los Horizontes E. Figura 119.

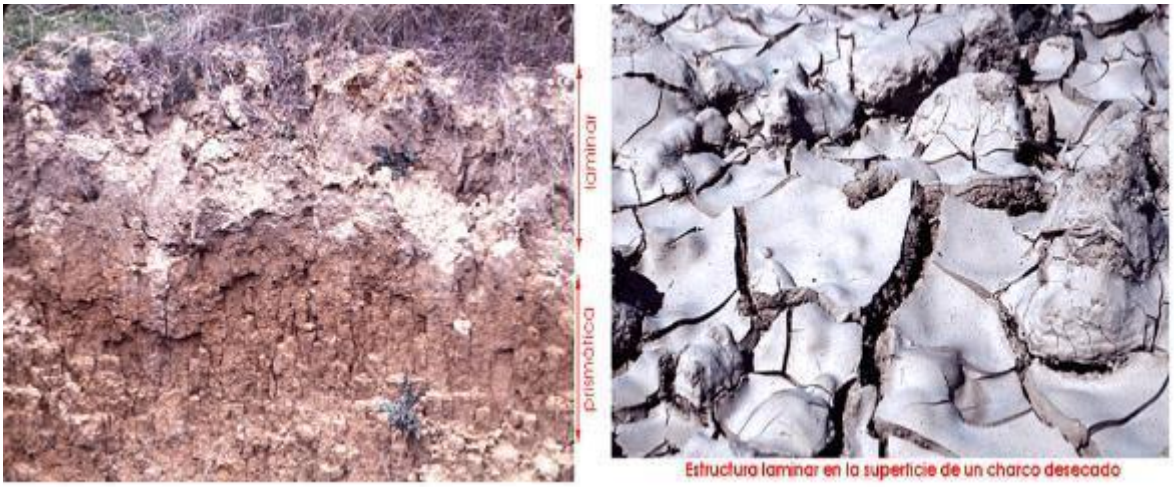


Figura 119. Laminar. Cuando los agregados se desarrollan en dos direcciones (horizontales) más que en la tercera (vertical). Típica de los horizontes medios a gruesos, como los horizontes. E. Recordar: caso de Arcillas Tropicales y Limos, con la formación de "*clay skin*" y costras, respectivamente. Fuente: Internet.

En la Figura 120 se presenta un resumen de los tipos de estructura edáfica, su apariencia en campo y se hace una primera mención gráfica de la dinámica de microestructuración que marca el origen y la dinámica de cada uno de los arreglos espaciales que se acaban de discutir.

No obstante, en un solo horizonte puede ocurrir una entremezcla de tipos de agregados, como se señala en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Combinaciones de tipo de estructura de los suelos, FAO, 2009.

CO + PR	**Ambas estructuras (CO y PR) presentes**
PR → AB	**Estructura primaria (PR) cambiando hacia una secundaria (AB)**
PL / PR	**Una estructura (PL) fusionándose a otra (PR)**

Tabla 8. CLASES de TAMAÑO para los TIPOS de ESTRUCTURA del SUELO, FAO, 2009.

CLASE		Granular/laminar	Prismática/columnar/ forma de cuña	Blocosa/terrones/ desmenuzable/grumos
	(mm)	(mm)	(mm)	
VF	Muy fino/delgado	< 1	< 10	< 5
FI	Fino/delgado	1–2	10–20	5–10
ME	Medio	2–5	20–50	10–20
CO	Grueso/espeso	5–10	50–100	20–50
VC	Muy grueso/espeso	> 10	100–500	> 50
EC	Extremadamente grueso	–	> 500	–

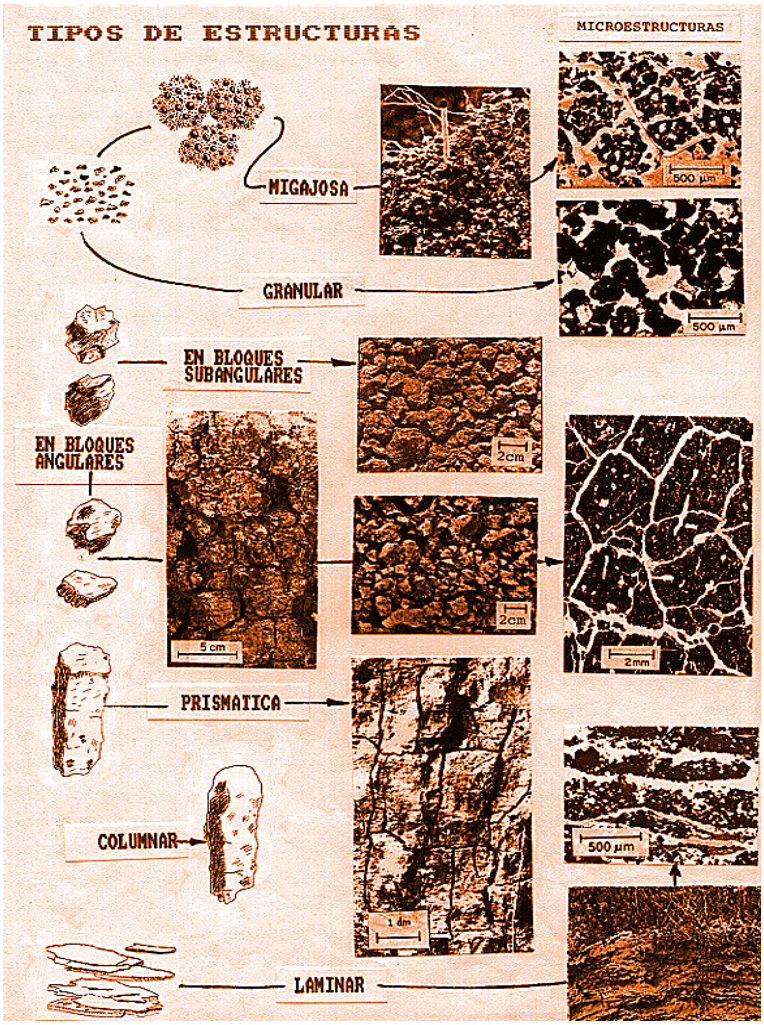


Figura 120. Resumen de Tipos (Formas) de estructura edáfica y su correspondiente arreglo microestructural._Fuente:Internet.

13.2.2. Clases (tamaños) de agregados del suelo.

Según sean los tipos de estructura se tendrán diferentes rangos de medida para asignar el calificativo de clases: (VF) Muy fino/delgado; (FI) Fino/delgado; (ME) Medio; (CO) Grueso/espeso; (VC) Muy grueso/espeso y (EC) Extremadamente grueso. Un detalle de dicha clasificación, según FAO, 2009, se presenta en la Tabla 8.
Sin embargo, en un mismo horizonte pueden concurrir diferentes clases de agregados para un mismo tipo de ellos, como se ejemplifica en el Cuadro 4.

No obstante, los esquemas que se presentan en las Figuras 121 y 122, constituyen una valiosa ayuda para las personas que se inician en la actividad de descripción de suelos.

Cuadro 4. Clases de Tamaño combinadas para los tipos de Estructura de Suelo, FAO, 2009.
FF…….. Muy fino y fino
VM…….. Muy fino a medio
FM……. Fino a medio
FC……. Fino a grueso
MC…….. Medio a grueso
MV…….. Medio a muy grueso
CV……. Grueso a muy grueso

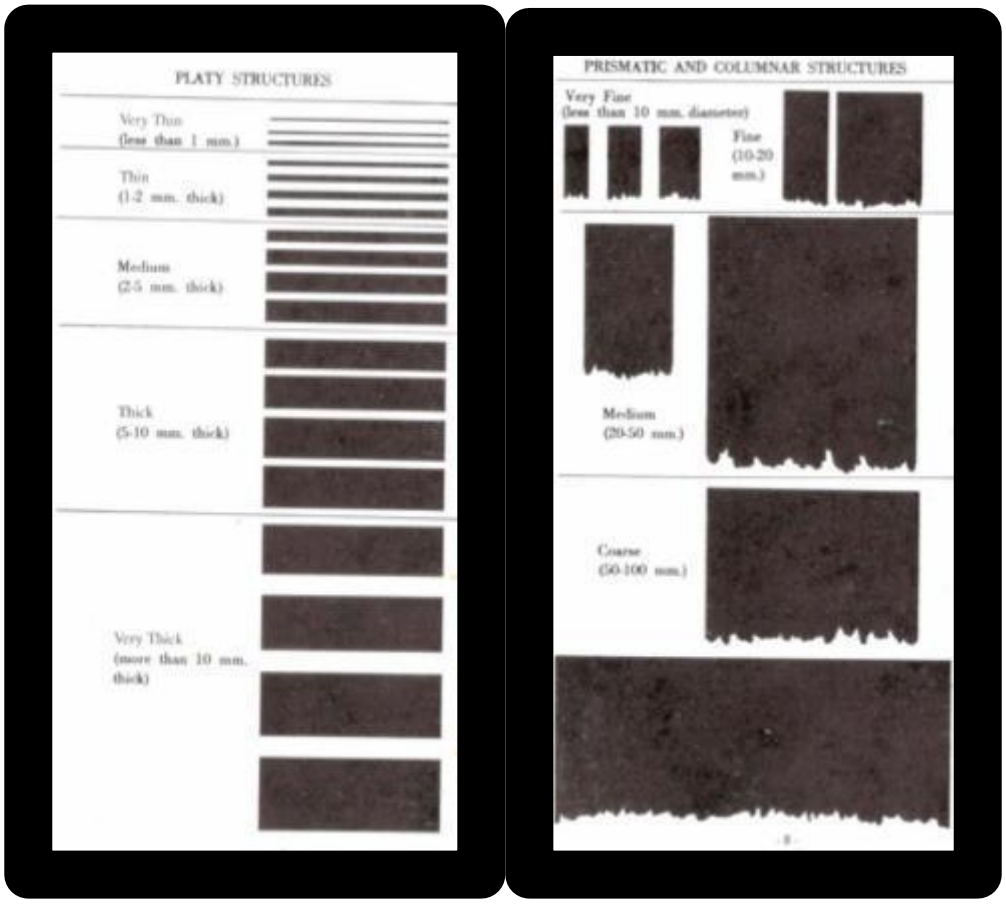


Figura 121. Guía gráfica para la calificación de clases de estructura laminar y prismática._Fuente: FAO.

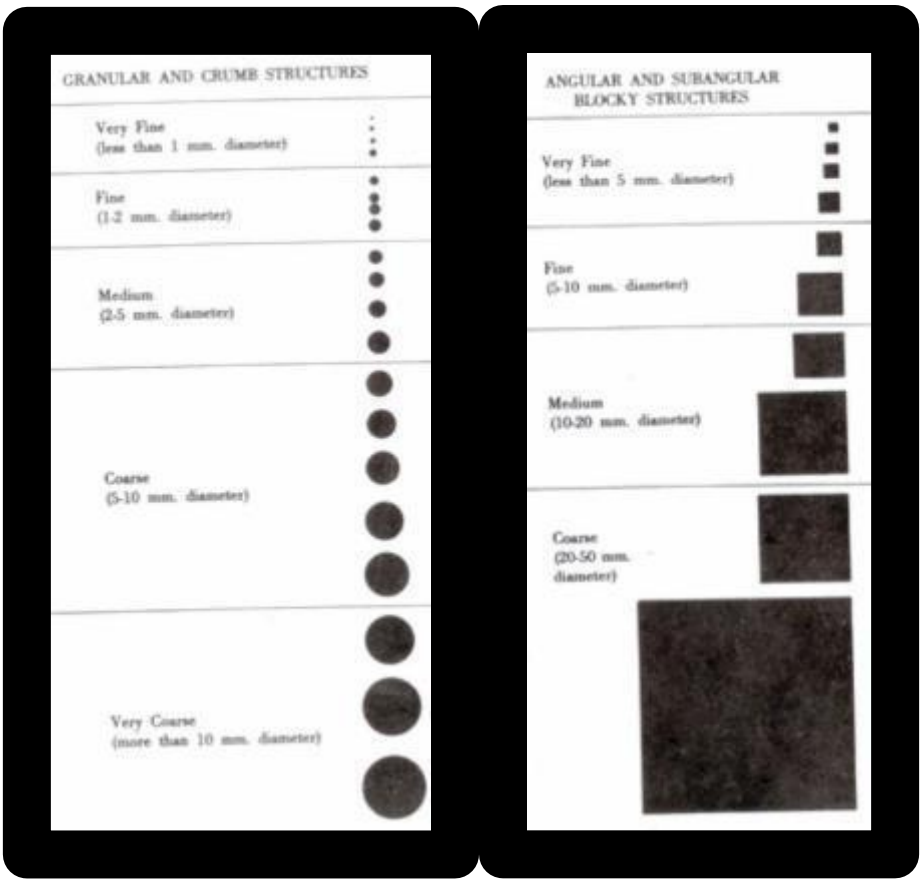


Figura 122. Guía gráfica para la calificación de clases de estructura esferoidal y en bloques angulares y/o subangulares. Fuente: FAO.

13.2.3. Grado (estabilidad) de los agregados del suelo.

Más que la forma y tamaño adoptados por el arreglo espacial de los granos del suelo, bajo la identidad de los agregados edáficos, en términos prácticos resulta de mucha mayor importancia la perdurabilidad o estabilidad de los mismos frente a los agentes que tienden a destruirlos, como son: la labranza, el pisoteo, la radiación solar, el impacto de las gotas de lluvia, la acción cizallante del escurrimiento y la presión y velocidad de las corrientes de viento que eventualmente puedan impactarlo en condiciones de muy bajos niveles de humedad. En el Cuadro 5 se presentan las calificaciones establecidas por la FAO, 2009, para el grado de estabilidad estructural.

Ahora bien, la pregunta obligada a esta altura de la discusión es acerca de cuáles son los factores implicados en dar estabilidad a los agregados del suelo.

13.2.3.1. Factores de Estabilidad Estructural en el Suelo.

a. **La cantidad y tipo de material arcilloso dominante en la fracción fina del suelo** son determinantes en la estabilidad estructural de un suelo, así entonces un alto contenido de arcilla será responsable de una cohesión significativa que puede ser precursora de una agregación considerable, más dicho efecto será más marcado en arcillas no expansivas que sí ellas presentan una considerable expandibilidad. Un caso patético de dicha situación lo presentan los horizontes B_o característicos de los Oxisoles, los cuales revisten una alta estabilidad estructural.

Cuadro 5. Clasificación del grado estructural de los suelos, FAO, 2009.

NS	**Sin Estructura = Aestructural: No hay agregación visible, ni ordenamiento en los planos de fragilidad, puede presentar las variantes de:**
	SG ***Grano simple***
	MA ***Masiva***
	PM ***Masiva porosa***
WE	***Débil:* Los agregados son apenas observables en el sitio y sólo hay un arreglo débil De las superficies naturales. Cuando está poco disturbado, el material de suelo se rompe en una mezcla de agregados completos, muchos agregados Rotos, y muchos materiales sin caras agregadas. La cara superficial de los Agregados difiere de alguna manera del interior de los agregados.**
MO	***Moderado:* Los agregados son observables en el sitio y hay un arreglo distinguible De las superficies naturales. Cuando está disturbado, el material del suelo se rompe en una mezcla de muchos agregados completos, algunos Agregados rotos y poco material sin caras agregadas. La cara superficial de los agregados muestra generalmente diferencias distinguibles con los Interiores de los agregados.**
ST	***Fuerte:* Los agregados son claramente observables en el sitio y hay un arreglo Prominente de las superficies naturales de debilidad. Cuando está disturbado, el material del suelo se separa principalmente en agregados Completos. La superficie de los agregados difiere generalmente de manera Marcada de los interiores de los agregados.**
Las clases combinadas se pueden construir como sigue:	
WM	***Débil a moderado***
MS	***Moderado a fuerte***

b. La especiación catiónica del complejo de cambio, sin embargo está bastante relacionada con el tema en referencia, con base a los conceptos de radios iónicos y de hidratación de cada catión, así entonces, mientras es mayor el primero y consecuentemente se reduce el segundo, como en el caso del calcio (Ca^{++}) será considerable la actividad floculante del catión cuando predomina en el complejo; mientras que en el caso opuesto, como es el del sodio (Na^{+}) ,su dominio en el complejo de cambio tendrá una resultante de dispersión o defloculación.

c. Los Cementantes inorgánicos, Como son los óxidos de Fe, Al y Mn, la calcita (CaCO3) y el yeso (CaSO4), cuando tienen presencia significativa en el suelo impactan fuertemente la cohesión, la agregación y la dureza del mismo.

d. Las plantas y sus residuos, como sustrato inicial que son en el proceso evolutivo: Biomasa – Necromasa – Humus, juegan un papel importantísimo en la gestión húmica que continuamente se desarrolla en el suelo y que tendrá un impacto singular, definitivo y de progresiva importancia en las fases de “crumb”, “ped” y “agregación” de la génesis estructural.

e. Los Compuestos y cementantes orgánicos producidos en la dinámica húmica referida en el literal anterior, serán los agentes de agrupamiento y encapsulamiento de las agrupaciones de materiales orgánicos y minerales hasta el momento solo atraídos por fuerzas de Van der Waals y electrostáticas, dando paso a la verdadera estabilidad estructural.

f. La Actividad Biótica es responsable central de la dinámica húmica del suelo y por tanto de sus implicaciones sobre la evolución estructural del mismo.

g. El agua implica varias y diversas facetas en la evolución estructural del suelo, así entonces, mientras niveles reducidos de humedad en el horizonte favorecen los procesos de cohesión, precursora de agregación; niveles hídricos altos generarán altos niveles de producción de biomasa, la cual con el tiempo y demás condiciones favorables se traducirá en niveles húmicos significativos, implicados en los procesos de consolidación de “peds” y agregados estables.

Adicionalmente, cuando el suelo recién abandona el nivel de seco al aire y apenas comienza su proceso de humectación, las pequeñas cantidades de agua que comienzan a alojarse en los intersticios intergranulares desempeñan, gracias a la tensión superficial que desarrollan, las veces de puentes de unión entre las partículas que tocan. Y en este punto cabe resaltar que cualquier mecanismo o

material que propicie el acercamiento de los granos, se constituye en un promotor de agregación.

Además, como ya se ha indicado anteriormente, el agua constituye condición *sine quanon* para el desarrollo de la actividad biológica en el suelo, inicialmente involucrada en la producción de biomasa, y posteriormente en la evolución húmica de tal sustrato en el medio edáfico.

El agua como componente climático definirá la periodicidad y duración de las temporadas de sequía durante el año, con lo cual será factor determinante ´de buena parte de las características morfológicas y fisiológicas de la cubierta vegetal y de las especies faunísticas asociadas a la primera, con lo cual determinará la cantidad y calidad de biomasa producida y de la tasa de acumulación húmica en el sistema. Finalmente, el comportamiento cíclico de los períodos de estiaje son determinantes importantes del tipo de arcilla producida en una ecorregión.
En último término, el agua como regulador climático de la temperatura edáfica determinará el comportamiento del potencial "redox" del suelo y así mismo determinará los tipos dominantes de biota participantes en la evolución húmica propia de cada suelo.

h. El aire: Cuando el agua penetra en el perfil, será normal el desplazamiento progresivo del aire que inicialmente ocupaba el espacio poroso, generando con ello un factor de resistencia a la penetración y consecuente redistribución del frente húmedo. No obstante, cuando el agua posteriormente irrumpe en el espacio poroso interno de un agregado en particular, es muy probable que la alta presión hidrostática que rodea al agregado en cuestión genere una compresión progresiva del aire existente dentro de él y consecuentemente la explosión del mismo cuando la ocupación de dicho espacio poroso interno se acerca al 100%. En tal caso el papel del aire en la agregación tendría signo negativo.

Un caso bien distinto se da cuando se analiza el papel del aire como requisito respiratorio de la biota que gestiona el humus en el suelo, mayoritariamente aeróbica.

Desde el punto de vista químico la abundancia del aire en el suelo determina la ocurrencia de procesos de oxidación de elementos metálicos como el hierro y el manganeso, determinantes de estabilidad estructural al precipitarse en condiciones de oxidación. Así mismo una proporción moderada de aire en el medio garantiza la evolución húmica en el mismo, pero si la dotación de aire es incrementada se promoverá la liberación de CO_2 y la consecuente mineralización del humus. Y nuevamente el papel del aire en la agregación tendrá signo negativo.

i. **La Temperatura**: es factor determinante en la actividad de todas las formas de vida y por tanto impacta de comienzo a fin el proceso: Biomasa – Necromasa – Humus.

Así mismo, de acuerdo a la Teoría Físico-Química, el incremento de la temperatura en el medio se traduce en un incremento de la Fracción Molar de Energía Libre (FMEL) de las moléculas implicadas, con lo cual se incrementa la posibilidad de tener en menor tiempo: “domains”, “clods”, “crumb”, “peds” y correspondientemente agregados.

Igualmente, el nivel de temperatura del medio será determinante del tipo de arcilla dominante en los suelos de la ecorregión, así como de la cantidad y características de la materia orgánica autóctona de dichos suelos. En resumen, impactará las características morfológicas y funcionales del complejo coloidal de esos suelos.

j. **La Presión**: que se desarrolla en el medio edáfico, como producto de las oscilaciones en los niveles humedad y temperatura del suelo y los consecuentes cambios de volumen de la masa del mismo son eventualmente factores de acercamiento entre granos y por ende de generación de estructura.

Así mismo, el crecimiento de raíces y el pisoteo animal constituyen fuerzas que desplazan partículas del suelo, acercándolas, favoreciendo por tanto la génesis estructural.

Finalmente, las prácticas de labranza y el tráfico sobre el terreno son procesos que desarrollan presiones las cuales tienden a reducir el volumen del mismo, con lo cual se comportan como prácticas degradantes de la estructura.

No obstante, algunas prácticas de labranza como el paso de arado de cinceles, acompañado de la aplicación de enmiendas orgánicas, en razón a su acción de tundir desde abajo a la masa del suelo, promueven la fractura de las masas compactas de suelo, siguiendo sus planos naturales de fragilidad, mientras las enmiendas favorecen la estabilización de las estructuras rehabilitadas.

EN RESUMEN. Los factores de estabilidad estructural son factibles de reunir en los tres ejes centrales que se detallan a continuación:

1. Factores promotores y actuantes en el Proceso de Floculación, precursora de estructuración mas no sustitutiva, bajo ninguna condición, de ella.

2. Factores implicados en la dinámica húmica, condición necesaria y suficiente para obtener la estabilidad estructural edáfica.

3. Factores relacionados con la habilitación de materiales que tienen acción cementante en el proceso de evolución estructural del suelo.

13.2.3.2. Factores de Dispersión Estructural en el Suelo.

Podría decirse que todos los factores de estabilidad estructural, cuando rebasan un nivel óptimo o cuando toman signo contrario en su acción, llegan a comportarse como factores de dispersión estructural. A continuación, el análisis respectivo:

a. **Las continuas oscilaciones de humedad** en suelos con presencia significativa de arcillas expandibles constituyen un factor de inestabilidad estructural. Cabe recalcar aquí que la estabilidad estructural requiere acercamiento entre partículas y permanencia de tal condición en el tiempo y el espacio.

b. **La defloculación:** constituye una degradación estructural por la base del proceso de estructuración, siendo, como es, la floculación el proceso responsable de la generación de “crumbs”. Así entonces, un suelo de apreciable estabilidad estructural puede llegar a la condición de aestructuralidad, mediante la dispersión o defloculación de su complejo de cambio, lograda a través del desplazamiento de la variedad catiónica del mismo, mediante su enriquecimiento con el catión sodio, un ejemplo de éste proceso se da en la “sodificación” con miras de impermeabilización que se da a las áreas de captación o producción de escurrimientos que se practica dentro de las estrategias de “cosecha de agua lluvia” en zonas secas, como son el norte de México, Chile y sur del Perú.

   Un ejemplo más cercano se tiene en el sector de Playas de Mireya y Caño Salado, en comprensión de los municipios de San Bernardo del Viento y San Antero, área circunvecina este de la desembocadura del Río Sinú, Córdoba, Colombia, donde la defloculación del suelo acarreada por altos niveles sódicos, ha generado la formación de áreas más o menos extensas, las cuales sirven de nicho al caimán aguja (*Crocodylus acutus*).

c. **La Oxidación** de la materia orgánica del suelo resulta en efectos letales para la estructura del suelo, mientras tiene efectos positivos sobre la misma, cuando afecta a los iones hierro y manganeso, precipitándolos como óxidos.

d. **La Reducción** de los óxidos de hierro y manganeso da al traste con su acción cementante, y por ende con su papel positivo en la estabilidad estructural, al incrementar la movilidad de tales iones.

e. **La lixiviación** eventual de materiales cementantes como la cal ($CaCo_3$) y el yeso ($CaSO_4$) resulta en efectos negativos sobre la estabilidad estructural. Se hace énfasis acerca de la eventualidad de estos procesos de lavado, en atención a la considerable insolubilidad de los dos materiales referidos. Sin embargo, el proceso puede revestir alguna importancia en las temporadas húmedas.

f. **El calor** tiene efecto deletéreo sobre la estabilidad estructural, en razón a ser un factor de degradación del humus, responsable central de la misma. De ahí que desde 2005 se haya introducido la expresión “Erosión Solar” en el argot de la degradación de terrenos, en atención al efecto negativo de la radiación UV sobre las sustancias húmicas, presentándose como medida preventiva del daño, el manejo de coberturas naturales y la rotación de cultivos.

g. **La presión, el cultivo, el tráfico y el pisoteo,** como generadores de sellos, costras y compactación del suelo constituyen un factor de degradación estructural, al cual quizás no se le ha dado la atención debida y que hoy tal vez por ello reviste la mayor importancia entre los factores negativos en el desarrollo de la empresa agrícola.

h. **Lluvia y erosión**. El sello y el encostramiento generado por el impacto de la gota de lluvia, la abrasión por el escurrimiento y la presión del viento se presentan como factores de degradación estructural ubicados en la sutil frontera entre lo natural y lo antrópico, haciéndose por tal razón merecedores de un estricto monitoreo y demandantes de un manejo óptimo de las coberturas vivas e inertes.

13.3. EFECTOS DE LA TEXTURA SOBRE LA ESTRUCTURA DEL SUELO.

Si bien todos los suelos, independientemente de su clase textural, alcanzan bajo condiciones apropiadas un cierto grado de agregación, cubriendo un rango extremadamente amplio de grados de estabilidad, el grado logrado en cada caso particular dependerá de los siguientes factores:

- % Relativo de cada fracción granulométrica
- Tipo de arcilla
- M.O%

La explicación a lo anterior estriba en los siguientes hechos:

1. Mientras se desciende en el diámetro específico de los granos que componen al suelo, se avanza desde las formas polihédricas, con desarrollo dimensional en las tres direcciones cartesianas y contornos angulosos hasta formas aplanadas y hojosas, con predominio de las dos dimensiones horizontales, en tanto se incrementa la superficie específica de tales materiales. En consecuencia, también se aumenta la probabilidad de acercamiento entre partículas para formar los "Domains" precursores de estructura.

   En consecuencia, la estabilidad estructural exhibirá relación directa con la presencia porcentual de granos finos en el suelo en cuestión.

2. Como ya se ha señalado anteriormente, la estabilidad estructural guardará relación inversa con la expandibilidad del complejo arcilloso de cada suelo.

3. Reafirmando la aseveración ya planteada muchas veces en este capítulo, la estabilidad estructural del suelo guarda relación directa con el tenor húmico del mismo y relación inversa con el grado de labilidad de las sustancias húmicas presentes en el medio edáfico.

13.4. EL PERFIL ESTRUCTURAL DEL SUELO.

Como es de esperarse el peso de cada horizonte afectará el desarrollo estructural de los demás horizontes que le subyacen. Igualmente, las raíces de las plantas que medran en la superficie tendrán acciones diferenciales de presión y de aportes húmicos a través de la profundidad del perfil. De forma similar, a lo largo de la evolución del suelo, las translocaciones y transformaciones que se desarrollan imprimirán condiciones diferenciales a través de la profundidad del suelo. Finalmente, la textura de los centímetros más superficiales del perfil podrá imprimir una tendencia a la formación de sellos y/o costras, o en determinados casos, de capas adensadas, o en presencia de unas condiciones climáticas de alta concentración de lluvias en determinados períodos y de arcillosidad significativa en el perfil, en suelos evolucionados, la generación de cutanes, los cuales según la naturaleza de la arcilla dominante podrán revestir la forma de ferranes, argilanes o ferriargilanes.

La anterior discusión permite visionar la amplia variedad de tipos, clases y grados estructurales que pueden encontrarse en recorridos relativamente cortos de la superficie terrestre. Por tanto, la manifestación de la estructura, en términos de condiciones para el desarrollo de la vida en el suelo, será ampliamente variable a través de la superficie y a lo largo de la profundidad del perfil.

Los hechos inmediatamente anteriores, conducen a enfocar la discusión en los términos ya conocidos horizonte y perfil de suelos. Así entonces cada horizonte presenta unas condiciones de estructuración edáfica tales que orientan su desempeño hacia una funcionalidad determinada.

Con base en lo anterior resulta pertinente establecer el siguiente paralelo. Así como en las Ciencias Administrativas, las esferas de actuación de cada sección de un organigrama resumen su **horizonte** de acción, la sumatoria de horizontes del organigrama constituye el **Perfil** de la Empresa**,** al igual que el conjunto de horizontes de un suelo constituye el perfil de este, y en última instancia determina su capacidad de uso. Cabe ahora preguntar: ¿Cómo se manifiesta el tipo, clase y grado estructural? O lo que es lo mismo, ¿Cuáles son los fenómenos de la Estructuración del Suelo?

13.5. LOS FENÓMENOS DE LA ESTRUCTURACIÓN DEL SUELO.

Ante los ojos del observador el tipo, la clase y el grado de la estructura edáfica se manifiestan a través de los cuatro siguientes fenómenos:

1. **La Porosidad (w)**. Dentro de los agregados y entre los agregados se generan espacios vacíos, cuyo diámetro y geometría guardan relación directa con la medida y forma de los granos los primeros; y de los agregados, los últimos.

   Ésta es la propiedad más dinámica y aparente, morfológica y funcionalmente de la estructura y del suelo, el cual, como ya se ha establecido, es definido como el cuerpo poroso que capta, almacena y cede humedad y a través del cual trascienden gases de la más diversa naturaleza. Gracias a la porosidad el suelo es un medio elástico física y funcionalmente, y de ésta última condición depende en gran parte su resiliencia.

2. **La Agregación**. Pero de nada sirve tener en un suelo agregados de tal o cual forma y dimensión sí ellos no son lo suficientemente resistentes ante los factores, fuerzas y procesos que apuntan a su destrucción, y que ya se han discutido anteriormente. En este orden de ideas, la mayoría de los trabajos coinciden en establecer que la máxima estabilidad de los agregados se registra cuando ellos exhiben diámetros comprendidos entre 0.5 y 2.0 mm. Cabe anotar también que no es para nada despreciable la acción de los cementantes que eventualmente pueden coadyuvar en el proceso de agregación, lo mismo que el tipo de arcilla dominante en el complejo arcilloso, y en tal sentido se establece que la estabilidad de la agregación se ciñe al siguiente orden de dominancia de tipos de materiales arcillosos:

Óxidos de Fe y Mn > Canditas > Micas Hidratadas > Smectitas

3. **La Permeabilidad**. Constituye la manifestación dinámica de la porosidad y hace referencia a la capacidad que tiene el medio poroso suelo para permitir el flujo de cualquier fluido a través de sí. Como parámetros estimativos de esta propiedad se tienen: La permeabilidad (k, (L/T^2)); la Conductividad Hidráulica (K, (L/T)); la Velocidad de Infiltración (V.I., (L/T)); la Velocidad de Difusión de Oxígeno (VDO, (ųgrO_2/cm^2/seg) y la Velocidad de Percolación (V.P, (L/T)).

   La permeabilidad no es una función simple de la porosidad (w) e involucra parámetros y condiciones referentes al medio poroso como son: la tortuosidad, la anisotropía, la elasticidad y la expandibilidad del mismo; y relacionadas con el fluido como la temperatura, la densidad, la viscosidad y la concentración de solutos en el mismo.

4. **La Cohesividad**. Hace relación al conjunto de fuerzas que mantiene unidas las partículas del suelo bajo condiciones de humedad cero o muy cercanas a tal nivel; por tanto, está directamente relacionada con el porcentaje correspondiente a la presencia de arcillas en el medio y con el tipo y correspondiente densidad de carga de dichos materiales. No obstante, es necesario llamar en éste punto la atención sobre la influencia que ejercen sobre el fenómeno en referencia, el tipo y densidad de raíces que ocupan el suelo, no solo por la acción desecante de las mismas, sino también por su efecto aglutinante sobre la masa de suelo.

13.6. EL SUELO COMO MEDIO POROSO.

La condición de porosidad del suelo, habilita al medio edáfico como receptor – redistribuidor – almacenador y surtidor de fluidos; al mismo tiempo, tales espacios vacíos se constituyen en el escenario para el desenvolvimiento de las reacciones de solubilización de nutrimentos, el crecimiento y desarrollo raíces y de los organismos que crecen en él. Figura 123.

Sin embargo, como se aprecia en la Tabla 9, cada poro, de acuerdo con su diámetro, presentará un comportamiento hidrodinámico diferente y consecuentemente su funcionalidad hidroedáfica y biótica serán distintas. Llama la atención en la Tabla 2

El aparentemente reducido espacio de variación de los diámetros porales, desde 0.00003 mm. = 0.03 ųm. (Superficie Higroscópica) hasta 1.0 mm = 1000 ųm (Macroporo), lo cual determinará su correspondiente valor de entrada de aire (VEA^{29}, bars), desde 100

bars = 10^4 Kpa en la más reducida superficie higroscópica hasta 0.003 bars = 0.3 Kpa en el macroporo de 1.0 mm de diámetro.

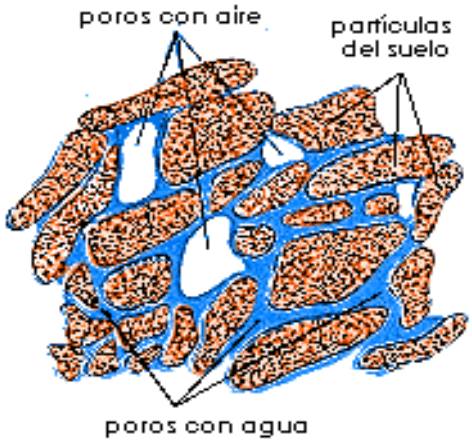


Figura 123. El espacio poroso del suelo, en atención a su alta complejidad, cumple múltiples funciones. Fuente: Internet.

Llama la atención en la Tabla 2, ver como la porosidad de drenaje rápido (Ø = 0.3 – 1.0 mm) evacua el exceso de agua, en los primeros momentos después de lograr el suelo su nivel de saturación, con VEA extremadamente bajos, (VEA = 0.003 - 0.01 bars = 0.3 – 1.0 Kpa), aún inferiores a la capacidad de campo (T= 0.3 bars = 30 Kpa), lo cual permite afirmar que aquellos poros que se colman de últimos son los primeros en evacuarse. Al otro extremo del fenómeno de retención de humedad por el suelo, la afirmación que también es correcta tendrá la forma de: Los poros que son los últimos en drenarse son aquellos que se llenaron en los momentos iniciales del proceso de humectación.

a. ***La macroporosidad*** del suelo (Ø > 0.06 mm. = 60 µm.) (VEA < 0.05 bars = 5 Kpa) estará conformada por el conjunto de poros grandes correspondientes a la suma de la porosidad de drenaje rápido, ya discutida, en unión de la porosidad de aireación (Ø = 0.06 mm. – 0.3 mm.) y (VEA = 0.05 bars – 0.01 bars) y tiene por función física propiciar la infiltración del agua al suelo y el intercambio de gases entre la atmósfera externa y la edáfica interna. Los macroporos son visibles al ojo desnudo en su mayoría, son garantía de drenaje y tienen máxima presencia en los suelos de apreciación textural gruesa, en tanto que, en los finos, su ocurrencia es poco significativa. Dentro de esta porosidad se

---

29.VEA: Valor de la succión matricial de la humedad del suelo (τ_m). (bars, Kpa, pF) que se registra en el instante en el cual el poro de un determinado diámetro (mm., µm.) comienza a perder la humedad (Θ) que lo colmaba hasta ese instante, esto es, el momento en el cual comienza a entrar aire al poro.

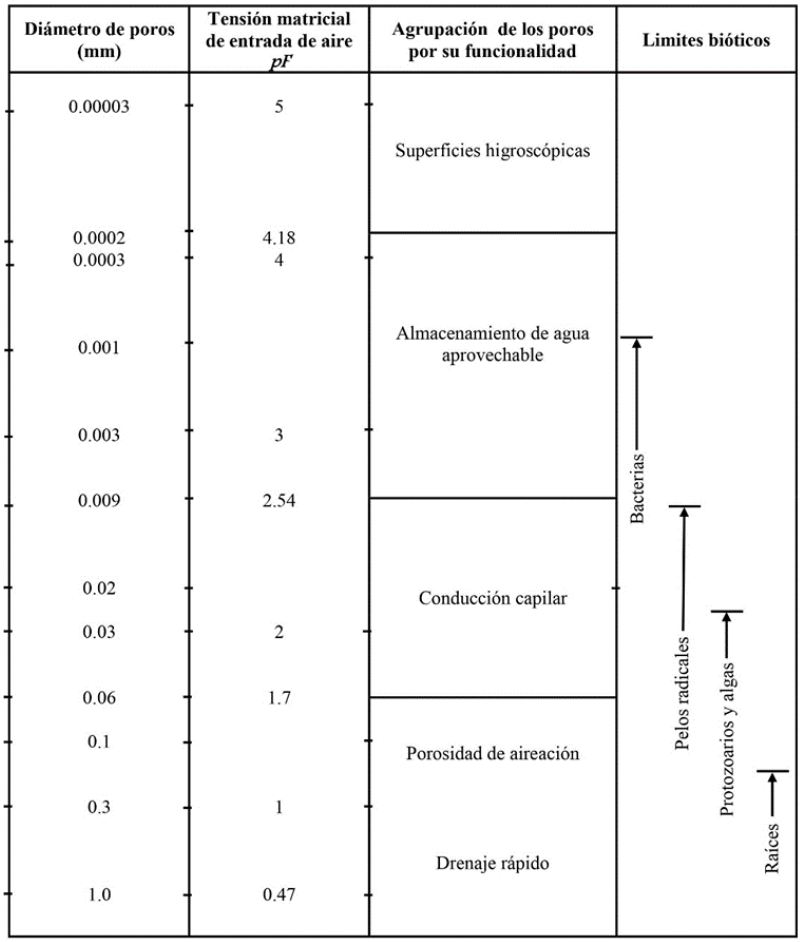
desarrollan las raicillas vegetales (Ø > 0.1 mm. = 100 ųm.), lo mismo que algunos protozoarios y algas con diámetro superior a: (0.06 mm. = 60 ųm.), límite inferior de esta familia de espacios porales.

b. ***La mesoporosidad***, conformada por espacios vacíos de diámetro intermedio (Ø = 0.009 mm. - 0.06 mm. = 9 ųm. - 60 ųm.) no son visibles al ojo desnudo y tienen la funcionalidad, dado su diámetro capilar, el permitir que se desarrolle a través de ellos el flujo de Poiseuille, de redistribución capilar de humedad en la masa del suelo, el cual en términos prácticos culmina en las vecindades del nivel de succión (T= 0.3 bars = 30 Kpa), conocida en el argot propio de ésta rama científica como la capacidad de campo (cc); precisamente a ese nivel de succión o nivel de VEA, el máximo diámetro de los espacios porosos satisfechos con agua es de (Ø = 0.009 mm. = 9 ųm.), los poros con diámetro ligeramente inferior a dicho límite, y por ende con VEA levemente superior no presentarán movimiento aparente de la humedad a través de ellos. Las formas de vida con diámetro relativamente apreciable que medran en el ámbito de esta familia poral serán los vellos radicales, las algas y los protozoos más finos.

c. ***La microporosidad****,* conformada por espacios vacíos con diámetros (Ø = 0.0002 mm. - 0.009 mm. = 0.2 ųm. - 9 ųm.) y (VEA = 0.3 bars – 15 bars) no son visibles al ojo desnudo y debido a su diámetro reducido y VEA relativamente alto, el flujo capilar es muy lento y por ende progresivamente inapreciable en el rango de diámetros (Ø = 0.003 mm. - 0.009 mm. = 3 ųm. - 9 ųm.) y VEA (0.3 bars – 1.0 bars). En el nivel de (T= 1.0 bars = 100 Kpa), en atención a que el esfuerzo tensil del agua es de 1.0 bars, se pierde la continuidad de las películas de agua que eventualmente circulan a través de este rango de diámetros (Ø = 0.003 mm. - 0.009 mm. = 3 ųm. - 9 ųm.) en obediencia a gradientes capilares demandantes de humedecimiento. Finalmente, en el rango de diámetros (Ø = 0.0002 mm. - 0.003 mm. = 0.2 ųm. - 3 ųm.) y (VEA = 1.0 bars – 15 bars) la velocidad de los ajustes capilares de potencial hídrico se hace cada vez más lentos, en atención a la discontinuidad de las masas acuosas en movimiento. En consecuencia, esta familia poral tiene por función la retención de la humedad aprovechable del suelo, retenida por la matriz del mismo, en el rango de succiones (T= 0.3 – 15 bars.) o de contenidos hídricos (Θ = cc – PMP), de lo anterior proviene la predilección que los productores agrícolas del caribe colombiano profesan por las “tierras veraneras o de barro”, esto es, suelos de apreciación textural fina, y por ende, con predominio del tipo de porosidad que se discute.

d. ***Las superficies higroscópicas****.* Cuando se analizan espacios vacíos con diámetro (Ø < 0.0002 mm. = 0.2 ųm.) y correspondientemente (VEA > 15 bars = 1500 Kpa) resulta apenas admisible que los flujos de ajuste capilar se harán prácticamente imperceptibles en forma progresiva a medida que avanza el proceso de secamiento, no obstante,

Tabla 9. Agrupación por tamaño y funcionalidad de los poros del suelo, fuente: Kohnke, H, 1975..



cuando el “flujo” se estudia en poros con (Ø < 0.00019 mm. = 0.19 ųm.) y correspondientemente (VEA = 31 bars = 3100 Kpa) el flujo dejará de ser líquido para pasar a fase gaseosa, en el cual el agua se mueve molécula a molécula en fase de vapor, debido a que se ha superado el coeficiente higroscópico (CH) del suelo, el cual se registra en las vecindades a la succión (T= 31 bars = 3100 Kpa). Las características del flujo que ocurre a través de dichas superficies higroscópicas (Sh), llegan a hacer su ocurrencia, de suma importancia en los suelos de zonas áridas y semiáridas.

13.6.1. Características de un Sistema Poroso.

Un sistema poroso clásico se caracteriza por presentar los siguientes atributos:

1. Presencia de poros de diferente tamaño.
2. Elasticidad.
3. Compresibilidad

4. Conductividad.
5. Estabilidad
6. Capacidad de retención de humedad.
7. Difusividad.
8. Continuidad
9. Capacidad de deformación.

13.6.2. El Sistema Poroso del Suelo.

No obstante, el sistema poroso del suelo presenta una serie de particularidades como:

1. No son tubos simples y presentan una variedad de ramificaciones con diámetros variables.

2. Son irregulares en su diámetro y en su orientación.

3. No son rígidos, dada la heterogeneidad de los materiales que los constituyen y la distribución azarosa de esos materiales.

4. Dimensión variable en el tiempo y el espacio.

13.6.3. Características deseables en el Sistema poroso edáfico.

La distribución ideal de las diferentes familias porales en un suelo promedio puede plantearse bajo la forma:

a. macroporos:…… 12 a 15 %
b. mesoporos:…… 25 a 30 %
c. microporos:…… 12 a 15 %
d. superficies higroscópicas:…… (1 a 2 %)[30]

Adicionalmente, dicho sistema poroso edáfico ideal debe presentar atributos de:

1. Estabilidad.

2. Continuidad.

---

30. Porcentaje discutible, ya que depende mucho de las condiciones de humedad ambiental del entorno circundante al suelo que se estudie. (*N de los As*)

3. Baja Tortuosidad.

13.7. ESTIMACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO.

Una estimación certera de la Estructura Edáfica debe abocarse idealmente al análisis detallado de los cuatro fenómenos a través de los cuales se manifiesta el arreglo espacial de los granos del suelo. Sin embargo, solo el **método de campo** engloba el estudio de los cuatro fenómenos, aunque desafortunadamente, de forma cualitativa. Por su parte, los **métodos de laboratorio**, si bien arrojan resultados cuantitativos, parcializan el estudio en un solo fenómeno a la vez, como se verá a continuación.

13.7.1. Técnica de la Membrana y Olla de Richards.

Método orientado al estudio del fenómeno de porosidad, se fundamenta en el "barrido" de la humedad contenida en muestras de suelo inicialmente saturadas, y que se logra mediante la aplicación de la presión que se genera desde un compresor diseñado para este fin. Figura 124 (a) y que es modulada mediante un "Tablero de Distribución múltiple". Figura 124 (b) en el cual, mediante un par de manómetros y sus correspondientes válvulas de paso se regula el paso de aire a presión hacia la membrana, receptáculo más delgado, ubicado en el extremo izquierdo de la Figura 124 (b), con capacidad de soporte de presiones máximas de 100 bars. Y simultáneamente, hacia la olla, receptáculo más profundo, ubicado en el extremo derecho de la Figura 124 (b), con capacidad de soporte de presiones máximas de 4 bars.

El método funciona con base al principio del VEA, ya señalado, según el cual, cada diámetro poral (mm. ųm.) se corresponde con un determinado valor de presión (bars.,Kpa.) el cual, cuando se registra inicia y mantiene el proceso de evacuación del agua que saturaba el poro que exhibe el diámetro previamente determinado, por tanto, la técnica diseñada por Richards, Richards, 1954, permite conocer el volumen (cc) de cada grupo de poros por diámetro, presente en la muestra en estudio.

(a) (b)

Figura 124. Membrana y Olla de Richards. Foto: I. D. Bustamante Barrera, 2012.

13.7.2. Técnica de Yoder.

Método orientado al estudio del fenómeno de agregación. También conocida como el Método de Tiulin modificado por Yoder. Aunque en Colombia, y específicamente en el Caribe colombiano, el método más empleado es la modificación que propuso González al método de Yoder, Motta et al, 1990, y que fundamentalmente se aboca a la reducción de tiempo y peso de la muestra analizada. Se fundamenta en el hecho de someter a dos muestras del mismo suelo, A, sin sometimiento, y B, sometida a pretratamiento con dispersante + agitación mecánica, Figura 125 (a), por espacio de treinta minutos a la acción del impacto vertical, descendente y ascendente de la masa de agua contenida en sendos tanques de depósito, en los cuales habrán de sumergirse y emerger seguidamente cien (100) veces los dos trenes de cuatro tamices de diámetro externo de dos pulgadas. Figura125 (b) y con abertura de orificio de criba, en orden de colocación ascendente de (Ø= 0.25”, 0.5”, 1.0” y 2.0”).

Al término del ensayo se cuantifica el peso seco a la estufa (105ºC – 110ºC, 24 hrs.) de las cinco submuestras correspondientes a cada uno de los dos trenes y que se detallan así:

1. Retenida en el Tamiz de Ø= 2,0”
2. Retenida en el Tamiz de Ø= 1.0”
3. Retenida en el Tamiz de Ø= 0.5”
4. Retenida en el Tamiz de Ø= 0.25”
5. Depositada en el fondo del tanque de almacenamiento de agua

(a) (b)

Figura 125 (a) Agitador mecánico. (b) Dispositivo de Yoder, modificado por González. Foto: I. D. Bustamante Barrera, 2012.

Mediante una serie de cálculos orientados a valorar la masa de los verdaderos agregados, esto es, disminuidos en la masa correspondiente a los simples granos, obtenidos gracias a la dispersión aplicada a la submuestra B, se arriba finalmente a la obtención de los dos parámetros:

a. Diámetro Ponderado Medio, (DPM) (mm), el cual pretende señalar el diámetro (Ø,mm) de los agregados estables al agua que más abundan en la muestra en estudio.

b. Diámetro Geométrico Medio (DGM), entidad adimensional proveniente de un cálculo estocástico que combina el diámetro de los agregados estables al agua que más abundan en la muestra y un “factor de forma” de los mismos, el cual determina la probabilidad que tiene cada agregado, según su configuración, de atravesar las cribas de cada uno de los cuatro tamices involucrados en la prueba.

Los escalafonamientos de los valores de los dos parámetros, (DPM) (mm) y (DGM), como calificativos de la estabilidad de los agregados de un suelo se presentan respectivamente en las Tablas 10 y 11.

13.7.3. Técnica de Henin.

Método orientado al estudio del fenómeno de agregación. Ampliamente descrito en el texto “El perfil cultural, el estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas” publicado por Hennin, Grass, y Monnier, en 1.972, y detallado instrumentalmente en

Tabla 10: ESCALAFONAMIENTO PARA EL VALOR DE “DPM (mm)” DE YODER, Fuente: Malagón y Montenegro,1990.

VALORES (mm)	INTERPRETACIÓN
< 0.50	**Inestable**
0.5 – 1.5	**Ligeramente Estable**
1.5 – 3.0	**Moderadamente Estable**
3.0 – 5.0	**Estable**
> 5.0	**Muy Estable**

Motta et al, 1990, éste método apunta a lograr la dispersión de los agregados, agitándolos con diferentes agentes como alcohol, agua y benceno, lo cual la hace una técnica bastante apropiada para calificar la estabilidad estructural de suelos de ladera, sometidos a la agresiva acción de procesos erosivos. En tanto que la técnica de Yoder se reserva para el estudio de la estabilidad estructural de suelos sometidos a labranza y pisoteo, bajo condiciones topográficas menos extremas.

Tabla 11. ESCALAFONAMIENTO PARA EL VALOR DE “DGM” O ÍNDICE “Y” DE YODER. , Fuente: I.D. Bustamante B.1997.

VALORES	INTERPRETACIÓN
< 0.00	Extremadamente Inestable
0.00 – 0.20	Muy Inestable
0.20 – 0.40	Inestable
0.40 – 0.60	Estabilidad Media
0.60 – 0.80	Estable
0.80 – 1.00	Muy Estable
> 1.00	Extremadamente Estable

13.7.4. Técnica de estimación de la Velocidad de Infiltración (VI) del suelo.

Método orientado al estudio del fenómeno de permeabilidad. Conocida ampliamente como la Técnica del Doble Cilindro de Lewis, es descrita con detalle por Richards, 1954 y más recientemente por Pizarro, 1978, lo mismo que en Motta et al, 1990, consiste básicamente en someter el suelo a una tirante hidráulica variable mantenida desde un cilindro interno, y direccionada verticalmente desde un cilindro externo, el cual determina las condiciones de frontera del ensayo. En los primeros instantes del ensayo se estima la sortividad (s) del suelo (Velocidad de Infiltración inicial, bajo condiciones de alto gradiente en el frente de humedecimiento); y, una vez logradas las condiciones cercanas al equilibrio, esto es, proximidad a la saturación en el frente de humedecimiento, es posible estimar la Velocidad de Infiltración básica (VIb), definida como la máxima VI que es capaz de exhibir el suelo, bajo condiciones de gradiente hidráulico cercano a la nulidad, fundamental en la selección de emisores en el diseño de sistemas de riego presurizados. Figura 126.

13.7.5. Técnica de estimación de la Conductividad Hidráulica (K) del suelo.

Método orientado al estudio del fenómeno de permeabilidad. Conocida ampliamente como la Técnica del Pozo Barrenado, en sus dos modalidades de Pozo Directo o de Hooghoudt, y de Pozo Invertido o de Porchet y descrita en detalle por Richards, 1954; Pizarro, 1978 e Motta et al, 1990, consiste básicamente en el monitoreo de la velocidad de ascenso, del espejo de agua en un pozo previamente barrenado con sección cilíndríca (Ø =4”), bien hasta interesar los primeros 10 a 20 centímetros de las aguas freáticas, que una vez achicados, tienden a restablecer el nivel original, Porchet; o bien el descenso del espejo de agua de una cantidad determinada que ha sido vertida dentro de un pozo inicialmente libre de agua freática, Hooghoudt. Figura 127.

Figura 126. Prueba de Velocidad de Infiltración. Foto: M. Gamero C. 2016

Figura 127. Prueba de conductividad hidráulica (Hooghoudt.) en un Typic Tropaquept isohipertérmico vermiculítico, ubicado en el Campus Central de la Universidad de Córdoba. Foto: L.A. Alemán R. 2015.

13.7.6. Técnica de estimación de la Permeabilidad (k, L^2, Darcy) del suelo.

Método descrito por Richards, 1954 y por Taylor y Aschroft, 1.972 enfocado a medir la velocidad con la cual discurre el agua en una columna de suelo no disturbado, Figura 128 y sometido a la acción de una carga constante de agua. Figura 129.

13.7.7. Técnica de estimación de la Resistencia Mecánica del suelo a la Penetración, RMP (Kr/cm^2, Kpa). (Penetrometría).

Método orientado al estudio del fenómeno de Cohesividad. Descrito por Taylor y Aschroft, 1.972, y Motta et al, 1990. Se fundamenta en la aplicación de una fuerza vertical sobre el suelo, Figura 130, a través del área superficial de un dispositivo de penetración, generalmente un cono, Figura 131 (a) evaluada mediante la magnitud de la presión (F/A) de reacción mecánica obtenida y que es registrada bien, en un manómetro tradicional, Figura 131 (b) o de un dispositivo electrónico. Figura 131 (c), conectable a un computador personal, con fines de establecer records temporales y espaciales de la RMP (Kr/cm^2, Kpa) ^{del} suelo.

(a) **(b)**

Figura 128. (a) Colecta de muestra no disturbada de suelo. (b) Núcleo de suelo a punto de ser extraído con gato hidráulico para ser llevado al permeámetro.
Foto: J.H. Rivera P., 2002.

Figura 129. Permeámetro de carga constante en operación. Foto: J.H. Rivera P., 2002.

Figura 130. Operación del penetrómetro. Foto: Internet

(a) **(b)** **(c)**

Figura 131. (a) Conos de penetración. (b) Penetrómetro de manómetro. (c) Penetrómetro Digital (Penetrolog) Foto: Internet

13.7.8. Técnica de microscopía electrónica.

Método orientado al estudio del fenómeno de agregación y que, de alguna manera arroja luces sobre la génesis de la estructura, permite mediante la microscopía electrónica, mediante el uso de una amplia variedad de técnicas de tinción. Figura 132.

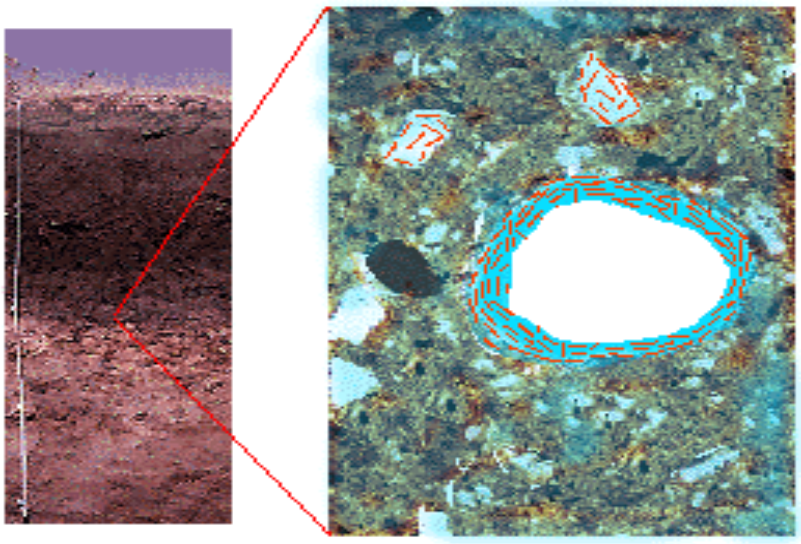


Figura 132. Visión en microscopía electrónica de barrido de un cután.
Fuente: http://edafologia.ugr.es/iluv/formac.htm.

13.8. MANEJO DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO.

Si bien la textura constituye el atributo edáfico que marca de manera indeleble el destino de utilización de un suelo, la estructura es la modulación de la primera, y como tal, presenta una amplia gama de variaciones, con lo cual da paso a la generación de una serie de técnicas de manejo, las cuales coinciden en apuntar a los siguientes objetivos.

13.8.1. Objetivos del Manejo de la Estructura del Suelo.

Las diferentes técnicas de manejo de la estructura edáfica coinciden en presentar los siguientes enfoques:

1. Profundizar el perfil del suelo.
2. Controlar la erosión del suelo.
3. Regular sistemas tan dinámicos como:
    a. Régimen Hídrico.
    b. Régimen de aireación.
    c. Régimen Térmico.
    d. Factores de Consistencia del suelo.

Los anteriores enfoques u objetivos toman forma tangible bajo algunas de las técnicas de manejo que se detallan a continuación.

13.8.2. Técnicas de Manejo de la Estructura del Suelo.

Presentan una variedad de orientaciones, pero bien pueden agruparse de la siguiente forma:

1. Técnicas de Labranza.
2. Sistemas de Riego y Drenaje
3. Técnicas de manejo de la materia orgánica del suelo (MOS)
4. Prácticas específicas de la Conservación de Suelos y Aguas.

Las anteriores técnicas se combinan, dentro de una serie de estrategias, entre las cuales se entresacan algunas que se exponen a renglón seguido.

13.8.3. Estrategias de Manejo de la Estructura del Suelo.

De acuerdo con las condiciones circundantes a cada situación, las diferentes técnicas de manejo se combinan para generar algunas estrategias como las que se señalan a continuación:

1. Manejo de la estructura de suelos arenosos mediante planes de aplicación de enmiendas orgánicas, las cuales, en el caso de suelos medios se combinan con prácticas de labranza anti-sello y/o anti-costra, y en el caso de suelos finos se complementan con técnicas de labranza de descompactación y manejo de coberturas vivas e inertes.

2. Ampliación progresiva de los períodos con cubierta de pastos, promotores de estructuración a través del entramado que proporcionan sus raíces, dentro de los planes de rotación, con lo cual a su vez se reducirán los pases de maquinaria e implementos de preparación de terrenos, sobre el campo.

3. Programación y Manejo de los diferentes implementos de labranza de acuerdo con su correspondiente ROL (Rango Óptimo de Labranza) de acuerdo con el comportamiento del régimen hídrico de cada suelo.

4. Implementación de prácticas de incorporación de residuos de cosecha con el fin de aumentar la eficiencia de las técnicas de descompactación con maquinaria agrícola.
5. Uso de cultivos de cobertura que luego se incorporan, no tanto como abono verde, sino como estrategia contra el adensamiento de suelos.

13.9. RELACIONES MASA: VOLUMEN EN EL SUELO.

Siendo la estructura el arreglo espacial de los granos del suelo, principales componentes de la masa de un suelo, las relaciones masa : volumen se constituyen como un estimador cuantitativo de primera mano del estado de agregación de un suelo. Veamos:

Según el diagrama de la Figura 133, se tendrá:

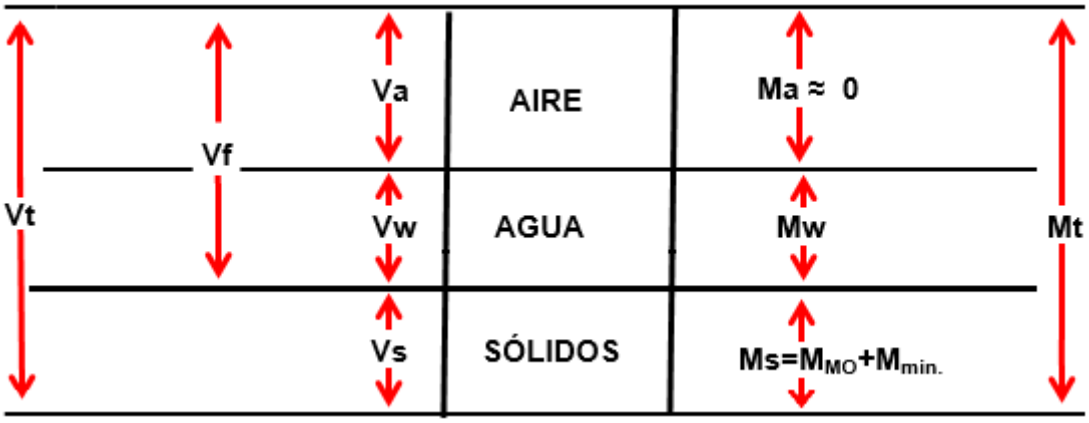


Figura 133. Relaciones Masa: Volumen en un Suelo.
Fuente: Malagón y Montenegro, 1990.

$$Ms = M_{M.O.} + M_{minerales.} \qquad (1)$$

$$Mt = Ms + Mw + Ma \approx Ms + Mw \qquad (2)$$

y

$$Vt = Vs + Vw + Va = Vs + Vf \qquad (3)$$

Dónde**:** Vf = Vw + Va

Por lo que se puede establecer que:

Densidad real (**ρ_s**) está dada por:

$$\rho_s = Ms/\ Vs \quad (g/cm^3) \qquad (4)$$

13.9.1. La Densidad Real o Densidad de Partículas (ρ_s (g/cm^3)).

Estima la relación existente entre la masa de partículas sólidas y su volumen, esto es, expresa el cociente entre la masa total (M_s) de las partículas sólidas respecto al Volumen total de dichos sólidos del suelo (Vs), *excluyendo* el volumen ocupado por los poros ocurrentes entre las partículas y entre los agregados.

13.9.2. Peso Específico del Suelo.

De otro lado se tiene el Peso Específico del Suelo, el cual se define como la relación entre la Densidad Real (ρ_s) o de partículas y la densidad del agua (ρ_{agua}), por lo que exhibe igual valor absoluto a la Densidad Real (ρ_s) pero, como entidad adimensional.

Generalmente, en atención a las densidades parciales de los componentes comunes en un suelo, la Densidad Real (ρ_s) o de partículas exhibe regularmente un valor que oscila entre 2.65 gr/cc. y 2.75 gr/cc. No obstante, cuando en el suelo se da la predominancia de minerales pesados, como pueden ser algunos que impliquen el hierro, como se da en suelos derivados de peridotitas, basaltos y/o gabros, la Densidad Real (ρ_s) puede llegar a niveles hasta de 2.9 gr/cc. En tanto que, cuando en el suelo se da una ocurrencia significativa de materiales orgánicos, la Densidad Real (ρ_s) puede reducir su valor hasta las vecindades de 2.0 gr/cc.

13.9.3. Densidad aparente en seco (ρ_b, (g/cm^3)).

También denominada densidad bulk, estima la relación existente entre la masa de los sólidos del suelo, (Ms) independientemente de la humedad que pueda ocurrir en él, y el volumen total, (Vt) aparente o bulk del suelo, así:

$$\rho_b = Ms / Vt = Ms / (Vs + Vw + Va) = Ms / (Vs + Vf) \quad (3), (5)$$

13.9.4. Densidad aparente total o en húmedo (ρ_t , (g/cm^3)).

Es la relación existente entre la masa total del suelo, según (2), y el volumen total del mismo, según la expresión (3), y toma la forma de:

$$\rho_t = Mt/Vt \quad (6), \text{ y}$$

$$\rho_t = (Ms + Mw) / (Vs + Vw + Va) \quad (2,3), (7)$$

13.10. COMPARACIÓN DENSIDAD APARENTE (Dap) .vs. DENSIDAD REAL DEL SUELO (DR).

Sí se tiene un cubo unitario, (cubo de lado (l = 1 cm) y por ende, volumen (V=1cc)) y masa (m=1.33 gr.), la Densidad aparente de esa porción de suelo será (Dap= 1.33/1.0 = 1.33 gr/cc = 1.33 T/m^3). Por otro lado, sí se comprime ese volumen de suelo, con el fin de eliminar[31] sus espacios vacíos, logrando que la misma masa (m=1.33 gr.), llegue a

ocupar un volumen comprimido (V=0.5cc), entonces la Densidad Real (DR= 1.33/0.5 = 2.66 gr/cc = 2.66 T/m^3).

Como se puede apreciar a partir de la discusión anterior, la Densidad Real es, teóricamente, el valor límite superior de la Densidad Aparente, al cual se llega mediante la compresión **"total"** de una porción de suelo, lo cual no es cierto en la realidad práctica, debido a que el suelo es por definición incompresible total, esto es, nunca permite la reducción a cero de sus espacios vacíos. Por tanto, valores bajos de Dap implican suelos porosos, bien aireados y con buen drenaje interno, por el contrario, Si los valores son altos, el suelo es compacto, poco poroso, con poca porosidad en su masa, la infiltración del agua en el mismo es lenta, por lo que proporcionalmente produce un volumen significativo de escurrimientos. Sin embargo, los valores altos de Dap, no necesariamente de- ben constituir un signo de alarma en el manejo de los suelos, ya que la mineralogía y la condición mecánica de los mismos también influyen en su valor, como se presenta en la Tabla 12.

Como ha quedado establecido, la Dap (gr/cc, T/m^3) es función del porciento de poros totales en el suelo, la textura del suelo, Tabla 12, el porcentaje de M.O en el suelo, la profundidad del punto bajo estudio en el perfil, la compacidad o R.M.P (Kgr/cm^2) y el tiempo de uso bajo cultivo o pastoreo.

13.11. UTILIDADES DEL CONOCIMIENTO DE Dap (gr/cc, T/m^3).

La entidad densidad aparente, o "bulk" toma parte en una amplia diversidad de expresiones matemáticas de trascendental importancia en el manejo de suelos, por ejemplo:

13.11.1. Cálculo de la humedad volumétrica (θv %,cc/cc.100) *a partir de la humedad gravimétrica (θg %,gr/gr.100).*

En atención a que se tiene establecido, como resultante de la aplicación del método gravimétrico para la estimación de la humedad del suelo, que:

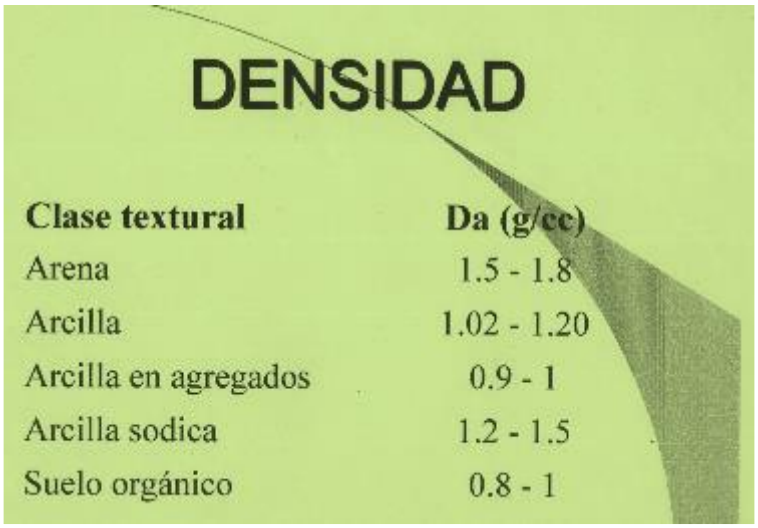
$$\theta g\ (\%) = (Mw/Ms).100 \qquad (8)$$

Y teniendo en cuenta que:

$$\theta v\ (\%) = (Vw/Vs).100 = (Vw/Vt).100 \qquad (9)$$

31. Cabe aclarar que la eliminación (Reducción a cero) del espacio vacío de un suelo constituye un imposible físico, dada la condición de material incompresible de los granos que conforman el medio edáfico. (N de los As)

Tabla 12: VALORES DE LA DENSIDAD APARENTE (Dap, gr/cc, T/m^3), SEGÚN MINERALOGÍA Y CONDICIÓN MECÁNICA Y FISICO-QUÍMICA. Fuente: I.D. Bustamante B, 1.997.



DENSIDAD

Clase textural	Da (g/cc)
Arena	1.5 - 1.8
Arcilla	1.02 - 1.20
Arcilla en agregados	0.9 - 1
Arcilla sodica	1.2 - 1.5
Suelo orgánico	0.8 - 1

humedad del suelo, que:

$$\theta g\ (\%) = (Mw/Ms).100 \qquad (8)$$

Y teniendo en cuenta que:

$$\theta v\ (\%) = (Vw/Vs).100 = (Vw/Vt).100 \qquad (9)$$

Será factible calcular θv (%) a partir de θg (%), mediante la siguiente expresión:

$$\theta v\ (\%) = (Vw/Vt) = (\theta g)(\%)\ (\rho_b) \qquad (10)$$

Demostración:

$$\theta v = (Vw/Vt) = (\theta g)\ (\rho_b) = (Mw/\ Ms)\ (\rho_b\ ) = (\theta g/1)\ (\rho_b / \rho_w)$$

$$\theta v = (Mw/Ms)\ (Ms/Vt)/(Mw/Vw) = (Mw/Ms)\ (Ms.Vw/Vt.Mw) \text{ ..... } \textbf{\textit{LQQD}}$$

13.11.2. Cálculo de la lámina de riego (L).

La lámina de riego se calcula mediante la expresión:

$$L=10^4(CC-UR).\ Dap.N^0\ ha/PH\ (m^3/m) \qquad (11)$$

Donde:

L = Lámina de riego (cm)

CC = Capacidad de campo (%)

UR = Umbral de Riego (%)
Dap = Densidad aparente (gr/cc)
N^0ha= Número de hectáreas a regar (cantidad)
PH = Profundidad de Humedecimiento (cm)

13.11.3. Cálculo del Peso de una hectárea de capa mecanizable para la estimación del requerimiento de fertilizantes y enmiendas por hectárea. (Wha).

La estimación del peso de los primeros 20 cm., de capa de raíces de una hectárea de terreno (Wha) se estima mediante la expresión:

$$Wha = 10^4\ m^2\ X\ 0.20\ m\ X\ Dap\ Ton / m^3 = 2Dap\ X\ 10^3\ Ton$$

$$Wha = 2Dap\ (10^6)\ Kgr \qquad (12)$$

Donde:
Wha = Peso de una hectárea de capa de raíces (Kgr)
0.20 m = Profundidad considerada para la capa de raíces, variable (cm)
Dap = Densidad aparente (gr/cc, T/m^3)

13.11.4. Cálculo del espacio poroso total (w).

Se sabe que:

Vol. Esp. Sólido **=** (Vol. Partículas **/** Vol. Suelo)100 (13)

Pero se tiene que:

(4) ρ_s = DR = masa partículas/ Vol. Partículas= Ms/ Vs y

(5) ρ_b = Ms /Vt = masa suelo / Vol. Suelo

Por lo que:

Vol. Partículas = masa partículas/ ρ_s

y

Vol. Suelo = masa suelo / ρ_b

Otra forma de expresar (13) sería:

(13) Vol. Esp. Sólido **=** (masa partículas/ ρ_s) / (masa suelo / ρ_b) (100) =

(13) Vol. Esp. Sólido **=** (masa partículas) ρ_b / (masa suelo) ρ_s (100) =

Pero:

masa partículas = masa suelo

Por tanto:

Vol. Esp. Sólido = (ρ_b / ρ_s) (100)

Y como:

% Poros **+** % Esp. Sólidos **=** 100%

Por lo que:

% Poros = W **=** 100 - (ρ_b / ρ_s) (100) (14)

Por aplicación de (14) se podrán obtener datos como:

W_A = 100 **-** (1.5 **/** 2.65) 100 **=** 43.4 %
W_{FL} = 100 **-** (1.3 **/** 2.65) 100 **=** 50.9 %
W_{Ar} **=** 100 **-** (1.1 **/** 2.65) 100 **=** 58.5 %

Recuérdese, no obstante que la porosidad total no distingue entre los diferentes diámetros de poros, por lo que su importancia práctica no rebasa el campo de ser un simple guarismo comparativo.

Con respecto a esta porosidad cabe aclarar, también como relaciones Masa : Volumen en el suelo, los siguientes parámetros:

Porosidad total (f,W) como se acaba de señalar será factible de calcular por la expresión:

f = W = Vf/Vt = (Va + Vw) / Vt (15)

Normalmente exhibirá valores entre 0.3 en suelos gruesos y 0.6 en los muy finos.

Relación de vacios (e) se calcula mediante la expresión:

e = Vf / Vs = (Va + Vw) / (Vt – Vf) (16)

Fundamentalmente se emplea en Mecánica de Suelos como un calificativo del grado de compactación de un material, y normalmente oscila entre 0.2 y 0.3.

Así mismo, también en Mecánica de Suelos y un tanto también en Manejo Agronómico de los Suelos bajo Riego y Drenaje, es común hablar del **Grado de saturación (** θ_s) el cual hace relación al porcentaje del espacio poroso que ésta ocupado por humedad, y se calcula mediante la expresión:

$$\theta_s = Vw/ Vf \qquad (17)$$

Complementario a lo anterior también es común hablar del parámetro **Volumen de aire** (f_a), el cual se calcula mediante la expresión:

$$f_a = Va/ Vt = f - \theta v = Vf/Vt – Vw/Vt = Va/Vt \qquad (18)$$

Y para completar esta sección se tiene el parámetro **Volumen aparente en seco,** un indicador de compacidad del suelo, (Vb), el cual se calcula así:

$$Vb = Vt/Ms = 1/ \rho b \qquad (19)$$

Todos los conceptos expuestos hasta este momento dan una visión “estática” del medio edáfico. No obstante, si se detalla la definición esbozada desde un comienzo para el suelo, éste fue señalado como “cuerpo natural altamente dinámico”. Así las cosas, teniendo en mente los conceptos ya vertidos en este texto, el texto se abocará ahora al estudio del comportamiento dinámico del Suelo.

XIV. CONSISTENCIA DEL SUELO.

"La consistencia del suelo comprende los atributos del material edáfico que se expresan a través de su tipo y grado de cohesión y adhesión, o a través de su resistencia a la deformación o la ruptura"

Templin, et al, 1947

Teniendo en mente la anotación de Templin et al, 1947. Conviene formular la pregunta:

Sí el suelo es un producto de disgregación por efecto del Intemperismo Físico. ¿Cómo es posible que el mismo suelo soporte máquinas, plantas, construcciones, tráfico y toda la gama de actividades que la humanidad realiza sobre él? Y aún más. ¿Cómo las plantas logran tener el anclaje suficiente que les permita sostenerse erguidas ante el embate de los vientos fuertes? Las respuestas a éstas y otras inquietudes similares tienen fundamento en la consistencia del suelo. Esto es, el conjunto de fuerzas y condiciones que mantienen al suelo, como un medio físico mecánicamente competente y espacialmente continuo.

La fracción mineral del suelo, junto con la materia orgánica, conforman la llamada matriz sólida del suelo, la fracción mineral referida está constituida por tres componentes fundamentales, siempre con diámetro inferior a 2mm, como quedó establecido en el Capítulo XII, los cuales se clasifican como arenas, cuando su diámetro oscila entre 2 y 0.02 mm; como limos cuando su tamaño está comprendido entre 0.02 y 0.002 mm y como arcillas sí su diámetro es inferior a 0.002 mm. Algunas veces la masa mineral del suelo se ve diluida por la presencia de los llamados fragmentos gruesos, esto es, aquellos con diámetro superior a 2 mm que se clasifican como gravillas cuando su tamaño está entre 2 y 20 mm, cascajos si varían entre 20 mm y 80 mm y son redondeados, o entre 20 mm y 150 mm sí son aplanados; como piedras si su diámetro varía entre 80 mm y 250 mm y son redondeados; o entre 150 mm y 380 mm sí son aplanadas, y como pedregones, si rebasan los límites de 250 mm si son redondeados y 380 mm si fuesen aplanados, IGAC, 2009.

Los fragmentos minerales se agrupan siguiendo determinados patrones espaciales para formar los que se llaman agregados del suelo, Capítulo XIII, y se estudian en atención a su forma, tamaño y grado de desarrollo o estabilidad. Todo el proceso de estructuración, y lo que es más, su grado de estabilidad o resistencia a la

ruptura por acción de los aperos de labranza, o por el impacto de las gotas de lluvia, están fuertemente influidos por la presencia y grado de evolución de la materia orgánica, además de otros factores como el tipo de arcilla y la clase y cantidad de carga de los cationes que se encuentran en el complejo de cambio, para citar solo dos de los muchos agentes precursores de la arquitectura del suelo.

La estructuración del suelo se manifiesta, como se estableció en el Capítulo anterior, por el grado de porosidad del suelo, la cual a su vez es estimada por medio de la densidad aparente o densidad de volumen del suelo, y se define como la masa de la unidad de volumen del medio edáfico; con lo cual se distingue de la densidad real o de partículas, la cual es la relación masa a volumen de las solas partículas del suelo, despreciando la existencia de cualquier espacio vacío, y cuyo valor generalmente es cercano a 2.65 gr/cc dada la densidad individual de los componentes comunes de los suelos, estando solo por encima del valor referido cuando abundan los minerales pesados como son algunos, por demás poco frecuentes, como la magnetita, el zirconio, la turmalina y la hornblenda. De otra parte, la densidad de partículas estará por debajo del valor referido cuando se presentan en el suelo altos contenidos de materia orgánica, siendo menor, cuanto mayor sean tales tenores.

En consecuencia, la densidad real expresa el tope máximo que puede alcanzar la densidad aparente en la eventualidad de que el suelo fuese totalmente compactado, reduciendo a cero su porcentaje de espacios vacíos, aunque dicho evento es imposible, dada la condición de ser el suelo un material poroso incompresible. De otra forma, la densidad aparente expresa el grado de mullimiento o esponjosidad de un suelo, siendo por tanto el mejor calificativo de una operación de labranza, no queriendo indicar con esto que los laboreos intensivos con alta pulverización, y generación por tanto de valores bajos en la densidad aparente, sean los más recomendables, en todos los casos.

Los niveles de labranza que se deben alcanzar están regidos por el tipo de suelo, el cultivo a desarrollar, el equipo disponible y la condición climática. Es entonces una decisión de innegable requerimiento técnico, la cual debe ser tomada con el mejor criterio posible, dado que es una actividad del cultivo imposible de enmendar en el transcurso de este.

14.1. CONSISTENCIA DEL SUELO.

14.1.1. Definición.

Como quedó establecido desde el primer párrafo introductorio de este Capítulo. La Consistencia del Suelo constituye la fase dinámica de la Arquitectura del Suelo, y engloba por tanto el conjunto de condiciones que desembocan en la continuidad espacial

y la competencia dinámica que ofrece el suelo para el desarrollo de la vida, en y sobre él.

En consecuencia, como Consistencia del Suelo, se tienen todos aquellos atributos que se expresan por el grado de cohesión, adhesión y plasticidad del Suelo. Lo mismo que la resistencia que el suelo presente a: deformación, ruptura, corte y cizalladura.

14.1.2. Fenómenos de la Consistencia del Suelo.

La Consistencia del Suelo se manifestará ante los sentidos del observador, en obediencia estrecha a los diferentes niveles de humedad que exhiba el medio edáfico de las siguientes maneras:

RANGO SECO $(\tau > 31.623$ Atmósferas.$)$ (1)

Bajo esta condición de humedad la consistencia del suelo se manifiesta como: **Dureza**, esto es, su resistencia a corte y cizalladura son máximas en este nivel.

RANGO HÚMEDO $(\tau = 0.3$ a 31.623 Atmósferas.$)$

Suelo, bajo la condición de baja humedad. $(\tau = 31.623$ Atmósferas.$)$. En este rango de

(1) τ: Tao. Tensión o Succión de humedad del Suelo, Fuerza opuesta (MLT^{-2})

humedad el suelo presenta dos comportamientos, correspondientes a los dos extremos del rango referido, a saber:

Firmeza: Materializada como la máxima Resistencia a la Compresión que puede presentar cada suelo, y que es atribuible al alto nivel de cohesión imperante en el
Friabilidad: Condición de humedad edáfica en la cual los agregados del suelo responden a la acción de corte abriéndose por sus superficies de fragilidad o planos naturales entre granos del suelo. $(\tau \sim 0.3$ Atmósferas.$)$

RANGO MOJADO $(\tau < 0.3$ Atmósferas.$)$

En este rango de humedad el suelo presenta dos comportamientos, relacionadas con las condiciones de elasticidad que se manifiestan en el medio edáfico, a saber:

Plasticidad: Entendida como la Resistencia a la Deformación que exhibe la masa de suelo.

Adhesividad o Pegajosidad: Grado de adherencia de la masa de suelo a los objetos que entran en contacto con la misma.

14.1.3. Fuerzas responsables de la Consistencia del Suelo.

Las fuerzas y condiciones generadoras de los fenómenos de Consistencia del Suelo se dividen entre:

a. Principales.
b. Modificadoras.
c. Coadyuvantes.

A continuación, la discusión breve de cada una de ellas:

a. Principales.

Aquí se agrupan dos tipos de fuerzas de innegable importancia en la dinámica del Suelo, cuales son el binomio de fuerzas de Cohesión y Adhesión.

14.1.3.1. Las fuerzas de Cohesión: Se dan entre partículas de suelo cargadas eléctricamente (Fuerzas de Van der Waals). Para que estas fuerzas actúen de forma intensa y perceptible, deben cumplirse dos condiciones:

1. Ausencia de cuerpos extraños, como agua, entre las partículas que presentan carga eléctrica, esto es, condición de suelo seco.

2. Ocurrencia de orientación óptima de las partículas cargadas eléctricamente, con el fin de que se tenga el máximo apareamiento de cargas contrarias y el mínimo acercamiento entre cargas de igual signo. A dicha condición se le conoce como Condición de Thixotropía, y es comportamiento diferenciador entre los diferentes tipos y clases de arcilla, únicos granos del suelo que presentan carga eléctrica. Cabe aclarar aquí finalmente que para el estudio de la Thixotropía de cada tipo de arcilla se parte de muestras de arcilla saturadas en agua, buscando la reorientación de las partículas arcillosas, hasta llegar a la condición de arcilla seca a la estufa ($\tau > 10000$ atm.).

14.1.3.2. Las Fuerzas de Adhesión: Son fuerzas que se dan en la interface Suelo: Agua, en obediencia al fenómeno de Tensión Superficial, propio de interfaces cargadas eléctricamente. Ver figura 134.

Básicamente puede entenderse el fenómeno de adhesión observando el cuadro 6; cuando el suelo está seco, no existe ningún menisco no hay humedad y por tanto no

se da origen a ninguna fuerza adhesiva; cuando el suelo comienza a humedecerse se generan meniscos cóncavos de fuerte curvatura, pero con una reducida área de contacto los cuales dan lugar entonces a una ligera adhesión. Cuando se incrementa la humedad del suelo llegando a estar el suelo moderadamente húmedo, los meniscos reducen su curvatura cóncava, pero aumentan sus áreas de contacto, con lo cual se logra una alta adhesión. Finalmente, cuando el suelo se moja totalmente, luce brillante y gotea, la

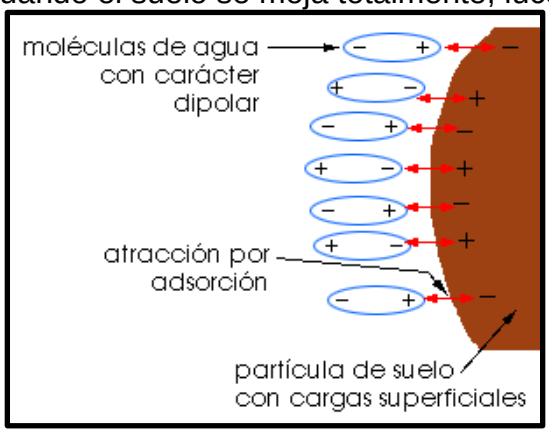


Figura 134. Diagrama esquemático de la Interface Suelo: Agua, generador del fenómeno de Adhesión. Diagrama tomado de Internet, 2002.

curvatura en los meniscos se hace convexa y aunque las áreas de contacto son altas, prácticamente no se genera ninguna adhesión.

No obstante, la sola adhesión no explica totalmente los fenómenos de consistencia, ya que como se ha establecido también, la atracción molecular entre partículas, sin interferencia del agua, da lugar a fuerzas de cohesión, tanto más grandes cuanto más activas sean las arcillas presentes. Así entonces podrá decirse que la consistencia es máxima, por cohesión, cuando el suelo está completamente seco; al comenzar a humedecerse, la cohesión cae pero comienzan a generarse fuerzas de adhesión que se incrementan con la presencia, cada vez mayor del agua llegando a su máxima expresión cuando el suelo está húmedo, y los meniscos cóncavos a exhibir una amplia área de contacto, para comenzar a decrecer dicha curvatura cóncava a partir de allí, con los incrementos sucesivos de humedad, tendiendo hacia la convexidad, y llega a un mínimo cuando el suelo consigue estar mojado a muy mojado, siendo nula cuando el suelo tiende a la saturación, para llegar entonces a comportarse como un fluido viscoso. Ver figura 135.

De las dos discusiones anteriores, relativas a Cohesión y Adhesión, se desprende que la condición de Consistencia tendrá comportamiento directamente proporcional con la magnitud de partículas cargadas eléctricamente en el suelo, esto es, porcentaje de arcillas en la masa edáfica.

b. Modificadoras.

Las fuerzas Modificadoras hacen relación al conjunto de fenómenos que apuntan a reducir, enmascarar y hasta casi eliminar la acción de las Fuerzas Principales, cuales son la Cohesión y la Adhesión, ellas son:

Cuadro 6. Tipos de curvatura, áreas de contacto de los meniscos de agua y su efecto sobre la consistencia del suelo, en obediencia a las fuerzas de adhesión. Tomado de Malagón y Montenegro, 1990.

	CONDICION DE HUMEDAD	MENISCO		ADHESION
		Curvatura	Área de Contacto	
	Húmedo	No curvado	Grande	Casi Nula
	Parcialmente húmedo	Curvado	Media	Alta
	Ligeramente húmedo	Ligeramente curvado	Pequeña	Baja
	Seco	Ninguna	Ninguna	Ninguna

Figura 4.2. Relación entre el menisco del agua en la curvatura y el área de contacto con la adhesión.

- **Contenido y grado evolutivo de la MO:** El tenor y grado de estabilidad del complejo orgánico ocurrente en el suelo está ligado en relación directamente proporcional con el enmascaramiento de las fuerzas de cohesión principalmente, y en un menor grado las fuerzas de adhesión. Todo ello fundamentado en la capacidad que tiene el complejo orgánico del suelo de retener humedad en cantidad superior a veinte veces su masa seca, dependiendo de su grado de evolución húmica.

- **Tipo y Clase de Estructura:** Mientras más pequeños y coincidentes en sus aristas sean los agregados del suelo, se apreciará con mayor intensidad la acción de las Fuerzas Principales sobre la Consistencia del Suelo. Así entonces en un suelo con estructura prismática fina debe generase una consistencia más intensa

que en otro suelo con estructura granular, migajosa o en bloques subangulares finos.

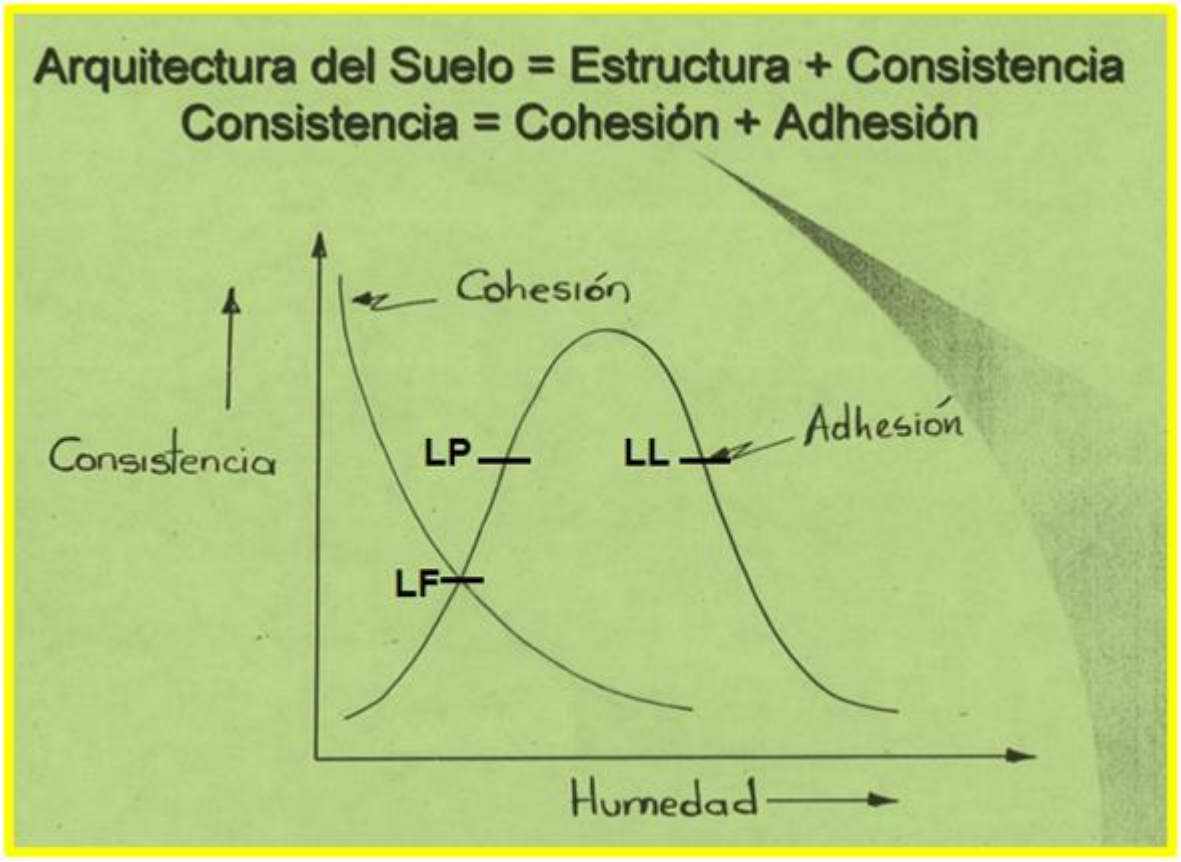


Figura 135. Diagrama esquemático del efecto de la humedad sobre las fuerzas principales de la consistencia del suelo y fijación de los Límites: Friable (LF), Plástico (LP) y Líquido (LL). ID Bustamante B, 1996

- **Textura del Suelo:** Ha quedado claro que la intensidad del fenómeno de consistencia del suelo guarda relación directamente proporcional con el tenor arcilloso del suelo. Sin embargo, hay necesidad de aclarar que la clase textural del suelo, incluyendo la ocurrencia de fragmentos gruesos, sí los hay, afectan el nivel de expresión de las dos fuerzas principales responsables de la Consistencia del Suelo. A ese respecto puede establecerse la relación directa: A mayor finura textural corresponde una mayor expresión de las fuerzas de cohesión y adhesión en el suelo.

- **Tipo de Arcilla:** El tipo de coloide mineral dominante en cada suelo será determinante de la intensidad que tengan en él las fuerzas de cohesión y adhesión. Puede establecerse a este respecto que las fuerzas de Cohesión y Adhesión se harán más perceptibles en relación directa con la dominancia de arcillas de muy baja evolución en el complejo arcilloso de cada suelo.

c. Coadyuvantes.

Las fuerzas, o mejor, condiciones coadyuvantes en la expresión de la Consistencia del Suelo toman apoyo en las circunstancias pedogenéticas de cada suelo, dado que hacen relación a la acción cementante de algunos compuestos que llegan a cobrar importancia en las condiciones de: 1. Calcificación y 2. Laterización, las cuales se discuten brevemente a continuación.

- **Calcificación:** En desarrollo de este proceso pedogénetico de translocación se dan acumulaciones subsuperficiales de Carbonato de Calcio, y en otras condiciones de material parental, Sulfato de Calcio. Ambos compuestos cálcicos, con base a su acción cementante entre los granos del suelo, incrementan la acción de las fuerzas de cohesión principalmente y de adhesión en menor escala.

- **Laterización:** En este proceso de translocación se genera la acumulación de óxidos de hierro, manganeso y aluminio, los cuales, en forma similar al caso anterior, por su acción cementante, incrementan las condiciones de cohesión y adhesión del suelo.

No obstante, como término a la presente discusión, es preciso señalar la importancia crucial que tiene el contenido de humedad en el comportamiento de la Consistencia del Suelo, como muestra de ello se tiene la información consignada en el Cuadro 7.

14.1.4. Estimación de la Consistencia del Suelo.

La estimación de la Consistencia del Suelo puede realizarse en campo y en laboratorio.

a. Estimación de la Consistencia del Suelo en Campo.

La estimación de la Consistencia del Suelo en campo se fundamenta corrientemente en el uso de diferentes tipos de penetrómetros. Ver Sección 13.9.7 del Capítulo anterior, como técnica estimadora de la Resistencia Mecánica a la Penetración (RMP, Mpa.), concepto éste que será tratado en detalle más adelante.

De otro lado, y de uso bastante extendido entre los profesionales de la preparación mecánica de terrenos, es la medida del Requerimiento de Potencia al Tiro (MPa. ó Kg/cm^2). Según esta práctica, se instala un dinamómetro entre el Tiro del Tractor y el Enganche del Implemento que se trate; arado, cincel, renovador, sembradora, etc.) y se toma la lectura del dinamómetro al momento en el cual el implemento que se trate alcanza su profundidad de trabajo y el tractor comienza su desplazamiento.

b. Estimación de la Consistencia del Suelo en Laboratorio.

La técnica de Laboratorio con uso más extendido entre los profesionales de la mecánica de suelos, la geotecnia y la edafología física es la estimación de los Límites de

Atterberg. Motta de M, B et al, 1990. En la Figura 136 se presentan algunos implementos de uso común en la determinación del Límite Líquido (LL).

Por su parte, el Límite Plástico (LP) se estima por desecamiento sucesivo de una muestra cilíndrica de suelo proveniente del ensayo de Límite Líquido, la cual es moldeada repetidamente en la forma geométrica referida, hasta alcanzar la condición de friabilidad.

Recientemente, en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, los Profesores Madriñán Molina y Ramírez Ramírez, han desarrollado y patentado un equipo que estima el Límite Friable del Suelo, mediante una técnica de humectación controlada de una muestra de suelo, haciendo uso de centrifugación intervenida por una cámara de luz infrarroja, asistida a su vez, por un software diseñado para la tarea referida. Madriñán Molina, R. y Ramírez Ramírez, JM, 2020.

Adicionalmente, en Laboratorio también se estiman el Módulo de Ruptura, La Resistencia al Corte y la Resistencia a la Compresión, aunque éstos últimos tres parámetros son más circunscritos a los campos de la geotecnia y la mecánica de suelos.

Cuadro 7: Manifestación y valoración de la Consistencia del Suelo, a través de los diferentes rangos de humedad. Cuadro I.D. Bustamante B, 1995.

CONSISTENCIA			
Seco	***Húmedo***	***Mojado***	
Suelto	Suelto	No pegajoso	No plástico
Suave	M. Friable	L. pegajoso	L. plástico
L. Duro	Friable	Pegajoso	Plastico
M. Duro	Firme	M. pegajoso	M. plástico
E. Duro	M. Firme		
	E. Firme		

14.2. COMPRESIÓN Y COMPACTACIÓN.

14.2.1. Conceptos.

a. COMPRESIÓN.

Desde la visión de la Mecánica Clásica, se entiende por compresión a un proceso físico o mecánico que se da como consecuencia de la acción de dos esfuerzos opuestos sobre un cuerpo determinado, que buscan reducir el volumen del mismo, en una dirección definida. Lo cual conduce al concepto del ESFUERZO DE COMPRESIÓN, el que se define como el resultado de dicho par de tensiones, empleado ampliamente en

ese campo de la Ciencia, bajo el nombre de Coeficiente de Poisson, y es distintivo de los diferentes materiales.

Dentro del campo de interés de este Texto, la compresión del suelo se entiende como el resultado de una serie de pares de esfuerzos opuestos a los cuales está sometido un suelo, bajo condiciones de plasticidad significativa y que se dan como resultado de la acción de animales y maquinarias transitando sobre los terrenos.

b. COMPACTACIÓN.

En ingeniería geotécnica, la **compactación del suelo** es el proceso por el cual un esfuerzo aplicado a un **suelo** causa densificación a medida que el aire se desplaza de los poros entre los granos del suelo**,** como consecuencia de la Ley de Acción : Reacción. No obstante, en dicho campo de la ingeniería se habla de ese proceso, como un proceso

(a) (b)

Figura 136. (a) Homogenizadora de muestras y (b) Cazuela de Casagrande para la estimación del Límite Líquido del Suelo. Foto ID Bustamante B, 2000.

de consolidación En el mismo campo ingenieril se habla de compactación, como el resultado del paso de maquinaria pesada y tráfico animal sobre la superficie del terreno.

En los suelos agrícolas se denomina compactación a un proceso que combina los conceptos de compactación y consolidación de la Ingeniería geotécnica, donde una variedad de fuerzas intervienen para generar un incremento en la densidad aparente del suelo, lo cual redunda en detrimento de la capacidad de infiltración del suelo, la velocidad de difusión de gases en el medio poroso, la capacidad de enraizamiento, y por ende de nutrición de las plantas y consecuentemente en el decremento de la actividad biótica en el medio edáfico.

14.3. COMPACTACIÓN Y ADENSAMIENTO.

El concepto de compactación ha quedado establecido en la última sección. En dicha discusión ha quedado claro que a consecuencia de dicho proceso se da un incremento en la densidad aparente del suelo. No obstante, conviene aclarar en este nivel de la discusión que dicha densidad aparente puede verse incrementada por causas naturales, generalmente con frecuencia episódica. A este fenómeno se le conoce como adensamiento del suelo.

14.3.1. Conceptos.

a. ADENSAMIENTO.

Se conoce como adensamiento al incremento, generalmente estacional que pueden presentar, generalmente con frecuencia temporal, algunos materiales del suelo. En específico, materiales arcillosos, justamente referidos por la Edafología Alemana como “alteritas del suelo”, dado el amplio rango de actividad de los materiales arcillosos silíceos o cristalinos. Ver Capítulo XV, siguiente.

Así entonces, los suelos con presencia significativa de arcillas montmorilloníticas, mejor conocidos como pertenecientes al Orden de Los Vertisoles, presentan, como consecuencia de procesos de secamiento progresivo, una aproximación progresiva de sus miscelas, caracterizadas por densidades de carga altas a muy altas, lo cual desemboca en un incremento de su densidad aparente, con efectos colaterales sobre su dinámica estructural, que desembocan en el desarrollo de la estructura cuneiforme, característica de los Vertisoles, fácilmente observables en el departamento de Córdoba, por ejemplo en el Corregimiento de Carolina, Planeta Rica; en el Humedal de Sierra Chiquita, Montería; en la vereda San Andresito, Sahagún, en la Ciénaga de Corralito, Cereté, en el Corregimiento de Martínez, Cereté, y en buena parte de los Montes de María, Sucre y Bolívar.

De otra parte, en el Orden de Suelos Alfisoles, donde, en atención a la dominancia de arcillas candíticas en su horizonte B_t, nominado Horizonte Diagnóstico Argílico, sufren durante la temporada climática seca una aproximación pronunciada de sus miscelas, caracterizadas por densidades de carga media a baja, condición ésta que conduce a una reducción de la profundización radical, lo cual, en suelos dedicados a la ganadería extensiva lleva a exigir un estricto monitoreo de las praderas, ya que se corre el riesgo de la profusión de "calvas" en la cubierta vegetal, por el excesivo pastoreo, en condiciones de sequía, lo cual haría necesario implementar prácticas de resiembra de pasturas en el período húmedo subsiguiente, sí se desea mantener la productividad de la Unidad Ganadera. Ejemplos de estos suelos se encuentran profusamente al sur y sureste del municipio de Pueblo Nuevo, en buena parte de las municipalidades de Planeta Rica, Buenavista y La Apartada, en el Departamento de Córdoba.

14.4. RESISTENCIA MECÁNICA A LA PENETRACIÓN. (RAP), (RM).

Como quedo establecido en el primer aparte del numeral 14.1.3.1.5, correspondiente a la estimación de la Consistencia del Suelo. Primer punto: Estimación de la Consistencia del Suelo en campo. Los dos métodos disponibles se apoyan, primero en la operación de diferentes tipos de penetrómetros, y el segundo en la estimación de los requerimientos de Potencia al tiro de un tractor, para operar un implemento de corte.

La lectura de los penetrométros se denomina como Resistencia Mecánica a la Penetración, se expresa en unidades de Presión (F/L^2) y es un índice que integra en su expresión numérica aspectos relacionados con las siguientes condiciones del Suelo, a saber:

1. Grado de Compactación del Suelo (F/L^2).
2. Nivel de humedad del Suelo (θg (%))
3. Textura del Suelo
4. Tipo de arcilla dominante en el coloide mineral.
5. Contenido de coloide orgánico (%)
6. Estructura del Suelo.
7. Consistencia del Suelo (Resistencia al corte).

Con relación al grado de compactación de los suelos, Pla, 2012, presenta la Clasificación de la Compactación del Suelo incluida en la Tabla 13.

Como puede colegirse de la revisión de la Tabla 13. Será necesaria una RM>0.30 Kg/cm^2, para que un suelo sea un medio competente para brindar anclaje suficiente a una planta. Así mismo, Roveda (2002) encontró en las condiciones del CNIA"La

Libertad", Villavicencio, que la emergencia de plantas de maíz era nula a niveles de RM, superiores a 1.33 MPa (13.562,01 Kg/cm^2)

Tabla 13. CLASIFICACIÓN DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO, Pla, 2012

CONSISTENCIA	**Lectura de Dinamómetro en Tractor (Kg/cm^2)**
Suave a suelta	<0.25 – 0.30
Suave (Poca resistencia)	0.30 – 0.45
Moderadamente compactado (T**rabajo** poco fácil)	0.45 – 0.50
Compactado (Penetración difícil de los implementos de corte)	0.50 – 0.75
Muy compactado (Penetración casi imposible de los implementos de corte)	>0.75

14.5. ESTUDIO DE CASO.

La Mecanización Agrícola y el Deterioro de los Suelos.

Una condición fundamental que debe tenerse en cuenta al diseñar cualquier operación de laboreo es el grado de consistencia que presente el suelo, en el momento de aplicar la labranza, esto es, su grado de resistencia al corte, la ruptura, la deformación y la cizalladura. La consistencia del suelo depende, como ha quedado establecido en el párrafo anterior, de su contenido de humedad; en razón a ello el suelo que es duro y firme a finales del verano tropical, llegará a ser friable y suelto después que las primeras lluvias del invierno tropical caen sobre el campo, más después de que un número mayor de lluvias se han precipitado sobre el lote puede llegar a ser plástico, deformable, y aún más, pegajoso y adhesivo, y en última instancia, con contenidos extremadamente altos de humedad, el suelo será fluido, viscoso y tenaz. Ahora bien, las fuerzas responsables de la consistencia son la atracción molecular entre partículas del suelo cargadas eléctricamente, la tensión superficial que se da como una fuerza inherente a la formación de meniscos propios de la humedad al avanzar y ser retenida por la matriz sólida del suelo, así mismo tendrán que ver con el comportamiento de la consistencia del suelo otros factores como el contenido de compuestos del tipo del carbonato de calcio, que al comportarse como un cementante generará una intensificación en la dureza y resistencia al corte de un suelo, o bien la presencia de arcillas tropicales u óxidos de hierro y aluminio, que también pueden impartir una gran estabilidad al suelo o aún llegar, bajo

condiciones de sequías intensas y frecuentes, a cementarse en capas plintíticas, de muy difícil roturación por los implementos de labranza convencionales.

Todo lo anteriormente discutido se traduce en una mayor o menor resistencia del suelo a ser laboreado, y lo que es más, conducirá a unos determinados resultados de las operaciones de labranza, deseables o no, de acuerdo a los objetivos que se persigan en cada caso, ya que serán distintos los propósitos cuando se prepara un lote para desarrollar en él un cultivo de maíz, o bien cuando se proyecte adelantar un cultivo de arroz por el sistema de fangueo.

No obstante, a este nivel de la discusión podrá el lector tener claro que la consistencia del suelo está determinada fundamentalmente por su contenido de arcillas, tipo de estas y su contenido de materia orgánica. Analicemos por ejemplo el fenómeno de plasticidad del suelo. La plasticidad se define como la capacidad que presenta cualquier material, o un suelo, que le permite ser moldeado por presión y mantener la forma lograda por moldeamiento después de suspendida la presión; dicha propiedad dependerá en su intensidad de manifestación, del contenido que presenta dicho suelo de materiales plásticos. Más, el único material plástico en un suelo es la arcilla, en atención a sus condiciones de alta superficie específica y carga eléctrica en sus superficies. Generalmente se establece como nivel mínimo de contenido de arcilla para que un suelo comience a manifestar plasticidad el de un l2 % a un l4% de arcilla; sin embargo, dichas cifras límites variaran, siendo menores a medida que se reduce el grado de evolución de las arcillas dominantes y disminuye la presencia de arenas y materia orgánica en el suelo. Así mismo, tales límites se verán incrementados cuando aumente el grado de evolución de las arcillas dominantes, y /o se incremente el contenido de limos y materia orgánica, en el medio edáfico.

Ahora bien, el grado de plasticidad de un suelo se estima por su número plástico, concepto desarrollado por el científico sueco Albert Mauritz Atterberg en l9ll y que se define como la diferencia entre el contenido de humedad que exhibe el suelo cuando deja de ser plástico para hacerse fluido, o Límite Líquido (LL); y el contenido de humedad del medio edáfico, cuando éste deja de ser friable, separable por superficies de fragilidad, para hacerse plástico, o Límite Plástico (LP). La diferencia entre los dos Límites referidos se denomina Número o Rango Plástico, para significar con ello el intervalo de niveles de humedad edáfica, entre los cuales el suelo tiene comportamiento plástico, haciéndose susceptible a la compactación. Sin embargo, ha quedado establecido que la plasticidad del suelo además de depender del contenido de humedad y la presencia y tipo de arcilla, está fuertemente influida por la presencia y grado de evolución de la materia orgánica.

En este orden de ideas es posible observar cómo, dado su efecto atemperante sobre la plasticidad de la arcilla, a medida que se aumenta el contenido de materia orgánica de un suelo, tanto el Límite Líquido como el Límite Plástico resultan incrementados en proporciones casi similares, con lo cual el rango o Número Plástico resulta prácticamente inalterado, pero desplazado a la derecha; éste hecho analizado en profundidad, reviste una especial importancia, dado que permite que un suelo pueda ser laboreado después de haber recibido una mayor cantidad de precipitaciones, a medida que se incrementan los tenores de materia orgánica en el mismo.

De forma similar y en más estrecha relación con el tema de esta discusión, conviene ahora analizar el concepto de Rango Óptimo de Labranza con Discos (R.O.L.D.), definido como la diferencia entre el Límite Plástico (LP), ya definido, y el Límite Friable (LF), distinguido como aquel contenido de humedad edáfica que se registra cuando el suelo deja ser friable para tornarse firme y cada vez, más cohesivo. Ver Figura 135 y cuadro 8.

Un hecho de vital importancia y que establece meridianamente la diferencia entre el Número o Rango Plástico (R.P.) y el Rango Óptimo de Labranza con Discos (R.O.L.D.) consiste en que mientras los incrementos de la materia orgánica logran un desplazamiento del primero hacia niveles superiores, manteniéndolo prácticamente invariable, en el segundo logran su ampliación en razón a incrementar el límite plástico inferior como ya se ha discutido, pero al mismo tiempo reducir el contenido de humedad al cual el suelo comienza a cohesionarse, dada la acción atemperante que ejerce el humus en el fenómeno de cohesionamiento. Figura 137.

No obstante, la información que puede derivarse de una primera revisión a la Figura 136 debe ser modulada con cierto grado de moderación. Debe quedar muy claro en este punto que la Materia Orgánica (MO) es el constituyente fungible del suelo, esto es, cambia en su tenor y grado de evolución, a la par que el suelo se desarrolla, por tanto, sus niveles varían positiva o negativamente, de acuerdo a los procesos pedogenéticos, de por sí lentos, que se den en cada sitio. Dicho de otra forma, los niveles de MO en el suelo no varían con la rapidez que es esperada para otros parámetros edáficos, como el nivel de un determinado ión en la solución del suelo, o el valor del pH de la misma.

Como muestra de la anterior aseveración se tiene el trabajo de Donigian et al, 1995, quienes estudiaron el efecto del cultivo continuo sobre los niveles del carbono orgánico en los 20 centímetros superficiales del perfil de los suelos de las Grandes Llanuras de Norteamérica. Figura 138. El trabajo parte de los tenores de MO en sitios de referencia en el año 1907, año que fijan como inicio de la conversión de la cobertura vegetal nativa para dar paso a los cultivos comerciales. Puntualizan como para el año

1950, esto es, 43 años después de la primera intervención antrópica los niveles de MO representaban el 53% de aquellos registrados en 1907. En 1960, se da el advenimiento de la Labranza Reducida, los materiales genéticos mejorados, la incorporación de residuos de cosecha

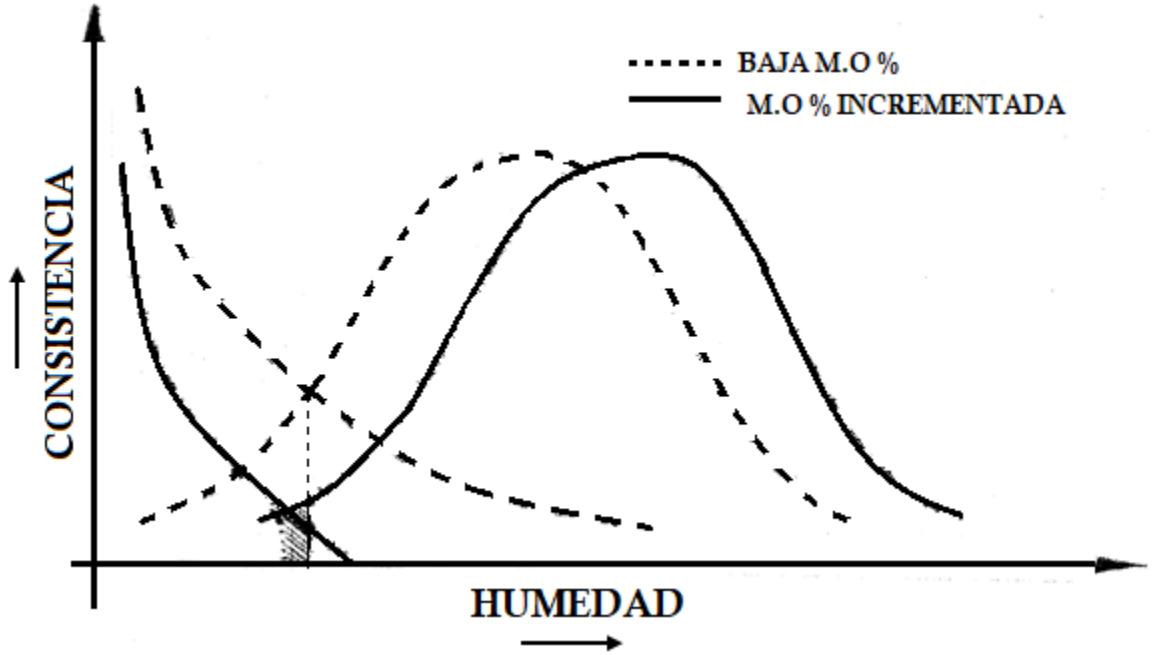


Figura 137. Diagrama esquemático del efecto del tenor de MO en el suelo sobre el RP y el ROLD del suelo. ID Bustamante B, 1994.

y las labranzas de mantillo. Sin embargo, de 1960 hasta 1970 no se dan cambios significativos en los tenores de MO, y sólo has ta 1990 reportan cierto nivel de recuperación de los niveles de MO, alcanzando el 61% de los niveles de referencia de 1907. A partir de 1990, los autores realizan una proyección de rendimientos agrícolas y de rehabilitación húmica de los suelos, asumiendo que mientras un 3% de los agricultores abrazan la Labranza Cero, 27% de ellos adoptan la Labranza Reducida y el70% restante continúan aplicando la Labranza Convencional. En forma inversa a los grados de conversión tecnológica, los agricultores que adoptan la Labranza Cero logran incrementos de 1.5% en sus rendimientos, y correlativamente de residuos de cosecha. Los agricultores que emplean Labranza Reducida alcanzan incrementos de 1.0% en sus rendimientos y los que practican Labranza Convencional tienen incrementos de 0.5% en rendimientos. Llevando la proyección hasta el año 2030, los investigadores en referencia estiman que los agricultores que adoptaron la Labranza Cero tendrán para el año mencionado un 90% de los niveles de referencia de MO en 1907, en tanto que, en Labranza Reducida, para el mismo año sólo llegarán al 80%, y con Labranza Convencional el 75%. Queda claro con base a los datos recién reportados, que la resiliencia de los tenores de materia orgánica es bastante reducida, en atención a la

complejidad que entraña su evolución, sobre la cual, a la fecha actual, abundan las incógnitas.

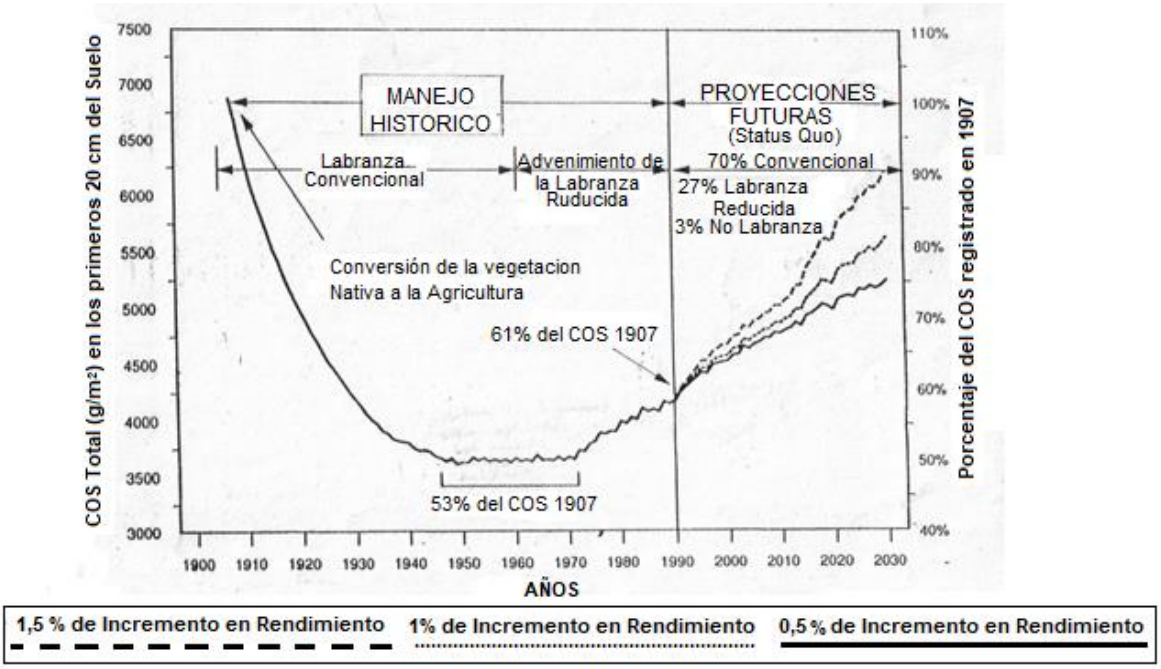


Figura 138. Efecto del cultivo continuo sobre los niveles del carbono orgánico de los suelos (MO) en las Grandes Llanuras de Norteamérica. Donigian et al, 1995.

Como colofón a la discusión desarrollada hasta aquí, y como punto de partida del análisis de la labranza como factor del manejo edáfico, es bueno discutir el efecto de la humedad en la consistencia del suelo, y por ende, en su respuesta al laboreo, en presencia de contenidos medios y altos de arcilla (Cuadro 8).
Bien puede apreciarse en el cuadro 8, la importancia de aplicar las operaciones de labranza con discos, cuando el suelo se encuentra en niveles de humedad comprendidos dentro del R.O.L.D, lográndose la máxima eficiencia de las mismas, y correlativamente el mínimo deterioro del suelo.

Paralelamente con lo antes expuesto, es necesario señalar a ésta altura de la discusión al LF, Límite Friable, como el Límite Máximo para aplicar la Labranza Vertical, LMLV, o con Cinceles. Y al Límite Líquido, LL, como el Límite inferior para realizar Labranza de Fangueo, LmLF.

Los conceptos anteriormente esbozados ineludiblemente conducen a pensar que cada suelo posee características y propiedades, estáticas y dinámicas, bien diferentes, y que, por serlo, lo individualizan y por ende indican que forzosamente debe ser tratado

como tal, como el individuo suelo ubicado dentro de cada entorno ambiental que lo lleva al concepto de terreno específico, y que por tanto le hace merecedor de técnicas de manejo individualmente diseñadas para él.

Como primer manejo del suelo en el fenómeno productivo agrícola que es la labranza, tendiente a mejorar las condiciones físicas del medio para facilitar la germinación y desarrollo de las semillas, debe estar fundamentado en el conocimiento detallado del perfil del mismo, preponderantemente en lo tocante a clase textural, tipo de arcilla dominante, contenido de materia orgánica, dinámica estructural y comportamiento de la consistencia, tipificado éste último en su RP, ROLD, LMLV y LmLF.

Obviamente, este conocimiento, fundamental para el diseño de la técnica de labranza sostenible, no se logra sino con el conocimiento detallado del perfil del suelo, involucrando todos los conceptos relacionados con el grado de evolución de sus diferentes horizontes, y muy especialmente, de aquellos que llegaran a ser intervenidos directamente por la mecanización, aunque, en realidad, todo el perfil edáfico resulta afectado por dicha labor.

El análisis crítico de una primera decisión tomada con respecto a la técnica de labranza conducirá a que periódicamente se evalúe el impacto antrópico sobre la evolución y taxonomía del perfil, de tal manera que permita evaluar lo acertado de la práctica que se viene aplicando. De no ser así, el mismo comportamiento del cultivo, inicialmente en parches o áreas muy localizadas, y posteriormente con una aparición más generalizada, denotará la generación de capas compactadas, que obviamente tendrán un efecto deletéreo en el comportamiento de las plantas, materializado en reducción del tamaño de frutos y grado de fructificación de las mismas primariamente, hecho éste que casi simultáneamente puede verse acompañado por desórdenes fisiológicos, que a su vez puedan dar cabida a la aparición de ataques, de severidad variable, de enemigos naturales del cultivo.

Queda demostrado con lo anterior que técnicas de labranza diseñadas con poco juicio edafológico conducen a bajos rendimientos, los cuales inicialmente pueden ser atribuidos a causas próximas y visibles, como los enemigos naturales, pero que en una última instancia pueden residir en el manejo y comportamiento del recurso natural primario, cual es el suelo.

CONCLUSIÓN

Un hecho debe quedar claro y es que la creencia popular de que la labranza deteriora el suelo carece de validez si la mecanización agrícola se practica con el más depurado criterio técnico, esto es, a sabiendas que el ecosistema actual, que hoy por

acción de la mecanización, inicia su viraje hacia el agroecosistema, sufrirá un impacto ineludible y que por tanto debe ser minimizado mediante la selección cuidadosa de equipos, niveles y velocidades de aplicación. Y posteriormente monitoreado a través de

Cuadro 8. La relación humedad edáfica: consistencia del suelo: respuesta al laboreo en presencia de contenidos medios a altos de arcillas (Adaptado de Kohnke, l975)

Humedad del Suelo	Seco	Húmedo	Mojado		Saturado
			Lig Mojado Muy Mojado		
	Seco a Estufa pF= 7	Coeficiente Higroscópico pF= 4.5	Lim Friable pF= 2.8		Succión nula
Forma de consistencia	Dura Firme	Friable Blanda	Plástica y pegajosa		Viscosa, el suelo fluye por gravedad
Grado relativo de Consistencia	Muy alto	Bajo	Alto		Muy Bajo
Razones principales de consistencia	Atracción molecular (cohesión)	----------	Tensión superficial (Adhesión)		----------
Resistencia a la disgregación	Alta	Ligeramente alta	Baja	Muy Baja	Prácticamente nula
Facilidad de Labranza	Difícil	Fácil	Difícil, los implementos tienden a flotar y resbalar	La inversión es fácil, pero la tracción es baja. Los implementos se hunden	Generalmente es imposible La labranza.
Resultados de la labranza	Terrones y polvo	El suelo disminuye el tamaño de sus agregados, pero mantiene su estructura	El suelo se esmalta e impermeabiliza	El suelo fluye por entre los elementos de corte	
Representación gráfica del grado relativo de consistencia					

la evaluación agronómica y más específicamente edáfica, la cual permitirá la implementación de técnicas de mantenimiento o manejo sustentable, materializadas en las diferentes técnicas tendientes a retribuir, aunque no restituir lo cual no sería sostenible, los niveles húmicos del suelo original.

XV. COLOIDES DEL SUELO

“Como en el pasaje Bíblico de David y Goliat,
muchas veces las dimensiones físicas reducidas
resultan en logros trascendentales. De forma similar,
en el ambiente del suelo
los fragmentos micro y nanométricos
son responsables de hacer de él
EL MAYOR BIORREACTOR de la naturaleza”

Bustamante, 2020

15.1. INTRODUCCIÓN.

Desde la visión de la Fisicoquímica Clásica un **sistema coloidal** consiste en la coexistencia armoniosa de una fase homogénea dispersante y una fase dispersa en el seno de la anterior, y que está constituida por partículas pequeñas, pero de tamaño suficientemente grande con respecto al diámetro de las moléculas de la fase dispersante, como para inhibir el paso del sistema referido a través de una membrana. Misma que si puede ser traspasada por una solución cristalina clásica. Por su parte. En el **suelo**, la fase dispersante es líquida y la dispersa es sólida y puede estar constituida por partículas orgánicas o minerales con diámetro inferior a 0,5 micras. ($\phi < 0{,}5\ \mu$). Ejemplos de sistemas coloidales muy cercanos a la cotidianidad son la leche, la sangre, la saliva, el estiércol y muchos más. Hasta el punto de que pueda afirmarse que tales sistemas son más la regla que la excepción en la naturaleza.

Adicionalmente, el vocablo coloide proviene de las raíces griegas *Kolla* = pegante y *veidos* = en forma de. Esto es, materiales con comportamiento similar a la cola pegante, adhesiva y untuosa. Sin embargo, como se verá más adelante los coloides no sólo son arcillas.

El centro de importancia de los sistemas coloidales en el comportamiento del suelo reside en que, en atención a lo exiguo de sus dimensiones, ese material adquiere una superficie específica, área expuesta por unidad de masa, exageradamente considerable. Así entonces, se encuentran expresiones tales como de que la Superficie Específica de un gramo de arcilla es igual a mil veces la Superficie Específica de un gramo de arena. Dicha acotación aparenta atractiva. Pero ¿cuál es su importancia?, Resulta que en un sistema poroso anisotrópico, trifásico, heterogéneo, elástico, resiliente

y tortuoso como es el suelo, donde coexisten las tres fases clásicas de la materia, sólida, líquida y gaseosa. El diámetro reducido de las partículas minerales y orgánicas más diminutas del sistema edáfico, en asocio con la fase biótica constituye el complejo bio-coloidal del suelo, el cual presenta comportamiento de fase plásmica, un cuarto estado natural de la materia, generado en forma natural. A diferencia de los dos estados restantes de la materia, a saber: Condensado Bose – Einstein y Condensado Ferviónico, logrados ambos en condiciones de laboratorio en los años 2000 y 2004, respectivamente. Ver Capítulos VIII y IX de este texto. Por tal condición el Suelo más que Trifásico debe considerarse como Sistema Natural Tetrafásico y pentadimensional.

No obstante, como ha quedado establecido en el párrafo anterior, el sistema coloidal edáfico está constituido por partículas muy finas, tanto minerales como orgánicas. En consecuencia, para su estudio y análisis comparativo apropiado. La siguiente discusión se enfocará primero en los coloides minerales, y finalmente en aquellos de carácter orgánico.

15.2. COLOIDES INORGÁNICOS O MINERALES.

Las arcillas o “alteritas” constituyen la fracción mineral o no orgánica del sistema coloidal edáfico. Sin embargo, antes de continuar es necesario plantear algunas precisiones.

15.2.1. Arcilla Mecánica.

El vocablo arcilla puede ser enfocado desde tres diferentes puntos de vista, a saber: el mecánico, el mineralógico y el coloidal. Mecánicamente es sabido que las arcillas son las partículas del suelo fino (ϕ < 2,0 mm.), con diámetro inferior a =0.002 mm = 2 *ų.* , (ϕ < 2,0 *ų.*). Aquí cabe aclarar que esta clasificación del Sistema Internacional de Suelos es solo una clasificación por diámetros de partículas, por lo que será posible encontrar en este grupo de granos al lado de los silicatos secundarios clásicos, “alteritas” o arcillas silicatadas, granos diminutos de cuarzo y carbonatos y algunos minerales primarios resistentes; lo mismo que otros minerales secundarios, esto es, generados en la evolución del suelo, al igual que las arcillas silicatadas, pero que no presentan el silicio en su estructura, como serán las arcillas tropicales y las arcillas provenientes de ceniza volcánica. Figura 110. Capítulo XII.

15.2.2. Arcilla Mineralógica.

Por su parte, las arcillas mineralógicas o “alteritas”, se definen como minerales secundarios, esto es, minerales generados en el proceso evolutivo del suelo, pero no necesariamente presentes en el material parental de cada suelo, de allí su nominación como “alteritas”, o lo que es lo mismo, producto de alteración del material de origen del suelo en estudio. En este punto de la discusión es necesario diferenciar entre las arcillas mineralógicas, los diferentes tipos de materiales que resultan involucrados bajo esta nominación. Así entonces tales arcillas se dividen en dos grupos: Arcillas silicatadas o cristalinas. Y arcillas no silicatadas o no cristalinas, o simplemente amorfas. Cabe aclarar

que el carácter de amorfas que reciben en la actualidad se debe al grado de desarrollo que hoy exhibe la microscopía cristalográfica, por lo que es posible que haya cambios en un futuro para dicha clasificación.

Las arcillas no silicatadas incluyen a las arcillas tropicales, materiales arcillosos excesivamente evolucionados que bien pudieron provenir de procesos de intemperismo intenso, lo cual redundó en la pérdida del silicio originalmente presente en su estructura. Figura 143. Y también incluyen a las arcillas provenientes de las cenizas volcánicas, alofánicas o de ando, comunes en las áreas vecinas a los volcanes, pero también presentes en paisajes de altura, distantes de las zonas volcánicas, pero donde las corrientes de aire pudieron traer dichos materiales, por ejemplo la zona del altiplano norte de Antioquia, algunas zonas del páramo de Sumapaz, en la ciudad de Bogotá,D.C, zonas caracterizadas por “Geomorfología en domos” al sur del Quindío, el norte del Valle del Cauca, norte del Tolima y oriente de Antioquia.

A manera de resumen y buscando clarificar los conceptos emitidos hasta aquí, y como antesala a una discusión próxima acerca de aspectos cristalográficos de las arcillas. Conviene aquí dejar planteados las siguientes afirmaciones. Las arcillas entonces son:

1. Materiales que pueden ser tanto cristalinos, como amorfos.

2. Son Estables (Durables). Resisten al fuego y a la mayor parte de agentes Naturales

3. Presentan cargas eléctricas, en densidades que oscilan desde bajas a altas.

4. Dada su estructura cristalina pueden presentar comportamiento de material tanto expandible, como no expandible.

5. Todas poseen composición química definida.

6. Su Capacidad de Humectación y de Retención de Humedad va de baja a media.

7. Son poco variables. Por lo que se repiten a través de los diferentes ecosistemas.

Finalmente, conviene ahora establecer algunas diferencias, que son cruciales, entre los dos tipos referidos de arcillas amorfas o no cristalinas:

Así se dirá entonces que las Arcillas Tropicales son:

1. Moléculas muy finas

2. Tienen presencia característica en suelos tropicales, reconocidos por la Edafología Internacional, como suelos de Laterita, Latosoles en la Clasificación Natural de Suelos u Orden de los Oxisoles en la Clasificación del USDA.
3. Están constituidas básicamente por Óxidos de Hierro (Fe), Aluminio (Al) y Manganeso (Mn), anhidros o en diferentes grados de hidratación.

4. En diferentes latitudes se pueden observar yacimientos significativos, y por ende de interés económico de los minerales Hematita (Fe_2O_3), Goetita (α $Fe^{3+}O(OH)$) y Limonita ($FeO \cdot nH_2O$), los cuales no son más que óxidos de hierro, con diferentes grados de oxidación-hidratación. Y que dan fundamento a la Industria Metalúrgica del Acero. Las minas de Hematita del municipio de Paz del Río, Boyacá son un ejemplo de lo antes expuesto.

De otro lado, con respecto a las Arcillas Volcánicas, cabe resaltar lo siguiente:

1. Son características de los suelos clasificados, según el USDA como del Orden de los Andosoles.

2. A diferencia de las arcillas tropicales son ampliamente variables en su composición. Por lo que se ha llegado a establecer que las cenizas emitidas por un mismo volcán son diferentes dependiendo del evento de erupción que las haya emitido a la atmósfera.

   Dada la misma variabilidad de las arcillas en referencia son conocidas bajo el nombre genérico de “Alofanas”. Aunque en las zonas del Valle de México, México y en Puebla, México se les denomina como “Jaboncillo”

3. En realidad, las clásicas arcillas de alofano se generan por la alteración evolutiva de los materiales vítreos piroclásticos, de diámetro extremadamente fino, merced al íntimo asocio que llegan a tener con los materiales orgánicos preexistentes en el lugar donde se depositan finalmente dichas cenizas, después del proceso de trasporte por acción eólica.

15.2.3. Arcilla Coloidal.

Finalmente, se conoce como fracción coloidal arcillosa como a la porción del complejo arcilloso con diámetro inferior a 0.5 micras ($\phi < 0{,}5\ \mu$.). Diámetro éste que se constituye en el valor dimensional umbral máximo, en el cual la materia comienza a presentar el comportamiento clásico de los sistemas coloidales. Dicho comportamiento involucra las siguientes facetas:

1. **Movimiento Browniano:** Movimiento en el cual, las micelas (núcleos coloidales dispersos) están animadas de un incesante

movimiento de rotación en forma de trepidación. ... Este **movimiento** se debe a los choques no compensados de las moléculas del medio dispersante sobre las partículas **coloidales dispersas.** Y es independiente de todos los factores externos.

2. **Adsorción:** La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son retenidos en una superficie cargada eléctricamente, por lo que se tipifica como un fenómeno de superficie. En contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen.

3. **Calor de Humedecimiento:** Cuando una muestra de partículas coloidales, (ϕ < 0,5 μ.) en condición de material edáfico seco a la estufa, (τ > 31.623 Atm.); recibe las primeras moléculas de agua, que buscan humedecerlo, expide una cantidad de calor, la cual es característica para cada material. Con base en este hecho, es posible determinar los tipos y cantidades de arcillas presentes en una muestra dada, mediante la técnica del Análisis Térmico Diferencial (ATD)

4. **Indicios de Cristalinidad Plana:** Hace referencia a la presentación de fenómenos derivados de la disposición de los cristales planos de los coloides minerales. Tales fenómenos son:

4.1. Sensación de centelleo que presentan las suspensiones y los frotes de estos materiales.

4.2. Brillo intenso de las superficies arcillosas pulidas.

4.3. Curvamiento de los bordes de costras, que generalmente muestran los suelos con alta presencia de arcillas, después de sufrir un anegamiento o una lluvia leve, pero de duración considerable y el posterior proceso de secado natural.

4.4. Capacidad de Intercambio Iónico, solo propio de superficies planares y con cargas eléctricas en tales superficies.

4.5. Difracción de Rayos X. Cada tipo de arcilla presente en una muestra difracta la Radiación X con un ángulo diferente. Esta condición da base a un método de valoración de tipos y cantidades de arcillas

4.6. La Microscopía Electrónica posibilita la valoración de los tipos y cantidades de arcillas presentes en una muestra, en atención a las dimensiones y hábitos de cristalización de cada

4.7. material arcilloso.

15.3. ARCILLAS SILICATADAS.

Son las arcillas más estudiadas, aunque su estudio no lleva tiempo considerable y solo se encuentran reportes científicos después de 1920. También es conveniente puntualizar que son las arcillas que presentan con mayor intensidad los atributos de plasticidad, adhesividad y de fluidez viscosa, generalmente atribuidas a cualquier material arcilloso.

Aunque tienen diferencias grandes en su composición química. Es posible generalizar conceptualmente, acerca de la existencia de las celdas básicas implicadas en su estructura cristalina. Ellas son los Tetrahedros de Silicio y los Octahedros de Aluminio. Figura 139.

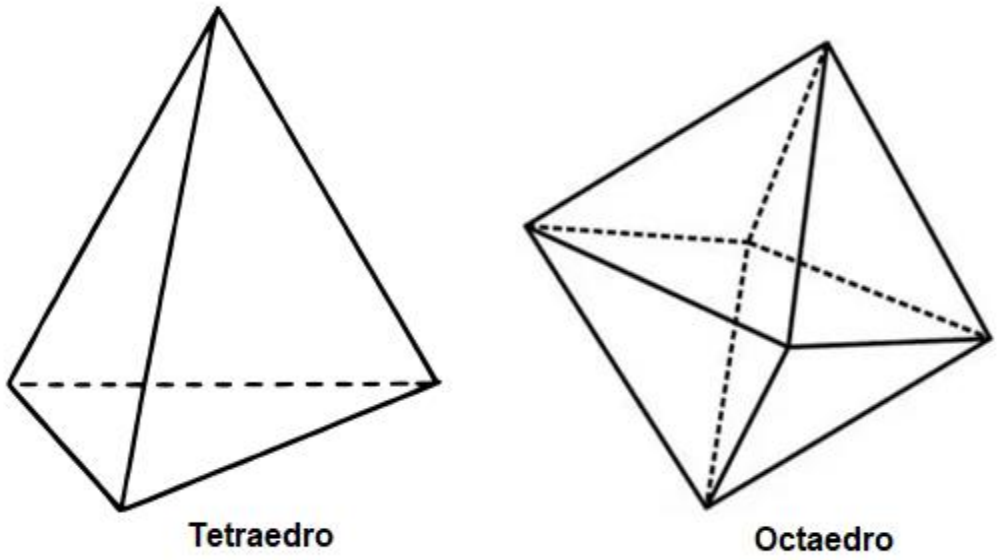


Figura 139. Cristales Unitarios de las Arcillas Silicatadas. Khonke, 1968

En los Tetraedros de Silicio, un ion de bajo radio iónico, como el Silicio (Si^{+4}) se coordina en un esquema dinámico y cercano a la condición tetraédrica de cuatro aniones oxígeno (O^{-2}) o hidroxilo (OH^{-1}), lo cual redunda en una alta reactividad electroquímica de estos cristales.

De otra parte, en los octaedros de Aluminio, un ion de radio iónico considerable como el Aluminio (Al^{+3}) se coordina en un esquema dinámico y cercano a la condición octaédrica de seis aniones oxígeno (O^{-2}) o hidroxilo (OH^{-1}) , lo cual redunda en una alta reactividad electroquímica de estos cristales.

Será correcto decir entonces, que las celdas unitarias de las arcillas silicatadas que se acaban de referir se constituyen en la mínima expresión de una de estas arcillas. Ahora bien. Comenzando con los tetraedros de Silicio merced a la disposición de los aniones oxígeno (O^{-2}) en sus vértices aparentes, se dará lugar a que se agrupen siguiendo una orientación planar, como se esquematiza en la figura 140.

Si se tiene en cuenta ahora que las fracciones de lamela tetraédrica u octaédrica se prolongan en el espacio siempre siguiendo el ordenamiento planar, el lector se hará a la idea de dos agrupaciones de celdas unitarias, que bien podrán coordinarse con lamelas vecinas, mediante enlaces covalentes de oxígeno (O^{-2}) o electrostáticos de hidroxilo (OH^{-1}).

En obediencia a la Ley de Acción de Masas, las lamelas dominantes en cada medio se coordinarán entre sí, siguiendo alguno de los tipos de coordinación que se discuten a continuación, y que serán definitivos para marcar el comportamiento de cada tipo de arcilla silicatada.

Los Octaedros de Aluminio, por su parte, se disponen espacialmente, siguiendo la orientación planar según la tendencia que se presenta en la Figura 141.

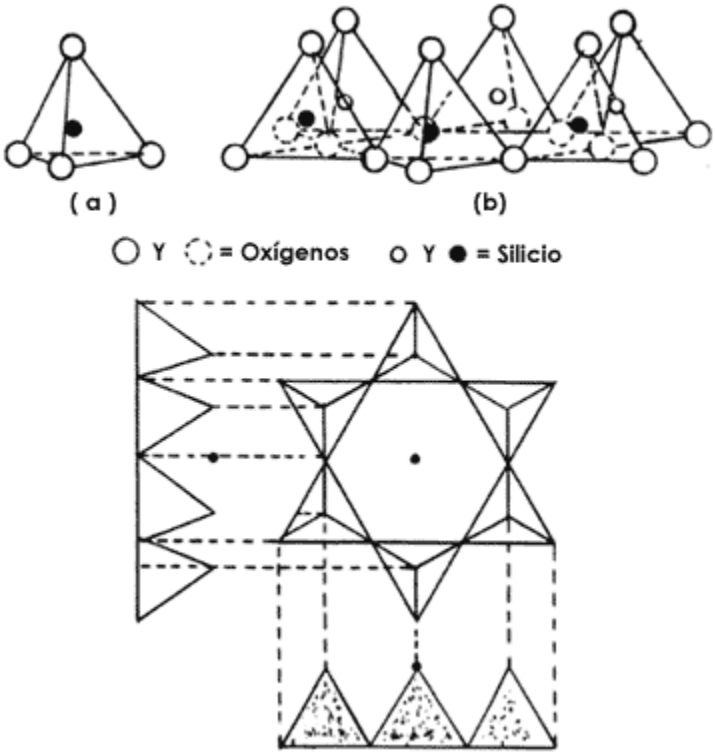


Figura 140.
(a) Cristal unitario de un Tetraedro de Silicio. Diagrama tomado de Internet. 2020.

(b) Lamela constituida por un anillo formado por seis Tetraedros de Silicio, merced a la estabilidad considerable de los enlaces de Oxígeno (O^{-2}). Dia - grama tomado de Internet. 2020.

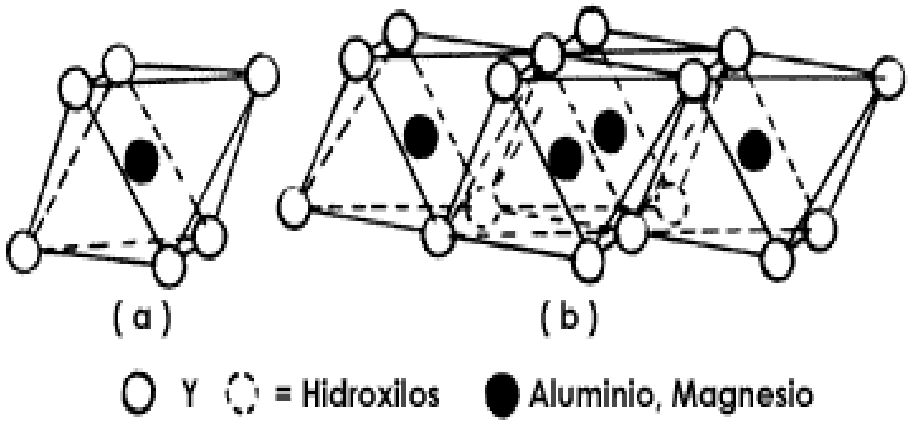


Figura 141. (a) Cristal unitario de un Octaedro de Aluminio. Diagrama tomado de Internet. 2020

(b) Fracción de una lamela constituida por una serie de Octaedros de Aluminio. Diagrama tomado de Internet. 2020.

15.3.1. Tipos de coordinación entre lamelas arcillosas.

Existen tres tipos de coordinación entre lamelas, a saber:

a. Difórmica o 1:1. Por ejemplo las Canditas
b. Trifórmica o 2:1. Por ejemplo las Smectitas
c. Tetrafórmica o 2:2 o 1:2:1. Por ejemplo las Cloritas

i. Coordinación Difórmica (1:1) (Φ = 0.1 - 5.0 μ)

En esta coordinación, una lamela de Tetraedros de Silicio se coordina con otra de octaedros de Aluminio, mediante enlaces covalentes de Oxígeno (O^{-2}), para conformar el típico látice o cristal difórmico, mismo que se unirá a su vecino mediante enlaces electrostáticos de hidroxilo (OH^{-1}). Esta coordinación genera látices arcillosos de escasa superficie, la cual será unicamente externa, dada la alta estabilidad de los enlaces electrostáticos que se dan entre los hidroxilos (OH^{-1}) del cristal superior, y los oxígenos (O^{-2}) del látice inferior. Figura 142.

ii. Coordinación Trifórmica (2:1) (Φ = 0.01 - 1.0 μ)

En esta coordinación, una lamela de Octaedros de Aluminio se coordina en sus caras superior e inferior con sendas lamelas de Tetraedros de Silicio, mediante enlaces covalentes de Oxígeno (O^{-2}), para conformar el típico látice o cristal trifórmico, mismo que no se unirá al látice vecino, dada la electrorrepulsión ejercida por los iones Oxígeno (O^{-2}) enfrentados entre las dos lamelas de tetraedros que exponen los dos cristales vecinos, esto redunda en que el cristal trifórmico presente la mayor superficie activa, ya que ésta será la suma de las dos superficies, interna como externa. Figura 143.

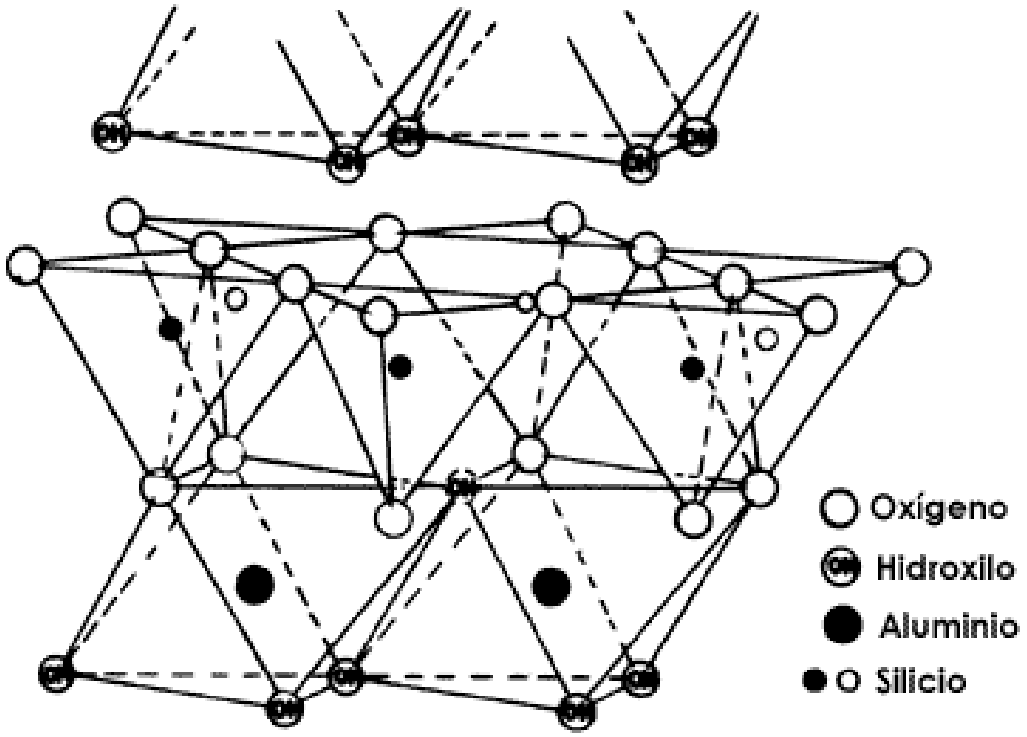


Figura 142. Esquema de Coordinación Difórmica, 1:1. Diagrama tomado de Internet. 2020.

iii. Coordinación Tetrafórmica (2:2 = 2: 1:1).

Aquí se agrupan algunos materiales arcillosos específicos y de importancia en algunas áreas tan puntuales como las áreas de humedales, ciénagas y páramos.

En esta coordinación una lamela de tetraedros de Silicio se rodea, en su cara superior y en su cara inferior de dos lamelas de octaedros que, dadas las condiciones ecosistémicas (Humedales, Páramos y Ciénagas) han sufrido la sustitución isomórfica de sus Aluminios (Al^{+3}) por un ion de menor valencia como Magnesio (Mg^{+2}) lo cual redunda en una reducción de la electronegatividad de cada celda y por ende de la lamela en su integridad. No obstante, simultáneamente al par de coordinaciones referidas, la lamela superior de Octaedros de Magnesio ahora se coordina por su cara superior con otra lamela de tetraedros de Aluminio.

Como ya se mencionó inicialmente, estas arcillas solo son frecuentes en condiciones de intemperismo incipiente, lo cual hace que sea bastante difícil encontrarlas en forma aislada en el campo, siendo más frecuente detectarlas bajo la forma de lo que se conoce como “Minerales Interestratificados”, esto es, materiales en los cuales concurren diferentes materiales arcillosos. Así entonces se tendrán los Interestratificados más comunes como el de Clorita: Illita o Illita: Vermiculita. Ver Figura 144. Cabe aclarar

aquí, en forma correlacionada con el tema en discusión, que el grado de inmadurez de un suelo guarda relación directa con la presencia de materiales interestratificados.

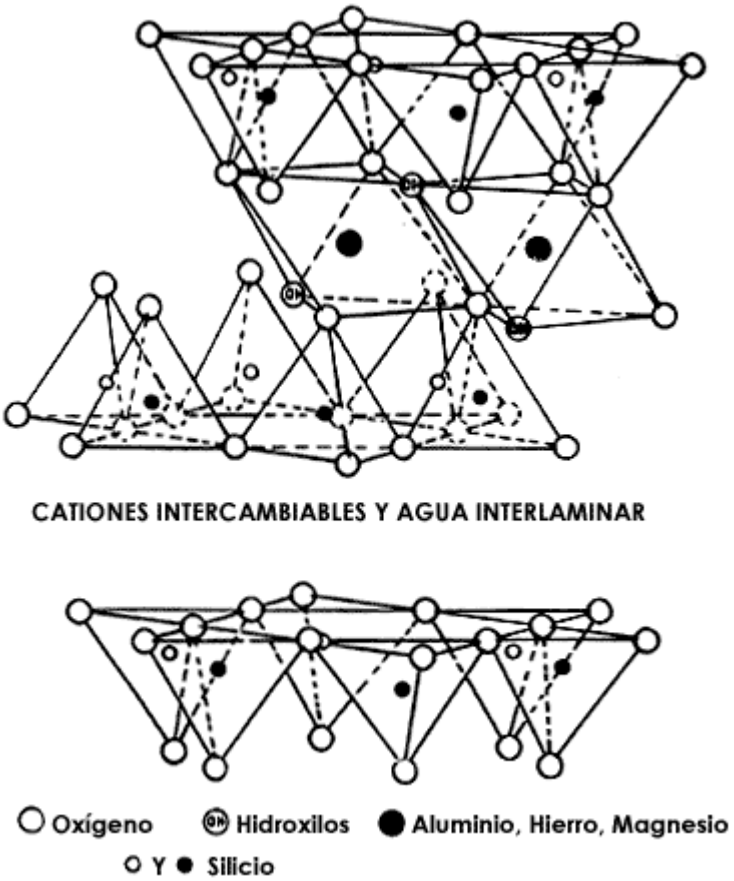


Figura 143. Esquema de Coordinación Trifórmica, 2:1. Cada una de estas lamelas Trifórmicas estará separada de sus dos semejantes vecinas, tanto supra como subyacente por una capa de agua con espesor variable, lo cual redunda en que la red se dilate o contraiga sucesivamente en obediencia a la adición y sustracción de agua al sistema. Diagrama tomado de Internet. 2020.

Retomando y resumiendo en este punto la discusión acerca de la estructuración de las arcillas silicatadas. Se deberá establecer que las celdas unitarias se reúnen para formar lamelas homogéneas, de tetraedros o de octaedros. Las lamelas luego se coordinan de tres formas diferentes para formar los cristales arcillosos, los cuales en razón a los desbalances de carga que presentan desde sus celdas unitarias, presentarán cargas, positivas y negativas en sus superficies. Bajo esta condición de estructura cristalina cargada eléctricamente en su superficie, resulta más conveniente denominarla como látice arcilloso. Seguidamente varios látices arcillosos se reunirán para conformar la partícula arcillosa clásica ($\Phi < 2\ \mu$). Capítulo XII. Cuando se considera a dicha partícula arcillosa desde la visión de su comportamiento coloidal, resulta más apropiado denominarla miscela arcillosa.

15.3.2. Génesis de Arcillas.

Las muy correctamente llamadas “alteritas” por la Escuela Edafológica Alemana se generan como producto de alteraciones sucesivas, por lo cual, la valoración, cuantitativa y cualitativa de la fracción arcilla de un suelo, preferentemente de su Horizonte B, de acumulación, resulta crucial para estimar el grado de desarrollo de un suelo. La afirmación anterior da mayor fundamento a la afirmación enunciada anteriormente, en el sentido de que la abundancia de materiales interestratificados en el complejo arcilloso de un suelo guarda relación directa con el bajo grado de evolución de un suelo.

Siendo consecuentes con los planteamientos del párrafo anterior, se debe establecer ahora que las arcillas pueden generarse por dos tipos de procesos de alteración, cuales son:

a. Descomposición.

b. Recrístalización.

c. Herencia del Material Parental, generalmente sedimentario y con contenido significativo de minerales arcillosos.

a. Descomposición:

Un ejemplo de un proceso de descomposición lo constituye la evolución de la mica Moscovita, para generar la arcilla sustituida con potasio (K), Illita.

$$K_2\ Al_4\ (Al_2\ Si_6)\ O_{20}\ (OH)_4 \ + \ Si + 4H_2O \leftrightarrow$$

Moscovita

$$\leftrightarrow\ (K_{0.2})\ .\ (K_{0.8})\ Al_4\ (Al\ Si_7)\ O_{20}\ (OH)_4 \ + \ K^+ \ + \ Al^{+3}$$

Potasio Intercambiable **Illita**

En esta reacción la Moscovita gana Silicio y agua, mientras libera iones de Potasio y Aluminio

b. Recrístalización:

Como ejemplo de recristalización se puede citar que la Illita consigue liberar Potasio e intercambiar parte de sus iones de Aluminio por iones de Magnesio, con lo cual se generará la arcilla Montmorillonita, arcilla ésta, considerada como la más estudiada en el grupo de las Smectitas (2:1) :

$(Na,Ca)_{0.3}\ (Al, Mg)_2\ Si_4O_{10}\ (OH)_{2.}\ .\ n\ H_2O$

Montmorillonita

c. Herencia del Material Parental:

Se trata de materiales de partida, generalmente sedimentarios y con contenido significativo de minerales arcillosos. Tal es el caso de los suelos de arcillolitas con cementante férrico, material de origen de muchos Oxisoles. O de los suelos generados a partir de materiales calcáreos y más aún, dolomíticos y su marcada tendencia a la generación de suelos ricos en montmorillonita.

15.3.3. Evolución de las Arcillas.

La continua alteración que sufren las arcillas queda certeramente presentada por los autores H. O. Buckman y N. C. Brady (1996). Figura 144. Obsérvese en la gráfica en cuestión, la fuerte influencia del agente clima en la alteración sucesiva de los materiales originarios, costado izquierdo del diagrama, hasta llegar al máximo grado de intemperismo, donde las arcillas dominantes en el complejo arcilloso de los suelos, estará dado por las arcillas tropicales, también conocidas como arcillas de laterita o de latosoles. Orden Oxisol y Ultisol según el SSS (Soil Survey Staff, USDA).

De otra parte, en la Tabla 14, resultan destacables varios aspectos que apuntan a comparar a los tres tipos de arcillas silíceas. Comenzando entonces por las diferencias marcadas en los rangos de dimensiones de los tres tipos de partículas arcillosas, los cuales se incrementan proporcionalmente con el grado de evolución de los materiales. Así mismo se hace perceptible como a medida que se incrementa la actividad de cada arcilla, se tiende a un mayor caos en la morfología de sus partículas y al incremento de su superficie externa expuesta, lo mismo que de la superficie interna, misma que resulta prácticamente inexistente en el grupo de la Caolinita (Canditas). Paralelamente la consistencia se manifiesta con mayor intensidad de forma proporcional con el grado de actividad fisicoquímica. Finalmente, la Tabla 14 llama la atención acerca de cómo la capacidad de intercambio iónico se ve fuertemente impactada por el grado de evolución de cada tipo de arcilla

15.4. ARCILLAS NO SILICATADAS.

En este grupo se reúnen los siguientes materiales:

1. Aluminosilicatos no cristalinos, comúnmente denominados como arcillas de Ceniza Volcánica o Alófanas.
2. Óxidos e hidróxidos de Fe, Mn, Al, mejor conocidas como Arcillas Tropicales
3. Óxidos e hidróxidos de Silicio

4. Fragmentos de minerales y rocas con Ø < 0.002 mm = 2 µ

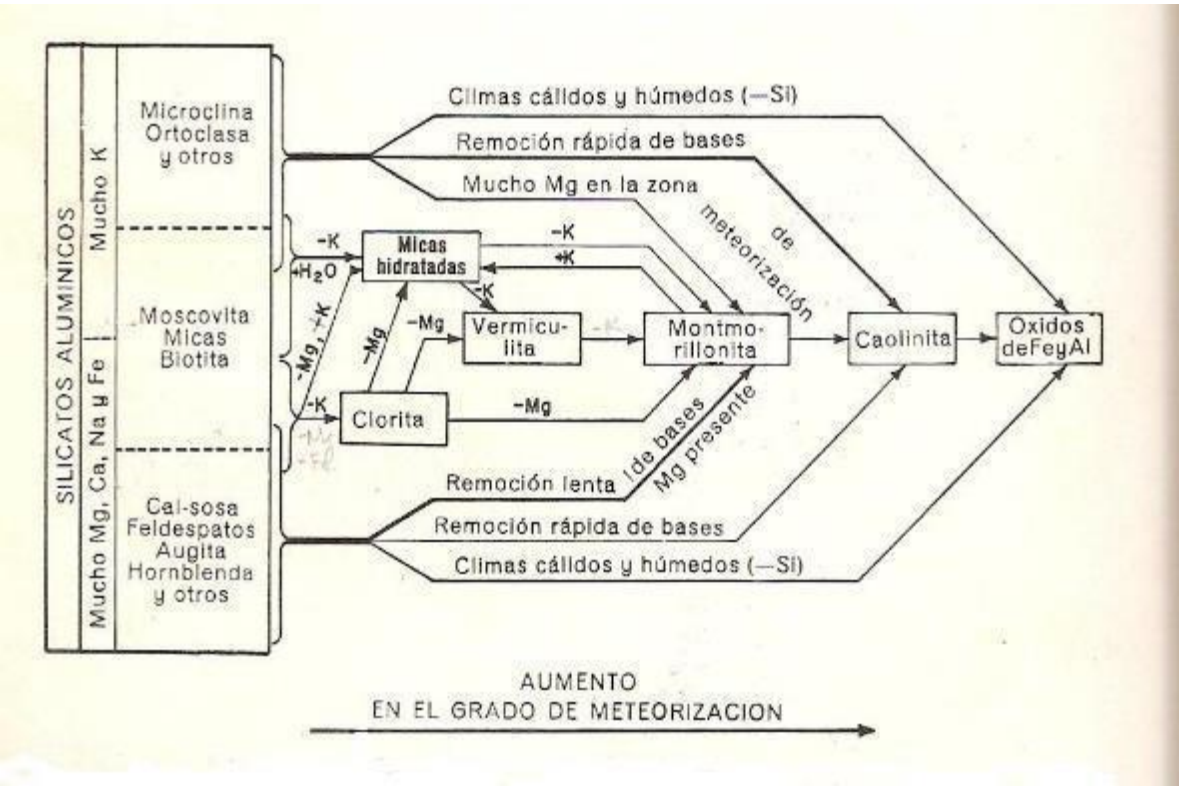


Figura 144. Diagrama que muestra las condiciones generales que deben darse para la Generación de las diversas arcillas silíceas y finalmente las arcillas tropicales, óxidos de hierro y aluminio, propios de condiciones de meteorización extrema. Como puede apreciarse la alteración se da en razón a la remoción de elementos solubles, tales como K, Na,Ca y Mg. Debe afirmarse aquí, que el grado de actividad de cada material arcilloso marcha en sentido inverso al grado de intemperismo. Tomado de Buckman y Brady. 1996.

15.4.1. Arcillas de Ceniza Volcánica.

Las arcillas conocidas con el Término genérico de Alófano (Stromeyer y Hausman, 1816), también denominadas en la literatura agraria mexicana como arcillas de jaboncillo, guardan cierta similitud con las arcillas silíceas o silicatadas, recién discutidas, y esta afirmación se hace en razón a que presentan en su estructura, tanto Silicio en coordinación tetraédrica y Aluminio en coordinación octaédrica, pero sin ningún arreglo ordenado de látices, condición ésta que se traduce en los siguientes hechos:

a. No difracta los Rayos X, por lo cual este método de análisis mineralógico de arcillas no aplica en los suelos del Orden Andosoles.
b. Genera curvas suaves de deshidratación. Lo cual se hace característico cuando la fracción arcillosa de un Andosol se somete al Análisis Térmico Diferencial (ATD)

c. Estas arcillas tienen una apariencia cambiante, debido a la misma heterogeneidad de sus constituyentes.

Tabla 14. PROPIEDADES COMPARATIVAS DE LOS TRES TIPOS DE ARCILLAS SILÍCEAS CLÁSICAS. Tomada de Buckman y Brady. 1996.

Propiedades comparativas de los tres grupos de arcillas Silíceas

Propiedad	Tipo de coloide		
	Montmorillonita	Illita	Caolinita
ϕ (μ)	0.01 – 1.0	0.1 – 2.0	0.1 –5.0
Forma	Lám. Irregul.	Lám. Irregul.	Cristal. hexagonal
Sup. Externa	Grande	Media	Baja
Sup. Interna	Muy alta	Media	Ninguna
Cohesión + Plasticidad	Alta	Media	Baja
Cap. Dilatación	Alta	Media	Baja
CIC (dmol/Kg)	80 - 100	15 - 40	3 - 15

15.4.2. Arcillas Tropicales.

Las Arcillas Tropicales, constituidas por una mezcla intensa de Óxidos e hidróxidos de Hierro, Aluminio y Manganeso, en diferentes grados de hidratación son características del Orden de Suelos denominado como Oxisol (SSS, Soli Survey Staff, USDA). Se trata de unos materiales arcillosos, clasificados a la fecha como no cristalinos o amorfos, en razón a que no difractan la luz en el microscopio petrológico. Dotadas de un diámetro más que reducido y con muy baja carga en su superficie externa, llegan a presentar dos condiciones muy interesantes, ellas son:

a. Glomerulización, Hardy (1970)

b. Generación de pieles de arcilla, conocidas como “Clay Skin”. Hardy (1970). Kohnke (1975).

Estas dos tendencias o condiciones hacen de estas arcillas, las más adaptadas a las condiciones climáticas prevalentes en los trópicos, cuáles son las precipitaciones copiosas e intensas y los períodos de sequía episódica intensa. Así entonces, merced a la glomerulización, los Oxisoles constituyen el Orden de Suelos con mejor drenaje de su perfil, de ahí su nombre. Por ello Hardy (1970) llega a afirmar que tales arcillas imparten al perfil, las condiciones de drenaje interno, propias de un perfil arenoso. De otro lado, la tendencia a formar las pieles de arcilla. “Clay Skin”, sobre los suelos, conduce a protegerlos del impacto de las gotas de lluvia, propias de las precipitaciones pluviales comunes en el trópico.

15.4.3. Óxidos e hidróxidos de Silicio y Fragmentos de minerales y rocas con Ø < 0.002 mm = 2 µ.

Aquí se agrupan todos aquellos minerales secundarios y silicatos primarios, que sin tener comportamiento de arcillas, desde el punto de vista mineralógico, cumplen con el requisito de las arcillas mecánicas, Ø < 0.002 mm. = 2 µ. Figura 110. Capítulo XII.

15.5. MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN Y ESTUDIO DE LA FRACCIÓN ARCILLA.

Existen diferentes y muy variados métodos de identificación y estudio. Se emplean diferentes aproximaciones a la arcilla, tales como:

a. Métodos de estudio del látice, aquí se tienen:
   a.1. Estructura del Látice
   a.2. Composición química del Látice
   a.3. Iones intercambiables internos y externos
   a.4. Distribución de partículas arcillosas por su diámetro.

b. Métodos ópticos:
   b.1. Centelleo de suspensiones de arcilla
   b.2. Estudio por Microscopía Electrónica
   b.3. Difracción de Rayos X.
   b.4. Espectroscopía Infrarroja. Presenta especiales ventajas para el estudio de complejos coloidales orgánico:arcillosos. Además, es el único método óptico aplicable a las arcillas no silicatadas o amorfas.
c. Métodos Químicos:

Estos métodos no han tenido una adopción considerable, debido a la dificultad que implica la remoción de iones adsorbidos y posibles impurezas que pueden presentarse en una muestra. Igualmente, la posibilidad de ocurrencia de sustituciones isomórficas en la muestra bajo análisis.

Dentro de este tipo de métodos también se manejan algunas relaciones indicativas de los diferentes tipos de arcilla, posibles de encontrar en una muestra, tales como:

- Relación Si: Al
- Relación Si: Óxidos metálicos

Adicionalmente, el estudio de la CIC puede dar algunos indicios acerca de los materiales arcillosos presentes en la muestra en evaluación.

d. Métodos Térmicos:

d.1. Método Termogravimétrico. En éste se pretende medir la relación temperatura: cesión de agua por una muestra de arcilla, manteniendo una tasa de calentamiento fija, con el fin de obtener una curva de la relación mencionada, la cual finalmente se compara con una serie de curvas características que ya están disponibles.

d.2. Análisis Térmico Diferencial (ATD): En resumen, es un método de calentamiento contrastado, de una muestra problema contra una muestra inerte, generalmente de alúmina calcinada. Muy útil en el estudio de arcillas difórmicas como caolinita y gibsita.

d.3. Calor de Humedecimiento. Se trata de un proceso exotérmico que desafortunadamente resulta muy afectado en sus resultados por las especies iónicas que se encuentren adsorbidas en el complejo arcilloso en estudio. Esta condición ha impactado significativamente el grado de adopción del método por el mundo científico.

d.4. Imbibometría. En este Método cualitativo, propuesto por Konta en 1963, citado por Kohnke, 1966, una gota de un líquido determinado, de la cual se conoce su diámetro se aplica desde una altura fija a una muestra de arcilla que se encuentra comprimida en un receptáculo estándar. Se miden tres parámetros, cuales son:

- La Velocidad de Infiltración de la gota en la muestra
- La Expansión de la muestra a causa de la aplicación de la gota

- Área humedecida por la gota.

En atención a la complejidad de las medidas requeridas por el método, no ha tenido una aceptación amplia en la esfera de Científicos del Suelo.

15.6. COLOIDE ORGÁNICO.

A manera de introducción, esta discusión acerca del complejo orgánico del suelo debe comenzar destacando las diferencias entre los coloides minerales, recién analizados y los coloides orgánicos, ellas son las siguientes:

1. Siempre son amorfos.
2. Son altamente inestables, esto es, poco durables. Tanto por ser sustrato alimenticio de la biota del suelo, como por ser susceptibles a sucumbir por acción del fuego. Por lo cual exhiben la tendencia a desaparecer del medio.
3. Tienen carga eléctrica alta a muy alta.
4. Siempre son no expandibles.
5. Tienen composición química compleja.
6. Poseen una altísima Capacidad de Retención de Humedad (CRH). Admiten un grado de hidratación de hasta seis veces su peso.
7. Son altamente variables. Hasta el punto de que puede establecerse que “Cada suelo tiene un tipo de materia orgánica, para cada condición de manejo. Por lo que es válido afirmar que son tan individuales como el mismo Individuo Suelo.

Una vez establecidas las siete diferencias que acaban de enunciarse entre los dos tipos de coloides que coexisten en el suelo, resulta apropiado dar comienzo al estudio de la Materia Orgánica del Suelo.

15.6.1. Importancia.

A pesar de que tradicionalmente se atribuye a la materia orgánica, una presencia máxima, inferior al 5% del volumen del suelo; el alto grado de subdivisión de este componente edáfico conduce a que independientemente de su baja presencia volumétrica, impacte marcadamente las propiedades físicas, químicas, físico – químicas y biológicas del Suelo

15.6.2. Definición de la Materia Orgánica.

En sí, la materia orgánica del suelo incluye todos los residuos orgánicos, de origen animal y vegetal, frescos, en proceso de descomposición y totalmente humificados[32]; así mismo, debido a la imposibilidad de separarlos de ella, también abarca a todos los microorganismos existentes en el medio edáfico. Finalmente, en atención a su alta tasa de renovación y, por ende, su continuo aporte de residuos, también involucra a las raíces de las plantas superiores. Sin embargo, dada su alta movilidad, y consecuentemente su reducida permanencia en un volumen dado de suelo, no comprende ninguna forma de macrofauna del suelo.

15.6.3. Clasificación de la Materia Orgánica.

Una clasificación práctica entonces de la materia orgánica del suelo consistirá en dividirla en residuos y humus, los primeros estarían constituidos por partes muertas de plantas y animales, así como por las excretas de éstos últimos, sujetos todos a tasas de descomposición relativamente altas. Por su parte, el humus sería aquella materia orgánica de color oscuro, en la cual resulta imposible distinguir su origen, con propiedades físicas, químicas y físico - químicas más o menos definidas y que no se encuentra sujeta a ninguna tasa de descomposición lo suficientemente rápida, para que resulte aparente, esto es, se encuentra "estabilizada"

15.6.4. ¿Qué es la Humificación?

Generalmente se entiende por humificación a un proceso que involucra la desintegración física inicial y la posterior descomposición química de los residuos orgánicos originales, todo lo cual ocurre en forma más o menos paralela con la síntesis de algunos compuestos que son específicos del humus; concepción ésta que guarda una estrecha similitud con la propia génesis del suelo.

En desarrollo del proceso de humificación, algunos constituyentes muy susceptibles son fácilmente oxidados, pudiéndose perder otros como agua, bióxido de carbono y otros gases; además algunos minerales pueden lixiviarse, de tal forma que después de un tiempo de estar desenvolviéndose el proceso en cuestión, solo permanece una fracción del peso de los residuos originales, y, lo que es más, su composición elemental ha sufrido

---

32." Residuos totalmente humificados" o en estado de humus. Del latín "*humus"* = Fundamento = Base. La Ciencia Edafológica ha conservado en su argot técnico, esta raíz latina para dar peso al interés central que tiene el humus para el funcionamiento del suelo. Esta misma raíz latina es base de la llamada virtud de la humildad. Tan necesaria en todos los tiempos

cambios considerables, por ejemplo, sus contenidos de nitrógeno y otros minerales se han incrementado ampliamente, lo cual no ocurre con el carbono cuyo incremento apenas si es perceptible, en tanto que se observan intensas disminuciones en los contenidos de hidrógeno y oxígeno. Con base a lo anterior ha llegado a definirse a la humificación como al proceso de oxidación lenta e incompleta de los residuos orgánicos. Hardy, 1970.

15.6.5. Tipos de Humificación.

De acuerdo con el tipo y clase de material orgánico original, y en obediencia a la clase y velocidad de descomposición de este, las cuales a su vez dependen del nivel de la humedad, temperatura y oxígeno presentes en el medio de descomposición, pueden darse tres grandes tipos de humificación, cuales son la terrestre, la semiterrestre y la acuática, de las cuales la primera es la que reviste especial importancia en los suelos agrícolas.

Dado que el tipo y tasa de humificación son influidos por la presencia de humedad y oxígeno en el entorno, es de pensar entonces que la topografía y el clima tienen una relevante importancia sobre la cantidad y tipo de humus que se produzca en unas condiciones determinadas. Sin embargo, a su vez el clima y el suelo determinan el tipo de vegetación dominante, la que en última instancia afecta en forma directa el tipo de humus producido; en este orden de ideas, las propiedades más importantes de las plantas en relación a la generación de humus son: su distribución de raíces, su contenido de bases, de ligninas, de sustancias hidrofóbicas, de hormonas y de antibióticos. Considérese aquí las diferencias que deben esperarse entre los tipos de humus que lleguen a obtenerse en zonas tan diferentes como: El Nudo del Paramillo, Antioquia; El Bajo Atrato, Chocó; Uribia, Alta Guajira; Páramo de Sumapaz, Cundinamarca y La Tebaida, Quindío.

15.6.6. Composición y Clasificación del Humus.

La materia prima fundamental del humus, cual es el tejido de las plantas superiores exhibe una composición elemental promedia como la siguiente, según Stoddard, citado por Buckman y Brady (1996)

Agua…….. 75%
Carbono……. 11%
Oxigeno……..… 10%
Hidrógeno……. 2%
Minerales (N y otros) …….. 2%

A partir de un sustrato como el que se acaba de referir, y merced a los procesos de humificación, mediante el accionar de la macro y microvida del suelo, se llegan a

producir en él, cambios físicos, químicos y físico-químicos importantes, y en los cuales la comunidad científica, después de más de cien años de estudios no logra ponerse de acuerdo en forma total, así por ejemplo hay acuerdo en el sentido de establecer que el principal componente del humus estabilizado es un complejo conformado por aminoácidos y sustancias similares a la lignina, en íntima entremezcla al cual denominó Waksmann (1938) como complejo ligno-protéico, en menor proporción se observan otros tipos de compuestos orgánicos, cuya presencia promedia puede expresarse como se presenta en la Tabla 15, siguiendo a Kohnke (1975) en cuanto a la composición aproximada promedia del humus del suelo.

El caso es que, una vez cumplido el tiempo requerido para la estabilización del humus, en él se han operado cambios drásticos en su composición elemental, presentando unos contenidos de elementos como los que se detallan en la Tabla 16 (Kohnke, 1968) para el humus edáfico.

Tabla 15. COMPOSICIÓN APROXIMADA PROMEDIA (+/-) DEL HUMUS DEL SUELO, Kohnke,1975.

MATERIALES	CONTENIDO (%)
Compuestos Lignínicos	45
Aminoácidos	35
Carbohidratos	11
Celulosa	4
Hemicelulosa	7
Grasas, ceras y resinas	3
Otros	6

Entonces nos encontramos ante un material edáfico, extremadamente complejo, cambiante en mayor o menor proporción a través del tiempo y el espacio, y lo que es más, íntimamente entremezclado con la fracción mineral, lo cual dificulta su separación, con fines de estudiarlo, sin que se corra el riesgo de alterar su composición y naturaleza, haciéndose aún más complejo el panorama si se tiene en cuenta que es un material altamente dinámico, esto es, en continua evolución, en la cual, por la misma razón, resulta difícil establecer límites precisos entre sus diferentes niveles de evolución.

No obstante, lo anterior y teniendo en cuenta que, como ya se ha establecido el tipo de humus producido es función del tipo de clima y de vegetación circundantes, existe acuerdo en denominar como “Humus verde” a aquel en el cual es factible distinguir la naturaleza de los residuos originales, dado que su descomposición ha sido impedida, bien por una baja concentración de nutrientes en el medio, requeridos por los mismos

Tabla 16. COMPOSICIÓN ELEMENTAL DEL HUMUS DEL SUELO, Kohnke,1975.

ELEMENTO	% CON BASE A PESO
Carbono	52 - 60
Oxigeno	32 - 38
Hidrógeno	3 - 4
Nitrógeno	**4 - 5**
Fósforo	0.4 - 0.6
Azufre	0.4 - 0.6

organismos que agencian la descomposición, o bien por una baja temperatura o por una baja aireación o por la presencia de compuestos fenólicos o similares que inhiban el crecimiento bacterial, su color es más pardo que negro y generalmente ocupa la capa más superficial del perfil del suelo, sobre todo en condiciones de clima frío, y en suelos con baja potencialidad química y nutricional.

Una siguiente fase de la evolución del humus, la constituye el denominado humus nutriente en el cual su color es más negro que pardo y se hace más difícil determinar la naturaleza de su material originario. Su composición fundamental es azucares, almidones y algunas sustancias nitrogenadas solubles, por lo que sirve de sustrato alimenticio a los microorganismos del suelo de donde deriva su nombre. Una posterior y última fase evolutiva la constituye el humus verdadero, neutro o de mantenimiento, en el cual resulta totalmente imposible discernir acerca de los materiales originarios. Con color negro intenso exhibe una alta persistencia en el suelo y una naturaleza química bastante compleja, por demás bastante difícil de estudiar dada la intensa entremezcla del material, con la fracción mineral del suelo.

Los estudiosos de las ciencias forestales, casi que exclusivamente alemanes y de algunos países nórdicos, por su parte han sugerido el uso de los términos mull y mor, siendo aplicable el primero a aquel horizonte, bastante notorio en suelos de bosque de coníferas, caracterizado por un enriquecimiento en material húmico íntimamente mezclado con materiales minerales y que generalmente suprayace a los horizontes minerales de los suelos forestales. Por su parte con el término mor se designa a aquel horizonte superficial de los suelos forestales, caracterizado por la ausencia casi total de material mineral y la dominancia, también total o casi total de residuos orgánicos fácilmente identificables en cuanto a su origen, por lo anterior comúnmente se hacen las equivalencias entre mull y humus neutro, y entre mor y humus verde.

En referencia no ya a horizontes sino a suelos orgánicos como tal, la Edafología Internacional utiliza los términos: Turba y Muck, para diferenciar a aquellos suelos orgánicos, donde el material orgánico es relativamente identificable. Figura 145 a. Y de Muck, para aquellos donde se hace imposible la identificación de los residuos que fueron humificados en el sitio.

Además de lo anterior, la ciencia forestal también ha acuñado la nominación de horizontes orgánicos de los suelos minerales bajo los indicativos L(Litter), F (Fornia, Fermentación) H (Humificada) para referirse a una primera capa dominada por "Litter" "Mulch" hojarasca o mantillo, en fin, material orgánico susceptible de ser descompuesto o humus verde; una segunda capa subyacente donde se comienzan a dar con mayor o menor intensidad los procesos de descomposición de los residuos y donde naturalmente tiene presencia dominante el humus nutriente; por último, la capa H presenta un enriquecimiento de material humificado o humus verdadero, estable o neutro y por debajo de esta última, se encuentran, subyaciendo a un límite difuso con ella, los típicos horizontes minerales.

La anterior clasificación, proveniente de la pedología alemana fue modificada por el Soil Survery Staff del USDA, SSS, asimilándola inicialmente a las equivalencias Oi, Oe, Oa, para suelos orgánicos y a las nominaciones Hi, He, Ha, aplicables a horizontes orgánicos de suelos minerales, Capítulo X, en las cuales los subíndices tienen la siguiente significación:

i = Fibrist, condición de residuo orgánico en estado predominantemente fibroso, fácilmente reconocible en cuanto a su naturaleza y origen.

e = Henist, condición de fermentación, residuo orgánico en estado de descomposición medio, en el cual el reconocimiento de su naturaleza y origen se hace medianamente difícil.

a = Saprist, condición de descomposición total o completa, los residuos originales están totalmente alterados y resulta imposible identificar su naturaleza y origen.

En concordancia con lo anterior, los horizontes Oi = Hi presentan predominio del humus verde, en tanto que el humus nutriente domina en los horizontes Oe = He, correspondiendo finalmente los horizontes Oa = Ha a capas de cúmulo de humus neutro o estabilizado.

a. Suelo de Turba. Vgr: La Pozona, Cereté, Córdoba, Colombia

b. Suelo de Muck, V.gr: Remediapobres, Cispata, Córdoba, Colombia

Figura 145. Ejemplificación de Suelos Orgánicos: a. De Turba; b. De Muck. Fotos: Internet

Sin embargo, resulta interesante conocer más a fondo la composición detallada del humus, a este respecto una primera separación de componentes se hace con base en la solubilidad, tal como se indica en el Cuadro 9, aunque ella solo reviste validez por cuanto permite juzgar la intensidad del efecto de los diferentes constituyentes en el comportamiento físico del suelo. Existen sin embargo técnicas espectroscópicas avanzadas, como la espectroscopía infrarroja y las técnicas de resonancia electrónica, que permiten estudiar con más detalle el comportamiento y evolución de las sustancias húmicas, pero que, dada la alta especificidad del tema, escapan al objetivo de este texto (Senesi, 1997).

Cuadro 9. Clasificación de los componentes del humus neutro (Kohnke, 1975)

HUMUS SOLUBLE EN ALCALIS	HUMUS SOLUBLE EN ALCALIS	HUMUS INSOLUBLE EN ALCALIS
Precipitado por ácidos	No precipitado por ácidos	HUMINAS
Ácidos húmicos, pardogrisáseos a pardo oscuros	Ácidos fúlvicos: pardos amarillentos	(Propiedades físicas y químicas aun no bien conocidas.)
Contiene aminoácidos y compuestos fenólicos de alto peso molecular.	Contiene ácidos urónicos y compuestos fenólicos de bajo peso molecular.	
Gran número de grupos ácidos, muchos grupos carboxilos, consiste en partículas aproximadamente esféricas	Predominan los polisacáridos, pocos grupos carboxilos, moléculas grandes y flexibles.	

15.6.7. Funciones de la Materia Orgánica del Suelo.

Según Senesi (1997) es posible hablar de una fertilidad orgánica del Suelo, la cual se fundamenta en los siguientes hechos.

1. Asegura el crecimiento balanceado de plantas y organismos en el medio edáfico, en razón al suministro de nutrimentos en forma directa, como en el caso del nitrógeno, entre otros, y con base a su acción sobre el complejo coloidal, afectando por ende la capacidad de intercambio iónico, la capacidad reguladora de la reacción del suelo, lo mismo que su punto isoeléctrico.

2. Asegura la conservación del suelo, protegiéndolo de disturbaciones (mecánicas) y contaminaciones (químicas), lo primero en atención al efecto de la materia orgánica sobre la estabilidad estructural del suelo; y lo segundo en atención a la capacidad que tienen las sustancias húmicas para complejar poluyentes metálicos y orgánicos, pesticidas principalmente, mediante muy diversos mecanismos que llegan a hacer de la materia orgánica un componente autorregulador y renovador del suelo.

Con el fin de detallar, aún más la funcionalidad de la materia orgánica en el suelo, se presenta la información del Cuadro 10

15.6.8. Evolución de la humificación y tipo de Humus obtenido.

Los residuos o materiales orgánicos que han llegado a depositarse en la superficie o a una cierta profundidad en el perfil de suelo siguen ahora un proceso evolutivo humificante o de descomposición, el cual en su velocidad y en el tipo de productos finales obtenidos, depende de la edafotemperatura, la humedad, la aireación y la potencialidad

química y nutricional del medio, los cuales a su vez determinan el tipo de microbios dominantes en la gestión humificante de los residuos en referencia.

Todo lo anterior equivale a decir que el clima, la vegetación, el tipo de suelo y la topografía del terreno determinan el tipo de humus obtenido y la tasa de evolución de sus materiales originarios.

Cuadro 10. Acciones de la Materia Orgánica en el Suelo (Senesi, 1997)

PROPIEDAD	ACCION	EFECTO / FUNCION
1. Color oscuro y baja conductividad térmica	1. Alta absorción y retención de radiación solar	1.a. Facilita calentamiento del suelo. 1.b. Atempera los cambios bruscos de temperatura
2. Baja densidad	2. Afecta la relación masa / volumen del suelo	2.a. Reduce la densidad aparente. 2.b. Reduce la compacidad 2.c. Aumenta la conductividad Hidráulica del Suelo
3. Combinación con componentes inorgánicos del suelo.	3. Agregación de partículas	3.a. Mejora la estructura 3.b. Aumenta la porosidad y la aireación, y posibilita un mayor crecimiento radical. 3.c. Reduce la erosión, el encostramiento y la compactación
4. Coloidal.	4. Absorción y retención	4. Aumento de la capacidad de retención de humedad y eventualmente, aumento de la humedad aprovechable.
5. Fracciones solubles e insolubles en agua	5. Procesos de movilización y fijación	5. Afecta acumulación y transporte de materiales en el suelo.
6. Presencia de grupos funcionales ácidos.	6. Capacidad de enlace iónico	6. Aumenta la CIC
7. Sistema conjugado ácido débil – base	7. Poder tampón	7. Previene cambios bruscos en pH del suelo
8.Grupos funcionales ligandos.	8. Formación de complejos con iones metálicos polivalentes.	8. Afecta el estado químico y de disponibilidad de metales desde el punto de vista nutricional y ambiental
9. Capacidad reductora	9. Reductora	9. Contribuye al potencial Redox
10. Sistema generador de radicales libres de donores- aceptores de electrones.	10. Transferencia de electrones	10. Influye sobre los procesos químicos, fotoquímicos y biológicos que involucran la transferencia de electrones
11. Interación con químicos orgánicos xenobióticos	11. Incorporación, fotosensibilización catalítica	11.Afecta actividad de pesticidas

PROPIEDAD	ACCION	EFECTO / FUNCION
12 mineralización	12. Fuente de energía y nutrimentos: ($NH4^+$, $NO3^=$, $PO4^=$, $SO4^=$)	2. Aumenta aprovechabilidad de nutrimentos para plantas y organismos
13. Factor de crecimiento	13. Hormonal, auxinas, absorción de nutrimentos por las raíces.	13. Afecta directa e indirectamente los efectos fisiológicos de crecimiento de plantas y organismos.
14 antibióticos, ácidos fenólicos, etc.	14. Organismos patógenos	14. Influye sobre la resistencia de plantas al ataque de patógenos y enfermedades de las raíces.

Es natural también que la base de humificación también esté gobernada por la facilidad de descomposición de los residuos, en este sentido es clásica la gradación que normalmente se hace de la susceptibilidad a la descomposición de los diferentes grupos orgánicos, la cual es máxima para los azucares, y en su orden, almidones y proteínas solubles en agua, seguidos por las proteínas crudas y la hemicelulosa; exhibiendo la mínima susceptibilidad los aceites, las grasas, la lignina y las ceras.

Es un hecho comprobado que la tasa de humificación decae cuando aparecen en escena algunos compuestos característicos del humus, reemplazando a aquellos grupos orgánicos más resistentes a la descomposición; en tanto que los grupos más susceptibles a descomponerse son remplazados por productos tales como CO2, CH4, H2O, $SO_4=$, NO3 y $NH4^+$, según se halla dado la humificación en condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

Conviene ahora analizar el efecto de los factores que se discuten en el tipo de humus obtenido; así entonces, bajo las condiciones del clima húmedo y frío es natural que el humus verdadero predomine en los suelos de alta potencialidad química, en tanto que, en aquellos de baja fertilidad, generalmente cubiertos por bosque de coníferas, es de esperarse que predomine el humus verde. De otra parte, bajo los bosques húmedos de zonas tropicales, desarrollados en suelos ácidos y pobres, podrá observase una capa húmica extremadamente delgada, contrastando con el exuberante crecimiento vegetal que se manifiesta sobre el terreno.

De otra parte, conviene hacer aquí una breve anotación acerca de la evolución húmica que se da en los suelos orgánicos hidromórficos, cuando se drenan. Así entonces, cuando se incrementa la aireación de aquellos cúmulos de material orgánico, ellos experimentan una evolución, que a la vista de la velocidad de los fenómenos edafológicos resulta extremadamente rápida, por lo que es posible que se den incendios aislados en el predio. Y aún más, con el correr del tiempo puede apreciarse el proceso de subsidencia del terreno, esto es, recesión o profundización de la superficie del terreno,

por el simple hecho de que se ha operado una marcada sustracción de materia, merced al proceso de oxidación de los materiales orgánicos originales. Ejemplos de tal condición se observan con cierta frecuencia en el Valle del Sinú, tal es el caso de las Ciénagas como las de Corralito, El Cerrito, Las Pavas, Martinica, La Pisinga y La Chamarra, en el Valle Medio del Sinú y en algunas áreas del municipio de Yumbo, en el Valle del Cauca.

Así mismo, en atención a la dinámica de aportación de residuos, si bien en todos los suelos se puede observar un descenso en el contenido húmico a medida que se profundiza en su perfil, dicho descenso es gradual bajo cubierta de pastos y es abrupto, bajo la cubierta de bosque. Igualmente, la calidad de residuos aportados por ambas cubiertas conduce a que en los suelos bajo pradera se dé una dominancia de humus estable en tanto que el humus verde será el mayoritario bajo la cubierta de bosque. Capítulo X. Figura 146.

15.6.9. Manejo de la Materia Orgánica.

El objetivo primordial del manejo de la materia orgánica apunta hacia el incremento del rendimiento de los cultivos y la conservación del recurso suelo, esto es, el mantenimiento de su nivel de productividad. Como se puede deducir de lo anteriormente expuesto, la técnica de manejo debe ajustarse al tipo de suelo, el clima y

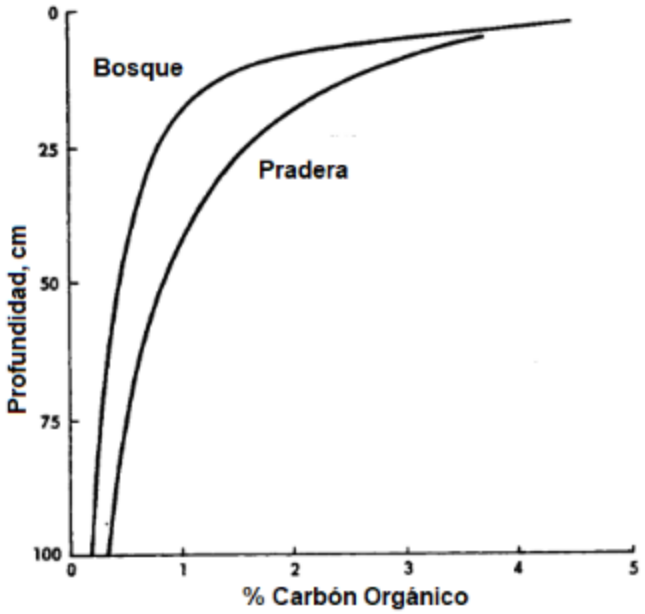


Figura 146. Perfiles de tenores de Materia Orgánica, bajo cubierta de pradera y bajo bosque. Tomado de Kohnke,1975.

el uso que se dé al suelo. En todo caso la meta es mantener en él una abundante cantidad de humus nutriente y una proporción de humus estable que se adecue a la intensidad de uso que se haga de él.

La relación entre la presencia de carbono y nitrógeno en los residuos orgánicos, mejor conocida sencillamente como la relación C/N será un parámetro de gran utilidad en el momento de tomar decisiones acerca de la viabilidad, oportunidad y profundidad de aplicación de un material orgánico al suelo. Es de amplio conocimiento que mientras más rebase dicha relación el valor de 10-12:1 en un material, más resistente será el mismo a la descomposición y por ende más amplio su tiempo de estabilización. Así mismo, se conoce que, dadas las condiciones de humedad, aireación y temperatura, principalmente. Entre más profunda se haga la incorporación de los materiales orgánicos, más prolongada se hará su evolución hacia el humus.

Es de considerar también que en el proceso evolutivo de un residuo orgánico se originará un incremento episódico en la población microbiana del suelo y por ende un aumento en la demanda de nutrimentos por la misma, lo cual eventualmente podría originar deficiencias nutrimentales, en especial de nitrógeno para las plantas cultivadas. Puede concluirse entonces que la aplicación de materiales orgánicos de alta relación C/N genera un desbalance nutrimental en el suelo, tanto más prolongado cuanto mayor sea la profundidad de incorporación. Figura 147.

La profundidad de aplicación por su parte estará ligada en extremo al objetivo que se persiga con la práctica, así entonces la técnica de mantillo o sea el simple esparcimiento del material sobre el terreno, o tratamiento “anti-sello y anti-costra” buscará reducir la incidencia de sellos y costras en la superficie del campo además de procurar una cobertura para el mismo, más por el efecto de la intensa aireación y radiación solar, el aporte húmico será muy reducido; no obstante el mismo material incorporado en forma somera, a una profundidad que no rebase los 5 cm mejorará ostensiblemente las condiciones mecánicas de la capa superficial del suelo, incrementando su permeabilidad y su laborabilidad con maquinaria; en adición a lo anterior, la incorporación profunda puede resultar de máximo beneficio para el mejoramiento de capas adensadas y compactadas, cuando la aplicación se hace a una profundidad igual a 1.25 veces el calado máximo de la capa problema. Finalmente, en la actualidad se realizan algunos ensayos en Apartadó, Antioquia y en Fundación, Magdalena, ambos sitios dedicados a la producción intensiva de banano en Colombia, para evaluar la técnica de mantillo vertical o “vertical mulching” con la cual se persigue mejorar las condiciones de drenaje interno de perfiles con alta dominancia de arcillas expansivas, o en algunos casos, fuertemente adensados debido a excesivas y persistentes fertilizaciones nitrogenadas, las cuales conducen a la excesiva pérdida de ácidos húmicos en el complejo orgánico y al consecuente impacto sobre la densidad aparente del suelo. Cuadro 9. Sin embargo, aún no hay resultados concluyentes sobre la aplicación de la misma, dada la variabilidad de materiales utilizados y, lo que, es más,

la diversidad de condiciones de humificación que se brindan al mismo a lo largo de la profundidad de aplicación, y a través de los diversos sistemas de manejo agronómico de los suelos.

Parece no obstante razonable anotar que dentro de un, marco de agricultura intensiva está vedado el uso de materiales orgánicos “frescos“, haciéndose necesario su tratamiento previo que reduzca su relación C/N y por ende su tiempo de estabilización, tales tratamientos previos podrán ser la simple mezcla de los residuos con materiales fertilizantes nitrogenados, la compostación, la lombricompostación la mezcla con lodos residuales y estiércoles, etc., dependiendo de su grado de resistencia a la humificación. El caso es que cualquier aplicación de materiales orgánicos al suelo debe estar fundamentada en su cantidad, calidad, oportunidad y técnica de aplicación en un análisis integral de cada situación, dada la multitud de factores que intervienen con mayor o menor intensidad en cada caso, y que aquí han sido discutidos.

15.7. ORIGEN DE CARGAS ELÉCTRICAS EN LOS SISTEMAS COLOIDALES.

Teniendo en mente que en el complejo coloidal del suelo coexisten armónicamente unos materiales tan diferentes como son las arcillas y el humus. Ya que a esta altura de la discusión debe tenerse claro que en buena parte la individualidad del suelo se sustenta en su sistema coloidal, caracterizado por un complejo húmico

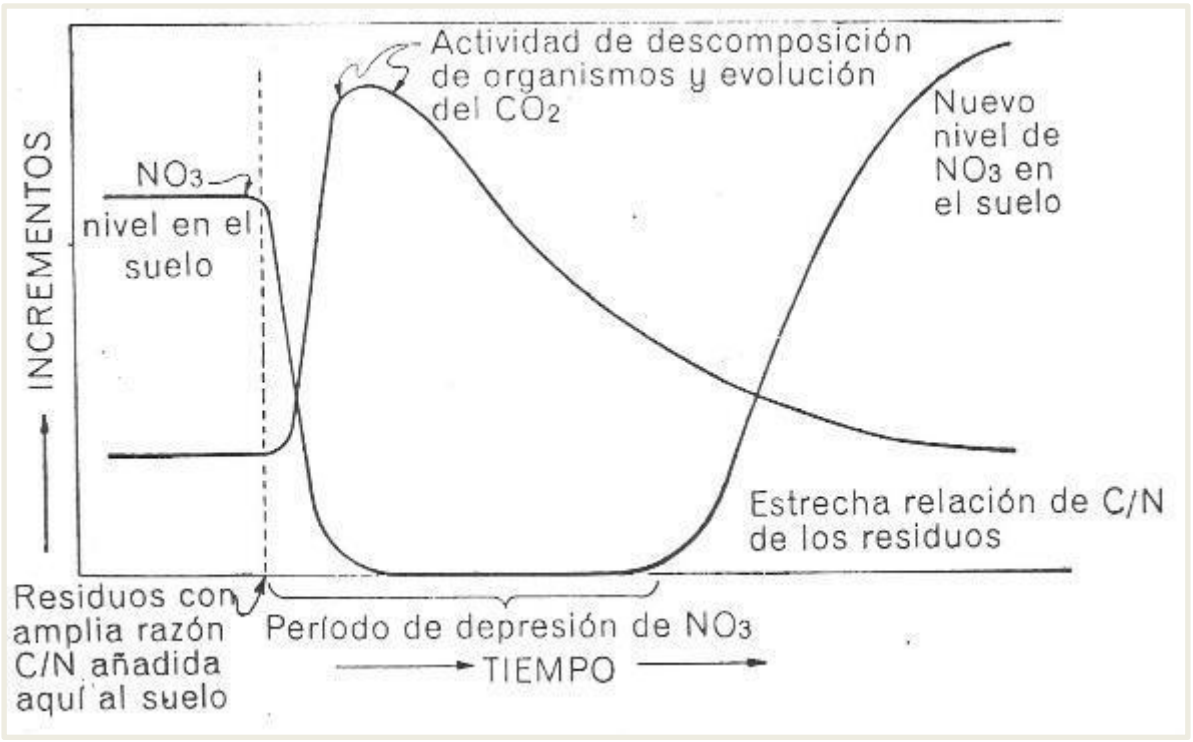


Figura 147. Diagrama explicativo de la relación cíclica entre el grado de descomposición de los residuos orgánicos y la presencia de nitratos en el suelo. Tomado de Buckman y Brady, 1996.

autóctono y una mezcla de arcillas minerales también autóctona, donde se entremezcla una arcilla dominante con otras accesorias y, a veces, algunas trazas de otras. Nuestro punto de interés ahora es acerca de cómo se originan las cargas en ese complejo tan heterógeneo como interesante.

Se ha llegado a establecer que el origen de las cargas eléctricas del sistema coloidal edáfico estriba en los siguientes tres conceptos:

1. Bordes rotos.

2. Cargas compartidas, variables o dependientes del pH del medio.

3. Sustitución isomórfica o carga fija.

15.7.1. Mecanismo de Bordes Rotos.

Según este mecanismo, debido a la elasticidad de cada suelo, la expandibilidad de otros y a los movimientos inherentes al medio poroso que es el suelo, en respuesta a los flujos de agua y gases que se dan en ese medio y al desplazamiento de las diferentes formas de vida que habitan el suelo, es normal que se generen esfuerzos en una serie intrincada de direcciones e intensidades, que pueden llegar a generar roturas en los bordes de las estructuras cristalinas, en buena parte, planas o laminares de los materiales arcillosos, generando así desbalances eléctricos en sus respectivos cristales.

Este mecanismo, si bien palpable y explicable a simple vista, dada su sencillez, francamente no resulta suficientemente creíble como para que pueda impactar en forma significativa la densidad de cargas del complejo coloidal, y así poder llegar a generar las altas Capacidades de Intercambio Iónico, como la que exhiben una buena parte de los suelos de los diferentes ecosistemas del mundo

15.7.2. Cargas Compartidas o carga variable.

Es sabido que, en atención a la alta $K_{d\ (H^2O)}$), el agua que circula en el suelo se presenta disociada en sus dos iones constitutivos. Y que, según la Ley de Acción de Masas, dependiendo del pH del medio, los iones H^+ abundarán en medios de bajo pH, en tanto que los iones OH^- serán dominantes en medios alcalinos.

Ahora bien, las partículas coloidales, tanto orgánicas como minerales, debido a sus dimensiones tan reducidas, deben su actividad a la cantidad considerable de superficies, externas, y en algunas ocasiones, también internas. En tales superficies es normal que se encuentren aluminosilicatos, óxidos o hidróxidos metálicos, para el caso de partículas minerales; o radicales carboxílicos o aromáticos, que en todo caso presentaran en tales superficies, terminales hidroxílicas (OH^-), que, dependiendo del pH del medio podrá recombinarse con iones H^+, generando cargas positivas (+) en medios ácidos, o bien, cargas negativas (-) en medios alcalinos. Situación ésta que puede esquematizarse de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\qquad\qquad (H^+) \\ Al \;\; +(- O - (+H) - \ldots \quad (OH^-) \end{array}$$

Para el caso de un aluminosilicato. En el caso de un coloide orgánico podría ser algo como lo siguiente:

$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\qquad\qquad (H^+) \\ C - C \;\; - O - O - (+H) - \ldots \quad (OH^-) \end{array}$$

De allí que sea denominada carga variable, o dependiente del pH.

15.7.3. Cargas por Sustitución Isomórfica o Carga Fija.

La sustitución isomórfica es un cambio de núcleos positivos en la red cristalina arcillosa, que sólo se da en el proceso evolutivo de las arcillas trifórmicas (2:1), para llegar a generar cambios en el volumen de sus cristales inferiores al 40%. Como consecuencia de tales intercambios, la mayoría de Al^{+3} por Mg^{+2} en los tetraedros; o de Si^{+4} por Al^{+3}, en los octaedros, se generan siempre cargas fijas negativas (-)

15.8. EL FENÓMENO DE INTERCAMBIO IÓNICO.

Merced al comportamiento eléctrico que tienen los coloides del suelo, como se acaba de discutir, este comportamiento se constituye en fundamento para la intensa actividad electro-química de sus extensas superficies internas y externas.

El proceso electroquímico de superficie que por excelencia se da en el suelo es el Intercambio Iónico. A su lado figuran otros procesos de no menor importancia como la estructuración de los granos del suelo, siguiendo patrones que son dictados por condiciones inherentes a cada suelo, para cada entorno ecosistémico donde se encuentre. Como se recordará del Capítulo XIV anterior, es grande el impacto de los coloides, orgánico y mineral en el comportamiento de la Consistencia del Suelo. Amén de las demás funciones marcadas sobre todo para el coloide orgánico y que fueron pormenorizadas en el Cuadro 10 del presente Capítulo.

Finalmente, cabe resaltar que La Fisicoquímica Clásica considera al Fenómeno de Intercambio Iónico, como la segunda reacción fisicoquímica de la mayor importancia como fundamento de la vida en el Planeta, después de la Fotosíntesis, la cual ocupa el primer lugar.

No obstante, su importancia, la discusión y análisis detallado del Intercambio Iónico es más del dominio de un texto de Química de Suelos o de Nutrición de Plantas, algo distantes de los objetivos de este texto.

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO, EXPERIENCIAS EN EL CARIBE COLOMBIANO

Texto de apoyo para un curso de Edafología Física

MÓDULO III: ARQUITECTURA FÍSICA DEL SUELO

Iván Darío Bustamante Barrera
María Isabel Toro Quijano
Mónica Cecilia Cantero Benítez

2022

Estimación de la Velocidad de Infiltración del agua en el suelo. Sede Central Universidad de Córdoba, Montería

Foto: Miguel G. Gamero Cantero. 2016

S U E L O Y A G U A

El planeta había arribado al día
en que tierra y agua se apartaron…
Con Suelito y Juancho Aguas
un buen día se encontraron…

Mirando al cielo pensaron:
¿Qué hacer para dejar huella
en éste hermoso planeta
que nos regaló la vida?

Natura apareció entonces,
diciéndoles:
Yo les tengo la respuesta:
júntense y unidos tengan
alimento y muchos hijos.

Ellos poblarán el mundo
y seguirán aplicando
vuestro muy feliz deseo.
¡Oh grandeza que les veo
en vuestra oportuna intención!

Vosotros seréis las semillas,
el sustento y el motor
de una generación pionera
que se extenderá en el tiempo.
Dando fuerza y fundamento
a la creación entera.
Sencillamente porque
ustedes dos constituyen
el básico y acertado dúo
en el que la vida toda,
se cimienta y funda.

Iván Darío Bustamante B

Ivándebebé

Montería, Córdoba,
Febrero 11/2020.

XVI. AGUA DEL SUELO

"La madre tierra y el agua se unieron
para producir alimento…. Entonces,
surgió el Hombre"

Tradición oral Cogui-Arhuaca, COLOMBIA

Nuestro conocimiento del suelo hasta el momento presente no va más allá de una visión estática del mismo. A esta altura del estudio, nuestro concepto del suelo es el de un sistema poroso, en el cual circulan agua y gases para cumplir funciones fundamentales del comportamiento de la vida, en ese sustrato fundamental para la dinámica de los ecosistemas. La pregunta obligada en este punto se centra alrededor del tema de cómo y en obediencia a cuáles principios ocurren los flujos de agua y gases, antes referidos.

16.1. IMPORTANCIA.

El estudio del Agua en un Curso de Edafología Clásica se fundamenta en que el agua es la sustancia que satisface las demandas evapotraspirativas de la cubierta vegetal (EVPT). Así mismo el agua es el solvente de la solución del suelo, responsable de la turgencia de los tejidos vegetales y de la nutrición mineral de los mismos. Capítulo IX. Como se señaló en el capítulo referido, en la porosidad del suelo, los espacios que no están ocupados por agua, lo están por gases. En consecuencia, el régimen hídrico del suelo regula la aireación del suelo. Capítulo XVII. Adicionalmente, con base a la capacidad calorífica del agua y a su alta conductividad térmica. Capítulo XVIII. El agua es el principal factor regulador del Régimen Térmico del Suelo.

El agua es factor crucial para el desarrollo de los procesos erosivos a los cuales puede estar sometido el suelo, ya que en el caso de la erosión hídrica, las gotas de lluvia que impactan la superficie del suelo, protegido por coberturas vegetales deficientes, ejercen una acción pedoturbadora, la cual termina disgregando los agregados superficiales, cuyos granos, inicialmente, por una parte sellan la porosidad superficial y por ende reducen la velocidad de infiltración del agua en el perfil, incrementando los caudales de escurrimiento, que por un lado pueden generar inundaciones en las zonas bajas del terreno, con riesgo de salinizarlos, y por otra aportan al escurrimiento las partículas de suelo en disposición alta para viajar en dichos caudales, con lo cual se cumplirían las dos fases, desprendimiento y trasporte, del proceso erosivo hídrico.

Finalmente, en la mecánica de la erosión eólica, el agua ejerce un papel central, ya que un suelo húmedo no es viable para volar por acción del viento.

El agua es factor central en la meteorización química de los suelos. Capítulo X, y adicionalmente es protagonista en los procesos de salinización de los suelos. Así entonces, aguas de riego de calidad cuestionable para riego, se constituirán en vectores de salinización. De todas formas, y esto es para remarcar, se hace absolutamente indispensable la evaluación de la calidad del agua que será utilizada para riego, ya que si bien, toda agua contiene minerales en solución, se hace necesario detectar su presencia en el fluido y analizar su posible evolución, una vez ingresadas a la solución del suelo, y lo que es más, su concentración incrementada, cada vez que progresivamente va decreciendo la presencia del agua en el suelo, con el consecuente efecto de concentración salina.

De otra parte, los ascensos freáticos, los cuales serán discutidos más adelante, pueden ser factores de salinización en suelos que se desarrollan sobre antiguos lechos marinos, como ocurre en buena parte del Distrito de Riego Córdoba, Número 1, La Doctrina. Bustamante, 2000; Cantero, 2008.

16.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.

Consecuente con los planteamientos de la Sección anterior, los objetivos del estudio del Régimen Hídrico del suelo deben ser:

1. Estudiar el movimiento del agua sobre y dentro del perfil de suelo.

2. Evaluar la capacidad de imbibición con agua que presenta el medio poroso suelo.

3. Analizar las relaciones de estabilidad con los regímenes gaseoso y térmico del suelo

4. Discutir la captura y asimilación de la humedad edáfica por las plantas.

16.3. AGUA Y HUMEDAD.

Es pertinente en este nivel de la discusión, hacer claridad entre los conceptos de agua y humedad. Se conoce como agua a la molécula conformada por dos átomos de Hidrógeno que hacen un ángulo de 103º a 106º con un átomo de Oxígeno. Figura 148

El agua es una sustancia prácticamente ubicua, pues se encuentra desde una profundidad cercana a los 10.2 Km., dentro de la corteza terrestre. Sobre la superficie

del globo, más del 99% del agua terrestre se ubica en la troposfera, 0 a 15 Km., Más alto. De 15 a 30 Km., en la estratosfera, se encuentra poca agua, siempre en estado sólido

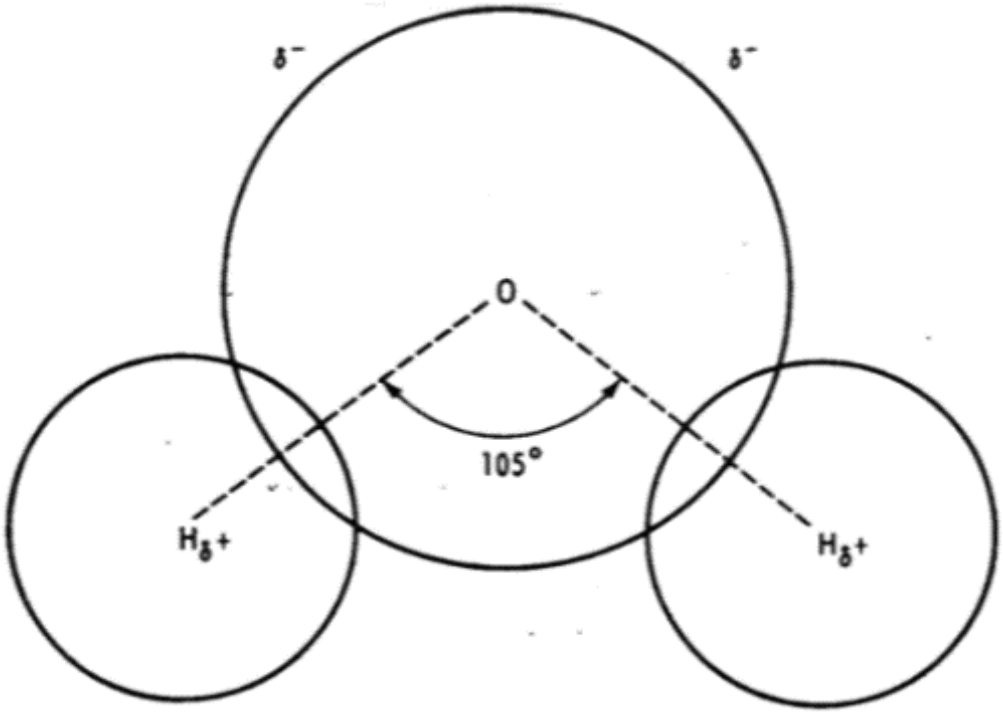


Figura 148. Presentación esquemática bidimensional de una molécula de agua. Tomado de Kohnke, 1975.

(hielo), formando parte de las masas nubosas. Luego, de 30 a 80 Km., desde la superficie del Planeta, en la quimosfera, debido a la intensa radiación de onda corta en esos confines, la molécula no puede existir como tal, por lo cual se encuentra en forma de átomos de Hidrógeno y Oxígeno. A alturas superiores a los 80 Km., se da la ionosfera, donde, debido a la pérdida de electrones en esos lugares, los tres átomos de los dos constituyentes de la molécula clásica se ionizan.

El volumen ocupado por una molécula de agua está prácticamente determinado por el volumen del ion Oxígeno. Los dos Hidrógenos ocupan un espacio bastante exiguo, por lo cual, la esfera que ocupa la molécula alcanza a tener un diámetro aproximado de 2.67 Å, pero dicha molécula presenta la particularidad de que, debido a que los dos hidrógenos solo neutralizan parcialmente la electronegatividad del oxígeno, cada hemisferio de la esfera que se discute, presenta una predominancia de carga positiva o negativa, por lo que el agua exhibe comportamiento dipolar. Figura 149.

Debido al carácter dipolar de la molécula de agua, se dará la situación de que el lado positivo de la misma se atraiga con el extremo negativo de su vecina, por lo que cualquier volumen de agua líquida que se observe, en realidad es un polímero gigante el cual se dispondrá en látices hexagonales que tendrán un comportamiento de red, en la cual cada molécula está firmemente unida a sus vecinas, mediante los enlaces H^+ que se dan entre ellas. Figura 149 y Tabla 17.

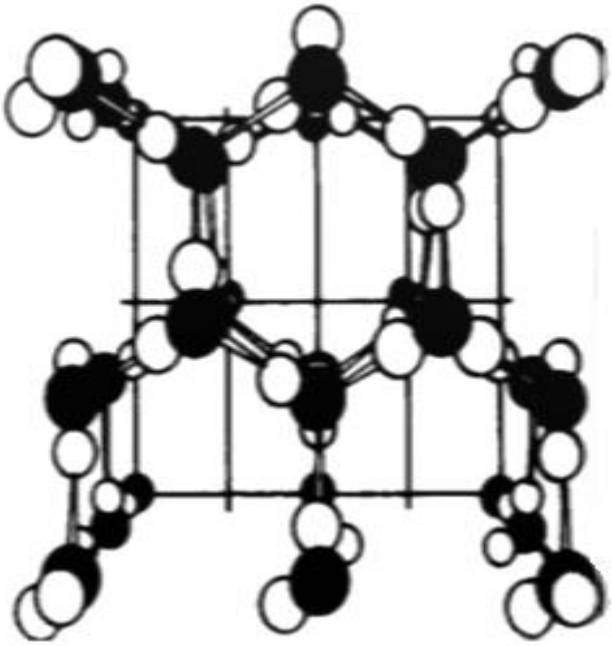


Figura 149. Presentación esquemática de un cristal de hielo. Los átomos de Oxígeno se muestran en color negro, y los de Hidrógeno en blanco. Los "brazos" que unen las moléculas adyacentes, representan a los enlaces Hidrógeno. Tomado de Kohnke, 1975.

Debido a la alta resistencia de los enlaces H^+, el punto de fusión, el punto de ebullición, la constante dieléctrica, el calor específico y la viscosidad son demasiado altos en comparación con los de otros compuestos de igual, y aún mayor peso molecular. Igualmente, debido a tales enlaces el agua es líquida a las temperaturas ambientales comunes, y no un gas.

Tabla 17. NIVELES DE PERSISTENCIA DE ENLACES H^+ A TRAVÉS DE LOS DIFERENTES ESTADOS FÍSICOS DEL AGUA, Kohnke, 1975.

Temperatura (ºC)	Estado Físico	% de Enlaces H^+
0	Hielo	100
0	Agua Líquida	85
40	Agua Líquida	>50
100	Vapor de Agua	>10

También debido a los enlaces Hidrógeno, como ya se mencionó, se da el arreglo molecular en látices hexagonales, como puede observarse en un trozo de hielo. Figura 148, estado físico en el cual, prevalecen las estructuras hexagonales referidas, mismas que son responsables de que el hielo tenga una densidad tan baja (0.917 g/cc). A medida que se le aplica calor al hielo, comienzan a colapsar los enlaces Hidrógeno, permitiendo que las moléculas se aproximen progresivamente y comiencen a ser gobernadas gradualmente, por las Fuerzas de van der Waals'. Con la energía aplicada al hielo se incrementa la energía cinética del sistema, y cada vez, las moléculas se aproximan más, por lo que la densidad irá incrementándose hasta su valor máximo de 1 g/cc, misma que alcanza a la temperatura de 4ºC, a partir de ese nivel, hasta las temperaturas ambientales comunes, la variación de la densidad es bien poca, entre 1 g/cc a 4ºC y 0.988 a 50ºC (Valle de La Muerte, Desierto de Atacama, Chile- Perú). Finalmente conviene aclarar que la energía que se invierte para lograr los cambios de estado del agua se aplica a la construcción o al colapso de los enlaces H^+. Con el fin de recalcar la importancia de los multicitados enlaces Hidrógeno conviene aquí citar que, mientras otros gases como el Oxígeno, el Nitrógeno y el Dióxido Carbónico logran traspasar una película delgada de polietileno, el vapor de agua no lo logra, con lo cual se demuestra la permanencia de algunos de tales enlaces, aún en la fase de vapor del agua.

Retomando el tema de las estructuras moleculares hexagonales, es pertinente aquí recalcar que, cuando el agua se aproxima a una superficie cargada eléctricamente, como son las coloidales, cada molécula recupera sus enlaces de Hidrógeno, debido a la reducción que se opera en su energía cinética, ante la vecindad de una superficie cargada, como son las partículas de arcilla y humus del suelo. Esta situación impactará sensiblemente a la viscosidad del agua en esas vecindades, y por tanto a las velocidades que pueda alcanzar su flujo en ese punto del suelo.

Volviendo al punto relativo a los fenómenos de adhesión y cohesión que se dan en el agua, y en particular en el agua que discurre por el sistema poroso del suelo. Figura 134, Capítulo XIV, se tendrá que establecer obligadamente que entre el agua y el suelo se dará una atracción, por el fenómeno de adhesión, y a su vez, la masa de agua ubicada en un poro se mantendrá unida por el fenómeno de cohesión. Pero a un perfil de suelo podrán aplicarle tales niveles de adición de agua, que parte de esa agua adicionada no alcanzará a cohesionarse con las láminas de agua preexistentes y definidas, y quedarán a merced de las fuerzas de gravedad, por lo que desarrollarán un flujo predominantemente vertical, buscando el nivel freático del suelo[33]

…….

33. NIVEL FREÁTICO DEL SUELO: Dícese de la superficie de la masa de agua libre, conocida como agua freática, la cual está gobernada por la presión atmosférica y se ubica en forma subyacente a la "ZONA DE AIREACIÓN DEL SUELO", en la cual coexisten sólidos, líquidos y gases. A diferencia de la ZONA FREÁTICA, donde solo coexisten sólidos y líquidos.

Es aquí, donde se debe diferenciar entre agua del suelo y humedad del suelo, esta última es, aquella fracción del agua ocurrente en el perfil, y sobre la cual, la matriz del suelo ejerce una atracción física por una combinación de los fenómenos de adhesión y cohesión, y gracias a los enlaces H^+ ocurrentes en el agua. En tanto que el agua del suelo es aquella que se puede encontrar en el perfil, sin estar sometida a ninguna atracción tangible ejercida por la matriz sólida del suelo.

16.4. PRIMERA APROXIMACIÓN AL RÉGIMEN HÍDRICO DEL SUELO.

La primera aproximación al estudio de este régimen parte de un suelo seco en el campo. Por ejemplo, un perfil de suelo en las sabanas de Córdoba, Sucre y Bolívar, a finales del mes de marzo, o comienzos del mes de abril, últimos días de la temporada seca en el Caribe, húmedo a seco.

Hipotéticamente, ahora se precipita sobre el campo en referencia un aguacero de baja intensidad y duración prolongada. Comenzarán entonces a colmarse de humedad los poros más finos. Satisfaciéndose finalmente los poros más grandes, en ese momento comienza el suelo a presentar el denominado “Flujo de pistón”, en virtud del cual, cada centímetro cúbico de agua que ingresa al perfil implica el desplazamiento de un volumen idéntico de agua desde el perfil hacia las aguas freáticas. En dicho instante se dirá que el suelo ha llegado a su máxima capacidad de contención de agua, o como es conocido más técnicamente, el suelo ha llegado a su Punto de Saturación con Agua (PS).

Continuando nuestra exposición hipotética, se dirá que una vez el suelo alcanza su PS, simultáneamente cesa la precipitación. Y, por tanto, seguidamente se presenta una fase de drenaje rápido del suelo. En desarrollo de tal fase será normal observar caudales significativos en los canales de drenaje circunvecinos al campo, y hasta en las corrientes del sistema natural de drenaje, cercanos al campo que se describe.

Esta fase, dependiendo de la textura y la estructura de los diferentes horizontes del perfil de suelo, tendrá una duración que oscila entre 24 y 96 horas. Una vez ha terminado la fase de drenaje rápido, el suelo alcanza el punto donde se da su máxima capacidad retentiva, a la cual se conoce como Capacidad de Campo (CC). En ésta el suelo comienza a mostrar una “cierta” atracción de la matriz del suelo por el agua que ahora es retenida en el interior de sus meso y microporos, ya que en este instante los macroporos ya han cedido su humedad, por lo cual a dicha macroporosidad, vaciada por

drenaje, se le conoce como porosidad drenable. Otro hecho que debe destacarse en este punto es que hasta este momento (CC), el flujo del agua en el perfil de suelo ha sido predominantemente vertical, como que es agenciado por la gravedad. A ese flujo se le conoce como Flujo Saturado o Percolante. A partir de la CC entonces el flujo se hace insaturado y multidimensional, en el cual la humedad se mueve en obediencia a diversos gradientes de humedad, que serán discutidos más adelante, y que se registran en diferentes direcciones dentro del sistema poroso anisotrópico que es el suelo.

Como no se han registrado más precipitaciones. La cobertura vegetal que cubre el suelo bajo estudio debe suplir progresivamente sus requerimientos evapotraspirativos con la humedad almacenada, casi que totalmente, residente en la microporosidad del suelo. Así las cosas, trascurrido un tiempo variable y dependiente del clima y de las especies presentes en la cobertura vegetal del sitio, llegará una tarde en la cual el observador podrá detectar síntomas de sequía en la vegetación. Sin embargo, al día siguiente, merced a fenómenos de condensación de humedad ambiental ocurridos durante los picos de temperaturas bajas acaecidos en la noche, las plantas lucirán “aparentemente” recuperadas del estrés de humedad que mostraban la tarde anterior. No obstante, llegará una mañana en la cual para el observador no ocurrirá ninguna recuperación del estrés referido. Se dirá entonces que la humedad del suelo ha arribado al Punto de Marchitez Permanente (PMP). Se establece entonces que, en tal nivel de humedad no sobreviven las plantas superiores.

Sin embargo, la dinámica de la humedad del suelo no termina en este punto. En el PMP aún existen algunas láminas discontinuas de humedad en la microporosidad del suelo. Y gracias a ellas sobrevive la biota de este, al igual que las xerófitas y halófitas que cubren buena parte de las áreas desérticas. Más llega luego un grado de abatimiento tal, en el cual el flujo de agua en forma líquida queda totalmente inhibido, en razón a la altísima discontinuidad de las películas acuosas. En este punto, conocido como Coeficiente Higroscópico (CH) la humedad relativa de la atmósfera del suelo, que desde un poco antes del punto de CC venía en 100%, cae por debajo de tal guarismo, dando paso a los flujos de vapor de agua, retenida en estos momentos por las llamadas superficies higroscópicas. Capítulo XIII. Esta es la razón de la supervivencia de muchas especies que medran en los desiertos.

16.4.1. La Succión del Suelo por el Agua.

De todas formas, a partir de la Capacidad de Campo (CC), se hace tangible la existencia de una succión (τ: Tao), esto es, la fuerza inversa, o presión negativa que las partículas del suelo ejercen sobre la humedad retenida en los poros de este. Como

presión negativa que es, la succión (τ) se expresa en unidades de presión, esto es, atmósferas, bars, cm. H_2O, Pa. Entre las cuales es posible establecer las siguientes equivalencias:

10 cm H_2O = atm / 100 = 10 mb
100 cm H_2O = atm / 10 = 100 mb
1000cm H_2O = 1 atm = 1 bar
1 mbar = 100 Pa
1 bar = 10^5 Pa = 10^2 Kpa
15 bar = 15 X 10^2 KPa

Adicionalmente, la succión (τ) del suelo se mide también, sobre todo en la literatura Edafológica Norteamericana en términos de pF, una función p, que al igual que el pH implica a un logaritmo. En este caso se define el pF, como el logaritmo de la succión del suelo, expresada en centímetros de agua. Así entonces τ = 10000 atm. = 10000 bars = 10000000 cm H_2O = 10^7 cm H_2O, será equivalente en términos de pF a:

$$pF = \text{Log } 10^7 = 7$$

Este sería el pF de un suelo seco a la estufa (SS = OD). A medida que dicho suelo gane humedad, los valores de pF decaerán. El inconveniente se tiene cuando el suelo llega a la saturación (τ = 0), por lo que el pF será

$$pF = \text{Log } 10^0 = \text{Log } 1 = ----$$

Esto es, indeterminado matemático. Lo cual le resta viabilidad a este índice de succión (τ) del suelo.

16.4.2. Dinámica de Humedecimiento del Suelo.

Retomando el tema de la dinámica del humedecimiento progresivo del suelo, se remite al lector a la Figura 150.

Como puede apreciarse en la Figura 150, en el PS, el contenido gravimétrico de agua en el suelo, θ_g, esto es, la cantidad de gramos de agua presentes por cada 100 gramos de suelo seco a la estufa. Tº > (105 – 110) º C /24 horas, es de 40%. En la capacidad de campo, θ_g = 20%. Y en el PMP, θ_g = 10%. Y finalmente, en el CH, θ_g = 8%.

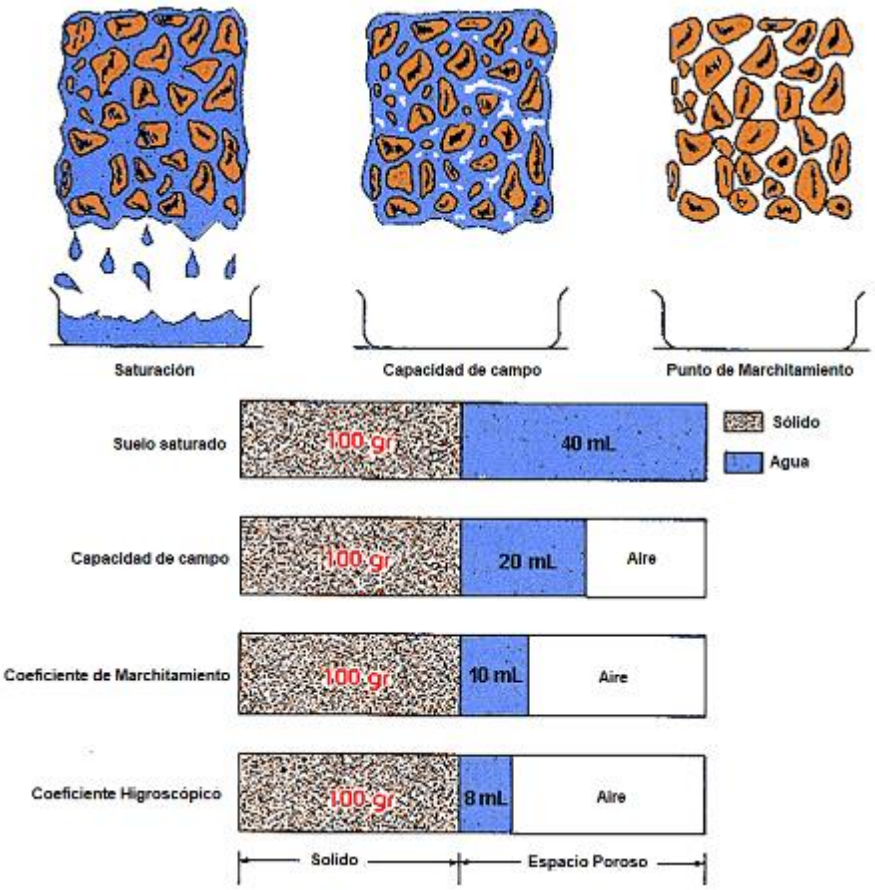


Figura 150. Presentación esquemática de las diferentes “Contantes de Humedad del Suelo”. Tomado de N.C. Brady,1984.

Debe aclararse aquí, que cuando un suelo es sometido al secado en estufa, a temperaturas máximas de (105 – 110) º C, por un período mínimo de 24 horas. A la condición hídrica del suelo que se extrae de la estufa, para pasarlo inmediatamente a un desecador, buscando enfriarlo, en ausencia de adsorción de humedad ambiental, se le conoce como Suelo seco a la estufa (SS) u (OD), por la expresión “Oven Dry”: “Seco a la Estufa”. Figura 151

De otra parte, en la figura 151, se esquematiza la marcha del humedecimiento progresivo y posterior saturación del medio poroso suelo. En ella se observa la ubicación del agua gravitacional, en los sitios más alejados de las superficies sólidas de los poros.

En la Figura 152 se señalan la sucesión del fenómeno de cohesión entre moléculas de agua, después de que la primera capa mono-molecular del dipolo se adsorbe, por adhesión física sobre la superficie del grano de suelo, Figura 134, Capítulo XIV, y posterior y sucesivamente los puentes de Hidrógeno se hacen responsables de la expansión de la zona de cohesión, la cual en su periferia. Cuando la Succión (τ) ,

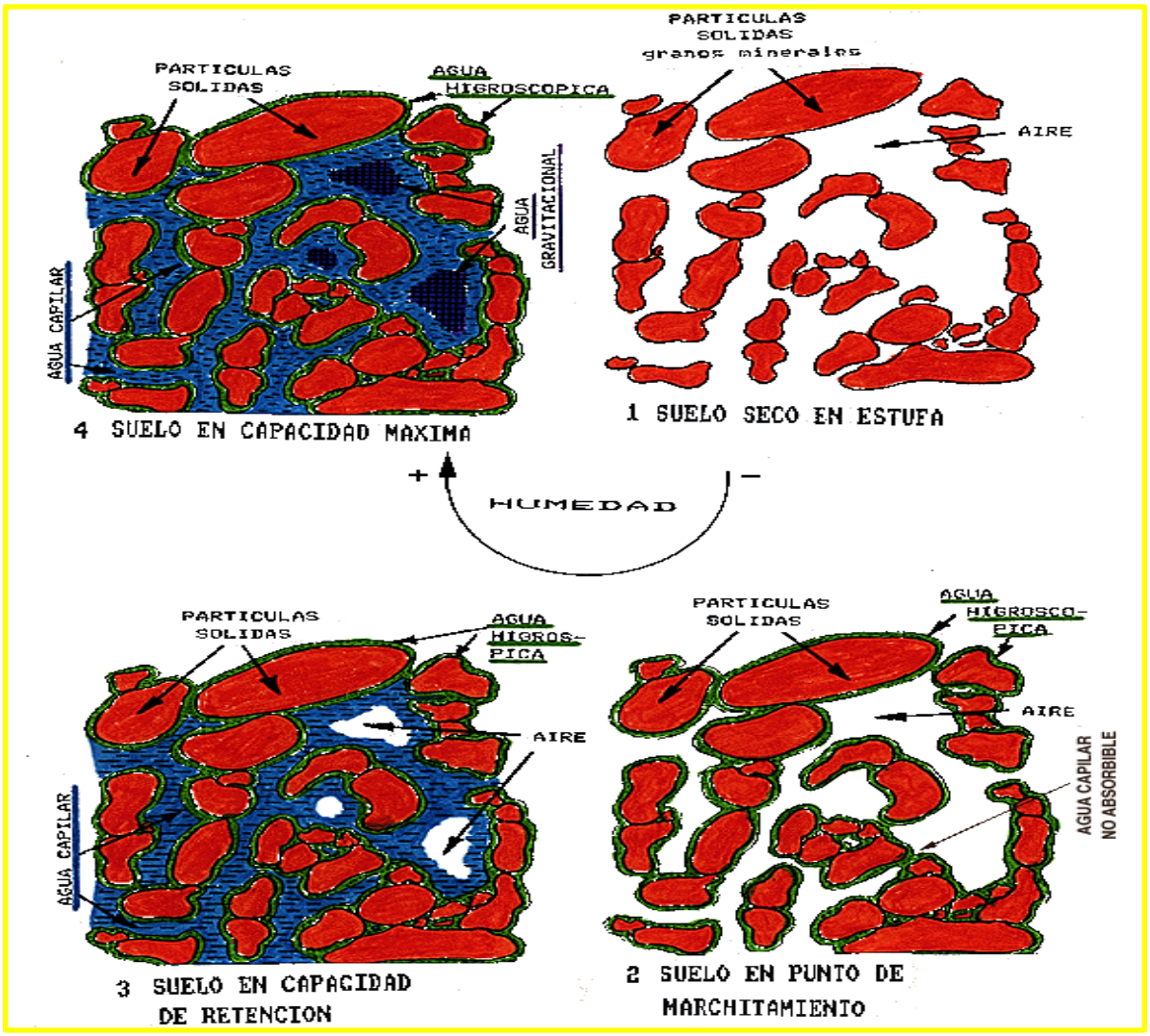


Figura 151. Presentación esquemática de la marcha progresiva del humedecimiento y posterior saturación del Suelo. Nótese como el agua gravitacional se ubica en los puntos más distantes de las superficies porales. Gráfica tomada de Internet.

en la interfaz agua: aire se aproxima a un valor de 0.3 atmósferas en suelos arenosos, abundantes en macroporosidad. O de 0.1 atmósferas en suelos arcillosos, de baja porosidad macro. Entonces se arriba a la Capacidad de campo (CC). Y la Gravedad supera a la fuerza ejercida por lo enlaces Hidrógeno, y las moléculas de agua que llegasen a ingresar al poro, a partir de este instante, se moverán descendentemente por acción del flujo percolante.

En atención a la alta variabilidad textural de los suelos, y por conveniencia de la Ingeniería de Riegos. Se ha acordado fijar como Constante de Humedad o Punto de Referencia, para comparación entre los diferentes suelos a la CC, como la Humedad Gravimétrica (θ_g) que se registra al nivel de Succión matricial (τ_m) de 0.3 atmósferas.

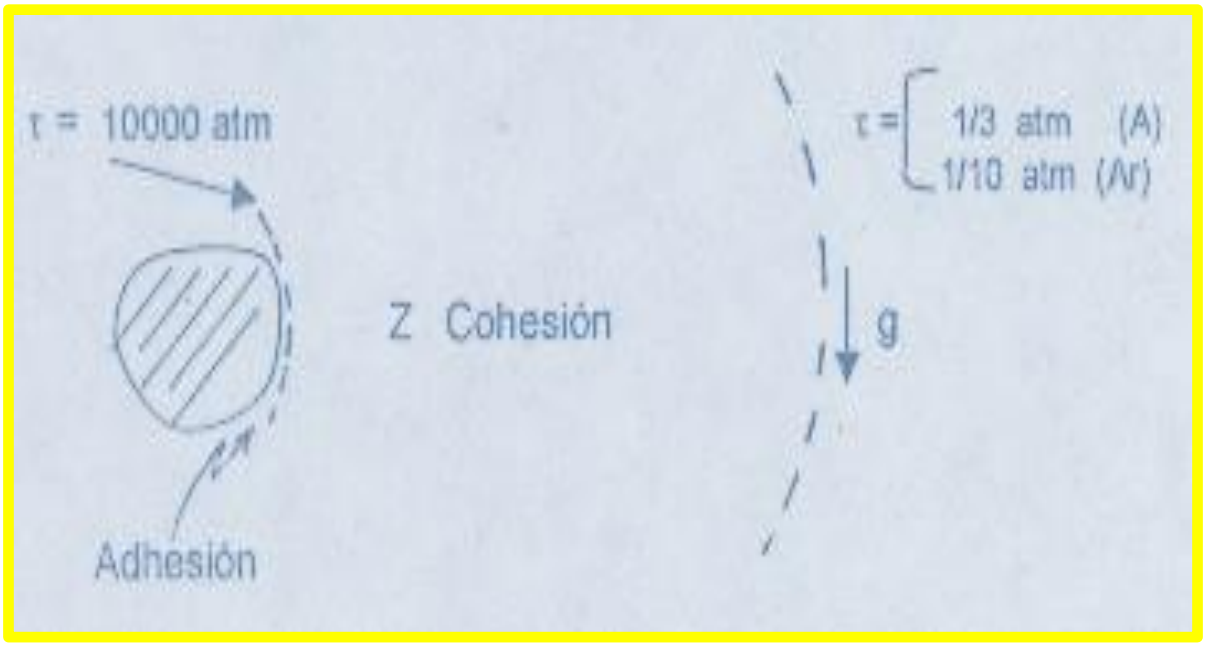


Figura 152. Presentación esquemática de la marcha progresiva del humedecimiento y posterior saturación del Suelo. Nótese como el agua gravitacional se ubica en puntos muy distantes de las superficies porales. Gráfica elaborada por I.D Bustamante B. 1996

16.4.3. Las "Constantes" de Humedad del Suelo.

Se denominan "Constantes" de humedad a los diferentes hitos, como ya se ha discutido, bastante dinámicos, por cierto, a través de los cuales se desenvuelve el proceso de humedecimiento del suelo. Más sea esta la ocasión para aclarar que, en la realidad, la dinámica del régimen hídrico del suelo está configurado por una serie continua de humedecimientos y secamientos. Por lo que, en realidad, las constantes en cuestión se constituyen más bien en puntos de referencia para los ingenieros de Suelos y de Riegos. Por tanto, en el esquema de la Figura 153, la marcha del Régimen Hídrico del Suelo puede ir en ambas direcciones. De izquierda a derecha, en el proceso de humedecimiento. O de derecha a izquierda cuando se entra al trascurso del secamiento.

Con relación a la misma Figura 153, y enfocados en la anotación que se hace en su esquina inferior izquierda acerca de la Humedad Equivalente. Es necesario aclarar que, dada la dificultad que entraña la estimación en el terreno de la Capacidad de Campo. Briggs y McLane (1907 – 1910) citados por Kohnke, 1975 propusieron estimarla mediante dicho Índice, el cual se logra por centrifugación durante 40 minutos, de una muestra de suelo desterronada que ha pasado el Tamiz Nº 10 (Ø = 2mm.) y se ha saturado con agua, antes de someterla a una fuerza centrífuga de mil veces la gravedad.

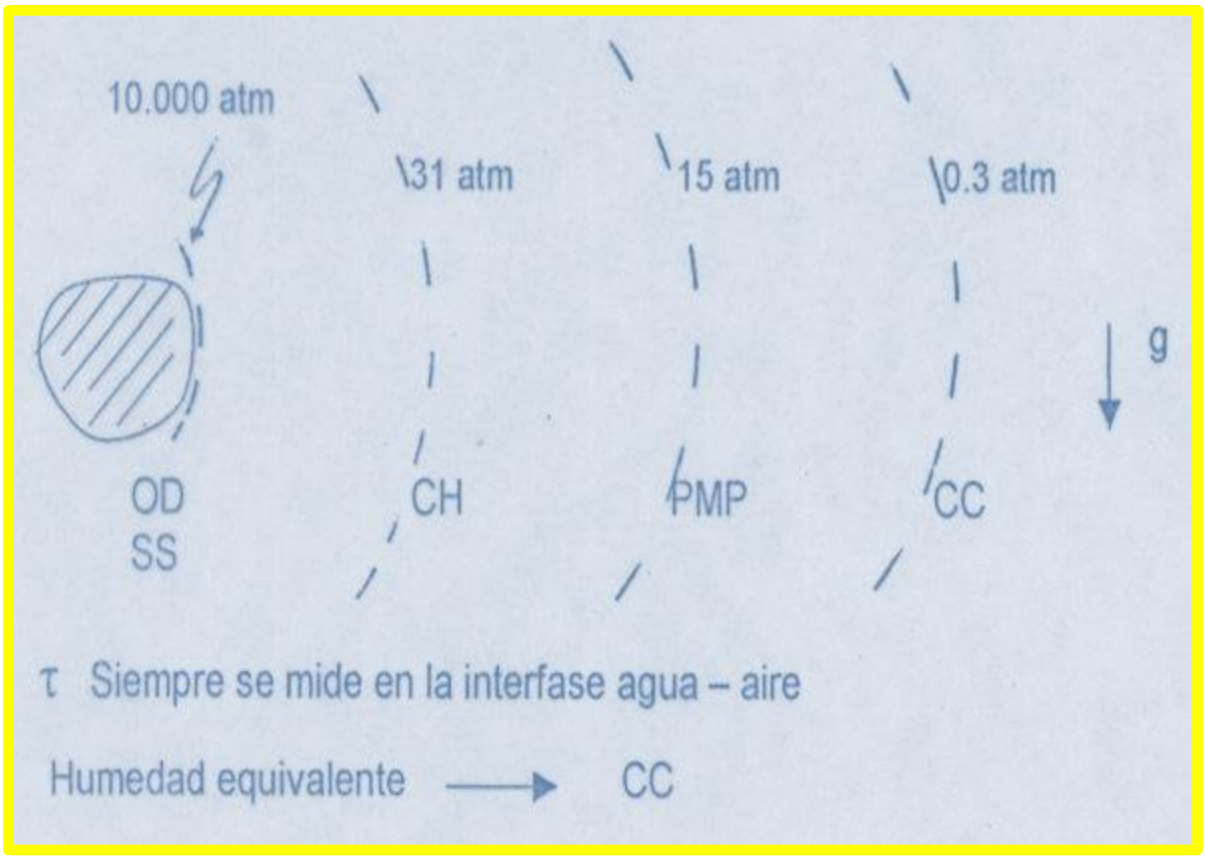


Figura 153. Presentación esquemática de las Constantes de Humedad del Suelo. Gráfica elaborada por I.D Bustamante B. 1996.

16.5. CLASIFICACIÓN FÍSICA DEL AGUA DEL SUELO.

La Clasificación Física del Agua del Suelo apunta al ordenamiento de los diferentes niveles de hidratación del mismo, desde el punto de vista de los procesos físicos que gobiernan al fluido en el medio poroso suelo. Haciendo caso omiso de la vegetación y la fauna que pueden habitar de y en ese perfil. Así entonces, será común oír hablar de agua libre, capilar, higroscópica y de cristalización. Estudiémoslas en detalle:

1. Agua Libre, es al agua retenida a succiones inferiores a 0.1 bares ($\tau <$ 0.1 bares), razón por la cual resulta gobernada por la fuerza de la gravedad y por la presión atmosférica.

2. Agua Capilar, es al agua gobernada por los principios de la capilaridad, y se registra entre la Capacidad de Campo y el Coeficiente Higroscópico (τ = 0.1 - 31 bares)

3. Agua Higroscópica, es el agua gobernada por los flujos que buscan equilibrar los gradientes de Presión de vapor de agua, y se registra entre el Coeficiente Higroscópico (CH) y el nivel de suelo seco a la estufa (SS = OD) (τ = 31-10000 bares).

4. Agua de Cristalización o Constitutiva, hace referencia al agua que es extraída de una muestra de suelo a temperaturas superiores al rango de 105 - 110 ºC, la cual no es más que el agua de hidratación de algunos minerales del suelo, con lo cual se produce una alteración mineralógica de la muestra en referencia. (Tº > (105 - 110) ºC)

En la Figura 154 se hace una representación esquemática de la discusión anterior. En ella la nominación EPT, hace relación al Espacio Poroso Total de un suelo, a lo largo de la profundidad de su perfil. El cual, como se tiene establecido se reducirá progresivamente con el incremento de la última.

16.6. CLASIFICACIÓN BIOLÓGICA DEL AGUA DEL SUELO.

A diferencia de la Clasificación Física, recientemente analizada. En esta clasificación se hace énfasis en los niveles de agua en el suelo, como recurso vital que es para la supervivencia de las plantas superiores y para la biota del suelo.

Así entonces, en esta Clasificación es común hablar de agua superflua, asimilable o aprovechable y, no asimilable o no aprovechable. Comencemos la discusión detallada de cada una de ellas, así:

Agua Superflua: Es el agua presente en el suelo a niveles de humedad gravimétrica (θ_g) superiores a la capacidad de campo (CC), por lo cual resulta tener una presencia fugaz en el perfil y consecuentemente es el agua que se utiliza en el lavado de los suelos afectados por niveles críticos de sales solubles.

1. Agua Asimilable: Corresponde al agua contenida entre la Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchitamiento Permanente (PMP). También se le conoce como Humedad Aprovechable (HA). Obviamente este concepto está enfocado a las plantas superiores, no teniendo en cuenta en ningún momento a otras plantas como las Xerofitas y Halófitas. Aquí es conveniente aclarar que, si bien una planta superior sobrevive hasta el PMP, el efecto del estrés de humedad sobre la fisiología y la morfología de la planta se hace tangible después de que se ha consumido entre un 30% y un 50% del agua en referencia, dependiendo del material genético que se trate. Por tal razón, desde la visión de la Ingeniería de

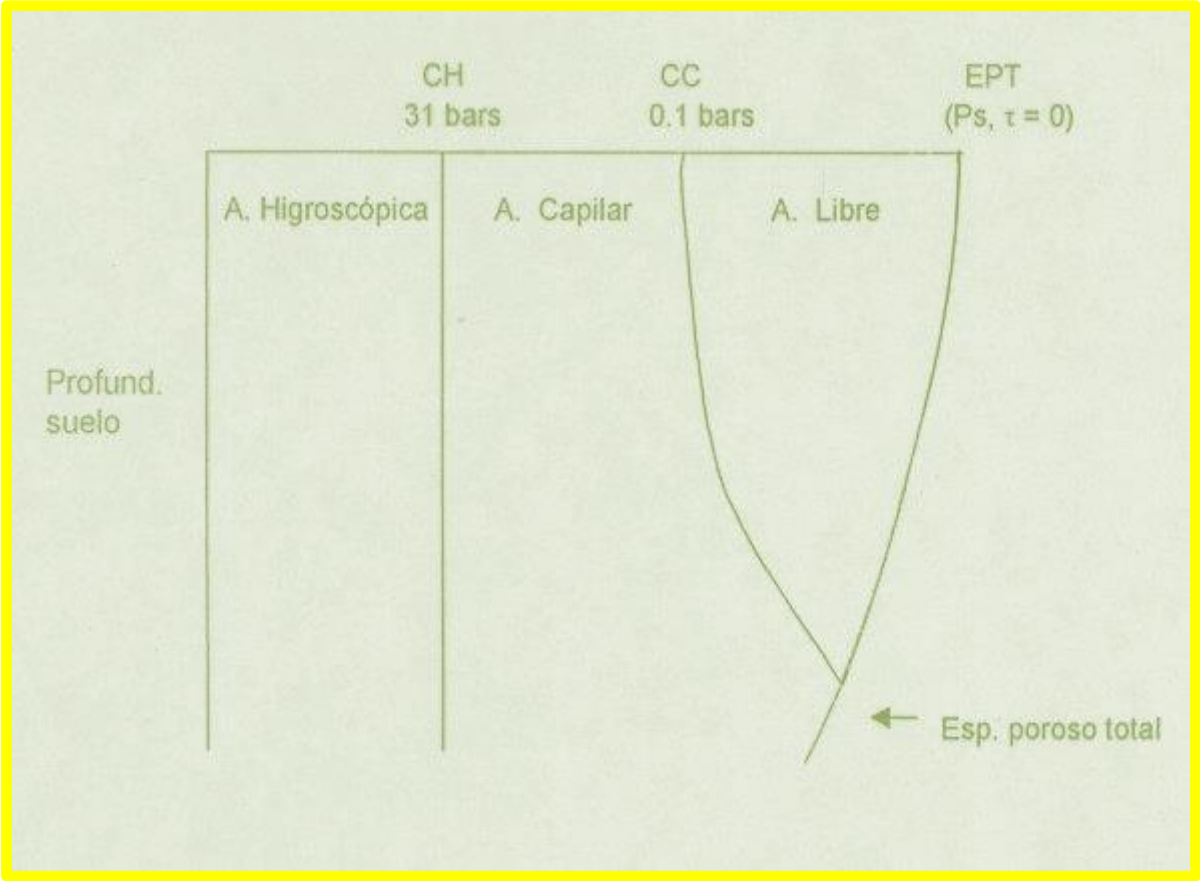


Figura 154. Presentación esquemática de la Clasificación Física del Agua del Suelo. Gráfica elaborada por I.D Bustamante B. 1996.

Riego se aporta un concepto, cual es el de Umbral de Riego (UR), mismo que se define como “El máximo abatimiento permisible en el Agua Asimilable del suelo, de tal forma que no se comprometa el rendimiento final de cada planta”. Este Índice, como ya se ha establecido, pertenece a la Ingeniería de Riego y no a la Física de Suelos y depende de varios factores como: Tipo de planta, variedad o híbrido, período fenológico en curso, clima y posibilidades de riego.

2. Agua No Asimilable: Corresponde al agua presente en el suelo, a niveles inferiores a la humedad gravimétrica (θ_g) correspondiente al PMP, y hasta el Punto de Suelo Seco (SS = OD). Cabe aclarar aquí nuevamente que se está haciendo referencia nuevamente a las plantas superiores, incapaces de asimilar esta agua, que a la par, resulta consumible para xerófitas, halófitas y biota del suelo.

16.6.1. Factores que Afectan la Calidad y el Uso de la Humedad Aprovechable.

Son diferentes los factores involucrados en el uso y la calidad que de él ejerza cada planta. Así entonces, se tendrán tres grupos de factores, distribuidos entre los tres aspectos: Planta, clima y suelo. Veamos:

16.6.1.1. Factor Planta.

Aquí se consideran factores de cada especie, relacionados con la evapotranspiración (EVPT), cuales son:

1. Patrón de Raíces: La morfología del patrón radical de cada planta, marcará de forma definitiva la eficiencia en el “pastoreo” y aprovechamiento que ella haga de la Humedad Aprovechable.

2. Resistencia a la sequía: Cada especie, y aún más, cada material genético de cualquier especie, en virtud de ciertas condiciones relacionadas con la suculencia de sus tejidos, su velocidad de apertura y cierre de estomas, y la morfología, inserción y características de sus superficies foliares, aprovechará y hará un uso más eficiente del agua que circula por sus haces vasculares.

3. Hábito y tasa de crecimiento: A través de toda su existencia, cada planta presenta diferentes períodos fenológicos, caracterizados cada uno de ellos por diferentes demandas hídricas. Generalmente los períodos de floración se caracterizan por su criticidad en dicho aspecto.

16.6.1.2. Factor Clima.

Aquí se hace referencia a una serie de condiciones climáticas estrechamente relacionadas con la dinámica de la evaporación característica de cada región, a saber:

1. Temperatura Ambiente: Factor preponderante en la dinámica de la evaporación en cada región, como expresión que es del potencial de evaporación que pueda presentar cada región.

2. Humedad Relativa Ambiental: Expresión del déficit de humedad ambiental que presenta la atmósfera de cada sitio, como factor responsable de la generación de gradientes de Presión de Vapor de Agua, entre las células vegetales más cercanas a la epidermis foliar y el microambiente que rodea a cada planta.

3. Vientos: Su frecuencia, duración y velocidad resultan cruciales en el desempeño de la dinámica de evaporación de cada sitio, como que es agente de cambio permanente en las condiciones de temperatura y humedad relativa en todos los puntos del microclima que rodea a cada planta.

16.6.1.3. Factor Suelo.

En este aspecto nuestra atención se centra en temas tales como la textura, la estructura y el tenor de materia orgánica de un suelo, factores de vital importancia en las relaciones hídricas del suelo, tales como:

1. Relaciones de Succión (τ) : En la Figura 155 se presentan en forma de Humedad Gravimétrica (θ_g) en forma porcentual (%) en el eje ordenado izquierdo, y (θ_g) expresados como centímetros de agua por pie cúbico de suelo, en el eje ordenado de la derecha, a través de seis texturas que gradan desde la arenosa a la arcillosa, siguiendo el eje de las abscisas.

   Aunque lo más común en el campo sea encontrar texturas intermedias entre las que se presentan en la gráfica en referencia. Cabe resaltar del análisis de la misma, que a medida que se reduce el diámetro de los granos del suelo, se incrementan la Capacidad de campo (CC), el Punto de Marchitamiento Permanente (PMP), la Humedad Aprovechable (HA) y la Humedad no Aprovechable (HNA) y se reduce el Agua Superflua (AS). En resumen, a medida que decrece el diámetro de las partículas, se incrementa la eficiencia del suelo en el manejo de su Régimen Hídrico, y de su potencialidad como medio de vida.

1. Presencia de Sales: El Esfuerzo de Humedad del Suelo (EHS) se expresa como:

   $$EHS = \Psi h + \Psi g + \Psi m + \Psi o$$
   Saturación Insaturación

   Donde:

   Ψh = Potencial Hidrostático del Agua del Suelo.
   Ψg= Potencial gravitacional del Agua del Suelo

   Ψm= Potencial que ejerce la Matriz del Suelo sobre el Agua retenida en los Poros del Suelo.

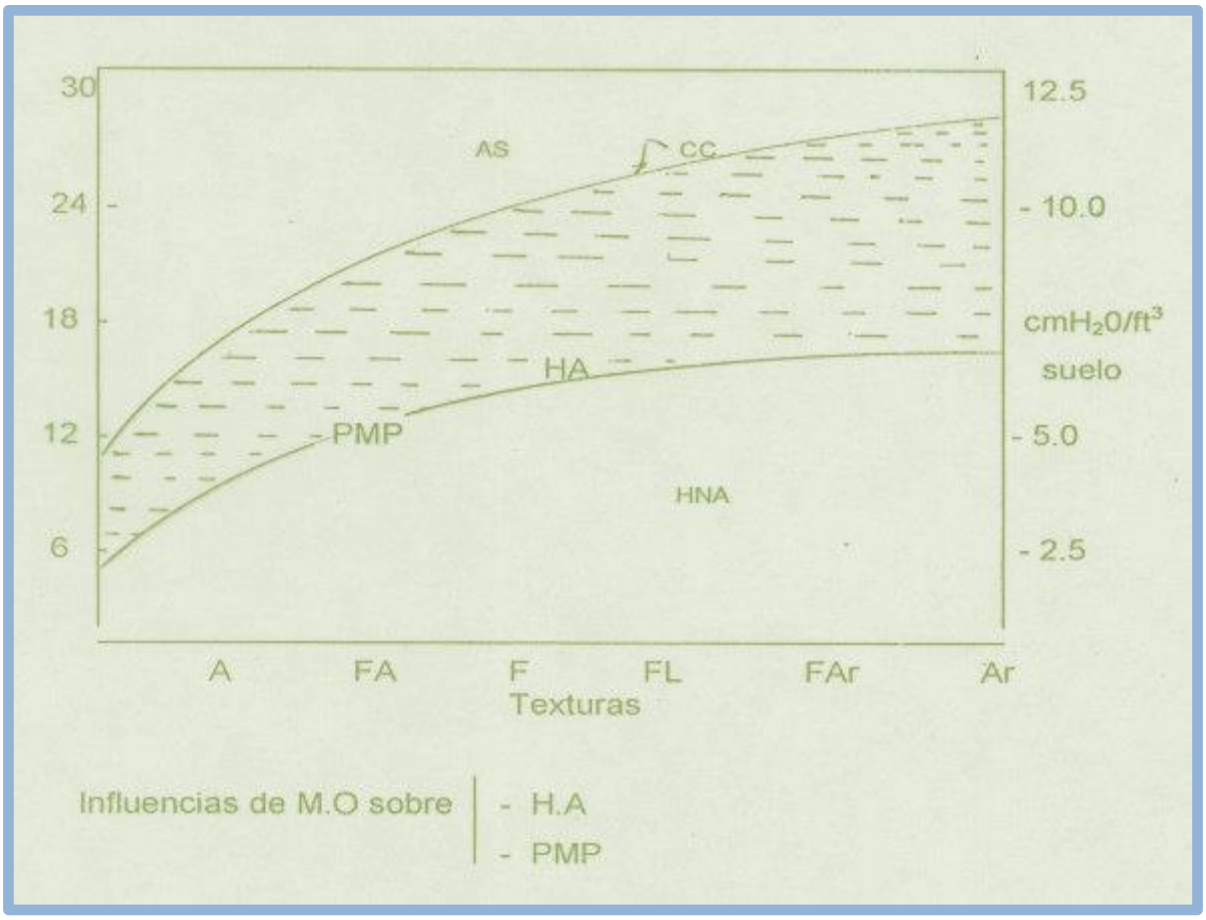


Figura 155. Presentación esquemática de las Relaciones de Succión a través de diferentes texturas. Gráfica elaborada por I.D Bustamante B. 1996.

El Esfuerzo de Humedad del Suelo debe entenderse como el conjunto de fuerzas que actúan en un momento dado, sobre cada partícula de agua presente en el mismo. Y consecuentemente afectan la movilidad del fluido en ese medio poroso.

Considerando inicialmente la condición de saturación del suelo con agua. Los poros en dicha circunstancia de saturación funcionarán como tuberías. La presencia de aire es nula en el sistema, y por tanto el agua tendrá un comportamiento similar al del mismo fluido contenido en cualquier depósito superficial, sometido a fuerzas de tipo gravitacional e hidrostático.

En el momento que entra aire al sistema poroso, el suelo ha ingresado a la condición de insaturación. Los poros comienzan a comportarse como canales. Las fuerzas gravitacionales e hidrostáticas se nulifican. Y el agua pasa a estar gobernada por las atracciones o succiones de tipo matricial (τ_m) y osmótico (τ_o), mismas que se incrementan progresivamente a medida que se acentúa la insaturación.

Para una aproximación a los conceptos de succiones de tipo matricial y osmótico, partiremos del concepto de Fracción Molar de Energía Libre de una Sustancia (FMEL). Comenzaremos definiéndola al decir que ella es la tendencia a escapar, reaccionar o cambiar que presenta una sustancia bajo unas condiciones determinadas. En el caso del agua debe decirse que ella ejerce sus influencias en el suelo, las plantas y todo el ecosistema en función de su FMEL.

La Fracción Molar de Energía Libre del Agua (FMELA) es función del Contenido Gravimétrico de Humedad del suelo (θ_g); la atracción del suelo por el agua, (Ψm) o (T_m); la temperatura y el contenido de sustancias disueltas en la solución del suelo. Así, mientras mayor es el contenido de humedad (θ_g), menor la atracción del suelo por el agua, (Ψm) o (T_m); mayor la temperatura del suelo y menor la concentración de solutos en la solución del suelo, mayor será la Fracción Molar de Energía Libre del Agua (FMELA).

La visión de Fracción Molar de Energía Libre del Agua (FMELA) permite analizar las diferentes relaciones ecosistémicas del fluido con el suelo, las plantas y la atmósfera. Así entonces, si se considera una FMELA = 0, en la superficie de un depósito de agua, se tendrá que aceptar que, por debajo de dicha superficie, la FMELA será mayor que cero, y estará dominada por la atracción de la gravedad y por el peso de la columna de agua que se ubica entre el punto en consideración y la superficie del depósito.

Ahora, si consideramos el agua retenida en un poro del suelo, tendremos que decir que la FMEL de dicha agua es menor que cero, además, si el agua en referencia se encuentra en un macroporo su FMEL se ubicará, siempre menor que cero, pero muy cercana a ese valor. En tanto que sí el agua en consideración se aloja en un microporo, o aún más, en una superficie higroscópica su valor continuará inferior a cero y muy distante de él. En resumen, entonces, el agua retenida en el suelo siempre presenta FMEL < 0, o sea, su FMEL será negativa.

Pero no solo las superficies de los poros del suelo afectan a la FMELA, debido precisamente a la alta reactividad de la molécula de agua, cualquier sustancia que interactúe con ella, la afectara. Así entonces, mientras mayor es la cantidad de sustancias disueltas en el agua, menor es su FMEL. Por tal razón el punto de ebullición de una solución siempre es mayor a aquel que presenta el agua pura. Se debe Resaltar aquí que a medida que se reduce la FMELA por efecto de la concentración de solutos, se incrementa la presión osmótica de dicha solución y sí se hace referencia a la solución

del suelo, entonces debemos establecer que la succión osmótica (τ_o) y el potencial osmótico (Ψo) también lo harán.

En razón a que la FMELA está gobernada en el suelo por un factor matricial del medio, y por la concentración de sales en la solución del suelo. La FMEL del agua del suelo no guardará relación directa con el espesor de las películas de esta, que discurren en el entramado poroso de ese medio. Tal situación sólo será cierta cuando la concentración de dicha solución sea extremadamente baja.

La atracción de la matriz del suelo por el agua (τ_m) es principalmente un fenómeno de reacciones de superficie. Por tal razón, los suelos de textura fina retienen más eficientemente el agua, en razón a su alta superficie específica (cm^2/g). Sin embargo, la humectación del suelo no puede explicarse únicamente en función de la textura. La estructura también cuenta, en cuanto determina en alto grado la distribución de poros por diámetro, así como la tortuosidad y continuidad de estos. Ahora, si se tiene en cuenta que la FMEL del agua del suelo también involucra el componente osmótico. (τ_o) o (Ψo). Se tendrá que aceptar que el tercer factor, concentración salina de la solución del suelo también gobierna el EHS en condiciones de insaturación.

Para terminar este numeral es pertinente introducir el concepto de Curva Característica de Humedad de un suelo. Figura 156. Esta es una curva, que como su nombre lo dice, caracteriza a cada suelo y es uno de sus principales argumentos de individualidad. Como que cada horizonte de cada perfil presenta una curva diferente. En ella se relaciona la succión matricial (τ_m) de una muestra, trabajada en una olla o una membrana de Richards. Figura 124, Capítulo XIII, con el Contenido Gravimétrico de Humedad (θ_g) (%) o Ps (%) para cada nivel de succión matricial (τ_m).

En la Figura 156 se presentan las curvas características de humedad para un suelo arenoso (A), otro franco arenoso (FA) y un tercero franco limoso (FL). La comparación de las tres curvas lleva a la conclusión de que a medida que la textura se hace más fina, las curvas reducen su pendiente, haciéndose por tanto mayor la humedad aprovechable en cada uno de los suelos en comparación. Un punto muy importante que debe

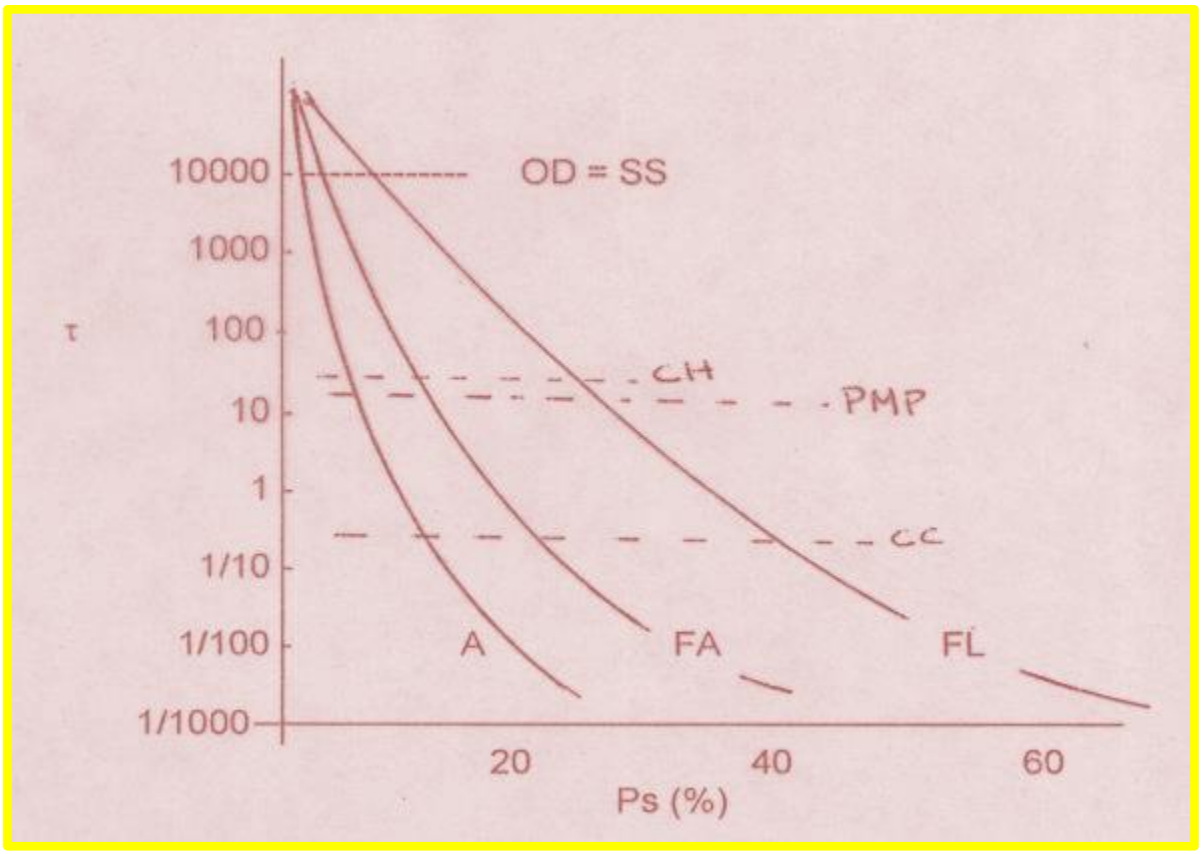


Figura 156. Curvas características de humedad de tres suelos, con textura gruesa, media y moderadamente fina. Obsérvese la amplia diferencia entre las Humedades Aprovechables de los tres suelos. Gráfica elaborada por I.D Bustamante B. 1996.

destacarse en este nivel de la discusión es que los dispositivos de succión de Richards. Figura 124, Capítulo XIII, solo miden la succión matricial (τ_m), por lo que, en suelos afectados por la presencia de sales en concentraciones tangibles en la solución del suelo, las curvas en estudio sufrirán, cada una, un desplazamiento hacia la izquierda. Pero tal desplazamiento no será uniforme a lo largo de cada una de las curvas. El desplazamiento en cuestión se incrementará con el aumento de la succión (τ), debido al efecto de concentración que se opera en tales condiciones en cada solución del suelo.

1. Espesor del Perfil de Suelo: Este aspecto es tema de una discusión obvia, dado que mientras mayor sea el volumen de suelo donde puede alojarse la humedad, naturalmente mayor será la calidad y la eficiencia del uso que hagan de dicha humedad las plantas que cubran el perfil en referencia.

2. Estratificación del Perfil de Suelo: Como se revisará más adelante, las capacidades de cada horizonte para admitir el ingreso de humedad a su interior, para permitir su movimiento y distribución en el mismo horizonte, es diferente. Y, lo que es más, para ceder agua gravitacional o de exceso, (θ_g > CC) hacia mayores profundidades, marcarán definitivamente la aptitud de cada perfil para captar, almacenar y ceder humedad aprovechable para las plantas superiores.

Precisamente, teniendo en mente evitar encharcamientos y garantizar la evacuación rápida de precipitaciones copiosas, los constructores de canchas deportivas tienen muy en cuenta las condiciones de porosidad de las diferentes capas de suelo que superponen para lograr tener un engramado óptimo de canchas de Football y de "Greens" de Golf.

16.7. MECANISMOS DE APROVISIONAMIENTO DE AGUA POR LAS PLANTAS.

Los mecanismos mediante los cuales una planta puede aprovechar la humedad edáfica son:

1. Ajuste Capilar: Dado que en este momento se hace referencia a un flujo de humedad resulta más apropiado hablar de Potencial matricial (Ψm) más Potencial osmótico (Ψo) del Suelo. A despecho de la succión matricial (τ_m) más la succión osmótica (τ_o); entidades físicas éstas que tienen un carácter marcadamente estático. En contra de la visión de potenciales, mismos que teniendo un valor similar a las succiones, implican más acentuadamente las condiciones de movimiento.

   Cabe aclarar aquí que los equilibrios capilares se dan entre puntos vecinos en el suelo, que presentan entre ellos un gradiente desde un punto con mayor contenido de humedad (θ_g), por tanto, mayor potencial total insaturado (Ψ_{TI}), esto es, con valor numérico inferior, ya que hablamos de entidades con signo

$$\Psi_{TI} = \Psi m + \Psi o$$

   negativo. El movimiento en referencia se dirigirá hacia un punto con menor contenido de humedad y por ende con menor potencial total insaturado. No obstante, en atención a las condiciones del esfuerzo tensil del agua, la continuidad de las películas de agua que circulan en los poros se romperá cuando el valor del Potencial Total insaturado rebase el valor de un bar (Ψ_{TI} > 1 bar). Es conveniente recordar aquí que, como ya ha quedado

establecido, este flujo de ajuste capilar comienza, dependiendo de los factores textura, estructura y presencia de sales, desde las vecindades de un Potencial Total insaturado superior a 0.1 bares ($\Psi_{TI} > 0.1$ bares).

2. Intercepto radical: Según este mecanismo, la raíz en su crecimiento natural se acerca al poro donde se encuentra la humedad y por efecto de gradientes de FMEL entre la humedad presente en el microclima que rodea a cada planta, la FMEL del agua contenida en los haces vasculares de la planta y la FMEL del agua que se encuentra en el poro cercano a la raíz se da el fenómeno de absorción física de la humedad del suelo. En este aspecto habrá una amplia diferencia entre los diferentes materiales genéticos, así por ejemplo, la considerable profundidad radical de la alfalfa (P > 2.0 m) (*Medicago sativa)* le dará ventajas a esta planta sobre cualquier otra leguminosa, en tanto que el sistema radical rizomatoso del pasto Buffel (*Cenchrus ciliaris)* lo hará el más adecuado para sobrevivir en suelos de zonas áridas y/o salinas. No obstante, la literatura existente al respecto no le asigna más allá de un 5% del agua total evapotraspirada por una planta a este mecanismo de aprovisionamiento de humedad. Lo cual realza la importancia del ajuste capilar como proceso responsable de suplir la demanda evapotraspirativa de las plantas.

Resulta pertinente aquí, señalar que el asocio simbiótico del sistema radical de cada planta con diferentes especies de micorrizas incrementa marcadamente la eficiencia en la toma del agua del suelo por las plantas que logran esa simbiosis.

16.8. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO.

Con el fin de conocer el contenido de humedad que pueda tener un suelo en un momento dado se han desarrollado varios métodos; a saber:

16.8.1. Método Gravimétrico.

En desarrollo de este método, el más común y siempre referente y patrón para nuevas técnicas de estimación del nivel de humedad ocurrente en un suelo, se toma una muestra de 30 g a 80 g del suelo del campo y manipulándola rápidamente y siempre con guantes de hule, para no alterar su humedad, se deposita en un bote tarado, de peso conocido, (w_t) y numerado, generalmente elaborado en aluminio, se cierra inmediata y herméticamente y se almacena en una maletín especial, preferiblemente revestido en espuma plástica, con el fin de evitar los golpes y posibles aperturas de los botes durante el trasporte del campo al laboratorio.

Una vez en el laboratorio se toma el peso húmedo (w_h) de cada muestra traída del campo, cada una dentro de su bote respectivo, el cual debe estar tapado al llevarlo a la

balanza, con aproximación a 0.0001 g. Inmediatamente después se le retira su tapa numerada y se lleva a la estufa, con circulación forzada de aire, la cual debe calibrarse a una temperatura máxima de 105ºC – 110ºC. Después de permanecer en la estufa por un período superior a las 24 horas, tiempo requerido para alcanzar el equilibrio en el ambiente de la estufa, se retira la muestra de esta con una pinza de laboratorio y se pasa inmediatamente a un desecador provisto de un fondo desecante con una sal como $CaCl_2$, con el fin de evitar que la muestra gane humedad proveniente de la humedad ambiental por el fenómeno de adsorción. Después de permanecer dos horas en el desecador, se retira la muestra y se cubre con su respectiva tapa. Se lleva seguidamente a la balanza y se le toma su peso seco (w_s). El contenido gravimétrico de humedad (θ_g) se calcula por la expresión:

$$\theta_g\ (\%) = \left(m_w / m_s \right) \cdot 100 = \left(\left(w_h - w_s \right) / \left(w_s - w_t \right) \right) \cdot 100$$

Este es un método bastante preciso y exacto. De ahí que siempre se le utilice como contraste a nuevas metodologías de estimación que lleguen a ser propuestas. Sin embargo, contra él se levantan varias críticas, en razón a los siguientes motivos:

1. Es un método invasivo y destructivo. La muestra que dio origen al dato, ya no se encuentra en el campo.

2. Tiene un tiempo de respuesta bastante amplio, en promedio entre 26 y 27 horas después de registrarse el dato en campo, el observador alcanza a conocerlo.

3. En suelos con tenores significativos de materia orgánica, ésta sucumbirá en el calentamiento de la muestra en la estufa, y la pérdida de peso será considerada en el cálculo final como agua extraída de la muestra, lo que a todas luces conducirá a un error en el cómputo que se haga con ese dato.

16.8.2. Método Tensiométrico.

En este método se emplean unos dispositivos denominados tensiómetros. Figura 157. Los cuales se fundamentan en el principio físico de establecer una columna continua de agua entre una cápsula porosa, la cual se encuentra en cada instante de su rango de trabajo, 0 – 60 cb., equilibrada con la humedad de la esfera de suelo circundante, en un diámetro inferior a los 10 cm. Y un manómetro que marcará la succión matricial imperante en la esfera de suelo referida.

Figura 157. Tensiómetros de uso común en agricultura bajo riego. La longitud de su tallo varía entre 20 y 200 cm, para adaptarse a diferentes profundidades de los sistemas radiculares. Gráfica tomada de Internet.

Cada tensiómetro está compuesto por un tallo, el cual no es más que un tubo de lusita con 10 mm de diámetro interno, y 20 mm de diámetro externo, y que en su extremo inferior termina en la cápsula porosa mencionada, la cual está construida en cerámica, la cual se debe de instalar en contacto íntimo con el suelo. Mientras en su extremo superior está coronado por una cámara anti-burbujas, la que será, el sello superior del tubo mencionado mediante la tapa roscada receptora, dispuesta en la base de dicha cámara. Mientras que, en su parte superior, la cámara en referencia está dotada de un mecanismo de diafragma resortado en hule elástico, para cumplir su función anti-burbujas. Figura 157.

La longitud del tallo del tensiómetro oscila entre 20 y 200 cm, para adaptarse a diferentes profundidades de los sistemas radiculares, y así se facilita su instalación en batería, con el fin de tener un control certero de la marcha del régimen hídrico en un volumen pequeño de suelo. Figura 158.

Figura 158. Batería de Tensiómetros insertados a 20 y 40 centímetros de profundidad en el perfil de suelo. Gráfica tomada de Internet.

Justamente no más de 5 centímetros antes de su extremo superior, el cual está dotado con roscado intrusivo, el tubo de lusita presenta una derivación lateral en ángulo de 45º ó 90º, que termina en roscado receptor, a la cual se acopla un manómetro de Bourdon, como el que se presenta en la Figura 159. Dicho dispositivo está graduado en 100 centibares (cb). Sin embargo, el rango real de trabajo de un tensiómetro es de un poco más de 60 cb. Cuando definitivamente “colapsa” el tensiómetro y mientras el dial cae a 0 cb., la columna de agua de su interior muestra un diminuto menisco de aire en la parte superior, ya que al perder continuidad la columna referida, inutiliza el dispositivo y por tanto debe retirarse del suelo, para volver a prepararse para su instalación.

El colapso de la columna de un tensiómetro se da en razón a que, para que el dispositivo logre tener un tiempo de equilibrio corto, 3 a 5 horas, la porosidad de la cápsula está diseñada con un diámetro tal, que su valor de entrada de aire (V.E.A) sea solo un poco mayor a los 0.6 bares. Por tal motivo, cuando la succión en el núcleo de influencia de la cápsula alcanza tal nivel, el aire entra a la columna, e inmediatamente, por diferencia de densidad con el agua, aparece el menisco en la parte superior de la misma, y la aguja del manómetro cae a cero.

Antes de instalar una batería de tensiómetros en el campo deben prepararse de acuerdo con el siguiente protocolo. Los tensiómetros que serán instalados deben revisarse en sus acoples con el manómetro y con la tapa, asegurándose del perfecto ajuste de cada una de las dos roscas. Los manómetros se dejan instalados en cada tallo, mientras se le retiran las tapas a cada uno de ellos.

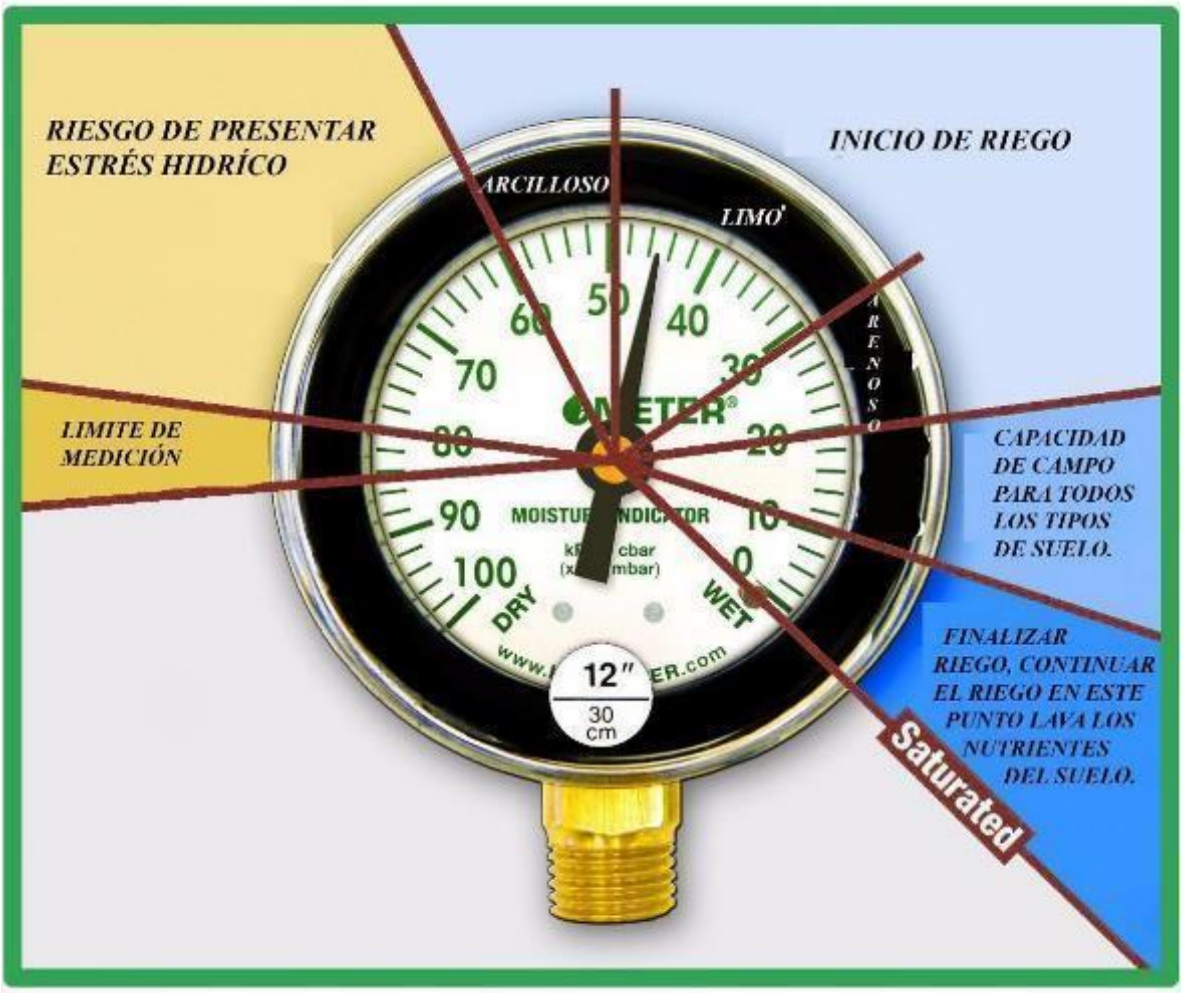


Figura 159. Detalle de diferentes niveles de lectura en el dial del manómetro de Bourdon, adosado a un tensiómetro para suelos. Gráfica tomada de Internet.

Durante las 24 horas siguientes, los tensiómetros quedarán con sus cápsulas sumergidas en agua, buscando saturar totalmente la porosidad interna de cada una de ellas. Cumplidas las 24 horas. Manteniendo sus cápsulas sumergidas en agua, cada tensiómetro será llenado con agua hervida, después de haberla dejado enfriar, aislada de cualquier contacto con la atmósfera. El llenado de cada columna debe hacerse en forma rápida, buscando que el agua no gane oxígeno atmosférico. Inmediatamente se llena cada tallo, se tapa rápidamente y se procede a accionar el diafragma anti-burbujas, con el fin de asegurar la continuidad de cada columna tensiométrica. Los tensiómetros permanecerán con sus cápsulas sumergidas hasta el momento de su instalación en su sitio definitivo en el campo. Tema éste que será tratado a continuación.

En el campo, recién regado, se selecciona, de acuerdo con el cultivo que se trate, un pequeño sector, cercano a un volumen significativo de raíces. Teniendo en cuenta el número de tensiómetros que se instalaran, y las condiciones de estabilidad del suelo, en

las condiciones de alto régimen de humedad que ahora exhibe, se selecciona un área para instalar la batería tensiométrica, la cual tendrá espaciamiento vertical entre las cápsulas de 5, 10, 15, 20, 25 o 50 cm. Esa situación determina la amplitud lineal de la batería.

Haciendo uso de un barreno de tipo Veihmeyer, se practica ahora una perforación vertical que alcance la profundidad más superficial para ser monitoreada. Una vez realizada, se toma rápidamente el tensiómetro con tallo más corto y se instala deslizándolo con igual o mayor rapidez a lo largo de la perforación. Al alcanzar el término de ella, se toma el tallo firmemente con las dos manos y se gira varias veces a derecha e izquierda, para asegurarse de que se ha logrado el íntimo contacto entre cápsula porosa y suelo. Ahora se procede con la siguiente perforación, la cual tiene su profundidad ligeramente mayor a la recién practicada, esa nueva perforación tendrá una distancia con la primera, acorde con la estabilidad del suelo, el que ahora mismo se encuentra cercano a su capacidad de campo. Se procede de igual forma, y así sucesivamente, hasta instalar el tensiómetro que monitoreará la profundidad mayor en el sitio bajo estudio.

Después de instalar el último tensiómetro de la batería, se debe dejar transcurrir un período de entre 3 y 5 horas, al cabo del cual se espera que la totalidad de cápsulas porosas estará en equilibrio con las succiones que se registran en los pequeños núcleos esféricos de suelo que son sus zonas de influencia.

Los tensiómetros presentan la ventaja de que pueden ser leídos con cualquier frecuencia entre lecturas, por lo que resultan adecuados para realizar marchas de succión o tensión a nivel de campo. Es más, estos dispositivos permiten adosar un sistema eléctrico a la aguja del manómetro, por lo que resultará posible implementar el encendido de las bombas para riego, y consecuentemente la activación del sistema de aplicación de regadío, cuando se registre un determinado nivel de succión, según las condiciones de suelo, cultivo y estado fenológico del mismo. Figura 159.

Finalmente, conviene establecer las ventajas y desventajas de este método. Comenzando con las primeras, se dirá entonces que las superioridades del método son:

1. Menos sujeto a la variabilidad espacial edáfica que el método gravimétrico.

2. Es mucho menos invasivo que el método gravimétrico

3. Su tiempo de respuesta es de solo 3 a 5 horas.

4. Posibilita el riego automatizado

Por otra parte, las desventajas del método serán:

1. Su uso está restringido a la Agricultura bajo Riego.

2. No detecta el componente osmótico del Esfuerzo de Humedad del Suelo (EHS).

3. El volumen de suelo monitoreado resulta muy reducido.

4. El método requiere de un estudio detallado de varias muestras de suelo, con el fin de determinarle a cada una su respectiva (CCH) Curva Característica de Humedad.

5. Su rango de operación es muy reducido (R.O < 60 cb.)

6. La técnica de instalación requiere de pericia especializada.

7. Requiere mantenimiento, y en ocasiones reemplazo del equipo periódicamente, al menos en su cápsula porosa, dado que se deteriora facilmente. Sobre todo en suelos con niveles significativos de salinidad en el suelo.

8. Debido al alto costo de cada tensiómetro, son bastante susceptibles al robo. Por tanto, requieren de vigilancia.

16.8.3. Método de Unidades de Resistencia Eléctrica.

Este método parte de la consideración que se hace de la alta conductividad eléctrica que presenta el agua, lo cual hizo pensar a los estudiosos de comienzos del siglo pasado que sería posible medir la corriente entre dos electrodos metálicos, introducidos en el suelo, como un estimativo del contenido de humedad ocurrente entre los dos. No obstante, tardaron poco en encontrar que las sales presentes en solución con la humedad del suelo afectaban la lectura de corriente, practicada en cualquier Puente de Wheatstone. Por tal razón en 1939, Bouyoucos, inicialmente. Y luego el mismo investigador acompañado por Mick, proponen el uso de dos pequeños electrodos metálicos, revestidos por un bloque de yeso ($CaSO_4$), el cual, si bien hace que el período de estabilización del dispositivo con su núcleo de influencia se aumente, dada la porosidad del yeso. Este yeso, sal de baja solubilidad, neutraliza el efecto perturbador de las sales solubles en la medida de conductancia eléctrica.

En la Figura 160 se presentan dos bloques de yeso y dos tipos de Puente de Wheatstone, para medir la corriente eléctrica que se da entre los dos electrodos presentes dentro de cada bloque.

Figura 160. Detalle de dos bloques de yeso (Bouyoucos & Mick, 1940), disponibles para ser instalados en campo. A su lado dos tipos de Puente de Wheatstone, a la derecha uno de tipo analógico. Y a la izquierda, un puente de tipo digital. Gráfica tomada de Internet.

Por otra parte, en la Figura 161 se presenta una batería de tres bloques de yeso, los cuales después de haber permanecido embebidos en agua de riego por un mínimo de 24 horas, se encuentran disponibles para ser instalados a igual número de profundidades, a lo largo de una sola perforación. Que puede ser practicada con una barrena Veihmeyer, o preferiblemente con una barrena de saca-bocado, ya que en el proceso de instalación, en un suelo que se encuentra cercano a su capacidad de campo (CC), después de instalar el bloque más profundo, la columna de suelo, ubicada inicialmente en el tramo inmediatamente superior a ese punto, debe volver a su sitio, y después de una ligera compactación practicada con una vara de madera, se instala el segundo bloque, y se repite la operación para la colocación del bloque más superficial, la última columna de suelo, que es la primera extraída, igualmente se ubica en la perforación, se compacta ligeramente y comienza el período de estabilización de los dos dispositivos, el cual toma entre 18 horas para suelos arcillosos y 36 horas para arenosos.

Conviene anotar aquí que los bloques de yeso, debido a la solubilidad de su material constitutivo, la cual, aunque baja, obliga a reemplazarlos, al menos cada año. Para solucionar esta situación, se ha propuesto el uso de fibra de vidrio, con un Valor de Entrada de Aire (V.E.A) similar al del yeso, pero se ha encontrado el inconveniente de la interferencia de las sales con la lectura, ya que con el nuevo material no logra superarse la interferencia ejercida por las sales presentes en la humedad del suelo.

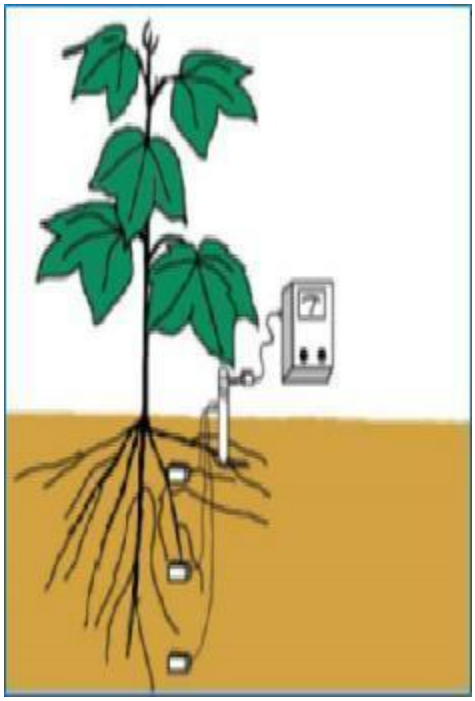


Figura 161. Detalle de la instalación de tres bloques de yeso, ubicados a diferentes profundidades, a lo largo de una sola perforación en el suelo, mientras que los dos terminales de cada uno se adosan a una estaca que les sirve de protección y señal de ubicación en el campo. Gráfica tomada de Internet.

Por último, conviene establecer aquí las ventajas y desventajas de éste método. Comenzando con las primeras, se dirá entonces que las superioridades de esta técnica son:

1. Método muy económico, el cual por tal razón permite múltiples replicaciones en el campo.

2. El bajo costo de los dispositivos no los hace atractivos para ser hurtados

3. Tienen fácil instalación y operación.

4. Permiten la lectura a distancia (telemétrica)

Por su parte, las desventajas de esta técnica son:

1. No es utilizable en suelos secos y suelos de texturas demasiado gruesas

2. El V.E.A es muy reducido, lo cual impacta el tiempo de estabilización de los bloques con sus núcleos de influencia.

3. Además, el reducido y variable V.E.A del yeso, hace que todo bloque de yeso tenga comportamiento histerético. El fenómeno de histéresis será discutido más adelante, pero de momento se aclara que consiste en que un cuerpo poroso tenga una curva de humedecimiento diferente a su curva de secamiento. Y lo normal en los suelos es que se debatan permanentemente entre los dos procesos.

4. La solubilidad del yeso, aunque baja, conduce a que haya que reemplazarlos, como mínimo, cada año.

16.8.4. Método de Dispersión de Neutrones.

En este método se estima la presencia de humedad en el suelo mediante el conteo del número de impulsos (golpes, impactos) por segundo que recibe una lámina de plata (Ag), ubicada en el centro del dispositivo que hace las veces de contador, de los neutrones decelerados después de impactar a núcleos de hidrógeno (H^+) presentes en una esfera de aproximadamente 50 cm de diámetro, que rodea a una fuente radioactiva, construida por un núcleo de americio (Am) + berilio (Be), o por una mezcla de radio (Rd) + berilio (Be), de la cual son emitidos los neutrones acelerados que impactan profusamente a los hidrogeniones presentes en el núcleo de influencia de dicha fuente, misma que hace parte de una sonda neutrónica, que en ese mismo instante reposa sobre un tubo de aluminio, con diámetro de 2” y longitud acorde a la profundidad de cada estudio que, como ha quedado establecido puede ser hasta de 2 metros.

La fuente radioactiva de la sonda, cuando el dispositivo no está en uso, se encuentra en el centro de la sonda, en la mitad de un ducto cilíndrico, que le sirve de nicho, al lado del contador de plata (Ag), y que están rodeados por una coraza cilíndrica de parafina, recubierta, periféricamente y en su base y ápice por una lámina de plomo con calibre de 1/4”.

En el campo donde se estudiará el contenido de humedad, mediante el dispersor de neutrones, se han instalado previamente un conjunto de tubos de aluminio o PVC con diámetro de 2” y longitud acorde a la profundidad que exija cada caso. Cada tubo está protegido de eventuales ingresos de agua lluvia, mediante una tapa hermética en su parte superior, abierta. Su otro extremo se encuentra cerrado en el mismo aluminio o PVC del mástil del tubo en referencia.

Cuando el Dispersor de neutrones se lleva a campo, se coloca en cada sitio de estudio, sobre la boca recién destapada de cada tubo de acceso. A continuación, el operador libera la mordaza que sujeta la fuente radioactiva y la va desplazando en forma controlada, en tramos de 5, 10, 15, 20 ó 25 cm. Cada vez que se detiene la fuente se realiza una lectura, bien en forma directa, o por técnica telemétrica. Cuando termina el

estudio en un sitio determinado, el operador recoge la fuente, recuperando el cable que la trasporta, y vuelve a accionar la mordaza de seguridad para sujetarla.

Antes de comenzar el monitoreo de humedad, mediante el dispersor de neutrones, es totalmente requerida la calibración de esta técnica para cada condición de suelo presente en el campo que habrá de monitorearse, tomando como referencia el método gravimétrico.

Obviamente que para efectos de implementación de riegos en el campo es absolutamente requerido el estudio previo de curvas características de humedad de cada condición edáfica ocurrente en el campo.

En la Figura 162 se presenta un dispersor de neutrones, a punto de comenzar el monitoreo de humedad en condiciones de campo, nótese la robustez que caracteriza al dispositivo, por lo cual su desplazamiento entre sitios requiere mucho esfuerzo físico.

Finalmente, conviene señalar aquí las ventajas y desventajas de éste método. Comenzando con las primeras, se dirá entonces que las supremacías de esta técnica son:

1. Medición rápida.

2. Alta precisión.

3. Es un método rápido, pueden hacerse hasta 500 lecturas de humedad en un día.

4. El tiempo de respuesta de este método es instantáneo.

Como desventajas, por otra parte, merecen mención las siguientes:

1. Requiere de calibración para cada tipo de suelo.

2. Debido a su carácter radioactivo requiere que el operario tome una serie de protocolos, absolutamente necesarios para su seguridad y su salud, ellas son:

   a. Debe utilizar botas y traje en plomo durante la operación del equipo

Figura 162. Detalle de la operación de un dispersor de neutrones en campo. Gráfica tomada de Internet.

b. Debe someterse mensualmente a un monitoreo con Contador Geiger, con el fin de conocer los niveles de radiación presentes en su cuerpo.

3. En atención al cuidado que hay que tener con la fuente radioactiva, los fabricantes del equipo recomiendan operarlo con protección de la radiación solar directa.

4. La instalación requerida en forma previa, de los tubos de aluminio, se ven como un costo adicional de la aplicación de esta técnica.

5. Su operación en campo se hace difícil, en razón al peso considerable del equipo

16.8.5. Método del TDR (Time Domain Reflectometry).

Esta técnica de estimación de la humedad del suelo en realidad es un dispositivo para la medición de la reflectancia en el dominio del tiempo. Es una apropiación a la Edafología de un avance en la Ingeniería de Comunicaciones, ampliamente empleado en los grandes núcleos urbanos con el fin de ubicar fracturas en el cableado de las redes telefónicas. Así entonces el dispositivo TDR funciona bajo el principio de que la presencia de agua en el suelo afecta la velocidad de propagación de una onda electromagnética, haciéndola más lenta. El TDR envía una onda electromagnética a través de una guía, constituida generalmente por un par de puntas paralelas, o electrodos, de metal, generalmente cobre, insertadas en el suelo a una profundidad deseada. El TDR entonces mide el tiempo que le toma a la onda viajar por la guía hacia el suelo y regresar al lector. Y mientras más amplio sea el tiempo, mayor será la humedad presente en el suelo.

Como ventajas de esta tecnología merecen mencionarse:

1. La agilidad de la medida, lo cual da eficiencia al monitoreo de humedad.

2. La posibilidad de telemetría que permite llevar los records de humedad en forma permanente.

De otra parte, las desventajas son:

1. El reducido volumen de suelo que es explorado, cual es el núcleo de suelo comprendido entre los dos electrodos.

2. Como condición para un óptimo desempeño, estos dispositivos deben ser instalados por personal calificado.

3. Debido al alto costo del cobre en el mercado, los electrodos tienen un riesgo alto de hurto. Por lo cual se recomienda la vigilancia permanente de los mismos.

4. En suelos con capas endurecidas o presencia de fragmentos gruesos, la instalación de los electrodos se hace bastante difícil, sobre todo en la condición de suelo seco.

5. En la actualidad esta tecnología tiene muy bajo grado de adopción en nuestro país, dado al alto costo que tienen los respectivos equipos, el cual oscila entre los 5.000 y 10.000 dólares.

16.9. TIPOS DE MOVIMIENTO DE LA HUMEDAD EN EL SUELO.

Los tipos de movimiento que el agua presenta en el medio edáfico son:

1. Ascenso Capilar.
2. Flujo Saturado.
3. Flujo Insaturado.
4. Flujo Por Ajustes de Presión de Vapor de Agua.

A continuación, se presenta una discusión detallada de cada uno de ellos:

16.9.1. Flujo de Agua por Ascenso Capilar.

En este flujo, el agua libre que se encuentra en la capa freática asciende por el fenómeno de capilaridad hacia niveles, cada vez, menos profundos. En el prodigio de la capilaridad se conjugan la tensión superficial propia del agua que asciende y la atracción que las paredes del poro ejercen sobre la masa de agua, la cual debe ser superior a las fuerzas de cohesión que en ese instante se dan entre las moléculas del agua que asciende. Por tal motivo, a medida que los poros aumentan su diámetro, el ascenso, si bien es más rápido, se hace más corto. De otro lado es necesario considerar que el avance del frente húmedo que asciende depende, milímetro a milímetro de las condiciones de las superficies porales, por las cuales avanza el flujo. En un momento dado, las condiciones que se dan alrededor del menisco de avance, ubicado en la interface agua: aire que limita el frente de progreso, son las responsables de la retención capilar que se registra a lo largo de la columna de agua que avanza. Algo distinto es el avance capilar, el cual está condicionado por la variación de las condiciones de diámetro poral, el cual en el suelo puede cambiar abruptamente, generando detenciones súbitas en el movimiento ascendente, ante la presencia de un ensanchamiento en el diámetro del poro. Figura 163.

En la Figura 164 se esquematiza la velocidad de ascenso capilar a través de tres condiciones de textura y estructura en el horizonte, donde se registra el movimiento en referencia. En ella puede observarse como la velocidad de ascenso es proporcional al diámetro de los poros, en tanto que la magnitud del ascenso es inversamente proporcional al diámetro referido.

Como se señala en la parte baja de la Figura que se analiza, el análisis del ascenso capilar tiene especial importancia en el diseño de sistemas de drenaje subterráneo, ya que si bien, con la implementación de tales sistemas se busca abatir el nivel freático,

debe entenderse que lo que se está persiguiendo es evitar el daño de raíces por efecto freático, pero en realidad éste último actúa siempre a través de la llamada franja freática,

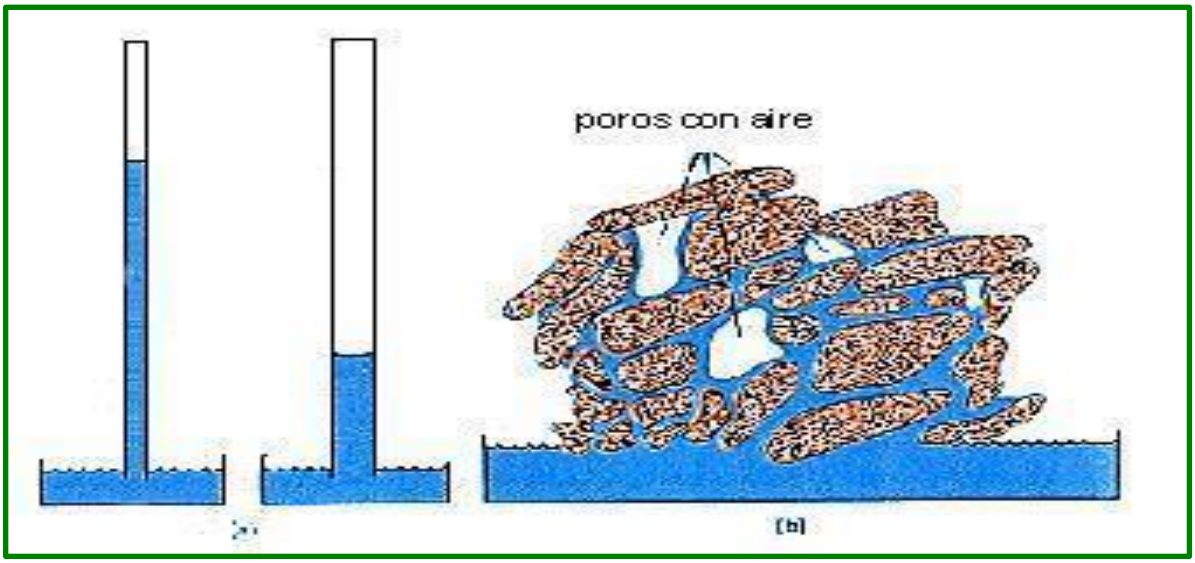


Figura 163. Detalle de la diferencia entre los conceptos de ascenso y retención capilar. Tomado de N.C. Brady,1984.

la cual se genera por acción del ascenso capilar que aquí se discute. Igual situación tendrá que señalarse para el avance ascendente de sales provenientes de mantos freáticos someros. Lo mismo tendrá que decirse para el diseño de sistemas de subirrigación, los cuales se fundamentan en el movimiento actualmente en discusión.

Finalmente es conveniente dejar claro que la anterior discusión acerca de ascenso capilar debe modularse un poco más, para hacerla aplicable a cada suelo, puesto que, en él, la porosidad es cambiante, no solo en el espacio, sino también en el tiempo, gracias al comportamiento de las arcillas expansivas, mismas que tenderán a reducir el diámetro de los poros al ser humedecidas.

16.9.2. Flujo Saturado del Agua en el suelo.

También conocido como flujo gravitacional o de percolación, es el flujo, ya referido en el comienzo de este capítulo, como un flujo episódico que ocurre eventualmente en un suelo, cuando éste recibe un aporte de agua que rebasa la capacidad de campo (CC), por lo cual aquella agua de exceso queda exenta de la acción del Esfuerzo de Humedad del Suelo (EHS) y entra a ser gobernada por la fuerza de la gravedad, que por ende tiene un curso vertical descendente.

El flujo de percolación reviste el mayor interés desde el punto de vista de la implementación de sistemas que mejoren el drenaje interno del suelo, cuyo objetivo es

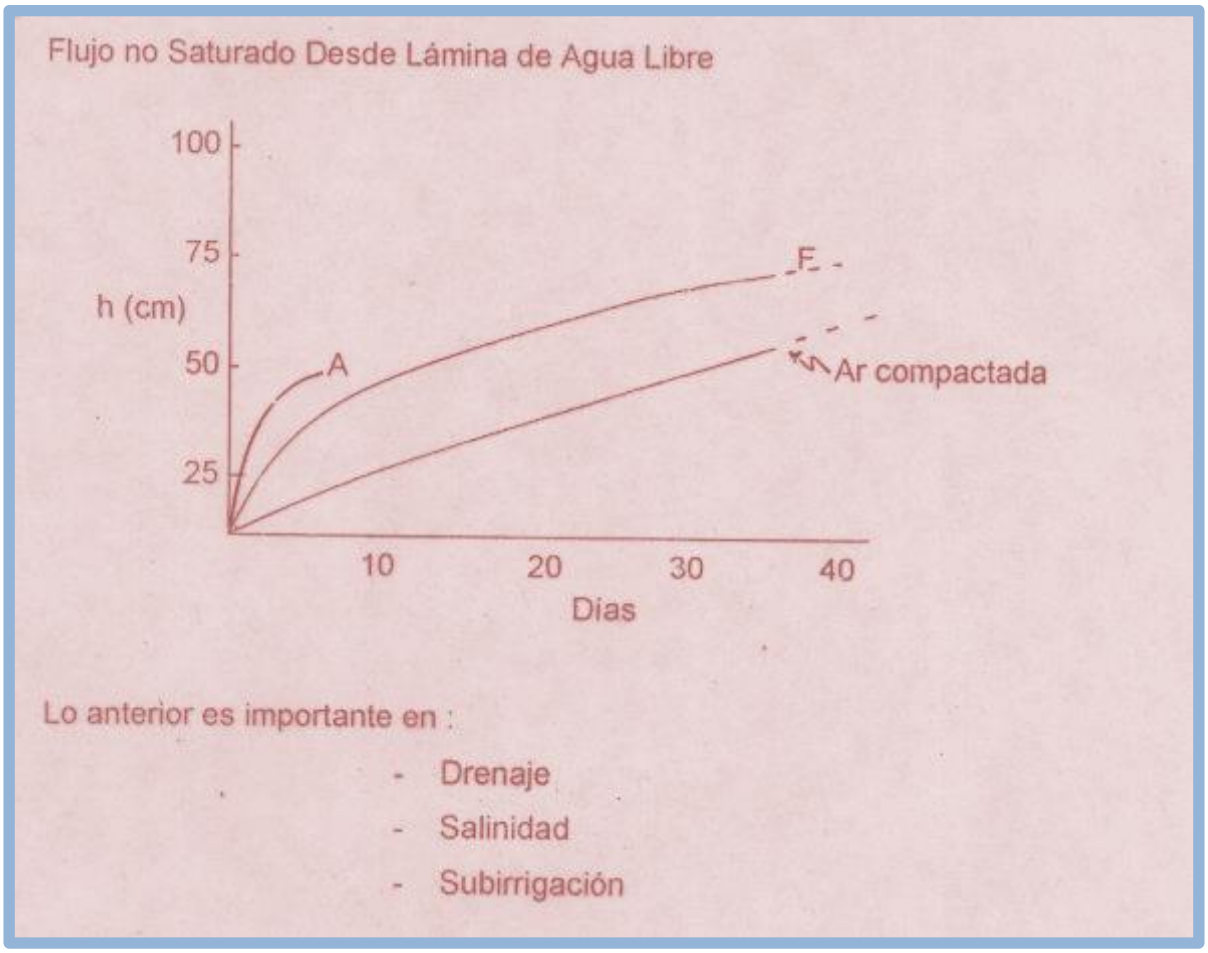


Figura 164. Velocidad de ascenso capilar desde una capa freática, surcando tres horizontes de suelo, con textura gruesa, media y fina. Diagrama elaborado por I.D. Bustamante B. 1996.

liberar al suelo de los eventuales excesos de agua en su perfil, los cuales dependen de los siguientes factores:

1. Cantidad de agua aplicada al perfil: La explicación es obvia, todo volumen de agua aplicado en exceso, por encima de la capacidad de campo, debe ser evacuada en el menor tiempo posible, con el fin de garantizar la adecuada aireación de la zona de raíces.

2. Capacidad de Infiltración del perfil de suelo: Esta es la máxima tasa de ingreso de agua (L/T), que permite un perfil en condiciones de humedad cercanas a la capacidad de campo.

3. Capacidad de Campo de cada Horizonte del Suelo: Cuando comienza el proceso de humedecimiento de un perfil, se da primero una fase de "Sortividad", la cual

puede tomar los primeros cinco a diez minutos del proceso de infiltración. La velocidad con la que ingresa el agua al perfil es muy alta, y en condiciones de riego por inundación, es factible observar la alta profusión de burbujas, que emergen del suelo, al ser desplazado el aire, hasta hace un momento presente en la porosidad del suelo, por el agua que ahora ingresa al perfil. Seguidamente la velocidad de infiltración del agua al perfil de suelo se hace progresivamente más lenta, a medida que se acerca a la capacidad de infiltración, ya mencionada en el numeral anterior.

No obstante, el proceso de infiltración dista bastante de ser sencillo y de comportamiento cercano a la linealidad. Por lo tanto presenta varias fases, cada una de ellas caracterizada por unas condiciones diferentes de velocidad de infiltración, las cuales estarán gobernadas por la capacidad de imbibición de cada horizonte, misma que está marcada estrechamente por la capacidad de campo de cada capa de suelo, lo mismo que por su permeabilidad, la cual es su capacidad para trasmitir, lateral y verticalmente el frente de humedad que avanza buscando alcanzar la profundidad de la capa de raíces, misma que marca la profundidad de humedecimiento, definida para cada operación de riego, según la Ingeniería de este Ramo.

4. Conductividad Hidráulica (K) de cada horizonte: La Conductividad Hidráulica (K), en unidades de velocidad (L/T), es la capacidad que tiene todo suelo para conducir agua. Es entonces una expresión numérica de su permeabilidad al agua. Pudiéndose dar entonces en un mismo perfil, una amplia gama de horizontes con diferentes capacidades para conducir el fluido.

   Como se observa en la expresión:

$$K = \frac{\rho\, g\, k}{\eta}$$

Donde:

K = Conductividad Hidráulica (cm/seg)
ρ = Densidad del agua (g / cm^3)
g = Aceleración de la gravedad (cm/ seg^2)
k = permeabilidad (cm/seg)
η = Viscosidad del agua (g . seg / cm)

La Conductividad Hidráulica (K) como se aprecia en la ecuación anterior involucra factores inherentes al medio poroso (k), al agua (ρ, η) y al movimiento (g, η). A su vez, la viscosidad (η) varía con la temperatura (ºC) del medio poroso.

El análisis de los cuatro factores anteriormente discutidos permite concluir que la textura y la estructura de la serie de horizontes implicados en el flujo, son los dos factores determinantes de la velocidad y desenvolvimiento general del mismo. Pudiéndose tener perfiles donde, por la ocurrencia de un horizonte comparativativamente impermeable, puede inducir a que el flujo que venía desarrollándose en dirección vertical, se torne correspondientemente horizontal, al cual se denomina técnicamente como flujo lateral, y es el que da origen a afloramientos de agua en las zonas medias y bajas de algunas colinas, como sucede en el sector de Los Zambos, municipio de Buenavista, Córdoba.

El flujo saturado de agua en el suelo es explicado por dos ecuaciones. La de Poiseuille y la propuesta por Henry Darcy. En la Ecuación de Poiseuille, se explica el flujo de un fluido en un tubo estrecho, bajo la siguiente expresión:

$$Q = \frac{P \pi R^4}{8 L Z}$$

Donde:
Q = Volumen de flujo (cc/seg)
P = Diferencia de presiones, fuerza impulsora (dinas/cm^2
R= Radio del tubo (cm)
L= Longitud del tubo (cm)
Z= Viscosidad del líquido (dina-seg/cm^2 = poise)

En la Ecuación anterior puede apreciarse como el flujo saturado es proporcional a la cuarta potencia del radio promedio de los poros. Con base a ello, será de esperar que la magnitud del flujo saturado guarde un orden de magnitudes entre las texturas de suelo como la siguiente:

$$A > L > Ar$$

No obstante, la anterior aseveración debe hacerse con cautela, pues si bien el suelo arenoso presenta una mayor viabilidad al flujo saturado, en razón de su poro medio amplio; la tortuosidad de los poros y la gradación entre los diferentes granos del suelo impactarán fuertemente la tasa de flujo saturado que se registre en ese medio. Por lo que “idealmente” el máximo flujo saturado será de esperar en un medio conformado por partículas de diámetro amplio y uniforme.

De forma similar, la ecuación de Darcy:

$$V = Ki$$

Donde:
V = Velocidad de flujo (LT^{-1})
K = Conductividad Hidráulica (LT^{-1})
i = Gradiente Hidráulico (Adimensional)

Según la ecuación de Darcy, el flujo se daría en una proporcionalidad constante a lo largo de toda su duración. Sin embargo, esta relación no es necesariamente lineal, sobre todo en suelos arcillosos, por esta razón, un horizonte con dicha textura puede constituirse en barrera al flujo percolante, generando en consecuencia eventualmente un flujo lateral.

16.9.3. Flujo Insaturado del Agua en el Suelo.

El flujo insaturado de agua en el suelo es el más frecuente en él, hasta el punto de que puede decirse que se registra en forma casi permanente en el medio edáfico, no ocurriendo únicamente en los episodios, poco usuales, cuando se da el flujo saturado. Este flujo está regido por el diámetro de los poros activos y por la succión con la cual la humedad sea retenida en cada instante del flujo. Así entonces, un suelo Arenoso podrá tener una conductividad hidráulica superior a la de un suelo Franco arcillo limoso hasta llegar a una succión cercana a 1.5 bares. A partir de ese nivel, la situación será a la inversa. Y a partir de ese punto, el flujo en el suelo areno so se hará progresivamente más lento, hasta llegar a ser prácticamente nulo cuando se alcance una succión de humedad cercana a los 3.0 bares; mientras que en el franco arcillo limoso, el flujo continuará hasta las vecindades de los 15.0 bares de succión de humedad. Este es un verdadero milagro de la naturaleza, según el cual el suelo se libera rápidamente del exceso de humedad, procurándole una adecuada aireación a las raíces y a la biota aeróbica del suelo, pero a medida que la humedad escasea, el suelo la libera cada vez con mayor lentitud. En realidad, mientras en el flujo saturado el aire está ausente y los poros funcionan como tubos, en el insaturado los poros se comportan como canales, por lo que, a cada avance del flujo, siempre hay formación de meniscos, en la altamente cambiante interfaz agua: aire, llegándose a presentar el fenómeno de histéresis. Figuras 165 y 166. El cual se da mayormente en los suelos de textura gruesa, y con menor incidencia a medida que se reduce el diámetro de los granos del suelo, y por ende el de los poros de este.

Para entender el fenómeno de histéresis, es necesario recordar la diferencia entre retención y avance capilar, discutida unas líneas atrás. Téngase en cuenta entonces que la retención de un líquido dentro de un capilar depende única y exclusivamente de las condiciones que se dan en la interfaz agua: aire, esto es, la succión que se registra en esa interface es la responsable de la retención de humedad

- Falta de uniformidad en la geometría de los poros individual

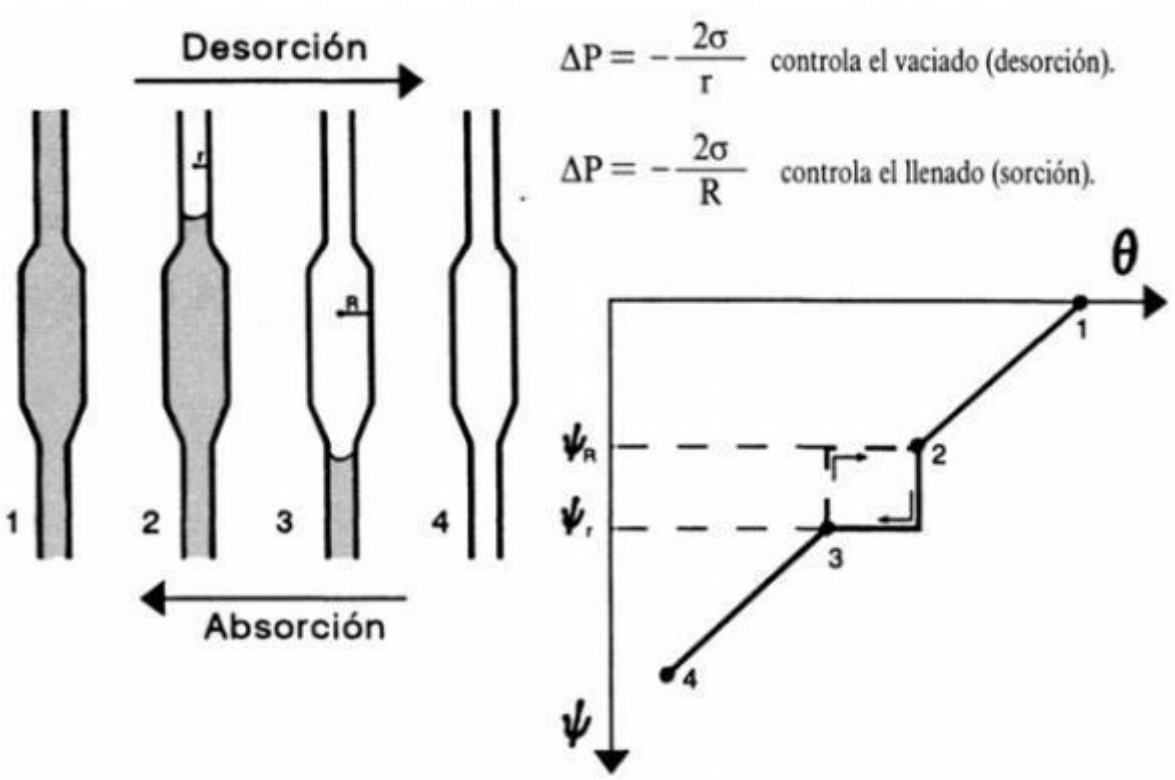


Figura 165. Esquematización física y gráfica logarítmica del fenómeno de histéresis. La absorción o humedecimiento está gobernada por las condiciones altamente variables del poro, por el cual avanza el frente de humedecimiento. La retención, desorción o secado está regida solamente por las condiciones imperantes en la interface agua : aire. Diagrama tomado de Internet. 2020.

en ese instante. A diferencia de lo anterior, en el avance del frente de humedecimiento, esto es, el avance capilar, todas las condiciones de geometría, trayectoria y rugosidad de todo el trascurso del poro afectan el proceso. Esta diferencia es el sustento del fenómeno de histéresis, por el cual, la curva característica de humedad (CCH) de un mismo suelo, será diferente dependiendo de sí el mismo se está humedeciendo o secando. Por esta razón, para una misma succión, se llegan a tener dos niveles de humedad, el mayor para la condición de secamiento, y el menor para la curva de humedecimiento. Figura 166.

Para finalizar este numeral conviene recalcar como la conductividad hidráulica del suelo, máxima en el rango mojado, decae gradualmente en el rango húmedo y se aproxima a la nulidad en el rango seco. Ciñéndose siempre, en condiciones de

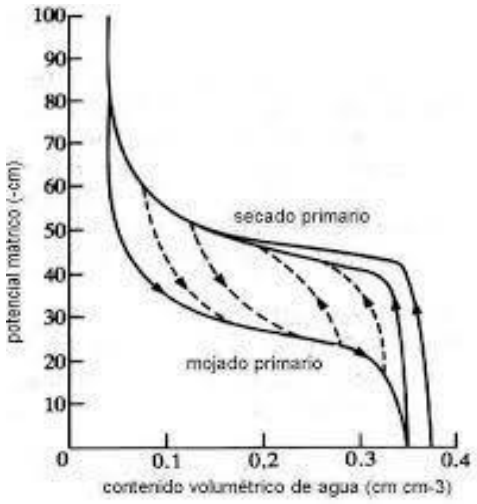


Figura 166. Esquematización gráfica del fenómeno de histéresis. En líneas discontinuas se presentan los procesos sucesivos de humedecimiento y consecuente secado. En líneas continuas aparecen de derecha a izquierda la curva característica de humedad (CCH) obtenida en laboratorio sobre muestra disturbada, le sigue la curva real de secamiento en campo, y finalmente aparece la línea de humedecimiento. Diagrama tomado de Internet. 2020.

saturación, a la Ley de Poiseuille ($K_{sat} = f(Ø^4)$). En tanto que, a medida que avanza la no saturación, se hace dependiente del grado de intensidad de dicha condición de reducción de presencia de agua en los poros, esto es: (($K_{insat} = f(\tau)$). Quede claro entonces que en ambas condiciones de humedad se da movimiento de agua, cada vez con menor velocidad, pero se registra en realidad. Por ello es posible afirmar que la recarga de mantos freáticos si bien se genera por acción del flujo saturado. El flujo insaturado descendente también lo hace. Por eso es posible observar agua en la red de drenaje artificial y natural, mucho tiempo después del último ingreso de agua al perfil. Este hecho reviste especial importancia en el funcionamiento de cualquier cuenca hidrográfica. Figura 167

16.9.4. Flujo de Agua en el Suelo, por ajustes de Presión de vapor.

El flujo del agua en fase de vapor depende de: a) El contenido de humedad; b) La temperatura del suelo, y c) La concentración de sales en el punto en consideración.

En realidad, este flujo reviste importancia vital en el rango seco, cuando existen suficientes poros vacíos de agua, para permitir el fenómeno de difusión de gases, entre ellos, el agua en estado de vapor, lo cual constituye un factor importante para la supervivencia de las plantas superiores, cuando el suelo se aproxima a su punto de marchitez permanente (PMP). Aunque cabe aclarar que desde las proximidades de la capacidad de campo (CC) ya el suelo dispone de porosidad libre de agua para permitir

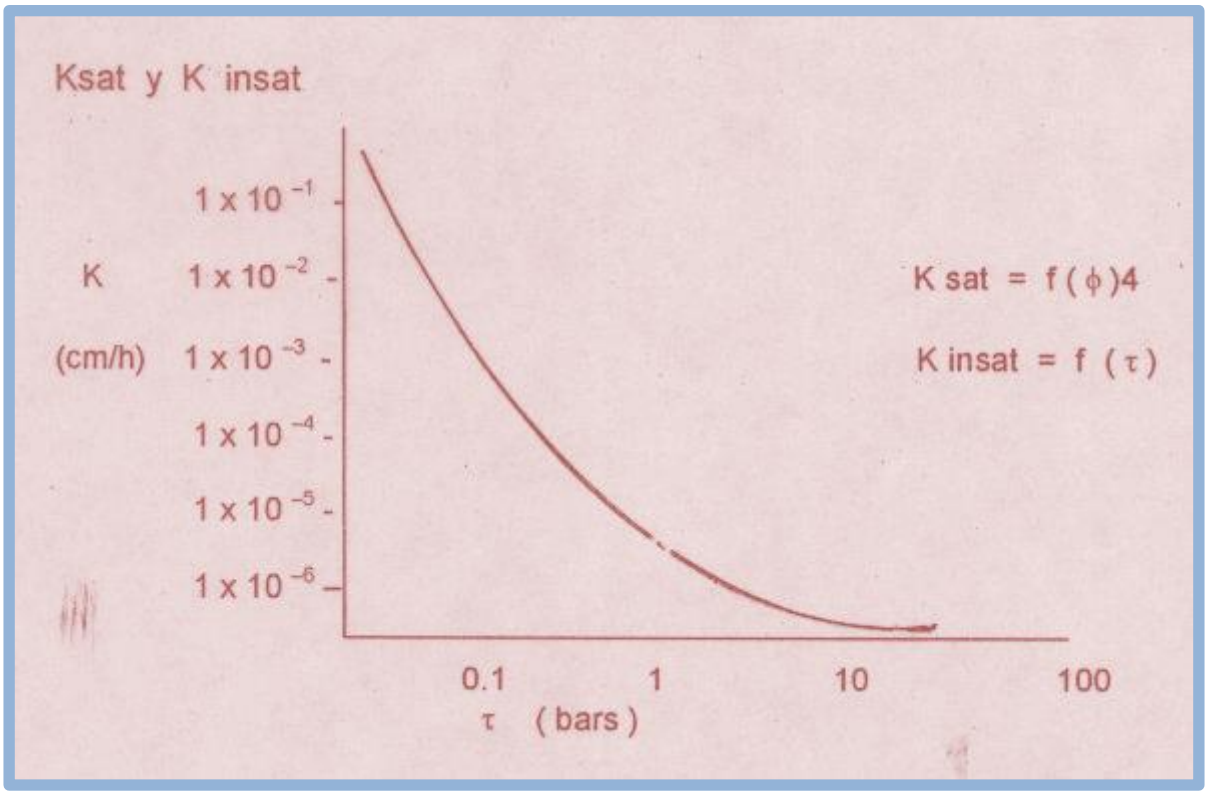


Figura 167. Esquematización comparativa del comportamiento de la Conductividad Hidráulica, bajo condiciones de saturación y no saturación del suelo. Diagrama elaborado por I.D. Bustamante B. 1996.

los flujos de vapor de agua, obedeciendo al gradiente de presión de vapor atmosférico que actúa sobre el proceso de evaporación.

También resulta de especial importancia el hecho de que los puntos de máxima presión osmótica, como son los sitios donde se aplica un fertilizante, se comporten como polos de atracción de flujos activados por gradientes de presión de vapor, pues este hecho imprime eficiencia a la dilución progresiva y la liberación controlada de los principios nutrimentales presentes en los abonos minerales.

16.10. REGÍMENES DE HUMEDAD EDÁFICA.

Cuando se describe un perfil de suelo, resulta de vital importancia, como calificación del clima del ambiente edáfico, calificar la evidencia, visual y social, que se observe de presencia de humedad en el perfil en estudio, este concepto es conocido como Régimen de Humedad Edáfica. Así entonces será factible encontrar los regímenes que se enlistan a continuación:

1. Régimen Ácuico: Cuando se observa evidencia de presencia de humedad en el perfil, por más de seis (6) meses cada año.

2. Régimen Údico: Cuando se tienen evidencias de presencia de humedad en el perfil por un período de tres (3) a seis (6) meses cada año.

3. Régimen Ústico: Cuando se tienen evidencias de presencia de humedad en el perfil por un período inferior a tres (3) meses cada año.

4. Régimen Xérico: Cuando se tienen evidencias de presencia de humedad en el perfil por un período inferior a un (1) mes cada año.

5. Régimen Arídico: Cuando se tienen evidencias de la presencia solamente ocasional de humedad en el perfil.

16.11. EGRESOS DE HUMEDAD DESDE EL SUELO.

Cuando una gota de agua surca la atmósfera en su caída, oblicua o vertical, puede tomar alguno de los siguientes destinos alternativos:

1. Evaporarse en la caída.
2. Ingresar como lluvia efectiva al perfil del suelo
3. Ser interceptada por el dosel y una vez interceptada puede tomar alguno de estas dos vías:
   a. Evaporarse desde el dosel.
   b. Tomar el camino del llamado flujo de tallo, en virtud del cual, después de pasar un período de tiempo, conocido como “retardanza”, que puede tomar hasta 12 horas, pasa a ingresar al suelo, si no se ha evaporado durante el flujo siguiendo el tallo de una planta.

Después de haber analizado el ingreso, distribución y almacenamiento del agua en el suelo, corresponde ahora analizar el egreso del agua desde el suelo. A ese respecto debe decirse que el agua abandona el suelo en dos estados físicos, a saber:

1. Egresos en fase de vapor.
2. Egresos en fase líquida.

Pasemos a analizar en detalle los dos tipos de salidas:

16.11.1. Egresos en Fase de Vapor.

Este tipo de egresos están conformados por la evaporación y la transpiración, las cuales se conjugan en la conocida evapotranspiración, misma que se da en obediencia a un gradiente de presión de vapor que se registra entre la humedad presente en la atmósfera próxima al suelo y a una planta, y el agua contenida en los poros del suelo o en los haces vasculares de una planta determinada.

El gradiente de presión de vapor referido en el párrafo anterior depende de los siguientes factores:

1. Energía radiante. La cual está bastante influida por la nubosidad y la humedad relativa del ambiente de cada región.

2. Temperatura ambiental y color de coberturas, naturales o artificiales.

3. Vientos, como factor de cambios rápidos y episódicos de las condiciones de presión de vapor de agua en la atmósfera.

4. Contenido de humedad (θ_g) del suelo. Como ha quedado establecido, mientras mayor sea dicho contenido, proporcionalmente también lo será la presión de vapor de agua (P_v) en la atmósfera del suelo.

5. Tipo de planta. En este aspecto se deben considerar los siguientes factores:

    a. Patrón de raíces. Como ya se discutió, cada patrón de raíces imprime un determinado nivel de eficiencia en la función de absorción de humedad desde el suelo. Recuérdese aquí el papel protuberante que llega a tener el asocio micorrítico que puede tener un determinado cultivo.

    b. Suculencia de la especie y variedad. La discusión es obvia. Como es de esperarse, las plantas más suculentas presentan mayor demanda evapotranspirativa.

16.11.1.1. Magnitud de los Egresos en fase de vapor.

Con el objetivo de cuantificar los egresos de humedad edáfica por la combinación de los procesos de evaporación desde el suelo y la transpiración desde las plantas, se ha sugerido el uso del índice conocido como USO CONSUMPTIVO o USO DE CONSUMO

(L / T / L^2) de un área estándar de cultivo con una planta determinada en un período de cultivo, o en un período de tiempo determinado y en ambos casos para una zona específica. Este índice es de vital importancia para la planificación de las labores de riego, y depende de los siguientes factores:

1. Condiciones climáticas de la zona.
2. Tipo de cultivo y variedad.
3. Fenología del cultivo.

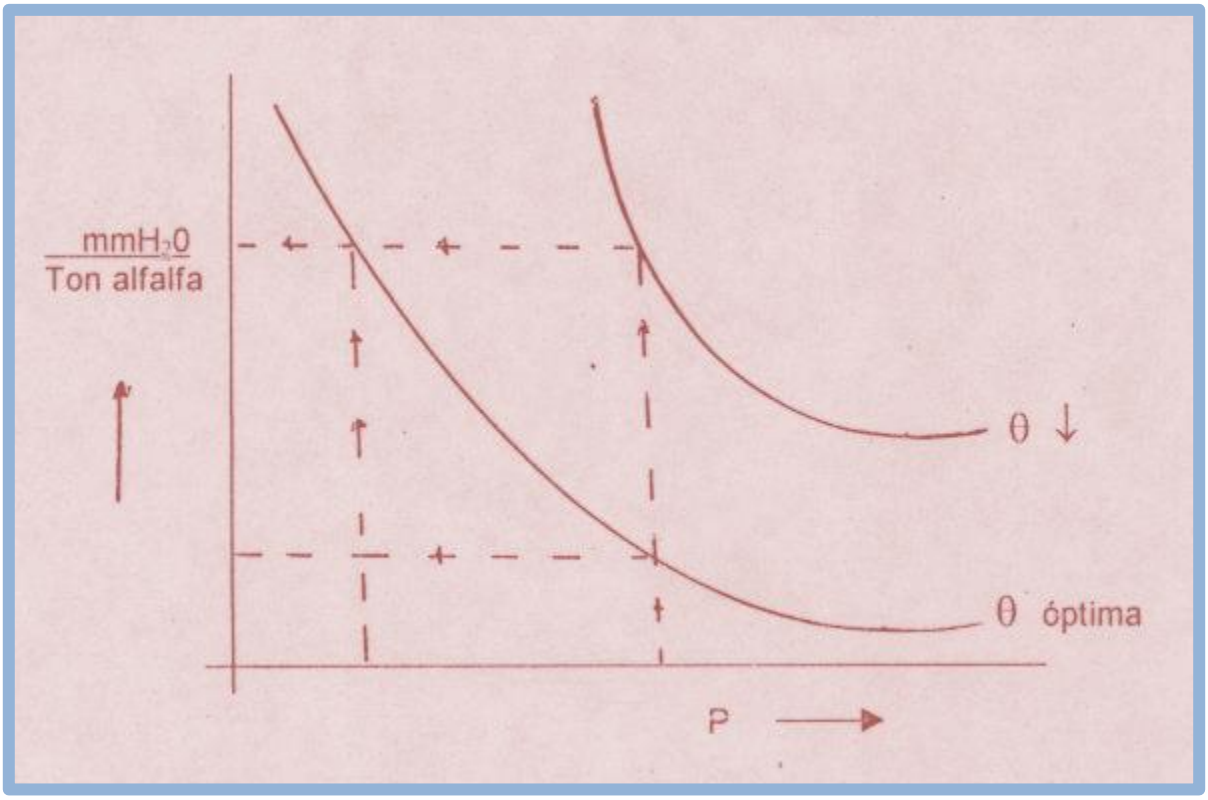


Figura 168. Gráfica que presenta la relación de la Razón de Transpiración con la toma de fósforo desde el suelo, bajo dos condiciones de régimen hídrico del mismo. Diagrama elaborado por I.D. Bustamante B. 1996, con base a O. J. Kelly, citado por Buckman y Brady,1996.

16.11.1.2. Eficiencia en el uso del agua por las plantas.

Un tema es el consumo de agua por una planta, tratado en el numeral anterior. Otro asunto bastante diferente es cómo usa la planta el agua, o de otra manera, como se comporta la relación entre cada unidad de agua utilizada por la planta determinada y la producción de esta. A esta relación se le conoce como RAZÓN O RELACIÓN DE TRANSPIRACIÓN (RT) y se expresa en (mm H_2O ***/*** unidad de producto) y es influida por los siguientes factores:

1. Condiciones climáticas.
2. Condiciones nutrimentales del suelo. Figura 167.
3. Condiciones morfológicas y fenológicas de la planta

En la Figura 168 se muestra el comportamiento de la RT en relación con la absorción de fósforo disponible en el suelo por un cultivo de alfalfa, bajo dos condiciones, de escasez y suficiencia, en el régimen hídrico del suelo. De su análisis puede concluirse que la planta, cuando se encuentra suplida adecuadamente de humedad, es más eficiente en el uso del agua y de los nutrimentos presentes en el suelo. Kelly, citado por Buckman y Brady, 1996.

16.11.1.3. Manejo de la evaporación

La transpiración (T) y la evaporación (E), son dos fenómenos naturales, y por tal razón no son ni medianamente manejables por el hombre. En cuanto a la primera, ningún agricultor estará interesado en reducirla porque una alta demanda transpirativa es indicio de una intensa actividad fisiológica del cultivo, lo cual redundará ciertamente en mayores rendimientos e ingresos para el productor. Independientemente de todo lo anterior, existen plantas como la palma de aceite, el eucalipto y el arroz, que presentan una relación, Transpiración: Evaporación desde una superficie de agua libre (Tanque de Evaporación Climatológica tipo A) mayor a la unidad. Y otras como el cacao, la alfalfa y los cereales y cítricos en fase de llenado de frutos, para los cuales, la relación referida es de 1 o muy cercana a tal valor.

Por su parte, el manejo de la evaporación puede resultar interesante para el agricultor puesto que ella implica reducción de la humedad del suelo, insumo crucial para su producción. La pregunta ahora es como lograr cierto manejo del fenómeno en referencia.

a. Manejo de la evaporación mediante Cubrimientos.

Resulta entendible que el hombre piense en el aislamiento del suelo, por diferentes medios, para lograr una reducción del egreso de humedad edáfica por acción de la evaporación, con tal fin se emplean diferentes alternativas, a saber:

1. Papeles y Plásticos. En áreas pequeñas se utiliza el cubrimiento con papeles encerados y láminas de plástico, bien de polietileno, o bien de asfaleno. Sin embargo, su empleo tiene una adopción baja, además esa utilización no se realiza con el fin expreso de reducir la evaporación, sino más bien con finalidades que demanda la agronomía de cada cultivo.

2. Rastrojos. Las cubiertas con material vegetal vivo no se hacen “exprofeso” con la finalidad de aminorar la evaporación, sino más bien buscando proteger la superficie del terreno del impacto de las gotas de lluvia.

3. Suelo. Las cubiertas con suelo se dan en algunas zonas del Caribe húmedo colombiano, principalmente en llanuras aluviales y zonas de bacines, cercanos a ciénagas y albuferas y en zonas con suelos con niveles significativos de limos. La tecnología en referencia se denomina popularmente como “Tierras de jugo”. Según la misma, pocos días después del que consideran el último aguacero de la temporada húmeda, los agricultores practican un pase de rastra con traba cero y alta velocidad (10 – 12 Km/h), buscando pulverizar al máximo el suelo, con el fin de que una eventual precipitación posterior, o bien, el rocío de las madrugadas genere un encostramiento intenso del lote, que hará las veces de cubierta de suelo, y evitará al máximo la evaporación. Por lo que esa humedad almacenada será aprovechable para una siembra anticipada de maíz, sorgo o millo, unas dos o tres semanas antes de la fecha de siembra tradicional en la región, lo cual hará más económico y fácil el manejo de esos cultivos, y garantiza mejores precios para la cosecha, que saldrá antes de que el mercado esté saturado del producto.

b. La Práctica de Cultivo.

Aunque ha caído en desuso últimamente, la práctica de pasar una cultivadora sobre el campo a los 30 ó 40 días después de la emergencia con el fin de controlar malas hierbas, aporcar el cultivo y facilitar la evacuación de acúmulos de agua superficial, en algunas zonas de los valles medio y bajo del Río Sinú, caracterizados por alta limosidad y formación de costras en su superficie, se continúa aplicando, aunque debe reconocerse que dicha práctica, además de producir posibles lesiones a las raíces del cultivo de base, lo cual es controlable siempre que se haya realizado una siembra alineada y técnica, aunque de todas formas, la práctica de cultivo es un incentivador importante de la evaporación.

c. Manejo de la evaporación en Zonas Húmedas.

En las zonas húmedas se utilizan las coberturas artificiales y los rastrojos mencionados en el literal a de este numeral, pero como ya se señaló en ese desarrollo, el objetivo real de las primeras estará más ligado a requerimientos agronómicos de cada cultivo. Y el uso de los materiales vegetales nativos estará más enfocado en su aprovechamiento como cobertura protectora de la superficie del terreno, contra la acción erosiva de la lluvia.

d. Manejo de la evaporación en Zonas Semiáridas.

El ingenio se hace más agudo en las condiciones propias de las zonas semiáridas, baste entonces citar los siguientes cuatro ejemplos:

1. Establecimiento de cultivos de bajo U.C. Los cultivos que se observan en las zonas semiáridas, generalmente de pancoger, siempre se hacen con materiales genéticos resistentes a sequía o generalmente cultivares de bajo porte, y por ende de baja demanda evapotranspirativa.

2. Cultivos con baja densidad de población. La explicación es obvia. Bajo condiciones de restricción de humedad, se hace necesario reducir el número de plantas por unidad de área.

3. Técnicas de Labranza. Entre estas se citan:

   a. Surcado áspero. Las labranzas deben dejar los terrenos poco mullidos, de tal manera que la porosidad superficial sea fundamentalmente macro, y así constituya una barrera al flujo ascendente de agua.

   b. Surcado perpendicular a la dirección dominante de los vientos. Con esto se busca hacer del cultivo una barrera disipadora de los vientos, de tal forma que las plantas eviten los vientos rasantes sobre la superficie del terreno, lo cual incentiva la evaporación desde el suelo.

   c. Cultivos de jugo. Esta técnica ya fue tratada al analizar los cubrimientos con suelo.

   d. Terraza de Zingg – Hausser. Esta técnica fue desarrollada en la década de los años 60’ del siglo pasado en el Desierto del Néguev, sur de Israel. Y consiste básicamente en intercalar pequeñas franjas de cultivo, con franjas de terreno, denominadas áreas de captación, las cuales reciben diferentes tratamientos en su superficie, con el fin de inducir a que la poca precipitación que reciban dichas áreas, escurra hacia el área de siembra vecina y humedezca su zona de raíces.

4. Trampas de Rocío. En el Norte de México, Estados de Coahuila y Chihuahua, es común ver los cultivos de pistache (*Pistacia vera* L.), donde cada planta nace y crece desde el fondo de un tanque metálico, que alguna vez fue parte de una máquina para el lavado de ropa; que en el día dan protección a la planta contra

los fuertes vientos. Y que, en las noches, condensa la humedad del rocío en sus paredes, desde donde escurre hasta las raíces de cada planta.

e. Manejo de la evaporación en Zonas de riego.

En zonas de riego deben tenerse en cuenta dos condiciones básicas, a saber:

1. Las condiciones climáticas de la zona son de tal nivel potencial de evapotranspiración, y tan escasas las precipitaciones que condujeron a planificar el sistema de riego.

2. El lote en consideración está rodeado de terrenos secos, los cuales inducirán a que la humedad tienda a fluir desde el lote hacia ellos.

Las anteriores consideraciones conllevan a que el riego deba ser planificado con un muy depurado juicio técnico, tratando de evitar alcanzar la capacidad de campo, y permitir abatimientos del régimen hídrico del suelo que no sean inferiores al umbral de riego.

Considerando ahora el aspecto de la salinidad, debe decirse que si los suelos son salinos. La estrategia de humectación referida en el párrafo anterior hace recomendable el uso intermitente de un sistema de microaspersión. Por otra parte, si el riego se practica con aguas de calidad deficiente, será recomendable el uso de un sistema de riego por goteo.

16.11.2. Egresos en Fase Líquida.

Mientras los egresos de agua en fase de vapor son vistos, como algo natural e inherente al cultivo. Las salidas en fase líquida también son naturales, pero a diferencia de las anteriores, son consideradas como verdaderas pérdidas para el perfil de suelo. Ellas son:

1. La Percolación.

2. El Escurrimiento Superficial.

A continuación, se discuten, con algún grado de detalle los dos procesos de salidas de agua en fase líquida.

16.11.2.1. Percolación y Lavado.

El agua que fluye con trayectoria fundamentalmente vertical, acelerada por la gravedad, buscando unirse a las aguas freáticas, ejerce sobre la solución del suelo un proceso conocido como lixiviación, en virtud del cual, arrastra en su flujo a una serie de nutrimentos inicialmente presentes en la solución del suelo. Tales elementos nutrientes, después de diluirse en las aguas freáticas viajarán disueltos en ellas, para alimentar finalmente a la red de drenaje natural de la región. Llegarán seguidamente a la corriente principal de la zona, y ésta los llevará finalmente hasta el océano.

16.11.2.1.1. Métodos de Estudio de la Percolación.

Con el fin de cuantificar el caudal de percolación y su composición química, se han aprobado varios métodos, los dos más conocidos son:

1. Campo de Drenaje: Consiste en aislar totalmente una determinada área del terreno, mediante un polígono de drenes entubados, y dispuestos a una profundidad tal que garantice que solo conducen las aguas de percolación del campo aislado. En el vértice más bajo del lote se excava y reviste en concreto una fosa de dimensiones controladas. De tal forma que un estadal, mira o regla graduada o un mecanismo de lectura accionada por boya permita evaluar, si se desea, en forma permanente los volúmenes brutos de efluente y las tasas de drenaje por unidad de tiempo. Facilitando además la colecta de muestras del agua drenada, para su posterior análisis de nutrimentos disueltos en ella.

2. Lisímetros: Son dispositivos que, como su nombre lo indica, tienen el objetivo de cuantificar y evaluar la cantidad y calidad de los lixiviados que se generan en un determinado volumen de suelo. Pueden involucrar un monolito de suelo no disturbado, en cuyo caso recibe el nombre de lisímetro Monolítico. Figura 169. O bien puede constar de uno o más tanques, en los cuales se depositará suelo, traído de otros sitios, procurando acomodarlo en una secuencia y condición tan cercana como sea posible, a las que tenía en su sitio de origen, En tal caso se hablará de un lisímetro de tanque. Figura 170.

16.11.2.1.2. Condiciones de Ocurrencia de las Pérdidas por Percolación.

Las condiciones responsables de que se genere el flujo de percolación están relacionadas con los siguientes aspectos:

1. Pluviosidad de la zona: Lo referente a magnitud de columna precipitada e intensidad promedia de las precipitaciones, tienen una influencia obvia como aportantes que son en el proceso de la percolación.

Figura 169. Sección transversal de un lisímetro monolítico. Tomado de Buckman y Brady,1996.

2. Evaporación media en la región: Como contraparte de los ingresos de agua a los perfiles, su importancia también resulta obvia para el tema en análisis.

3. Interceptación Radicular: Es natural que los sistemas radicales de las plantas actuarán como verdaderos obstáculos al flujo de percolación. Esta condición hace altamente recomendable el uso de sistemas de cultivo multistrata en condiciones de suelos muy permeables, con nivel freático superficial y alta pluviosidad.

4. Ocurrencia de horizontes con diferente permeabilidad: Mientras más uniforme sea la permeabilidad a lo largo del perfil, mayor será la viabilidad de la percolación.

5. Profundidad al Nivel freático: También resulta obvio que en tanto sea más superficial el nivel freático, aumentará la posibilidad de los flujos de percolación en ese perfil.

6. Frecuencia de las Precipitaciones Pluviales: Este factor junto con los dos mencionados en el primer numeral de esta lista conforman el Marco de Pluviosidad de un sitio. Y como tal, tienen marcada influencia en la viabilidad de los procesos de percolación.

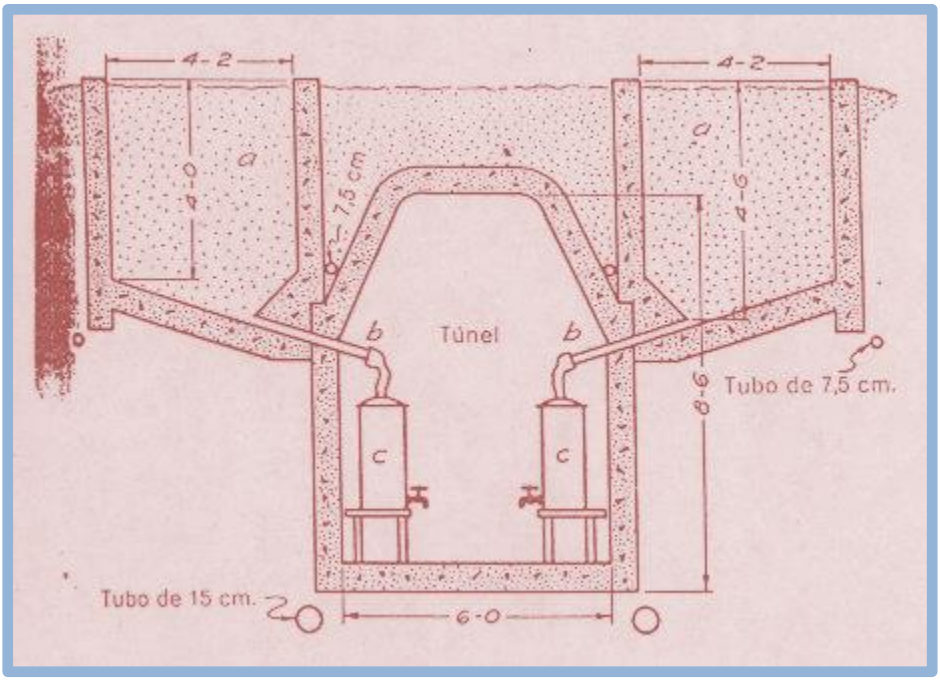


Figura 170. Sección transversal de los tanques lisimétricos instalados en la Universidad de Cornell, Ithaca, New York, en el cual el túnel puede dar acceso a toda una serie de cilindros c, destinados a colectar los efluentes generados en diferentes suelos, los cuales estarán dispuestos en tanques que siguen dos líneas paralelas. Tomado de Buckman y Brady,1996.

16.11.2.1.3. Pérdida de Nutrimentos por Lixiviación.

Como ya se señaló anteriormente, la lixiviación es un verdadero proceso de abatimiento nutrimental en los perfiles de suelo. Así entonces, el lavado de perfiles, en razón a la lixiviación de bases como el Calcio y el Magnesio es causal de acidificación en las regiones húmedas. Por su parte, el Potasio y el Azufre, exhiben unos niveles de pérdidas no tan altos como los dos primeros, pero de todas formas se reportan con frecuencia en los análisis cuantitativos de efluentes. Los fosfatos, debido a los niveles considerables de Fijación de tales aniones en los suelos minerales, no presentan cifras altas en los mismos análisis. Igualmente, los nitratos, única forma lavable del Nitrógeno, dadas las condiciones de evolución del nutrimento en el suelo, donde la intensidad de nitrificación es gobernada por las tasas ocurrentes en el proceso de nitración que le antecede, no presenta sino trazas en algunos y muy contados análisis.

De todas formas, la medida óptima para el manejo de las pérdidas de nutrimentos por lixiviación reside en la cubierta vegetal, preferiblemente multistrata, para que los materiales que potencialmente estaban en riesgo de ser perdidos por lixiviación sean mejor cedidos por extracción protagonizada por las raíces de las plantas que viven sobre un suelo, protegiéndolo, de paso, contra posibles pérdidas de nutrimentos por erosión.

16.11.2.2. Drenaje Natural del Suelo.

El Drenaje es la capacidad que tiene un suelo para liberarse de eventuales excesos de agua, bien ocurran estos, en el interior o sobre los perfiles de cada suelo. En consecuencia, habrá que distinguir entre los tres tipos de drenaje que se consideran en un perfil de suelo, a saber:

a. Drenaje Natural, el cual está conformado por:

a.1. Drenaje Externo: Hace referencia a la velocidad con la que el agua se mueve sobre la superficie del terreno, donde se ubica el perfil en estudio.

a.2. Drenaje Interno: Está relacionado con la velocidad con la que se desplaza el agua en el interior del perfil de suelo.

16.11.2.3. Drenaje Artificial.

Cuando un perfil de suelo presenta limitaciones en su capacidad para evacuar aguas de exceso, que se presentan en su superficie o que se registran en el interior de su perfil, se recurre a técnicas de Drenaje Artificial, que bien puede ser de tipo superficial o interno, y que en ambos casos se implementan con canales a cielo abierto. Aunque en el caso del drenaje artificial interno o subterráneo existe la alternativa de implementarlo también mediante tuberías porosas construidas en Gres inicialmente, y actualmente en materiales relacionados con el PVC.

a. Sistemas de Trazo de Sistemas de Drenaje Artificial.

Los sistemas de trazo de ambos tipos de drenaje artificial guardan algunas diferencias, dependiendo de que se trate de sistemas de drenaje artificial superficial o subterráneo.

Así entonces, en un sistema de drenaje superficial se habla de canales interceptores y canales conductores. Su definición es obvia, en atención a su funcionalidad. Y pueden tenerse algunos casos en los cuales un mismo canal interceptor, conduzca su caudal hasta el punto de disposición final de los escurrimientos.

En sistemas de drenaje subterráneo la priorización de canales o ductos entubados comienza desde el punto de disposición final o vertimiento del agua drenada. El canal o ducto que cumple dicha función se le conoce como ducto o canal principal o aductor. Éste recibe las aguas que conducen los ductos primarios. Y estos captan los vertimientos

que conducen los secundarios. Y así sucesivamente, existe una red amplia donde se habla de canales terciarios, cuaternarios, de 5º orden, etc.

Ahora bien, como ya quedó establecido, los sistemas de trazo son diferentes entre ambos sistemas. Así entonces, en sistemas de drenaje superficial el trazo de los canales interceptores, generalmente se ciñe a las líneas de piedemonte en un valle. Tal es el caso del canal interceptor de Purgatorio, que cruza la vía que conduce de la ciudad de Montería al municipio de Planeta Rica, específicamente en el sector de Jaraguay. El citado canal sigue la línea de piedemonte de la Sierra de Loma Grande y continúa su rumbo, hasta cruzar por el municipio de Ciénaga de Oro, bordeando allí la vertiente oriental de la sierra de Malagana, para desembocar finalmente en la Ciénaga Grande del bajo Sinú. El canal en referencia tiene el objeto de interceptar los escurrimientos provenientes de las vertientes de las postrimerías de la Serranía de San Jerónimo, desde el sector de Loma Grande hacia el norte, buscando proteger al Valle medio del Sinú, y a las obras que conforman el Distrito de Riego Córdoba Nº2. Mocarí.

En los sistemas de drenaje el canal principal generalmente sigue la línea de menor cota de la zona, por lo que su desarrollo puede incluir sectores rectilíneos, interrumpidos a trechos por algunas curvaturas. Por otra parte, los canales primarios y ordenes subsiguientes siguen dos tipos de trazos, dependiendo de la permeabilidad de los suelos y de la magnitud de los caudales de drenaje. En tal situación es común hablar de trazo en parrilla, en el cual los ductos, siempre paralelos, vierten su caudal al canal de orden superior, o en un momento dado, al principal, en un ángulo de 90º. En tanto que, en el trazo de Espina de Pescado, la aducción se da en un ángulo de 45º. Figura 171.

b. Especificaciones de los Sistemas de Drenaje Artificial.

Cada sistema de drenaje queda definido por estos tres aspectos:

1. **Profundidad:** La profundidad de los ductos y canales depende de los siguientes factores:

   a. Entorno Social. Tanto en Drenaje superficial, como subterráneo, las condiciones de la población vecina al proyecto son determinantes de gran peso en el diseño de la profundidad de los canales, buscando siempre la seguridad de la población infantil, senil y con limitaciones de movilidad que tenga que cruzar por el área del proyecto.

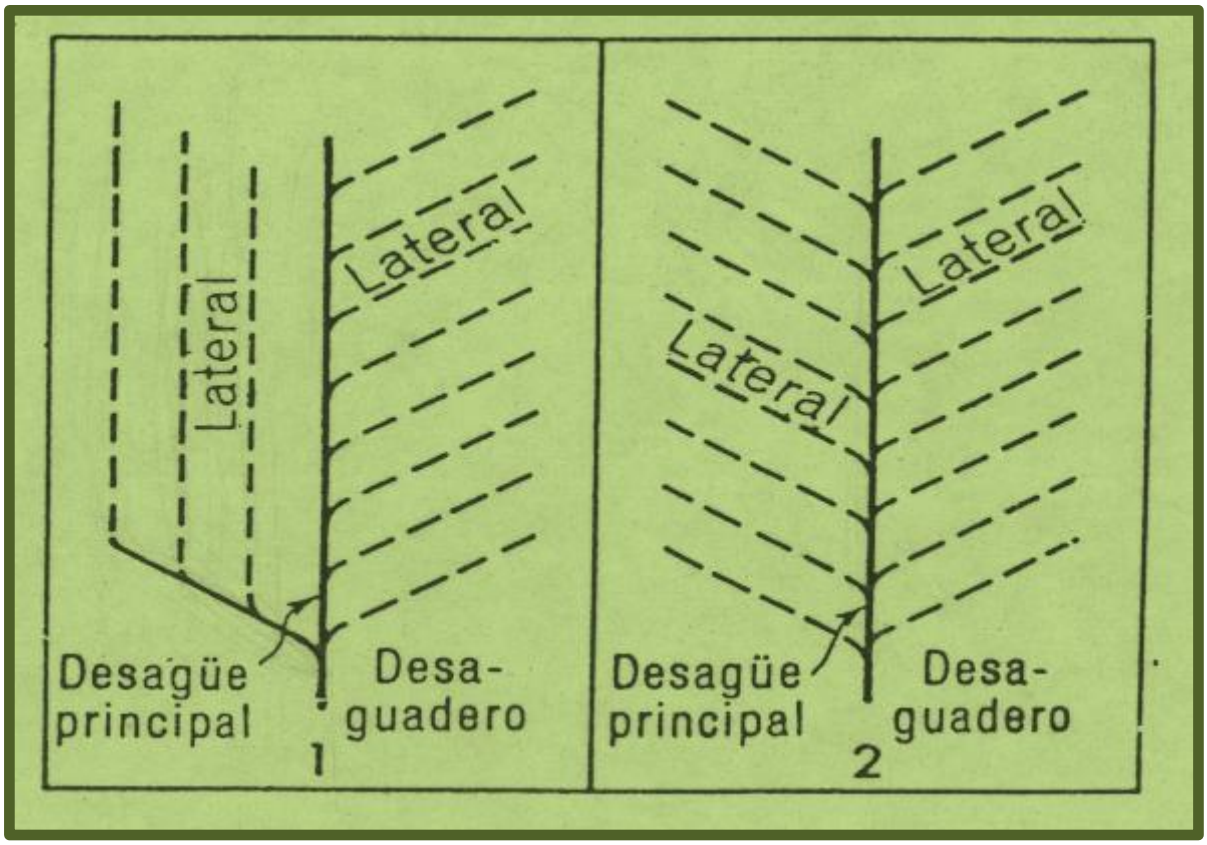


Figura 171. Sistemas de Trazo en Sistemas de Drenaje Subterráneo. 1: Combinación de trazo en Parrilla + trazo en Espina de Pescado. 2: Trazo en Espina de Pescado. Tomado de Buckman y Brady,1996.

a. Naturaleza del Perfil. Ésta hace referencia a las condiciones de estratificación de permeabilidades y a la profundidad al freático.

b. Cultivo y Variedad. Cada material genético tiene su requerimiento característico de drenaje. Por ejemplo, entre los años 1975 y 1976, las plantaciones de banano en Urabá tuvieron que cambiar de la variedad Gross Michell a la variedad Cavendish, en razón a su mayor tolerancia a la patología conocida como “Mal de Panamá”. Ese cambio, obligó a la profundización de los sistemas de drenaje subterráneo.

c. Clima. Las condiciones de pluviosidad y evaporación en la región resultan cruciales en el diseño de sistemas de drenaje superficial.

d. Condiciones de salinidad y permeabilidad del perfil de suelo. Cuando se enfrentan perfiles con alguna condición de salinidad, resulta crucial conocer los vectores salinos y las condiciones de permeabilidad, para proyectar posibles medidas de mitigación de la situación osmótica del perfil.

e. Espaciamiento entre drenes y caudales de drenaje. En drenaje subterráneo y en redes de conducción, en drenaje superficial, estos dos factores resultan determinantes de la profundidad de cada canal.

2. **Pendiente:** La pendiente de los canales dependerá de los dos siguientes factores:
   a. Grado de orden del canal en referencia
   b. Textura del suelo del terreno que surca el canal.

   Mientras mayor es el orden, así mismo será mayor el caudal de agua que fluye por él. En consecuencia, menor debe ser su pendiente. Por ejemplo, para un canal principal se recomiendan pendientes entre 0.25% y 0.5% en suelos de textura gruesa; y entre 0.17% y 1.7% en suelos de textura fina.

3. **Espaciamiento:**

   Como ya ha quedado establecido el espaciamiento es factor determinante en todo sistema de drenaje subterráneo. Y también en el subsistema de conducción en situaciones de drenaje superficial. Este espaciamiento depende de los siguientes factores:

   a. Textura del Suelo. En este tema se tiene una gran diferencia entre los dos sistemas de drenaje. En subsistemas de conducción, que trabajan en drenaje superficial, llama la atención su amplio espaciamiento en suelos arenosos. Algo que no se da en el drenaje subterráneo de ese tipo de terrenos.

   b. Estructura del Suelo. Más que la textura, el impacto más intenso en la porosidad y más aún en la porosidad drenable, que es la porosidad vacía, a succión (τ) equivalente a 50 cm de agua, y la permeabilidad de un perfil, lo ejerce su estructura.

   c. Conductividad Hidráulica. Correlativo con los dos factores anteriores, esta propiedad determinará la velocidad con la cual el freático cede agua a los canales y ductos de drenaje subterráneo. En drenaje superficial, este factor es determinante del espaciamiento y de la pendiente de los canales de conducción, con el fin de evitar filtraciones laterales.

   d. Profundidad al Freático. Este factor será determinante del espaciamiento de drenes de sistemas de drenaje subterráneo, correspondiendo menores

distanciamientos a freáticos más superficiales. En conducción de drenaje superficial, los freáticos superficiales conducirán a canales menos profundos y con menor espaciamiento entre ellos.

e. Cultivo y Variedad. Como ya se ha dicho. Cada material plantado en el campo tiene requerimientos diferentes de drenaje, en base a su morfología, fisiología y patrón radicular, por lo que el trazo de un sistema de drenaje subterráneo debe estar apoyado en un programa de uso y manejo agrológico del terreno suficientemente estable. En el caso de sistemas de drenaje superficial, este factor pierde peso, porque en tales condiciones, el principal objetivo es evacuar el exceso de agua superficial, con el fin habilitar el terreno para el cultivo, de acuerdo a la capacidad agrológica de ese terreno.

c. Ventajas de la Aplicación del Drenaje Artificial.

Las principales ventajas de la implementación de sistemas de drenaje artificial, tanto superficial como subterráneo son:

a. Ampliación de la Frontera Agrícola, con base a la reducción de áreas inundadas, por efecto de la implementación de sistemas de drenaje superficial.

b. Mejoramiento de la granulación de los suelos, como consecuencia del abatimiento de agua de exceso en la porosidad del suelo.

c. Regulación del Régimen Térmico del perfil, en razón a la disminución de los niveles de humedad en la porosidad del suelo.

16.11.2.4. Escurrimiento y erosión

El escurrimiento debe entenderse como aquella fracción de la columna precipitada que no ingresa al perfil de suelo, y corre libremente a lo largo de la pendiente del terreno. Este hecho lleva a considerar el escurrimiento como una verdadera pérdida en razón: Primero. Es una fracción de agua que nunca llega a ser funcional dentro del perfil, el cuerpo poroso natural que capta almacena y cede humedad. Y segundo. El agua que corre sobre el terreno, lo hace arrastrando nutrientes presentes en la superficie del terreno. Y lo que es más. Como el impacto de las gotas de lluvia ha disgregado previamente, en mayor o menor grado, a los agregados de la superficie del perfil. Con lo cual se da lugar a la formación de sellos y costras en la superficie, mismos que también

incentivarán el escurrimiento. Éste seguidamente cumple un proceso conocido como “Elutriación”, según el cual, el agua en movimiento trasporta preferencialmente las partículas más finas y menos densas, que coincidencialmente resultan las más cruciales para el óptimo funcionamiento del suelo, como son las arcillas y la materia orgánica. A la suma de estos dos procesos, de desprendimiento y arrastre de partículas, como ya fue referido en el Capítulo IV de este texto, se le conoce como Erosión.

Como ya se señaló en el capítulo antes referido. La erosión, en su conexión de fases de desprendimiento y trasporte implica la degradación y empobrecimiento de las partes altas del terreno. Y que, al llegar el escurrimiento cargado de sedimentos a las partes más bajas de la zona, como consecuencia de la reducción de energía en la corriente, sobreviene el proceso de sedimentación, pudiendo acarrear sepultamiento de suelos fértiles e inundaciones de diferentes magnitudes y grados de riesgo. Como también, el azolvamiento de presas y otros aprovechamientos hidráulicos similares, reduciendo su vida útil. Igualmente, los escurrimientos cargados de sedimentos llegan a los arroyos y ríos, afectando su navegabilidad e incrementan el riesgo de desbordamientos. Convirtiendo adicionalmente, de paso, a las desembocaduras de las corrientes superficiales en el mar, en verdaderas Calificaciones Definitivas del manejo que el hombre hace de sus cuencas, dándose casos como el de Bocas de Ceniza, desembocadura del Río Magdalena, Colombia, donde se requiere la continua actividad de cuatro dragas de máxima capacidad, para poder mantener el funcionamiento del canal de acceso a la terminal marítima de Barranquilla, Atlántico, Colombia. O el caso de la desembocadura del Río Sinú en Córdoba, Colombia, el cual, con un recorrido de tan solo 316 kilómetros, aguas abajo de la Presa de Urrá I, genera en su desembocadura en el Mar Caribe, el Delta de Tinajones, el cual incrementa su longitud con 500 metros adicionales cada año, en razón a su carga de sólidos en suspensión.

La erosión, como también se señaló en el Capítulo IV es un fenómeno permanente en la evolución de la tierra, cuya función es modelar el paisaje, dando lugar a extensos y fértiles valles y al labrado de lomeríos, serranías y cordilleras. Cuando todo esto sucede a una velocidad imperceptible al ojo humano, se dice que se trata de un Tipo de Erosión Geológica o Natural. Cuando los cambios en el paisaje se dan en tiempos muy cortos, dando lugar a la aparición de las tres formas de erosión. Las cuales pueden ser decoloraciones progresivas de los terrenos, y a la formación de surcos y cárcavas en diferentes áreas. El observador se encuentra ante un Tipo de Erosión Acelerada o Antrópica.

Así mismo, cuando el agente activo que produce el fenómeno de erosión es el agua, se dice que se trata de la Clase de Erosión Hídrica. Pero si el agente activo en el desprendimiento y trasporte de partículas de suelo es el viento, se dice entonces que se trata de la Clase de Erosión llamada Eólica.

Entiéndase entonces que la erosión es un proceso, que cuando es acelerado por la inconciencia del hombre, pasa cuentas de cobro ambientales de gran calado. Bastando hojear la historia brevemente para encontrar que culturas florecientes en tiempos pretéritos, hoy se hayan extinguido, como consecuencia del fenómeno. Tal es el caso de los babilonios, los persas. Y más recientemente los Teotihuacanos y los Mayas.

16.11.2.4.1. Coeficiente de Erosión.

Un Coeficiente de Erosión depende de los siguientes factores:

a. Pluviosidad de la Zona, este aspecto comprende Distribución estacional, columnas totales precipitadas e intensidad promedia de los eventos pluviales regionales.

b. Inclinación del Terreno, aquí se considera la longitud del terreno, su grado de inclinación y el micro-relieve del terreno.

c. Dimensiones y forma del Terreno. Explicación obvia.

d. Tipificación y morfología de los posibles canales de concentración de escurrimientos. Explicación obvia.

e. Vegetación. Hace relación al tipo de vegetación y grado de cobertura que brinda al terreno.

f. Naturaleza y Propiedades de Suelo y Subsuelo. Explicación obvia.

16.11.2.4.2. Prácticas para el Control de la Erosión.

Las prácticas para controlar la erosión acelerada son agrupadas, de acuerdo con la estrategia central de cada uno de los tipos de ellas. A saber:

a. Prácticas Mecánicas. En estas prácticas, más que control de erosión, lo que se busca es una defensa del suelo, conformándolo en determinadas formas para hacerlo más resistente al embate de la erosión. Tal es el caso del surcado al contorno, los diferentes tipos de terrazas, individuales y colectivas, las acequias de ladera, los canales de corona y los desagües vegetados.

b. Prácticas Biológicas o Agronómicas. En este tipo de prácticas se utiliza la vegetación como cobertura o arrope del suelo, pretendiendo aislarlo al máximo de

la acción de las gotas de lluvia, al tiempo que se busca alcanzar la máxima y sostenible productividad del suelo en el transcurso del tiempo. Ejemplos de estas prácticas son: La rotación de cultivos, los cultivos en fajas, los cultivos de cobertura, los abonos verdes y los barbechos mejorados.

c. Prácticas de Bioingeniería. En estas prácticas también se usa la vegetación, pero a diferencia de las agronómicas. En éstas se visiona a la vegetación desde el ángulo del papel ingenieril que desempeñan en y sobre el suelo. Por ejemplo, el efecto de refuerzo mecánico que ejercen las raíces en el suelo. Así mismo, el efecto de las raíces en la regulación del régimen hídrico del suelo. El efecto de incremento en la rugosidad de canales, en cursos de agua, como moderador de la velocidad de flujo, según la Ecuación de Manning. También, por su impacto en el control de deslizamientos, en razón al efecto de la vegetación en el incremento de la cohesión del suelo, y al esfuerzo normal que ella imprime sobre el plano de falla, de acuerdo a la Ley de Coulomb, la cual rige la resistencia al cortante tangencial, esto es, la ley que rige los movimientos en masa o deslizamientos.

   Ejemplos de estas prácticas son las fajinas estacadas, los espigones construidos con ramas y trocos vivos, los enramados en batería, los filtros en vegetación, o canales ahogados, para el drenaje controlado de zonas de ladera, las celdas de captación de humedad excavadas en taludes de pendiente considerable, trinchos en ramas para el control de cárcavas, etc.

d. Prácticas Biotecnológicas. En esta estrategia también se visiona a la vegetación desde el ángulo de sus efectos ingenieriles, pero a la vegetación se le complementa con algunos elementos tecnológicos, con el fin de potenciar su efecto. Ejemplos de ellas son: El rip rap vegetalizado en riberas de corrientes de agua, enmallados de diferentes tipos, biomantos de muy variados materiales para siembras en alta pendiente, hidrosiembra, geoceldas para el manejo y fijación de materiales gruesos, etc.

16.11.2.4.3. Prácticas para el Manejo de la erosión en cárcavas.

a. Dinámica de Carcavamiento.

En razón a representar la forma sintomática de niveles de erosión severa y muy severa, las cárcavas y su manejo, ameritan un tratamiento destacado. Las cárcavas tienen una evolución similar a la de cualquier flujo de agua, que son: fases incipiente, reciente, juvenil, madura y senil.

Como quedó establecido en el Capítulo IV, las condiciones para que se de la formación de una cárcava son:

1. Concentración de escurrimientos en un punto del terreno.

2. Cambio abrupto de la pendiente del terreno en el sitio de concentración de escurrimientos.

Cuando se conjugan las dos condiciones anteriores se genera un proceso co-nocido como “erosión por caída” o “erosión remontante”, por cuanto es un proceso denudativo que avanza cuesta arriba. Figura 172. Por lo cual las obras para controlar este tipo de geoformas deben direccionarse desde las partes más altas del lote y avanzar cuesta abajo del terreno.

b. Estrategias para el Manejo de Cárcavas.

No obstante, las estrategias para el manejo de este proceso, debe obedecer a una planificación que esté de acuerdo con la dinámica que exhiba la geoforma. Así entonces, el manejo de cárcavas incipientes y recientes podrá ser tan sencillo como el “borrado” de la geoforma incipiente con un paso de ida y vuelta con el arado de discos. O el relleno y enrase de la cárcava reciente, tomando material de préstamo de promontorios cercanos, seguidos por el aislamiento del área y la aplicación de un período de barbecho, que permita el cubrimiento del área con la vegetación nativa de la zona, bien en forma inducida o natural.

El manejo de cárcavas juveniles y maduras requiere de ingentes esfuerzos de tiempo y de recursos, debido a la intensa actividad de degradación que caracteriza a estas dos fases evolutivas, y al grado de complejidad de las técnicas requeridas para estas condiciones. Por consiguiente, solo se justifica aplicar las técnicas de manejo, que se discuten a continuación, después de trasegar un riguroso análisis social, económico y sanitario. Bajo tales situaciones, el trabajo comienza por la fase denominada “de cabeceo” de la cárcava. Con ella se pretende reducir a un mínimo y preferiblemente a nulificar el ingreso de escurrimientos a la cabecera, o punto de avance remontante, de la cárcava. En tal sentido, es común recurrir a canales de desviación de escurrimiento, aguas arriba de la cabecera; también al uso de terrazas de drenaje en igual posición del terreno. Igualmente se hace uso algunas veces de presas de disipación de escurrimientos en un sitio ubicado aguas arriba de la cabecera.

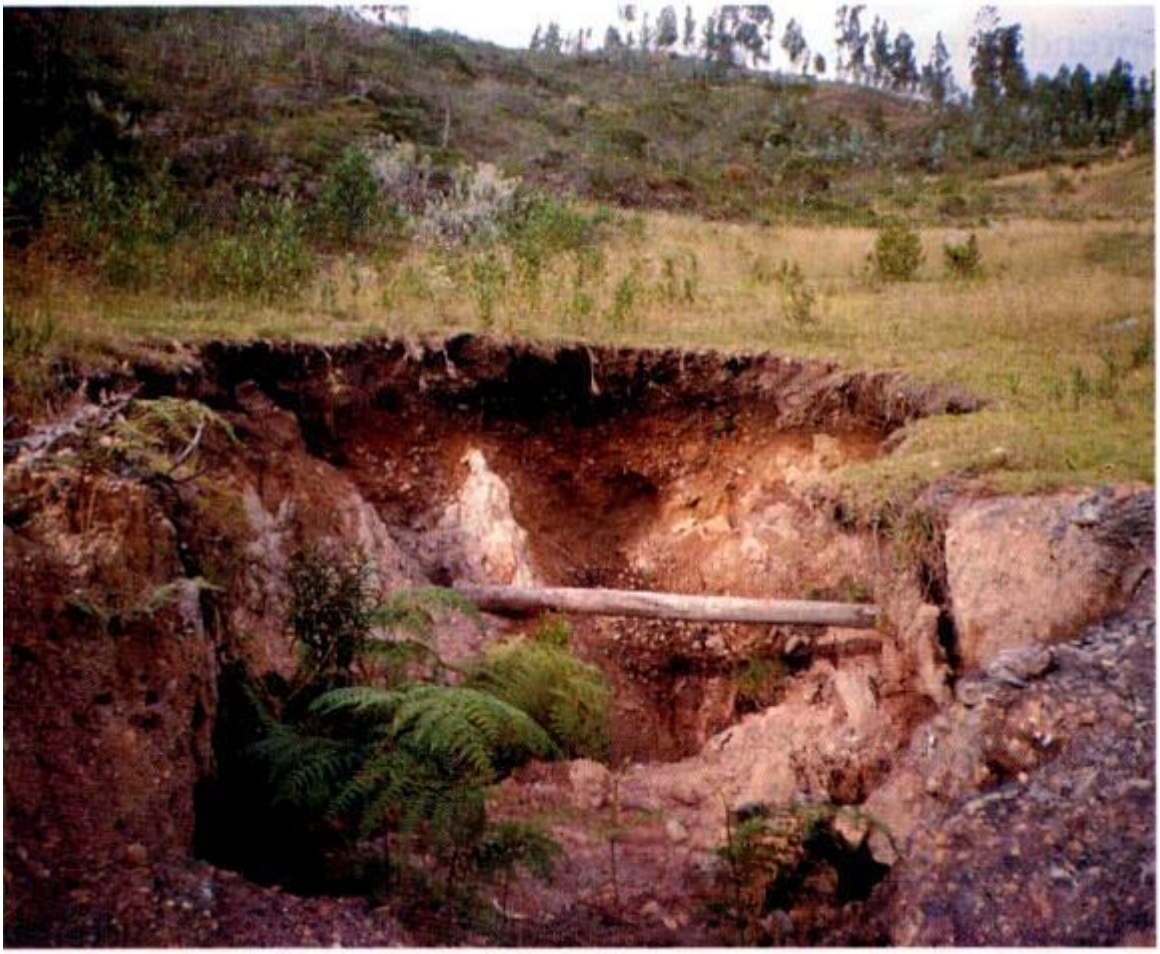


Figura 172. Erosión por caída o erosión “remontante” en la cabecera de una cárcava. Tomado de Internet. 2020.

No obstante, las técnicas de “cabeceo de cárcavas” muchas veces resultan rebasadas por las circunstancias y es muy probable que continúen llegando a la cabecera de la cárcava, cierto volumen de escurrimientos. Bajo tales condiciones, la estrategia subsiguiente tendrá que abocarse a controlar tanto la erosión por caída que se registra en la cabecera y algunas paredes laterales de la cárcava, que tiendan a darle a la cárcava una sección transversal en “U”. Como también al control de la erosión en canal, ocasionada por los escurrimientos que corren sobre el lecho de la geoforma, tendiendo a darle a la misma una sección transversal en “V”

Las técnicas para el control de estas últimas condiciones se fundamentan en la implementación de una batería de presas filtrantes o de control de azolves, las cuales pueden estar construidas en ramas acomodadas, troncos de madera, malla metálica entretejida con estolones de pastos, piedra acomodada, gaviones, mampostería, concreto y suelo nucleado. Colegio de Postgraduados de Chapingo, México, 1977.

Figura 173. Cárcava de Tequesquinahuac, Texcoco, México, México. Paramento húmedo de una presa filtrante construida en mampostería pesada. Nótese la copiosa captura de sedimentos. Foto I.D. Bustamante B. 1985.

Finalmente, el manejo de cárcavas seniles se hace prohibitivo, en muchos casos, debido a sus dimensiones considerables. Sólo la justificación sanitaria y de seguridad social le da viabilidad a este tipo de intervenciones. Tal es el caso de las cárcavas de San Bernardino (182 ha.) y Tequesquinauac (224 ha) en el Estado de México, México, donde más que rehabilitar la productividad de estos terrenos, se pretendía reducir el arrastre de sedimentos desde tales geoformas hasta el lago de Texcoco, circunvecino a la Ciudad de México, D.F. Buscando proteger a la población de la Ciudad (32 millones de habitantes fijos y 2 millones flotantes, en 1985). Ya que dichos sedimentos, por acción eólica, durante el período seco, diciembre a marzo, se venían convirtiendo en material particulado suspendido en la atmósfera de esta, por lo que afectaba fuertemente la salud de su población. Figuras 173, 174 y 175.

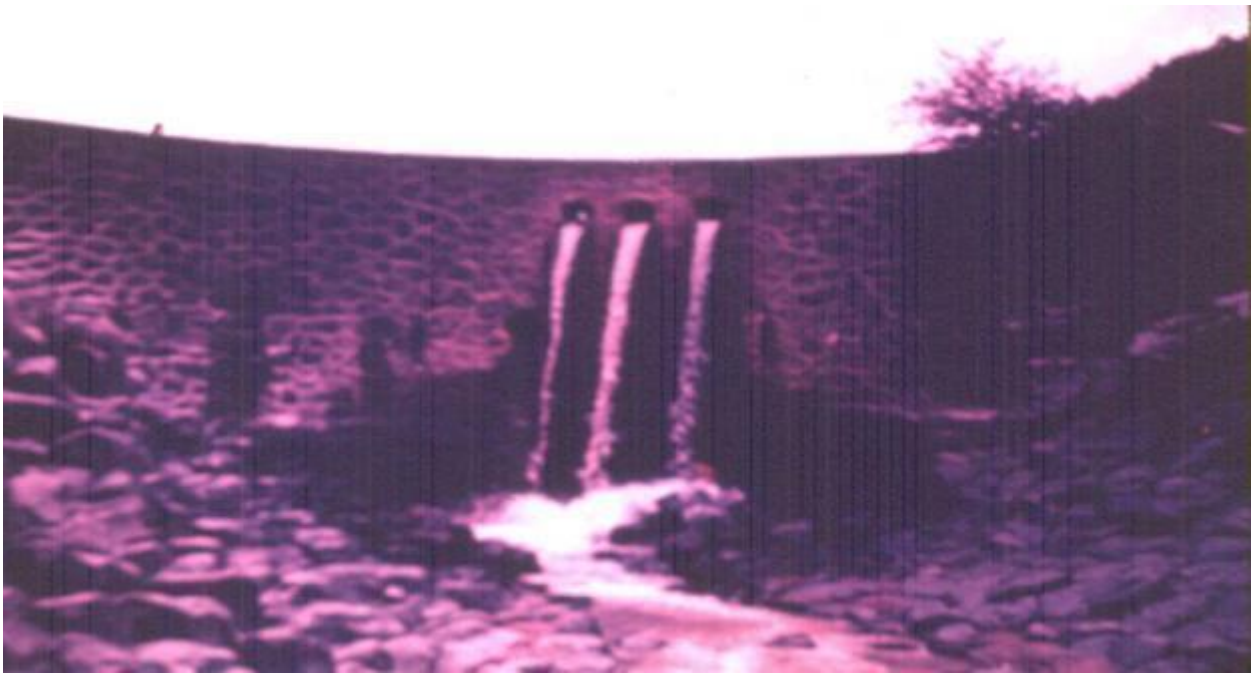


Figura 174. Cárcava de Tequesquinahuac, Texcoco, México, México. Paramento seco de la misma presa filtrante construida en mampostería pesada. Nótese el vertimiento en un tanque de remansamiento, construido solidariamente con la presa. Foto I.D. Bustamante B. 1985

Figura 175. Cárcava de San Bernardino, Texcoco, México, México. Paramento húmedo de una batería de presas filtrantes construidas en mampostería liviana. Nótese la captura de sedimentos, abundante, pero de menor volumen al presentado en la Figura 172. Foto I.D. Bustamante B. 1985.

XVII. AIREACIÓN DEL SUELO

“La tierra está tan viva, que respira a través de cada uno de los poros de su delicada y sensible piel. La cual no es otra más que el maravilloso suelo”

Bustamante, 2020.

La porosidad del suelo siempre estará ocupada por agua o por aire, en una continua pugnacidad entre las dos fases, de acuerdo a la situación climática que impere en el ecosistema que enmarca a cada suelo. De ahí que se señale en el esquema clásico de la distribución de las fases de la materia en el suelo, Capítulo IX, Figura 68, que aire y agua comparten dinámicamente “mitad a mitad”, el casi 50% poroso, que discurre entre el otro aproximadamente 50%, ocupado por los sólidos del suelo.

17.1. EL OBJETIVO DE ESTUDIO.

La aireación del suelo resulta crucial para el desempeño de facetas tan diversas e importantes del suelo como son: la actividad biótica del suelo, la evolución húmica, los procesos de óxido reducción en el medio edáfico. Y por si esto fuera poco, la producción de los cultivos resulta fuertemente impactada por el régimen de aireación del suelo, a través de aspectos como el crecimiento de raíces, y la absorción de nutrientes y agua por las mismas. Finalmente es conveniente anotar que condiciones de anoxia pueden desencadenar la presencia de sustancias letales como ácido sulfhídrico, metano, amoníaco. Y, lo que, es más, da paso a la denitrificación, y consecuentemente a la pérdida de nitrógeno desde el suelo, en forma de gas.

El caso es que tanto en las plantas, como en la biota del suelo y los animales superiores que habitamos sobre él se da la reacción de respiración, bajo los siguientes términos:

$$[C] + O_2 \rightarrow CO_2$$

El problema por estudiar se plantea entonces bajo los siguientes términos: “¿Cuáles serán las condiciones que debe cumplir un suelo, para que pueda calificarse como adecuadamente aireado?”. O de otra forma: “¿Cuáles son los mecanismos y procesos

que viabilizan el ingreso de oxígeno al suelo, y la liberación de CO_2, desde él a la atmósfera?”

Comencemos por dar respuesta a la primera pregunta. A ese respecto deberemos tener claro que las condiciones que aseguran la adecuada aireación en un suelo son:

1. Suficiente espacio vacío de agua en la porosidad del suelo.

2. Continuidad y transmisividad apropiadas en el medio poroso vacío de agua, esto es, se busca tener facilidad para el intercambio rápido y fácil de gases, desde y hacia el suelo. Por tal razón, las condiciones de sellamiento, encostramiento superficial, adensamiento superficial y subsuperficial, compactación subsuperficial e inundación resultarán opuestos a esta condición

La segunda pregunta será respondida en el trascurso del Capítulo que se comienza a desarrollar.

17.2. COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA DEL SUELO.

El aire del suelo está constituido por un gas de composición parecida a la de la atmósfera externa, la misma que el lector respira en este momento, pero con proporciones diferentes de cada uno de sus componentes. Dichas diferencias, como se verá más adelante, posibilitan la respiración de los organismos del suelo y de las raíces de las plantas que cubren su superficie. Así entonces, dada la intensa actividad biótica que tiene lugar en el suelo, siempre la concentración de CO_2 en el suelo, será muy superior al mismo dato en la atmósfera externa, mientras ocurre todo lo contrario, con el oxígeno, el cual exhibe mayor concentración en la atmósfera externa, y menor en la edáfica.

Si bien la aireación del suelo no motiva demasiado a su estudio por el grueso de los profesionales de la Edafología, su análisis arroja bastantes luces sobre una serie de procesos biogeoquímicos que tienen lugar en el suelo, al mismo tiempo que resulta crucial para la respiración de numerosas biocenosis edáficas y de todas las raíces que medran en ese medio. Otro punto de rotunda importancia de la aireación del suelo estriba en el hecho de su vital importancia en el comportamiento del potencial redox del suelo. Y, lo que, es más, en el tipo, cantidad y calidad de humus generado en un perfil determinado. Por otro lado, el manejo del suelo tiene fuerte impacto en el comportamiento de la aireación del suelo, por ejemplo, en los suelos cultivados permanentemente por tiempo prolongado, solo apoyando dicha labor en la aplicación de fertilizantes minerales, será normal que paulatinamente caigan los tenores de humus, y lo que es más, la disminución de su calidad para agregar los granos del suelo, lo que conduce a un deterioro de la porosidad, vital para el funcionamiento de la aireación. En

general se establece que cuando la porosidad decae por debajo de 10%, comienzan los problemas con la aireación del suelo. Así mismo, se presentan dificultades en este régimen, cuando la concentración de oxígeno cae por debajo de 2%, o el CO_2 rebasa el nivel de 5%.

Carlos Dorronsoro, investigador de la Universidad de Granada, España reporta una composición comparativa de las dos atmósferas vecinas, en y sobre el suelo, como se presenta en la Tabla 18.

La presencia del binomio O_2 – CO_2 en la atmósfera del suelo es apenas una consecuencia lógica de la marcada importancia que se registra en ese ambiente gaseoso para el proceso respiratorio de raíces y las numerosas biocenosis que continuamente se dan en ese medio.

Así mismo, el CO_2, en concentración superior en la atmósfera edáfica en comparación con la atmósfera externa, resulta de vital importancia en la disolución de materiales en el suelo, al combinarse con el hidrógeno para formar ácido carbónico, H_2CO_3.

Tabla 18. COMPOSICIÓN COMPARATIVA DE LAS ATMÓSFERAS EXTERNA Y DEL SUELO, Dorronsoro,2008.

GAS	Atmósfera Externa %	Atmósfera del suelo %
Oxígeno	**21**	**10-20**
Nitrógeno	**78**	**78,5-80**
CO2	**0,03**	**0,2-3**
Vapor de agua	**variable**	**en saturación**

La ocurrencia de vapor de agua en la atmósfera del suelo, y su nivel de saturación en el rango húmedo, resulta de vital importancia para mantener la funcionalidad de las raíces a niveles de succión cercanos al PMP, en tanto que en cualquier punto del rango de humedad en referencia se constituye en coadyuvante en la humectación y dilución controlada de los materiales fertilizantes adicionados al suelo.

Finalmente, la presencia de nitrógeno en ambos ambientes gaseosos es indicio de la actividad de las bacterias simbióticas y no simbióticas, fijadoras del nutrimento, tomado de la atmósfera externa.

17.3. VARIACIONES EN LA COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA DEL SUELO.

Como puede observarse en la Tabla 18, la presencia de nitrógeno es bastante similar entre las dos atmósferas vecinas. Así mismo, la suma de ($CO2 + O_{2)}$ en ambos ambientes es bastante similar, aunque no sus sumandos. Igual ocurre con el CO_2 y el vapor de agua, que son mayores en el aire del suelo, en comparación con la atmósfera externa. Sin embargo, este cuadro comparativo de concentraciones de gases puede sufrir algunas variaciones.

Así, por ejemplo, mientras la presencia de O_2 en los primeros milímetros superficiales del perfil de suelo puede alcanzar niveles entre 18% y 21%, la disminución de tales tenores es dramática, al incrementar la profundidad en el mismo perfil. Igualmente, Mientras el CO_2 registra concentraciones en el horizonte superficial de entre 0.1% y 5.0%, con la profundidad puede alcanzar un tenor cercano a 20%.

La composición de la atmósfera edáfica puede variar tanto que, bajo condiciones de anoxia, las diferentes reacciones de reducción que ocurren consecuentemente hacen posible la presencia en dicha atmósfera de gases como ácido sulfhídrico (H_2S), amoníaco (NH_4) y metano (CH_4). Con base en lo anterior, es posible establecer que la composición del aire del suelo es muy variable, debido a que está gobernada por tres condiciones tan dinámicas como son:

1. La actividad de raíces y microorganismos.

2. Las condiciones de intercambio gaseoso con la atmósfera externa.

3. Espacio poroso vacío de agua.

Para entender mejor la variabilidad que nos ocupa, es conveniente establecer que el CO_2 es mayor y O_2 es menor en el suelo en las siguientes situaciones:

1. Más en temporada de lluvias que en seca por mayor actividad de raíces y microbiota.

2. Más en suelos abonados, fertilizados y encalados que en suelos sin ningún mejoramiento por mayor actividad biótica en los primeros.

3. Más en suelos húmedos que en suelos secos, por menor difusión en éstos últimos.

4. Más en suelos de textura fina que en suelos de textura gruesa por difusión restringida en los primeros, en razón a la mayor presencia de humedad edáfica(θ_g).

5. Más en suelos de baja agregación que en suelos de alta agregación, también en razón a una mayor humedad gravimétrica en el suelo (θ_g).

6. Más en el subsuelo que en la capa superficial, en razón a mayores niveles de humedad (θ_g) en el subsuelo, y consecuentemente, a la ocurrencia de mayores obstáculos a la difusión, con el incremento de la profundidad en el perfil

Después de todos los planteamientos anteriores puede concluirse que la variabilidad del aire del suelo es mucho mayor que la que se registra en la atmósfera externa.

Como ejercicio académico se sugiere que los estudiantes analicen la variabilidad contrastada de las dos atmósferas vecinas, bajo las siguientes condiciones:

1. Suelos Anegados
2. Suelos Masivos
3. Suelos Recién abonados
4. Suelos Bajo cultivo
5. Suelos en barbecho

17.4. LA CAPACIDAD DE AIRE DEL SUELO.

La Capacidad de Aire del Suelo se define como la fracción ACTUAL de porosidad libre de agua, esto es, el porcentaje o el volumen de espacio apto para la circulación de gases en el suelo. En razón a ser función directa de la porosidad total (W_t %) estará impactada directamente por la textura, la estructura del suelo y la humedad edáfica presente (θ_g) en el momento en consideración. Téngase en cuenta, por ejemplo, que un suelo de textura gruesa y nivel freático profundo presentará consecuentemente una alta Capacidad de Aire.

Debe distinguirse la Capacidad de Aire del estimativo del que puede ser, en ciertas condiciones, su valor máximo, cual es, la capacidad de aireación, esto es, la porosidad no capilar, aquella cuyo diámetro rebasa las 60 micras (W_a Ø > 0.06 mm = 60ų), misma que solo tiene valor comparativo entre suelos, pero nada dice de las condiciones que reviste el proceso de aireación de un suelo, en un instante determinado. Se ha logrado establecer que el VEA (τ_m) de la porosidad de aireación (W_a) que está en discusión, se

registra al nivel de la succión equivalente a una columna de agua de 50 cm. de altura. Aunque algunos autores hablan de 40 cm, y otros hasta de 1.0 m. Por tal razón la profundidad mínima de los drenes parcelarios, o de orden menor, oscila entre 0.4 y 1.0 metros.

Si la profundidad al nivel freático es inferior a los 50 cm, la porosidad de aireación será mayor a la capacidad de aire de ese suelo. No obstante, teniendo siempre en mente lo crucial que resulta la profundidad al freático, puede establecerse que una relación $W_a / W_t > 10\%$ garantiza un adecuado funcionamiento de la aireación del suelo. Sin embargo, algunos pastos resistentes a la anoxia moderada, como Pasto panameño (*Ischaemum ciliare.* Retz) y Pasto Pará o Admirable (*Brachiaria mutica*) toleran un valor inferior a 10% en esta relación de porosidades.

La porosidad de aireación de los suelos medios y finos guardan relación directa con el tipo, clase y grado de su condición estructural. En suelos gruesos, arcillosos de alta estabilidad estructural como las lateritas y en los “muck” esta porosidad será considerable. Conviene, para terminar este punto aclarar que el valor de porosidad de aireación o no capilar no debe ser tomado como índice inobjetable de la capacidad de aireación, dado que puede llegarse a tener lo que se denomina, “poro bloqueado”, este es el caso de macroporos que rebasan los diámetros ya referidos, pero no participan de la aireación, en razón a estar rodeados de microporos.

En atención a la incertidumbre que rodea el concepto de la porosidad de aireación, cuando se emplea la Olla de Richards, los Laboratorios comúnmente reportan los dos valores de volúmenes vacíos de agua a las succiones (τ_m) equivalentes a 0.4m y 1.0 m.

17.5. LA RENOVACIÓN DEL AIRE DEL SUELO.

Como es lógico en todos los fluidos newtonianos, líquidos y/o gaseosos, que se encuentran en contacto y son miscibles, la atmósfera del suelo y la atmósfera externa buscan alcanzar constantemente un estado de equilibrio inestable, como consecuencia de los cambios de composición mutua, sobre todo en la atmósfera edáfica. Tal hecho permite tanto la oxigenación del suelo, como el enriquecimiento en CO2 de la atmósfera externa (epigea). De no ser así el medio edáfico sería anóxico y no solo las biocenosis, sino la atmósfera edáfica sería completamente diferente a las que hoy se pueden observar en él. Tal proceso de intercambio se realiza mediante dos procesos distintos: el movimiento en masa y la difusión. A continuación, la discusión detallada de cada uno de los procesos referidos.

17.5.1. El Flujo de Masas o Flujo Masivo.

Este primer proceso es generado por las variaciones de presión total y temperatura entre los distintos horizontes del suelo y finalmente, entre el horizonte superficial y la atmósfera externa. El gradiente entre ambos puntos vecinos y extremos, en cada caso estimula que salga el aire del suelo y se renueve por el que se encuentra sobre su superficie. El viento, por ejemplo, impulsa al aire dentro del suelo mientras succiona aire de la atmósfera. Del mismo modo, las aguas de lluvia, al fluir más o menos verticalmente a través del perfil del suelo, expulsan el aire presente en la atmósfera edáfica hacia la atmósfera externa. Quede claro aquí, que el flujo masivo es un flujo viscoso, y en consecuencia está regido por la Ecuación de Poiseuille, esto es, funciona en proporcionalidad a la cuarta potencia de los poros vacíos en el instante en consideración, además tiene ocurrencia episódica, aislada y casual. Esto es, no reviste actividad permanente.

Los flujos masivos pueden darse por cualquiera de las cuatro causas siguientes:

1. Variaciones de presión barométrica. De por sí, poco frecuentes y casi imperceptibles.

2. Variaciones de temperatura ambiental. Con comentario similar al del punto anterior.

3. Variaciones de humedad edáfica (θ) a causa de evaporación desde el suelo y la distribución de humedad a través de su perfil. Si bien la evaporación es un fenómeno persistente, el espacio que deja vacío a cada instante es reducido, por lo cual la admisión de gases por flujo masivo también es minúscula. La redistribución de humedad en la masa del perfil de suelo puede tener un impacto más sensible, pero recuérdese la reducida frecuencia con la que ocurre.

4. Vientos. Generalmente con aportes reducidos y ocurrencia algo más que casual, excepción hecha de algunas zonas del planeta, las que, por su alta ventosidad se consideran marginales para algún desarrollo de la vida.

5. Aporte de gases en el agua de lluvia. Considerando que 1 centímetro de lluvia por hectárea equivale a 100 m^3 de precipitación, y que de estar saturada con oxígeno, aportaría 4339 gr de O_2 a 20 ^{0}C, esto es, 3000 litros de O_2 a presión atmosférica, se tendrá que aceptar que las aguas de lluvia aportan más a la aireación del suelo, que las aguas de riego.

Como conclusión a la discusión anterior tendrá que decirse que, dada la poca frecuencia con la que ocurre, y en atención a la exigua magnitud de sus aportes, el flujo masivo resulta a todas luces insuficiente para suplir los persistentes requerimientos de aireación que presenta el suelo.

17.5.2. La Difusión.

La superficie del suelo actúa como una membrana permeable que permite el tránsito de los gases en uno u otro sentido. De este modo, se intercambian selectivamente gases entre el medio edáfico y la atmósfera por la tendencia a equilibrar sus respectivas composiciones, en obediencia a diferencias entre los niveles de concentración o presiones parciales de los diferentes gases. En consecuencia, cuando aumenta la concentración de CO_2, en el suelo, se produce un flujo de él hacia la atmósfera, y lo mismo ocurre con el oxígeno, pero en sentido contrario, para poder generar más CO_2. Se trata entonces del mecanismo esencial y permanente para posibilitar el intercambio recíproco de gases entre el suelo y la atmósfera externa. La difusión está regida por la Ley de Fick, y según ésta depende de la presión parcial de cada tipo de gas, en cada uno de los dos ambientes vecinos, así como de la porosidad del sistema edáfico, condicionada a su vez, por su textura, estructura y el contenido de humedad edáfica que se registra en un momento dado, por tal motivo, poros muy finos, llenos de agua, serán una interferencia al flujo difusivo desde el suelo hacia la atmósfera externa, y viceversa.

Debe quedar muy claro que varios gases pueden difundir simultáneamente entre dos cámaras vecinas, ocupadas por aire obedeciendo simplemente a los coeficientes de difusión de cada gas en el aire, no obstante, en el suelo, el fenómeno se registra en obediencia al coeficiente ya referido, pero éste estará reducido en comparación al primero, en atención a las condiciones de tortuosidad y anisotropía de la porosidad vacía de agua que se registre en ese instante entre los dos puntos en consideración. Por ello, no es posible hablar de un nivel de Succión Total del Suelo (τ_t) que posibilite una máxima difusión de gases entre el medio edáfico y la atmósfera externa. Si bien comúnmente se corre la voz de que una $\tau_t > 1.0$ bar, garantiza una difusión máxima en suelos con óptima agregación y que no presenten ningún horizonte endurecido o con microporosidad considerable.

En este punto de la discusión es conveniente recordar que cada horizonte del suelo posee unos ambientes iónicos, temperatura, textura y estructura diferentes. Del mismo modo, sus atmósferas no son las mismas. Por estas razones cuando un suelo está compuesto de horizontes con atributos muy contrastantes, las biocenosis edáficas y los procesos biogeoquímicos que suceden en él tienden a diferir bastante entre horizontes. Debido a que la edafogénesis suele producir este tipo de contraste entre horizontes, la

evolución de un suelo da lugar a su diversificación de ambientes, a los cuales debemos añadir otros efectos, como el efecto rizosférico, dado que cada rizósfera constituye un ambiente excepcional de actividad biótica, y, por tanto, también respiratoria.

Como bien se sabe, la composición de la atmósfera ha variado a través de los diferentes períodos geológicos. En periodos específicos, como en el Cretácico, por ejemplo, en los que la concentración de CO2 del aire externo era mucho mayor que el dato actual. Debemos suponer, por tanto, que la atmósfera del suelo también era más rica que la actual en ese gas, lo cual obligadamente afectaba a todo el metabolismo del ecosistema y a la biota edáfica.

17.6. LA VELOCIDAD DE DIFUSIÓN DE OXÍGENO.

La aireación, como intercambio de gases que es, entre las dos atmósferas, comparadas en los numerales 2 y 3 de este capítulo, y más que todo como proceso renovador de ambas, es un fenómeno altamente dinámico, que es evaluado cuantitativamente por la Velocidad de Difusión de Oxígeno, VDO (µ gr $O_2/cm^2/min$), Letey y Stolzy, 1964.

La Velocidad de Difusión de Oxígeno, VDO (µ gr $O_2/cm^2/min$) cuando es extremadamente baja, conduce a condiciones de anoxia en el suelo. En tanto que, cuando es muy alta afecta intensamente a la persistencia del humus en el suelo. Por tanto, la condición de VDO intermedia se hace más apropiada, y se manifiesta en una persistencia alta de tenores altos de materia orgánica, lo cual desencadena un círculo virtuoso, ya que tal condición redunda en una óptima agregación y porosidad del suelo, todo lo cual se traduce en una aireación más eficiente en el suelo.

Es natural pensar que los requerimientos de aireación de un cultivo se incrementan en relación directa con la densidad de población, y con los períodos fenológicos de máximo crecimiento y desarrollo. Los mismos autores, Letey y Stolzy, 1964 fijan como valor crítico de la VDO el de $30x10^{-8}$ gr O_2/cm^2 / min. En tanto que señalan que los valores de concentración de O_2 en la atmósfera del suelo deben oscilar entre el 21% de la atmósfera externa y un mínimo crítico de 10%. Acotan además en 2% el nivel crítico de presencia de Oxígeno en el suelo, como para detener el crecimiento vegetal. Finalizan su escrito sentenciando que los desórdenes fisiológicos que lleguen a presentar las plantas por deficiencias en la aireación del suelo se deben, dentro de los límites normales de funcionamiento del suelo a deficiencias de O_2 y no a excesos de CO_2.

Una dotación apropiada de oxígeno en el suelo permitirá a las plantas tomar más eficientemente el agua y los nutrientes, esto es, la razón de traspiración de las plantas

se optimizará. Tan cierta es tal situación que cuando un terreno se inunda y sobreviene la anoxia en su medio poroso, las plantas sucumben ante la denominada “sequía fisiológica”. No obstante, la afectación en la toma de nutrimentos no es igual para todos los iones. Se ha llegado a establecer que tal afectación guarda el siguiente orden:

K >>> Ca > Mg > N > P

Esta es la razón para que plantas tan “potasícolas” como son el banano y el plátano, sean tan exigentes en sus requerimientos de drenaje, no obstante, debe aquí llamarse la atención acerca del trazo y especificaciones de profundidad, pendiente y orientación de los sistemas de drenaje artificial subterráneo, los cuales deben fundamentarse en un depurado estudio freatimétrico de cada situación. Siendo preferible que se enmarque en un estudio regional, el cual debe estar regido por la autoridad ambiental de la zona, evitando así el drenado excesivo de algunas áreas, como ocurre en el eje bananero de Urabá. O a condiciones de concentración de vertimientos, con la consecuente afectación a la fauna y flora de tales sitios, como ocurre en la localidad de Ciénaga, Magdalena, Colombia. Siendo las dos situaciones atribuibles a la ausencia de coordinación por un Plan Maestro de Drenaje Zonal.

Así mismo, la presencia de oxígeno en el perfil de suelo es factor determinante de la profundidad y el calibre alcanzados por las raíces de las plantas. Pero nuevamente, el grado de afectación será diferente entre especies. Y se puede establecer que dicho orden de impacto será algo como:

Tomate, papa > maíz, soya, algodón >> pastos.

Y aún más, entre los mismos pastos habrá marcadas diferencias entre especies, pudiéndose registrar secuencias como esta:

Pasto Yaragua, Uribe o puntero (*Hyparrhenia rufa*) > Pasto llanero (*Brachiaria dictyoneura*) > Pasto panameño (*Ischaemum ciliare.* Retz)

No obstante, cabe destacar a plantas como el arroz, plenamente adaptada a condiciones de anoxia en el perfil de suelo, en razón a condiciones particulares de morfología y funcionalidad que se dan en sus raíces. Igualmente, un grupo considerable de mejoradores de plantas están en la tarea de lograr plantas alimenticias e industriales, cada vez más adaptadas a condiciones de carencia temporal y/o a limitaciones de niveles de oxígeno en el perfil del suelo.

17.7. LA AIREACIÓN Y OTRAS PROPIEDADES DEL SUELO.

Resulta apenas obvio el impacto de la aireación del suelo sobre las plantas, a través de sus raíces, cruciales, como son, para su nutrición y turgencia. Lo mismo que sobre todas las interacciones bióticas que se dan en el suelo y que confluyen en la generación de un humus, cuyo tenor, calidad y persistencia estarán marcadas en buena parte, para cada suelo, por las condiciones de aireación que se registran en ese medio específicamente.

Enfocando la discusión ahora en la influencia de la aireación sobre la actividad de los microorganismos del suelo, tendrá que decirse que una limitación en la presión parcial de oxígeno en el medio edáfico va a reducir la velocidad de evolución de la materia orgánica, con el consiguiente impacto negativo sobre la estructura del suelo. Y se producirá en general una reducción en la actividad de los organismos aeróbicos, tales como los encargados de la oxidación del nitrógeno, del fósforo, del azufre y de la fijación simbiótica del nitrógeno.

El hecho de que se ralentice la evolución de los materiales orgánicos por efecto de la anoxia da lugar también a la acumulación excesiva de materiales orgánicos, dando paso a la formación de turbas y eventualmente, de mucks.

Adicionalmente, la limitación de oxígeno en el medio se traducirá en un incremento de la actividad de los microorganismos anaeróbicos y facultativos del suelo, por lo que debe esperarse que se incremente la presencia de los iones Fe^{+2} y Mn^{+2}, como consecuencia de la intensificación de las reacciones de reducción de estos metales, por lo que pueden llegar a alcanzar niveles tóxicos, dada su alta presencia y movilidad en esa condición de reducción química.

Así mismo, la condición de anoxia generará cambios en las reacciones de evolución de las sustancias orgánicas, pudiendo llegarse a tener una evolución de la sacarosa, como la siguiente:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4$$

Simultáneamente con la aparición del metano (CH_4) en el circuito poroso del medio edáfico, también hacen presencia otros gases como el ácido sulfhídrico ($H_2S_{(g)}$), y otras toxinas orgánicas como el ácido láctico, el butírico y el cítrico. En resumen, puede decirse entonces que la condición de anoxia en el suelo se traduce en un cambio profundo en la naturaleza de los procesos bioquímicos, en cuanto a la tasa y productos de la evolución de la materia orgánica.

Por otra parte, la anoxia, como generadora que es, de un incremento en la presión parcial de CO_2 en la atmósfera del suelo. Y en virtud de la simple Ley de Acción de Masas, estará involucrado en una reacción como la siguiente:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

El ácido carbónico (H_2CO_3) tendrá dos efectos interesantes en el suelo; al llegar a disolverse en la solución del suelo, a saber:

1. Potencia la acción de la solución del suelo para liberar nutrimentos presentes en el material parental del suelo.

2. Reduce el pH de la solución del suelo

Por otra parte, cuando el poco oxígeno (O_2) presente en el suelo como ión adsorbido por los coloides del mismo en condiciones de anoxia, logra precipitar por la oxidación de los iones reducidos Fe^{+2} y Mn^{+2} que se encuentran, a la sazón, migrando en el perfil de suelo, dada su alta movilidad en su condición de reducción, genera puntos o moteados de colores oscuros, rodeados por parches de color pálido, debidos estos a la remoción desde ellos de los dos metales referidos en su condición reducida. Este proceso es la denominada Gleyzación, ya discutida en el Capítulo X, como un proceso de trasformación en la Génesis del Suelo. Índice claro de condiciones de limitaciones en el drenaje interno de cualquier perfil de suelo. La cual en casos extremos puede conducir a alteraciones tan intensas en el color del suelo, como pueden ser los vaciamientos y las matrices reducidas.

17.8. LA AIREACIÓN Y EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS.

Como se puede inferir de los aspectos discutidos hasta este punto, la aireación afecta a las plantas superiores a través de diferentes mecanismos, como:

1. El crecimiento y desarrollo del sistema radical de la mayoría de las plantas, salvo las escasas adaptaciones ya reseñadas anteriormente.

2. La absorción de nutrimentos por el mismo sistema radical. Quizás el ejemplo más dramático lo constituye el fenómeno de “la sequía fisiológica”, ya discutida en detalle anteriormente.

3. La oxidación de nutrimentos tan importantes como nitrógeno, fósforo y azufre.

4. La fijación simbiótica y no simbiótica de nitrógeno en el suelo.

5. La carencia parcial o total de oxígeno en el medio edáfico altera la naturaleza y la tasa de progreso de la evolución de los materiales orgánicos y del ambiente químico del suelo en general, por lo que es posible tener panoramas alternativos como los que se detallan en el Cuadro 11.

Antes de terminar este aparte, conviene llamar nuevamente la atención sobre el fuerte impacto que tienen en la reacción de la solución del suelo y en la nutrición vegetal la alta movilidad y posible toxicidad por los iones Hierro y Manganeso en forma reducida (Fe^{+2} y Mn^{+2}). Efecto éste que pierde relevancia cuando los dos micronutrientes pasan a formas oxidadas (Fe^{+3} y Mn^{+4}).

Cuadro 11. Productos de evolución de los materiales orgánicos y de los procesos de oxidación de diferentes elementos, bajo dos condiciones diferentes de suplencia de oxígeno.

Elemento	Suplencia adecuada de O_2	Suplencia deficiente de O_2
Carbono	CO_2	CH_4
Nitrógeno	NO_3	N_2, NH_4
Azufre	SO_4	H_2S, $S^=$
Hierro	Fe^{+3}	Fe^{+2}
Manganeso	Mn^{+4}	Mn^{+2}

17.9. ESTIMACIÓN DE LA AIREACIÓN.

La estimación ideal de la aireación sería a través de un experimento con características tales que, la presión parcial de O_2 sea la única variable actuante, sin embargo, como se ha venido discutiendo hasta aquí, la aireación es un proceso altamente dinámico, en el cual siempre que actúe el O_2, también actuará el CO_2, al tiempo que se desenvolverá a través de rangos, más o menos amplios, de succión matricial (τ_m), y eventualmente, en presencia de algunos compuestos tóxicos. Consecuentemente, lo más recomendable será realizar la estimación de este proceso a través de algunas dinámicas relacionadas con el comportamiento del mismo.

Son múltiples, variados y con diferentes grados de sofisticación y certidumbre, los métodos de estimación de la aireación del suelo, que reporta la literatura especializada. Acorde con el objetivo de este texto, se hará una breve mención de los siguientes siete protocolos:

1. Velocidad de Difusión de Diferentes Gases a través de un Suelo, sometido a diversos niveles de Succión Matricial (τ_m).

2. Velocidad de Difusión de Oxígeno (VDO (µ gr O_2/cm^2/min)), estimada mediante la combustión continua que se registra en una decena de microelectródos de platino, de diámetro capilar, conectados a un monitor eléctrico, el cual envía continuamente la corriente eléctrica requerida por cada uno de los diez microelectródos, con el fin de eliminar por combustión, cada uno de los microgramos de O_2 (µ gr O_2) que difunden en el medio edáfico cercano hacia la superficie capilar del microelectródo, el cual se desempeña en el medio como una superficie demandante de O_2 en forma continua.
3. Cantidad de CO_2 liberado desde una pequeña área de terreno, debidamente aislado previamente por un cilindro metálico, a cuya parte superior se adosa un recipiente que contiene una solución de Hidróxido de Potasio (KOH) al 36% de concentración, la cual actuará como sustancia tituladora del CO_2 producido por las diferentes biocenosis actuantes en el monolito en consideración.
4. Estimación de la Porosidad de aireación del suelo (ϕ>0.06mm), o porosidad vacía τ_m > 50 cm H_2O, siempre y cuando se trate de un suelo con profundidad al freático superior a 50 cm.
5. Capacidad de aire instantánea en muestra inalterada. Este método no es muy empleado, dada la alta complejidad que entraña su implementación.
6. Potencial de Oxido-Reducción de un volumen de suelo. Este protocolo no es muy empleado, en consideración a su complejidad y alta variabilidad de las lecturas, derivadas a su vez del alto dinamismo que reviste este potencial en el tiempo y el espacio edáfico.
7. Evaluación de la cantidad de productos de reducción presentes en un suelo. Este método resulta ser más efectivo como calificador del drenaje natural interno de un suelo, que como estimativo de la aireación instantánea del mismo.

17.10. MANEJO DEL AIRE DEL SUELO.

17.10.1. Estrategias de Manejo.

Las estrategias para el manejo de la aireación del suelo se enmarcan dentro de alguno de los siguientes lineamientos:

1. Remoción de las aguas de exceso en el perfil de suelo.
2. Mejoramiento de la agregación del suelo.
3. Laboreo de suelos densos por causas naturales o antrópicas.
4. Adaptación de materiales vegetales a condiciones de aireación excesiva y limitada.

17.10.2. Objetivos.

Teniendo en cuenta que en un suelo con niveles óptimos nutrimentales e hídricos, una condición adversa a la productividad del mismo la constituirá posiblemente algún tipo de limitación en su régimen de aireación. Los objetivos que se persiguen en operaciones de manejo de la aireación del suelo son los siguientes:

1. Presencia de O_2 en la zona de raíces, igual o superior a 10%.

2. Velocidad de Difusión de Oxígeno (VDO) en la zona de raíces igual o superior a 0.3 ų gr/cm^2/min. (VDO $\geq 30 \times 10^{-8}$ = 0.3 ų gr/cm^2/min).

3. Pero si la VDO es excesiva, se corre el riesgo de tener un bajo tenor de humus en el suelo, lo cual conducirá a una degradación, muy lentamente reversible, de la estructura, por lo que habrá que considerar estrategias para reducir el ingreso excesivo de oxígeno al perfil. Por esta razón, se hace imperioso considerar que un 10% de W_A (Porosidad de aireación) es un calificativo pertinente para cualquier labor de labranza.

4. Así mismo si la VDO es crítica en razón a niveles altos en su densidad aparente (Dap) se harán necesarias las labores especializadas de labranza aplicadas con una frecuencia ajustada a cada condición ambiental.

17.10.3. Técnicas de Manejo.

17.10.3.1. Técnicas enfocadas en la incentivación de la difusión.

Dado que es el mecanismo principal en la dinámica del régimen de aireación del suelo, este tipo de técnicas revisten la mayor importancia. Recuérdese que la difusión guarda especial relación con el espacio poroso vacío de agua, independientemente del diámetro de dichos poros. En consecuencia, estas técnicas se abocan a:

1. Mejoramiento de la estructura.

2. Abatimiento del régimen hídrico del suelo.

3. Como se discutirá en el próximo capítulo. Las dos medidas anteriores conducirán a una mejoría en el régimen térmico del suelo.

17.10.3.2. Técnicas apoyadas en la labranza y el manejo de la materia orgánica del suelo.

Al realizar la discusión conjunta del régimen hídrico y la estructura del suelo, merece especial atención la generación de sellos y costras superficiales, lo mismo que las capas compactadas subsuperficialmente, lo mismo que la ocurrencia de capas adensadas en el perfil, como impedimentos que son, bien a la difusión de gases, como al tiempo de vaciado óptimo de la porosidad de aireación. Ante esta situación deben considerarse las siguientes estrategias:

1. Técnicas de labranza.
2. Manejo de la materia orgánica del suelo.

Estas estrategias se implementan a través de técnicas como:

1. Técnicas de laboreo como la escarificación y de labranza vertical, como el arado de cinceles, y en caso de requerirse, algún tipo de subsolador.

2. Implementación de mantillos para reducir la incidencia de costras y sellos superficiales.

3. Empleo de vegetación dotada de sistemas radicales robustos y profundos, como medida para evitar la ocurrencia de capas adensadas.

4. Con igual finalidad, de contrarrestar los adensamientos, en algunas condiciones puede ser ventajoso el uso del abonamiento vertical o “Vertical mulching”

17.10.3.3. Técnicas enfocadas en el mejoramiento estructural del suelo.

Cuando la situación problema estriba en la ocurrencia de niveles freáticos a profundidades tales, que resultan en riesgo medio a alto para el cultivo base. La estrategia de manejo, a un plazo mediano a largo, debe fundamentarse en una combinación de medidas de labranza y de manejo de los recursos orgánicos regionales con el fin de incrementar la porosidad de aireación del suelo. Con esto se logrará la reducción del régimen hídrico del perfil, lo cual acarreará un incremento en el régimen térmico del mismo, él que a su vez será responsable de un incremento en la actividad biótica edáfica, la cual en su momento será responsable de una potenciación de la aireación en el perfil.

17.10.3.4. Técnicas que involucran el empleo de “mantillos”.

El uso de materiales orgánicos exógenos al perfil requiere un análisis juicioso y detenido, ya que de todas formas son materiales alogenéticos al perfil y a su única y secular evolución. No obstante, desde la óptica de la aireación conviene detener la discusión alrededor del empleo de “Mantillos”, superficiales o verticales. A este respecto es conveniente puntualizar que:

1. El “mantillo” superficial protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia, y consecuentemente evita la formación de costras y sellos, y en consecuencia incrementa la VDO.

2. El “mantillo” superficial y vertical conserva la humedad del suelo, por lo que reduce la VDO.

3. El “mantillo” superficial y vertical abate el régimen térmico del suelo, por lo que reduce la VDO.

4. En general el “mantillo” superficial y vertical abate la VDO en el perfil.

17.10.3.5. Otras técnicas para el Manejo de la Aireación del Suelo.

Existen algunas otras técnicas de manejo edáfico y agronómico que inciden en la aireación del suelo, en razón a incidir en el incremento de la respiración de raíces y microorganismos, entre ellos se tienen prácticas como:

1. La fertilización mineral de los terrenos.

2. Las prácticas culturales tendientes a incrementar el bienestar del cultivo.

3. El manejo de la densidad de población vegetal.

4. Las estrategias tendientes a definir los niveles óptimos de cantidad, localización, oportunidad y grado de descomposición de los recursos orgánicos regionales.

17.11. LA AIREACIÓN COMO FACTOR DE CALIFICACIÓN AGROLÓGICA.

La Capacidad de Aire de un suelo, esto es, la porosidad de aireación, o la porosidad no capilar, aquella cuyo diámetro rebasa las 60 micras (W_a Ø > 0.06 mm = 60ų), vacía a succión matricial superior a 50 cm. (τ_m > 50 cm), si bien solo tiene valor comparativo entre suelos, lo mismo que la profundidad al nivel freático son factores de primer orden en la evaluación agrológica de un terreno. Por tal motivo, en condiciones de terrenos con limitaciones importantes en su drenaje y porosidad se hacen recomendable su uso con vegetaciones con bajos requerimientos de aireación, y preferiblemente dotadas de sistemas radicales someros.

XVIII. RÉGIMEN TÉRMICO DEL SUELO

“Es bastante cálida y agradable la experiencia
que vivo cuando entro en alguna calicata,
pues la verdad, experimento en ese momento
el tierno abrazo de la Madre Tierra, al respirar
y sentirme abrazado por el húmedo vaho de ese
suelo fresco. Diáfano como el corazón de un niño,
acogedor, como el aromado regazo de una madre encinta”.

I D Bustamante, 2019.

El Régimen Térmico del medio edáfico reviste especial importancia, en atención a que está relacionado con propiedades y procesos tan importantes como los siguientes:

18.1. IMPORTANCIA.

1. Crecimiento vegetal, sobre todo de los sistemas radicales de las plantas.

2. La actividad microbiana y enzimática en el suelo.

3. La evolución de la materia orgánica y consecuentemente, con la formación de la estructura.

4. Composición de la atmósfera del suelo, y por ende con la aireación edáfica.

5. La concentración nutrimental en el suelo y los procesos de liberación de nutrientes desde al material parental.

6. Los egresos hídricos del suelo, en razón a afectar la viscosidad del agua.

7. Los egresos hídricos en fase de vapor, debido a estar estos ligados a dos procesos que involucran el aspecto térmico, como son la evaporación y la evapotraspiración.

8. La evolución mineralógica de las arcillas.

9. Como colofón a todo lo anterior, conviene dejar claro que el calor es el principal catalizador en todos los procesos químicos del suelo. A tal punto, que es una verdad axiomática el planteamiento que reza: “Por cada 10ºC de incremento en la temperatura, se duplica la velocidad de toda reacción química”

10. La temperatura del suelo es considerada como un verdadero “Biofactor” en la clasificación de los Grandes Grupos de Suelo en los diversos sistemas de clasificación de suelos, desde los planteamientos formulados por V.V. Docuchaiev desde 1886. Y también es tenido en cuenta por el Sistema de Taxonomía de Suelos del USDA. De uso oficial en Colombia.

18.2. CONCEPTOS Y UNIDADES TÉRMICAS.

Calor: En términos de la Termodinámica clásica, el calor se asimila como una manifestación de la energía cinética del movimiento al azar de las partículas primarias constitutivas de la materia.

Temperatura: Constituye un índice del grado de actividad molecular implícita en las partículas constitutivas de la materia, por esta misma razón es el valor, que determina, entre dos cuerpos vecinos, cuál de ellos cede y cuál recibe calor. Esto es, el flujo térmico depende de la existencia de un gradiente de temperatura.

Capacidad Térmica: La cantidad de calor existente en un cuerpo se conoce como su capacidad térmica o su capacidad de calor. La capacidad térmica de un cuerpo se define como la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de una determinada masa de la sustancia en referencia, en una cantidad de temperatura especificada, se tasa en calorías gramo, esto es, la cantidad de calor necesario de aplicar a un gramo de agua, con el fin de elevar su temperatura, desde 14.6ºC hasta 15.6ºC.

Calor Específico: El calor específico, capacidad calorífica específica o capacidad térmica específica de un material se define como la relación de su capacidad térmica con la del agua. Se expresa en cal/gr.ºC. El calor específico del agua es de 1 cal/gr. ºC. La materia orgánica del suelo tiene un calor específico de 0.4 cal/gr.ºC. Los sólidos minerales comunes en los suelos tienen un calor específico promedio de 0.2 cal/gr. ºC. En resumen, de todos los constituyentes del suelo, el agua exhibe el máximo calor específico. Por esta razón el dicho popular, “Tierra húmeda es tierra fresca”, cobra especial validez.

Conductividad Térmica: Así se denomina a la habilidad que presenta una sustancia determinada, para trasmitir calor de molécula a molécula de su masa, por esta

razón también se conoce como Conductividad Molecular. Se define como la cantidad de calor trasmitida a través de un área seccional dada de la sustancia, por unidad de gradiente de temperatura. Se cuantifica en (cal / cm.seg. ºC)

Conductancia Térmica: Se conoce así al fenómeno que implica el comportamiento simultáneo de la conductividad térmica de un material, ante el influjo de un gradiente de calor.

Difusividad Térmica: También conocida como Coeficiente de Difusión Térmica o Conductividad Termométrica. Es proporcional a la conductividad térmica, e inversamente proporcional a la capacidad térmica con base a volumen. Es la expresión de la tasa de calentamiento o enfriamiento de un material, bajo la influencia de un gradiente térmico. Dicho, en otros términos, es la rata de cambio de la temperatura de un cuerpo, a través de un período de tiempo. Se expresa en (cm^2/ seg).

Retentividad Térmica: Es el concepto físico-matemático inverso a la Difusividad Térmica, por lo que se define como la capacidad que tiene un cuerpo para retener calor. Concepción de importancia relevante en el control de las heladas que revisten incidencia considerable en las zonas agrícolas colombianas, ubicadas por encima de los 2000 msnm. Se expresa en (seg/cm^2).

Radiación Térmica: Es la trasferencia de energía calórica a través de la atmósfera, sin que medie ningún agente conductor. El calor trasmitido por la radiación varía de acuerdo con la cuarta potencia de la temperatura absoluta (ºK) del cuerpo radiante. La radiación desde un cuerpo brillante y muy caliente, como el sol se da en ondas cortas (λ = 0.3 – 2.2 µ) son las radiaciones de calor más eficientes. El suelo y la atmósfera, cuerpos opacos y fríos, radian en ondas largas (λ = 6.8 – 100 µ), estas radiaciones son las de menor poder penetrante, por lo que una lámina de vidrio puede detenerlas, generando el conocido “efecto invernadero”. Por tal motivo se prefiere nominarlas como irradiación. Las longitudes de onda entre 2.2 µ y 6.8 µ, denominadas ondas medias, son ineficientes para la radiación de calor y corresponden al espectro visible y a la franja de ondas de radio. La radiación se mide en términos de:

Energía calórica / área / tiempo
Esto es,
(cal gr/cm^2.min.) = (langley / min.)
Dado que,
1 cal gr/ cm^2 = 1 langley

18.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA TEMPERATURA DEL SUELO.

La temperatura del suelo está definida por una serie de procesos un tanto cuanto, intrincada y compleja, así entonces se debe establecer que depende de la radiación solar, la irradiación desde la atmósfera y la conducción de calor desde la tierra, factor éste último que generalmente no reviste importancia significativa, excepción hecha de las zonas sometidas a fuerte influencia geotérmica. Globalizando la discusión puede decirse que depende de una serie de factores, tanto ambientales, como edáficos internos.

18.3.1. Factores Ambientales.

18.3.1.1. Radiación Solar.

La cantidad de calor que llega a la superficie terrestre es de 2.0 langley / min. Pero en realidad la radiación neta que llega al suelo se ve modificada por diferentes factores, tales como:

a. El ángulo de exposición del terreno, de acuerdo con la latitud de su ubicación, estación y hora del día, lo mismo que la pendiente del terreno y su posición en relación al sol. Pero todo lo anterior no aplica para la zona tropical, donde la incidencia del sol es bastante cercana a la verticalidad, durante todo el año y sobre la integridad de los terrenos.

b. El grado de aislamiento del suelo a la radiación por efecto del aire, el polvo, el vapor de agua, las nubes, el humo, las plantas y el “mantillo”.

La radiación solar que alcanza el suelo se aplica a las siguientes funciones:

a. Evaporación. Se requieren 580 langley / min., para evaporar una lámina de agua, con 1 cm de espesor.
b. Transpiración.
c. Fotosíntesis.
d. Calentamiento del suelo.
e. Irradiación desde el suelo.

18.3.1.2. Radiación desde la Atmósfera.

Este tipo de radiación reviste poca importancia para las zonas tropicales, como Colombia, en razón a la orientación casi vertical de la incidencia de la radiación solar, en el trópico. Por tal motivo, la radiación desde la atmósfera solo reviste importancia en las

áreas boreales y subantárticas, donde la incidencia de la radiación solar tiene una orientación oblicua bastante acentuada.

18.3.1.3. Conducción de calor por la Atmósfera.

Debido a la baja conductividad térmica del aire, el efecto de este medio sobre el calentamiento del suelo es bien reducido. Solo el contacto directo de la atmósfera con el suelo, mediante el fenómeno de convección de vientos cálidos, algunos de ellos bastante nombrados en las diferentes zonas templadas del mundo, pueden revestir alguna importancia. En el trópico, donde las brisas son fundamentalmente cálidas, y la radiación alta, su efecto neto sobre la temperatura del suelo es bien reducido.

18.3.1.4. Condensación.

La condensación, como proceso exotérmico que es, libera calor al medio circundante. Y en virtud de ella, el vapor de agua de la brisa nocturna que se condensa sobre la superficie del suelo, o el ascenso del mismo vapor desde mayores profundidades del perfil hasta un determinado punto, más superficial, pueden ser responsables de incrementos significativos en la temperatura del suelo en ese punto.

18.3.1.5. Evaporación.

La evaporación, como proceso endotérmico que es, opera en sentido contrario a la condensación. Recuérdese que el calor de Vaporización del agua ($\Delta V_{agua} = 580$ cal/ gr H_2O), debiéndose ese valor tan alto a la dominancia de los enlaces Hidrógeno en la molécula de agua. Por esta razón, los suelos húmedos mantienen un perfil térmico de bajas temperaturas, con lo cual, el dicho popular, “Tierra húmeda es tierra fresca”, nuevamente cobra especial validez.

18.3.1.6. Lluvia.

En Zona templada, las lluvias de primavera y verano suelen estar marcadas por la acción de frentes intertropicales, y por ello pueden presentar temperaturas diferentes a la ambiental, por tal razón tienen cierta influencia en la variación de la temperatura de los horizontes superficiales de los suelos. En el trópico no es común ni significativamente perceptible el efecto mencionado.

18.3.1.7. Aislamiento.

El suelo puede estar aislado de la temperatura ambiental por la cubertura vegetal, los “mantillos”, las nubes y el humo. En general, los suelos aislados tienen perfiles térmicos más altos en climas tropicales fríos. Y más bajos, en climas tropicales cálidos.

18.3.1.8. Vegetación.

La cubierta vegetal genera en su entorno cercano, un microclima especial en atención a la acción de la reflexión de la radiación incidente, la fotosíntesis y la transpiración. Generalmente, el mencionado microclima presenta una temperatura inferior a la ambiental restante, y este hecho afecta la temperatura del suelo.

18.3.2. Factores Edáficos.

18.3.2.1. Capacidad Térmica.

La importancia de este parámetro será explicada más eficientemente a través del siguiente cálculo:

El calor específico de un suelo mineral seco a la estufa es aproximadamente de 0.2 cal/gr. Por este motivo, un centímetro cúbico de suelo seco, 50% sólidos + 50% poros vacíos, presenta una capacidad térmica de:

$$CT_S = 0.5 \times 2.65 \text{ gr/cc} \times 0.2 \text{ cal/gr} = 0.265 \text{ cal/cc.}$$

Sí el centímetro cúbico de suelo seco que nos ocupa recibe ahora humedad hasta saturar su espacio poroso, su capacidad térmica ahora es de:

$$CT_S = 0.265 \text{ cal/cc.} + (0.5 \times 1.0 \text{ cal/cc.}) = 0.765 \text{ cal/cc.}$$

Ahora, sí el espacio poroso (50%) de nuestro centímetro cúbico de suelo seco, sólo recibe humedad hasta llenar la mitad de ese espacio poroso (25%), la situación de la capacidad térmica es ahora así:

$$CT_S = 0.265 \text{ cal/cc.} + (0.25 \times 1.0 \text{ cal/cc.}) = 0.515 \text{ cal/cc.}$$

Queda así clara la importancia de la capacidad térmica del suelo mineral y del agua en el comportamiento de la temperatura del suelo. No obstante, hace falta un vistazo a la fracción orgánica del suelo.

La turba y el “muck” presentan un calor específico mucho mayor que el suelo mineral, si la comparación se hace considerando pesos iguales de ambos materiales. Pero si la comparación se hace considerando volúmenes iguales, la diferencia es muy poca. Los suelos orgánicos, en razón a su mayor porosidad, llegan a tener en condiciones de saturación, capacidades térmicas hasta de 0.9 cal/cc. En la Tabla 19, se presenta la capacidad térmica, con base a peso y con base a volumen, de algunas sustancias.

Tabla 19. Calor Específico de algunas sustancias de común ocurrencia en los suelos, según Kohnke, 1975.

Sustancia	Calor Específico con base a peso (cal/g)	Calor Específico Volumétrico (cal/cc)
Humus	0.4	0.56
Agua	1.0	1.0
Aire	0.25	0.0003
Arcilla	0.22	0.5
Cuarzo	0.19	0.5
Mica	0.21	0.59
Granito	0.19	0.5
$CaCO_3$	0.20	0.54
Fe_2O_3	0.15	0.75
Yeso	0.21	0.46
Madera	0.42	0.38

18.3.2.2. Conductividad y Difusividad Térmicas.

La conductividad térmica de la mayoría de las partículas del suelo oscila alrededor de 0.005 cal/seg.cm. ºC, para la materia orgánica del suelo es de 0.0025 cal/seg.cm.ºC, el mismo parámetro para el caso del aire es de 000005 cal/seg.cm.ºC, mientras que para el agua está alrededor de 0.001 cal/seg.cm.ºC. Por esta razón, un suelo seco y en condición estructural de alta porosidad, alcanzará una conductividad térmica tan baja como de entre 0.0003 y 0.0005 cal/seg.cm. ºC, debido al poco contacto entre los agregados y la bajísima conductividad del aire.

Si el mismo suelo del ejemplo que se viene discutiendo, pasa de la condición de seco a la estufa a seco al aire incrementa su conductividad térmica en muy poca cantidad. Pero sí, de acuerdo con su textura y a su estructura gana humedad a tal grado que se empiezan a generar puentes de agua entre granos y entre agregados la conductividad térmica se incrementa ostensiblemente. Dicha condición se registra generalmente cuando el suelo comienza a verse húmedo. Esta circunstancia se da cuando la succión matricial (τ_m) se acerca a las 30 atmósferas. En la succión matricial

(τ_m) de 10 atmósferas, la conductividad térmica del suelo alcanza un valor cercano a 0.001 cal/seg.cm. ºC, esto es, la conductividad térmica del agua. Y en ese instante se da un punto de quiebre en la relación succión: conductividad térmica, a partir del cual el incremento es creciente en ambas variables. Más, en ningún caso el suelo húmedo o mojado llega a tener una conductividad térmica superior a la de una roca compacta, ya que el agua presenta una conductividad térmica muchísimo menor que la de los diferentes minerales. Y en general, la conductividad total del suelo. Considerando todos sus componentes minerales y orgánicos, agua y aire no alcanza a tener los niveles de dicho parámetro para varios metales.

Es afortunado que los incrementos de humedad en el suelo conduzcan a incrementar tanto la capacidad como la conductividad térmica del suelo. La conjugación de estos dos hechos lleva a que la difusividad térmica del suelo varíe muy poco con tales incrementos de humedad. Todo ello libera al suelo de llegar a presentar temperaturas extremas en su perfil. Es un hecho que el valor máximo de la difusividad térmica se registra cuando el suelo alcanza una succión matricial (τ_m) de 1.0 atm. Y a partir de ese instante, comienza a decrecer rápidamente. La razón para que se registre este comportamiento estriba en el hecho de que en este rango de humedad la capacidad térmica se incremente más marcadamente que la conductividad térmica. En la Tabla 20 se incluyen los valores de la conductividad térmica de los materiales comunes en los suelos.

Tabla 20. Conductividad Térmica (CT) de algunas sustancias de común ocurrencia en los suelos, según Kohnke, 1975.

Sustancia	**Conductividad Térmica (CT)[1]**
Aire	0.5×10^{-4}
Suelo seco[2]	$3 - 5 \times 10^{-4}$
Agua [3]	$13 – 14 \times 10^{-4}$
Suelo húmedo	$20 – 40 \times 10^{-4}$
Materiales formadores del Suelo	$30 – 300 \times 10^{-4}$

1/: CT (caloría / segundo. centímetro. grado centígrado de cambio en el gradiente de temperatura). (cal/seg.cm. ºC)
2/: Dependiendo del grado de compactación.
3/: Dependiendo de la temperatura.

18.3.2.2. Actividad Biológica.

Como la actividad biológica en el suelo genera calor. Los suelos con altos tenores de materia orgánica, óptima dotación nutrimental, presencia adecuada de aire y agua, presentará un régimen térmico superior al de los suelos vecinos carentes de esas condiciones óptimas.

18.3.2.3. Actividad Biológica.

Como la actividad biológica en el suelo genera calor. Los suelos con altos tenores de materia orgánica, óptima dotación nutrimental, presencia adecuada de aire y agua, presentará un régimen térmico superior al de los suelos vecinos carentes de esas condiciones óptimas.

18.3.2.4. Radiación desde el Suelo.

La radiación desde el suelo, o mejor la irradiación, se registra permanentemente, a través de ondas largas, longitud de onda ($\lambda = 6.8 – 100\ \mu$), por lo cual tienen poco poder de penetración y son susceptibles a ser reflejados por obstáculos como el polvo, las nubes, el humo o el vidrio. En razón a ello un suelo permanecerá caliente durante una noche con firmamento nublado, o dentro de un invernadero.

El color y las condiciones de rugosidad de la superficie del suelo tienen un efecto considerable sobre la reflexión de la energía en onda corta, ($\lambda = 0.3 – 2.2\ \mu$), incidente sobre ella. Mientras más rugosa y oscura sea la superficie, menor será la energía calórica reflejada. A esta relación se le conoce como el Albedo (A) de esa superficie.

$$\text{Albedo (A)} = \text{Energía Reflejada} / \text{Energía Incidente}$$

Recuérdese que la superficie puede ser oscura en atención a altos niveles de materia orgánica o a la ganancia de humedad por dicha superficie. En razón al Albedo(A), los Ingenieros Agrícolas de California, con el fin de romper las tersas superficies de sus campos cubiertos de nieve blanca, a la entrada de la primavera para generar la rugosidad requerida y darle visibilidad al color pardo de los terrenos subyacentes a ella, que posibilitaran el ingreso de la radiación solar al perfil de suelo, diseñaron la grada de discos o rastra pesada, conocida en las sabanas de Córdoba, Sucre y Bolívar como ROME, debido a la marca comercial de los primeros implementos de este tipo que llegaron, importados desde Estados Unidos a esta región colombiana, donde se ha adoptado su uso extensivo y extendido, como implemento de preparación de terrenos para la siembra de pastos y diferentes cultivos de la zona.

18.3.2.5. Textura, Estructura y Humedad del Suelo.

Cuando un suelo está compactado tiene una mayor conductividad térmica que cuando se encuentra mullido, debido a la mayor conductividad térmica de los granos del suelo en comparación con la del aire. Además, estando compactado el suelo requiere menos humedad para formar películas de agua que interconecten las partículas del suelo. Igualmente, un suelo recién laboreado presenta menor conductividad térmica que la que muestra al final del período de cultivo, en atención al menor contacto entre agregados. Así entonces puede decirse que la conductividad térmica de un suelo se incrementa con la densidad aparente del mismo. Así mismo, estructuras de tipo blocosa y laminar posibilitan una mayor conductividad térmica que una de tipo granular. No obstante, la importancia de la textura y la estructura del suelo en el comportamiento de la conductividad térmica es bien poca comparada con la que revisten los cambios de humedad.

Como ya se ha discutido, la humedad del suelo afecta la capacidad y conductividad térmicas del mismo. Por ello, la humedad presente en la superficie del perfil al evaporarse reduce la temperatura de esa superficie. Debido a que buena parte de la radiación solar se aplica al proceso de evaporación desde el suelo, el suelo húmedo no se calienta tanto como el mismo, cuando está seco. Adicionalmente, como el suelo húmedo es mejor conductor de calor que el seco. Los suelos húmedos presentan mayor uniformidad en su perfil térmico, a lo largo de su profundidad.

En la Tabla 21 se presentan las propiedades térmicas de los constituyentes más importantes del suelo. En su última fila se presenta la retentividad térmica de los tres componentes, esto es, su habilidad para mantener su temperatura en presencia de un gradiente de temperatura. La alta retentividad térmica del agua es la razón para que la temperatura de los suelos saturados varíe tan poco.

Tabla 21. Datos Térmicos de algunos componentes del suelo. Promedios aproximados. Según Kohnke, 1975.

Datos	Materiales sólidos formadores del Suelo	Agua	Aire seco y en reposo
Densidad (g/cc)	2.65	1.00	0.0012
Capacidad calorífica, con base a peso. (cal/g. ºC)	0.20	1.00	0.25

Capacidad calorífica, con base a volumen. (cal/cc.. ºC)	0.53	1.00	0.0003
Conductividad Térmica (cal/cm. seg. ºC)	0.010	0.0014	0.00005
Difusividad Térmica (cm^2/seg.	0.019	0.0014	0.167
Retentividad Térmica (cm^{-2}. seg)	52	713	6

18.3.2.6. Sales Solubles.

La concentración de sales en la solución del suelo afecta la evaporación e indirectamente la temperatura del suelo. Así entonces, a través de su efecto sobre la fertilidad del suelo, las sales solubles afectan la actividad biológica, y por tanto afectan indirectamente la temperatura del suelo. Quede claro que, tanto un alta, como una baja concentración de sales en el suelo suprime la actividad biológica.

18.4. FLUCTUACIONES DE LA TEMPERATURA DEL SUELO.

La temperatura es una de las propiedades más dinámicas del suelo. De hecho, presenta variaciones tanto a lo largo de las veinticuatro horas del día, como a través de las diversas temporadas o períodos climáticos que tiene el año. Tales variaciones afectan las condiciones del suelo y afectan a la vida toda, porque Ella bascula sobre el medio edáfico. Por tal razón, serán analizadas a continuación, tanto las variaciones diarias, como las periódicas. Los factores que influyen sobre tales variaciones son los mismos que afectan a la temperatura del suelo como tal.

18.4.1. Fluctuaciones Diarias.

Las fluctuaciones diarias de temperatura se hacen aparentes y perceptibles solo en los primeros centímetros del perfil del suelo. Dependiendo de las condiciones texturales, estructurales, hídricas, de albedo y de cobertura de dicho perfil, es común que cada perfil, de acuerdo con las condiciones de los atributos antes referidos, presente una determinada profundidad en el mismo, tanto cuanto más considerable de acuerdo al valor de las mismas, donde no varía la temperatura a través de las 24 horas del día. Puede decirse que, en obediencia a la intensa radiación solar, siempre en longitudes de onda corta, por espacio de aproximadamente 12 horas diarias que incide casi verticalmente en los suelos del trópico. Y a la persistente y constante irradiación desde el suelo, siempre en onda larga. El período de enfriamiento del suelo toma aproximadamente 16 horas del día, en tanto que el período de calentamiento del perfil solo alcanza a durar aproximadamente 8 horas. Figura 176

De hecho, el perfil térmico de un suelo presenta generalmente una tendencia al decremento con la profundidad, salvo sí el perfil presenta alguna capa compactada o cementada, donde las condiciones térmicas de ese sector resultan atípicas. Generalmente la temperatura mínima en los primeros milímetros del perfil se registra, con muy poco retraso a la marcha de la temperatura del aire, entre las 06 y las 08 horas del día, en tanto que la máxima se da en esa profundidad entre las 14 y las 16 horas. Ver Figura 176.

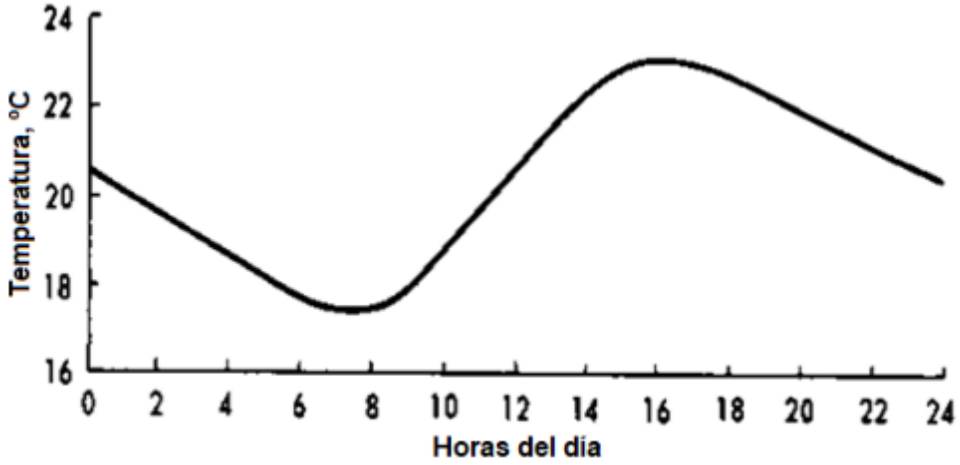


Figura 176. Fluctuación diaria de la temperatura edáfica a la profundidad de 10 cm., en un suelo cubierto de pasto. Según Kohnke, 1975.

Durante un día seco, un suelo desnudo generalmente alcanzará una temperatura mayor que la temperatura ambiental en sus primeros milímetros de profundidad. Y es muy poca la diferencia de tiempo entre las dos temperaturas máximas. A medida que se profundiza en el perfil se da un retraso progresivamente mayor en la hora que cada horizonte alcanza sus temperaturas máxima y mínima, en relación con la máxima y mínima ambiental. Todo depende del tiempo que tarda la energía calórica para penetrar en el perfil, dicho tiempo varía en función del tipo de suelo, su textura, estructura y contenido de humedad, todo lo cual impacta la difusividad térmica del suelo. Se fija el avance de la onda térmica en 3 horas para avanzar 10 centímetros de un perfil con condiciones promedias. Figura 177.

Un considerable grado de aislamiento, por coberturas, nubosidad u otro de los factores ya señalados a ese respecto, un bajo albedo, condición de suelo seco en la superficie y una difusividad térmica alta generan al actuar en forma conjunta, variaciones considerables en la temperatura de un suelo. Si las demás condiciones se mantienen, pero la difusividad térmica es baja, aunque la superficie del suelo se caliente, no va a afectar grandemente al régimen térmico de la totalidad del perfil. Esta situación es fácil de hallar en suelos recién rastrillados con rastra pulidora, cuando se secan.

Finalmente conviene puntualizar que, las variaciones diarias de temperatura se hacen mínimas por efecto de alta humedad en el perfil del suelo, la acción de nubes, mantillo abundante y cubierta vegetal densa.

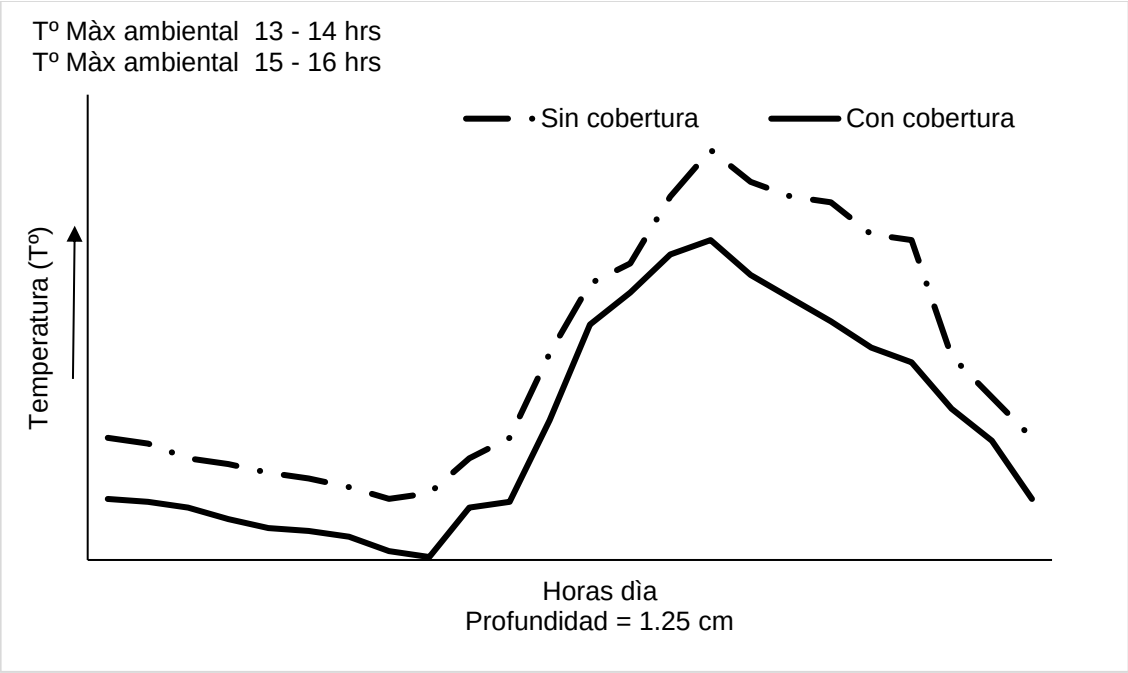


Figura 177. Tendencia general de las fluctuaciones diarias de la temperatura del suelo, en la profundidad de 1.25 cm., durante la época de secas del año 2000, en el perfil modal de la Serie Estación Meteorológica. Universidad de Córdoba, Sede Central, Montería, Córdoba. Diagrama elaborado en escala aritmética por I.D. Bustamante B. 2003.

18.4.2. Fluctuaciones Periódicas.

Ante la ausencia de estaciones en el trópico, las diferencias climáticas en el transcurso del año son fundamentalmente de carácter pluvial y no térmico. Por esto se habla en esta zona latitudinal más apropiadamente de temporadas secas y temporadas húmedas, mal denominadas como veranos e inviernos, entre los cuales la temperatura edáfica de cualquier horizonte determinado no presenta diferencias superiores a 5ºC.

Como ya se señaló en el numeral anterior, bajo la cobertura vegetal de selvas y bosques densos, las diferencias diarias y periódicas de temperatura edáfica son prácticamente nulas, registrando solo algunas de tales variaciones, las áreas de los eventuales claros que puede presentar alguna de las dos coberturas vegetales. Pero dicho efecto se diluye fácilmente en la extensión considerable del área cubierta con la cobertura densa que rodea a tales claros.

Cabe anotar dentro del tema que nos ocupa, que cada perfil de suelo presenta un determinado nivel en su espesor, en el cual no se detectan variaciones de temperatura a través del año, y es conocido como profundidad isoterma del perfil. Y lo más interesante del asunto estriba en que la temperatura promedia anual de ese nivel es ligeramente superior a la temperatura promedia ambiental de la zona donde se ubica el perfil y bastante semejante a la temperatura promedia de las corrientes superficiales de agua de dicho territorio, excepción hecha de las corrientes de origen profundo, como las termales. Mismas que derivan su temperatura y composición química de las condiciones particulares inherentes a la estratigrafía de la roca en las vecindades de su sitio de origen.

La mayor parte de la radiación solar es absorbida por el suelo y la vegetación. La atmósfera por su parte recibe muy poca cantidad de dicha radiación, y prácticamente su temperatura la toma de la irradiación desde la tierra. Por esta razón la temperatura promedia del suelo, en todas sus profundidades es superior a la temperatura promedia ambiental de esa zona. En la figura 178 se presenta el récord de temperaturas promedias mensuales en dos profundidades del perfil, monitoreadas por los estudiantes de la asignatura Física de Suelos, en la primera Cohorte de Maestría en Ciencias Agrarias, con Énfasis en Suelos, Convenio Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira - Universidad de Córdoba

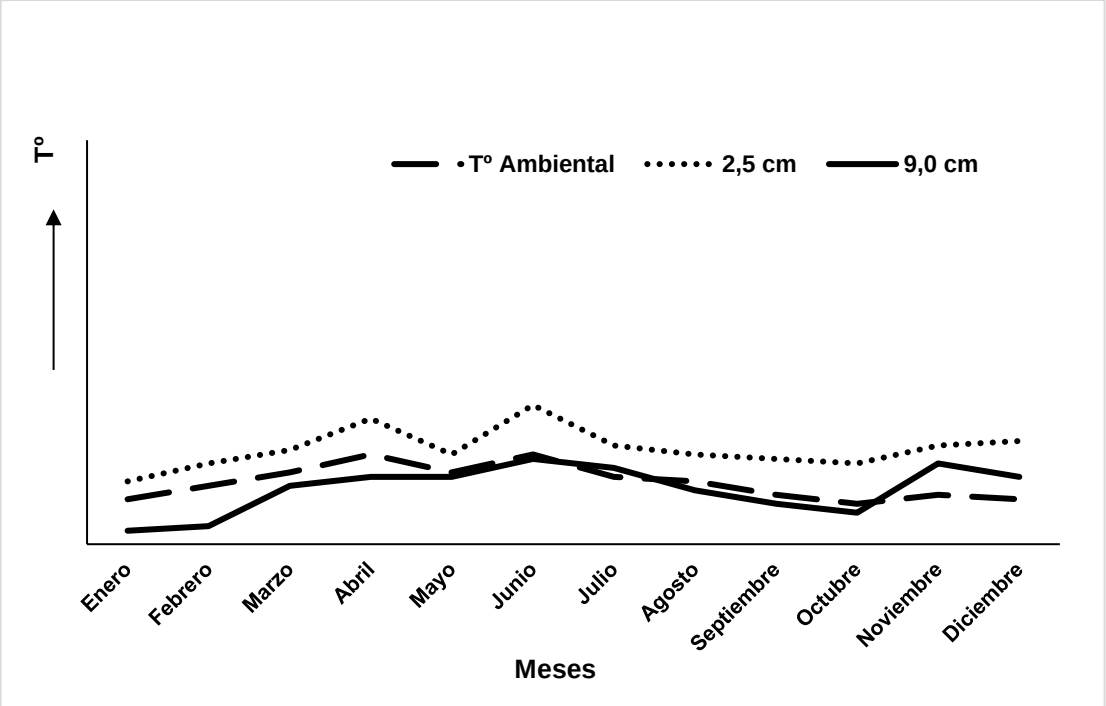


Figura 178. Fluctuaciones periódicas de la temperatura del suelo, en las profundidades de 2.5 y 9.0 cm., a través de los doce meses del año 2000, en el perfil modal de la Serie Estación Meteorológica. Universidad de Córdoba, Sede Central, Montería, Córdoba. Diagrama elaborado en escala aritmética por I.D. Bustamante B. 2003.

18.5. EL RÉGIMEN TÉRMICO Y OTRAS CONDICIONES DEL SUELO.

18.5.1. Régimen Hídrico.

El régimen térmico del suelo afecta al régimen hídrico del mismo, a través del impacto del primero sobre la Humedad Relativa en la porosidad del suelo y sobre la viscosidad del agua que se infiltra, redistribuye o percola a través del perfil.

Así entonces, en un suelo húmedo, las variaciones de temperatura resultan vitales para evitar la desecación de raíces, en razón a los flujos de vapor de agua, que pueden generarse cuando la succión total del suelo (τ_t), se incrementa significativamente.

De otra parte, el efecto de la temperatura edáfica sobre la viscosidad puede ser sobrevalorado, ya que sí bien, si reduce la viscosidad del fluido, y posibilita el flujo. Los movimientos de agua en el suelo sufren un impacto mayor en su comportamiento por acción de la expansibilidad de algunos de sus coloides minerales.

18.5.2. Estructura del Suelo.

La estructura del suelo es influida por el régimen térmico del mismo, a través de su acción sobre la evolución y tenor de materia orgánica en cada una de las tres condiciones evolutivas que ella presenta en ese medio.

Además, la estructura del suelo resulta impactada por el régimen térmico del mismo a través de la influencia marcada de él sobre el tipo y actividad del complejo arcilloso del mismo.

18.5.3. Actividad Microbial y Ambiente Nutrimental.

El efecto del régimen térmico del suelo sobre la actividad microbiana en el mismo presenta diversos y variados matices. Así entonces, la literatura señala como dicha actividad se ve muy restringida a temperaturas inferiores a 10ºC. Mientras el rango óptimo de temperatura del suelo para esa actividad es el comprendido entre 18ºC y 30ºC. Igualmente señala los 40ºC como la temperatura máxima, por encima de la cual, se bloquea cualquier actividad biótica en el suelo. Asimismo, señala hechos tan importantes como que la fijación de nitrógeno por las bacterias del suelo se incrementa con la temperatura y decae con los incrementos en el régimen hídrico del mismo. De otro lado, la nitrificación, que guarda funcionalidad directa con la temperatura edáfica, presenta su comportamiento óptimo a la temperatura de 30ºC. Igualmente, a temperaturas superiores a 30ºC más potasio es liberado desde formas no intercambiables, que a temperaturas

inferiores a la referida. De forma similar, la absorción de potasio por las plantas decae a bajas temperaturas.

18.5.4. Desarrollo del Suelo.

La temperatura del suelo está involucrada en el proceso de evaporación de agua desde el medio edáfico. Por tanto, impacta decididamente a parámetros climáticos tan cruciales como la precipitación, la humedad relativa ambiental y por ende la transpiración. Es por esta razón que resulta tan importante para el desarrollo del suelo, por lo que es considerada como Biofactor en todos los sistemas de clasificación de suelos. Tabla 22.

Con respecto a la Tabla 22, cabe aclarar que la mayoría de los suelos de Tundra se dan en zonas con temperaturas promedio inferiores a 0ºC, por lo que revisten poco interés para las zonas tropicales como Colombia. Cabe aclarar que en la franja térmica entre 10ºC y 20ºC se dan una gran cantidad de tipos de suelos, por lo que tratar de agruparlos en solo cuatro rangos, no pasa de ser una visión bastante general del tema.

Tabla 22. Relaciones del régimen térmico del suelo con los Grandes grupos de suelos. Según Kohnke, 1975.

Temperatura Promedia Anual, ºC	Grandes Grupos de Suelos	Connotación de suelos, según la Taxonomía del USDA
< 0	Tundra	Cryico
0 - 8	Podzol. gris de bosques	Espódico
8 - 15	Brunizem Podzoles pardo grisáceos	Húmico mólico Argílico
12 – 17	Chestnut rojizo. Podzoles rojos y amarillos	Xérico mólico Últic o
> 17	Latosoles	Óxico

En la Tabla 23 se presentan las cuatro valoraciones de regímenes térmicos, de uso corriente en la Clasificación Taxonómica de Suelos en nuestro país.

18.6. EFECTO DEL RÉGIMEN TÉRMICO DEL SUELO SOBRE EL CRECIMIENTO VEGETAL.

El efecto de la temperatura sobre las plantas está regulado por el tipo de planta, variedad

y su período fenológico de crecimiento y desarrollo. Anderson y Kemper, 1964, citados por Kohnke, 1975. Establecen que, por encima de los 20ºC, el incremento de 10ºC consigue duplicar el rendimiento del maíz. Los mismos investigadores reportan que el incremento de producción referido es atribuible al aumento en la relación tallo: raíces, la cual se da en virtud de la acentuación en la eficiencia en la absorción de humedad y nutrientes por tales órganos.

La importancia de la temperatura del suelo para el proceso de germinación de semillas es inobjetable, sobre todo en la zona templada. En la zona tropical dicho proceso es más impactado por la humedad del suelo. Una vez se da la nacencia, las plantas, en todas las latitudes son más impactadas por la temperatura ambiente, que por la edáfica.

Tabla 23. Clasificación de los regímenes térmicos de suelos para regiones tropicales, con variación promedia inferior a 5ºC entre la Temporada más cálida y la más fría del año. Según Kohnke, 1975.

Temperatura Promedia Anual, ºC	Régimen Térmico del Suelo, según la Taxonomía del USDA
< 8	Isofrígido*
8 - 15	Isomésico*
12 – 17	Isotérmico*
> 17	Isohipertérmico*

** El prefijo "Iso" significa que la diferencia de temperaturas a través del año es inferior a 5ºC*

18.7. ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL SUELO.

Con base en todo lo hasta aquí discutido acerca del régimen térmico del suelo, puede colegirse la importancia que reviste el monitoreo del mismo, no solo con objetivos edafológicos, sino también meteorológicos, fito-fisiológicos, agronómicos y ambientales. Precisamente, el objetivo de cada estudio en específico determinará la frecuencia y las profundidades de observación.

Los implementos empleados en el monitoreo de la temperatura edáfica van desde los termómetros de mercurio, revestidos con cobertura metálica, hasta los digitales, pasando por los termopares y los termistores.

La Organización Meteorológica Internacional fija como profundidades estándar para el monitoreo de la temperatura edáfica, las de 10, 20, 50 y 100 centímetros. Pero,

como ya se señaló desde el comienzo de este aparte, los objetivos particulares de cada estudio definirán en última instancia los valores que se precisan en cada estudio.

En el trópico, dada la reducida variabilidad diaria de la temperatura del suelo, resulta muy importante para cada caso, definir la hora de monitoreo. Por lo que muchos investigadores prefieren el monitoreo horario, desde las 06:00 horas hasta las 18:00 horas, bien con el fin de arribar a promedios o marchas térmicas, según las necesidades de cada caso. Por tal motivo, los termógrafos digitales, de lectura directa o remota son bastante apreciados para cumplir ese trabajo.

18.8. MANEJO DEL RÉGIMEN TÉRMICO DEL SUELO.

En realidad, es bien reducida la habilidad del hombre para manipular el clima, y en específico la radiación solar, como razón primaria del régimen térmico del suelo. Sin embargo, el hombre puede tomar algunas medidas enfocadas a la modificación del nivel de temperatura y de los flujos de calor hacia, en y desde el suelo. Así, por ejemplo, los cambios que se operen en la humedad y la estructura del suelo impactarán la capacidad y la conductividad térmicas del mismo. Tal es el caso de los riegos a saturación que se practican para el control de las heladas en las zonas de altura de nuestro país. Igualmente, los ajustes que se hagan sobre la rugosidad de la superficie del suelo, la humedad en dicha zona del perfil y el color de esa capa, afectarán la absorción de calor por el perfil, lo mismo que la irradiación de calor desde éste hacia la atmósfera. De forma similar, el nivel de humedad en los primeros milímetros del perfil marcará la tasa de evaporación desde el suelo a través de toda su profundidad.

Como ya se ha señalado en varias ocasiones en este Capítulo. El aislamiento del perfil modifica la dinámica térmica del mismo. Así entonces, una película de polietileno transparente sobre el suelo reduce la irradiación de calor desde el suelo y conserva la humedad en la superficie del perfil. Sin embargo, el tema de coberturas sintéticas restringe el enfoque a áreas reducidas. Resulta más apropiado ampliar la escala de análisis a las extensiones considerables, donde resulta más adecuado hablar de coberturas naturales. En igual sentido, la cubierta vegetal sombrea la superficie del terreno y hace uso de buena parte de la radiación solar para sus procesos de fotosíntesis y transpiración, por lo que logra mantener más baja y estable la temperatura del suelo, a diferencia de los suelos desnudos vecinos.

En relación con el tema en mención, cabe resaltar que desde finales del siglo anterior se ha comenzado a hablar de la llamada “Erosión Solar” (Bley Cicero Jr. 1999), para englobar la problemática que se registra con frecuencia inusual en los suelos tropicales, sujetos a la radiación solar más directa, casi vertical, y por tanto más eficiente

en el calentamiento de los suelos superficiales y descubiertos de la protección del dosel arbóreo, lo que acarrea la alteración del complejo húmico del suelo y de las diferentes biocenosis de común e intensa ocurrencia en los suelos adecuadamente protegidos. Este apunte es una clara exhortación a los estudiosos del suelo en el momento crucial, 2020 -2021, cuando se escriben estas líneas y cuando la deforestación de la Orinoquia, la Amazonia, el Catatumbo y el Pacífico colombianos, además de la Amazonia Brasileña registran sus más altos niveles de incidencia, en décadas.

XIX. REFLEXIÓN ENFOCADA HACIA EL MANEJO DE LOS SUELOS.

"Es obligación de todo padre, enseñar a sus hijos a amar y preservar a la Madre Naturaleza"

Jefe Seatle, 1856

En la actualidad, pareciera que el intenso consumo de fertilizantes en la agricultura hubiese llevado a esta actividad económica a superar las limitaciones a la producción que podría presentar el tema nutricional. Más bien, cuando contemplamos las extensiones considerables de cultivo, generalmente con altas densidades de población de plantas, llegamos a plantearnos que, evocando a los agricultores de finales del siglo XIX y comienzos del XX, anteriores al advenimiento de las "sales milagrosas", como fueron llamados los fertilizantes entre los finales de la primera década y comienzos de la segunda década del siglo XX, quizás las limitaciones a la producción agrícola pueden ubicarse hoy alrededor de la dotación y suministro de agua y aire para las plantas, de tal forma que se optimicen los regímenes térmicos y la estructura de los suelos, donde se encuentran creciendo esas plantas.

De otro lado, las altas demandas de productos agrícolas por una población mundial en aumento, obliga cada vez a ampliar la frontera agrícola, ocupando frecuentemente terrenos con limitaciones en sus atributos físicos. Todo lo anterior conduce a evaluar juiciosamente las condiciones del suelo desde la óptica de la Física de Suelos, de tal forma que se posibilite la formulación de planes de manejo de tales condiciones para beneficio directo de cada agricultor, y a largo plazo, para el avance de la humanidad.

Con el fin de abrir la discusión de los temas que se avecinan, recordamos hoy como Dumasky y Smith (1993) planteaban que "El manejo sostenible y sustentable de las tierras se fundamenta en los principios de:

1. Productividad.
2. Seguridad.
3. Conservación y Equidad.
4. Aceptabilidad.

Comencemos entonces esta intensa confrontación de enfoques y tendencias. Bienvenidos sean el disentimiento y la discusión plena y ampliamente argumentada:

19.1. OBJETIVOS DEL MANEJO DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO.

19.1.1. Ambiente Favorable para las Plantas.

La razón más obvia que fundamenta un Programa de Manejo de condiciones físicas del suelo es lograr un ambiente favorable para las plantas. En tal sentido el Ingeniero Edafólogo considera los regímenes hídrico, gaseoso, térmico y la resistencia mecánica a la penetración en toda la zona de raíces del cultivo de interés en cada caso. Igualmente, el ajuste de las condiciones físicas va de la mano con el mejoramiento de las condiciones químicas y microbiológicas en la capa referida. Con todo el plan se busca que las plantas que se establezcan en ese volumen de suelo hagan el uso óptimo de la fertilización y demás prácticas agronómicas que se apliquen al cultivo.

19.1.2. Conservación de Suelos.

El segundo objetivo que persigue el manejo de las condiciones físicas del suelo es la conservación del medio edáfico. Con tal fin, se parte del paradigma de que un suelo que presenta una estructura suficientemente desarrollada y estable permitirá una infiltración máxima, por lo que se generarán una dispersión y una escorrentía mínimas, con lo cual, si bien el suelo presentará algún grado de erosión, como fenómeno inexorable para el mismo, ella no pasará de niveles de no aparente a somera. Tal es el caso de las áreas donde floreció intensamente y por muchos años la producción tabacalera de Sucre y Bolívar, como son el eje Colosó, Ovejas, Carmen de Bolívar, San Juan Crisóstomo, San Jacinto, donde la alta estabilidad estructural que registran los vertisoles propios de la zona referida, resistió significativamente a los embates de la erosión en un cultivo tan exigente en el control de coberturas nativas como es el tabaco rubio. Y una vez rebasada esa bonanza tabacalera, los mismos terrenos han cambiado su uso hacia la fruticultura, la producción de leguminosas y ajonjolí, lo mismo que a la ganadería, sin mayores traumas para dichos terrenos.

19.1.3. Conservación del agua.

El agua es un recurso fundamental para la vida. Por ser el suelo el medio poroso que capta almacena y cede humedad en cualquier ecosistema terrestre, el Ingeniero Edafólogo tiene la gran responsabilidad de manejar con visión de sostenibilidad ese recurso vital. En tal sentido, debemos comenzar estableciendo que todo lo que se haga con la mira de conservar el suelo, también estará orientado a conservar el agua. Pero

aún más. El manejo simplista de que la práctica de la aplicación de una técnica de riego consiste simplemente en humectar una capa de raíces, debe ir más allá, visionando al agua como recurso universal que no solo busca suplir los requerimientos hídricos de un grupo de plantas. Debe pensarse entonces en que los excedentes de agua alimentarán a los mantos freáticos regionales, y que éstos a su vez alimentarán a las corrientes superficiales regionales las que finalmente tributarán sus aguas al océano. Conviene en este punto de avance de la discusión sopesar acerca de la responsabilidad que nos cabe al puñado de técnicos agrícolas que estuvimos implicados en la pujanza algodonera del Valle del Sinú, cuando los campos de este valle fueron sometidos a una inmisericorde e inconsulta cantidad de agroquímicos. Y hoy nos preguntamos con asombro. Por qué escasea actualmente el bocachico (P*rochilodus reticulatus magdalenae*) en el Río Sinú. Algo similar puede decirse del nivel de salinidad de las aguas del mismo Río Sinú en aproximadamente, los últimos 20.5 Kilómetros de su curso, después de recibir las aguas del Caño Sicará, dren principal del Distrito de Riego Córdoba Nº1. La Doctrina. Bustamante, 2000; Cantero, 2008.

19.2. REQUERIMIENTOS DE CONDICIONES FÍSICAS POR LAS PLANTAS.

Estos requerimientos dependen del tipo de planta con la que se haya decidido cultivar el terreno, las condiciones climáticas del entorno, e indirectamente, de las condiciones económicas de la zona. De forma similar, la selección del tipo de material vegetal depende de las potencialidades agrológicas del suelo, el clima y las condiciones socioeconómicas del entorno. En general, las plantas requieren un suministro constante de agua a baja tensión ($\tau_m < 1$ atm.), manteniendo siempre un adecuado equilibrio con el suministro de oxígeno a las raíces (VDO $\geq 30 \times 10^{-8}$ = 0.3 ų $grO_2/cm^2/min$).

Los requerimientos hídricos y gaseosos de las plantas varían ampliamente, aún dentro de una misma especie. Y para una planta en particular varía en obediencia a su desarrollo fenológico y a las condiciones de temperatura ambiental. Algunas plantas, como el arroz de riego, requieren abundante dotación hídrica, aún a costa de una limitada aireación, en tanto que otras especies resisten a prolongados períodos de carencia de humedad. El rango óptimo de temperaturas varía entre especies y variedades. Las condiciones de humedad y temperatura del suelo comúnmente se visionan más como factores de riesgo patogénico, que como factor fitotécnico de producción. Los requerimientos de resistencia mecánica a la penetración varían mucho entre plantas, dependiendo de su morfología radical y hábitos de crecimiento. De todas formas, se requiere un conocimiento detallado de los requerimientos fisiológicos de cada planta para lograr un ajuste perfecto con la oferta ambiental del medio físico del suelo. De todas formas, dada la amplia variedad de demandas productivas que en su desempeño

profesional podrán enfrentar nuestros alumnos, los remitimos a las discusiones particulares, contenidas en cada uno de los capítulos de este libro, en referencia a los diferentes atributos físicos del suelo.

19.3. AJUSTES AL USO DE LA TIERRA, SEGÚN LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO.

Como nuestra habilidad para ajustar las condiciones del suelo a los diferentes requerimientos de las diversas especies vegetales es bastante limitado. Tenemos que trabajar, de cierta forma, en sentido inverso, ajustando el uso de la tierra, en todo lo que sea posible, a las condiciones climáticas del entorno y a las condiciones físicas del suelo.

19.3.1. Textura.

La relación porcentual de diámetros de los granos del suelo va desde el suelo arenoso, altamente exigente en especificaciones del sistema de riego con el que se pretenda humectarlo, mientras ofrece un abanico de posibilidades de cultivo bastante reducida, prácticamente sesgada hacia el reglón forestal, en específico a plantas como los pinos. A medida que la masa del suelo comienza a presentar una mayor proporción de finos en su seno, se amplían las posibilidades de cultivo hasta plantas como el centeno y el mijo, en tanto los requerimientos de riego amplían el campo de posibilidades y disminuye sus requerimientos de altas especificaciones. En suelos Franco arenosos, por ejemplo, ya serán viables cultivos como trigo y tréboles. Mientras en suelos francos, franco limosos, franco arcillo limosos el abanico de posibilidades se amplía a reglones como el maíz, la soya, la remolacha, la alfalfa y otras plantas altamente exigentes en calidad de sitio. Finalmente, en suelos con alta presencia de arcillas silicatadas será de esperar una baja laborabilidad por lo que se hace recomendable su uso con coberturas vegetales permanentes como los pastos, o que requieran laboreos localizados como algunos frutales y forestales.

19.3.2. Humedad del Suelo.

En realidad, la humedad del suelo es un factor limitante a las demandas productivas que puedan formular los diferentes agricultores de una zona. No obstante, existen plantas como el sorgo (*Sorgum spp*), el pasto buffel (*Cenchrus ciiaris*), el pasto guinea (*Megathyrsus maximus*), la braquiaria humidícola (*Brachiaria humidicola*), la braquiaria decumbens (*Brachiaria decumbens*), el pasto llanero (*Brachiaria dyctioneu*ra) y el pasto estrella (*Cynodon plectostachyus)* que tienen un comportamiento bastante compensado en la relación materia verde producida : dotación de humedad edáfica, los cuales los hacen ampliamente aplicables a las condiciones de sequía prolongada, comunes en el caribe y los llanos orientales colombianos.

Otro factor a tener en cuenta en relación al tema que nos ocupa es el modelo de distribución de la humedad del suelo en el perfil. En tal sentido, será posible encontrar suelos aparentemente secos en su superficie pero que tienen comportamiento aceptable con cultivos como la alfalfa y la remolacha azucarera, en atención a la alta retención de humedad en las capas profundas de sus perfiles.

De otro lado, la carencia crítica, temporal o prolongada, de humedad en algunos ecosistemas orilla a los agricultores a echar mano de técnicas de supervivencia como las tierras de jugo, mencionadas en el capítulo de Agua del suelo, o a las técnicas de cosecha de agua, que hacen parte del libro de “Gestión Moderna de la Salud del Suelo” de los profesores Bustamante y Cantero, actualmente en preparación. Como las Terrazas de Zingg Hausser, mediante las cuales se sacrifica parte del terreno para captar escurrimientos y dirigirlos hacia un área de cultivo, al tiempo que se reduce la densidad de población de plantas, con el fin de lograr la producción sostenida y sostenible de material vegetal, sustrato de la vida.

19.3.3. Aireación del Suelo.

La mayoría de las plantas cultivadas tienen altos requerimientos de aireación, esto es especialmente cierto para plantas con sistemas radicales profundos como la alfalfa y la remolacha azucarera. Los suelos con oferta reducida de aireación limitan altamente su oferta en capacidad de uso agrícola a reglones tales como el arroz, y a algunos pastos como el Pasto panameño (*Ischaemum ciliare.* Retz)) y Pasto Pará o Admirable (*Brachiaria mutica*). Finalmente, cuando las limitaciones a la aireación son ocasionales, por inundaciones súbitas, el sorgo es quizás la planta más resistente a dichas condiciones.

19.3.4. Régimen Térmico del Suelo.

Como quedó establecido en el Capítulo anterior, en condiciones de climas tropicales la principal influencia sobre la vida vegetal la tienen las temperaturas ambientales, muy por encima de los regímenes de temperatura que rijan en el suelo.

19.3.5. Estructura del Suelo.

El efecto directo de la estructura sobre el comportamiento vegetal está asentado en el concepto de la resistencia que pueda presentar el suelo a ser penetrado por las raíces. Igualmente, la estructura del horizonte superficial y el llamado perfil estructural de cada suelo serán factores claves en la selección de alternativas de producción para un sitio determinado. Así entonces, los suelos densos deberán cubrirse con cosechas de

sistemas radicales de tipo radial y somero; o también por plantas axonomorfas, con raíces pivotantes fuertes y robustas, por tanto, capacitadas para sortear el obstáculo que pueda presentar la capa problema, que se comporta como impedimento al crecimiento radical.

19.3.6. Color.

Bajo condiciones tropicales, el color de los suelos no amerita ningún manejo, en razón a que no afecta en nada el comportamiento vegetal, como si lo hace en latitudes superiores a los trópicos de Cáncer y Capricornio.

Sea esta la oportunidad para dejar establecido que los ajustes que deben darse en búsqueda de niveles de producción agrícola de excelencia deben operarse en los campos climático, topográfico, de profundidad freática, condiciones químicas, en consonancia con la situación económica y el grado de avance tecnológico agrícola regional.

19.4. METAS PARA UN PROGRAMA DE MANEJO DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO.

Aunque la preparación de la tierra para lograr una producción agrícola máxima de alimentos y fibras es el principal propósito de manejo del agricultor, la conservación del suelo y del agua son temas que van unidos a ese objetivo.

Es imposible establecer especificaciones para las condiciones de cada cultivo y cada clima. No obstante, a continuación, se presentan algunos lineamientos generales aplicables en un grupo amplio de situaciones.

19.4.1. Régimen Hídrico.

Mientras más bajas se logren mantener las succiones matriciales (τ_m) del suelo, durante la temporada de crecimiento de un cultivo, más ventajosa y holgada es la suplencia hídrica para las plantas. Para lograr esta meta debe procurarse una alta tasa de infiltración, dar al suelo condiciones que posibiliten una alta retención de humedad en las capas más profundas del perfil, éste debe exhibir condiciones que viabilicen una fácil y rápida penetración de las raíces, de modo que ellas tengan más probabilidades de suplir las demandas hídricas de las plantas a través de un volumen incrementado de suelo. Adicionalmente, es deseable que los perfiles de suelo oscilen a través del año entre los niveles de seco al aire y húmedo, ya que dichas variaciones inducirán mejoras en el desarrollo y estabilidad de la estructura del suelo, lo que a su vez provendrá de los

cambios fisicoquímicos y biológicos que se desencadenan como consecuencias de esas variaciones en el régimen hídrico del suelo.

19.4.2. Régimen de Aireación del Suelo.

El reemplazo del aire del perfil de suelo debe permitir una VDO mínima de 30 x 10^{-8} gr O_2/ cm^2-min. por difusión hasta la profundidad a la cual se espere que habrán de alcanzar eventualmente, las raíces de las plantas que se deseen cultivar en cada sitio. Unos días después de la siembra la profundidad en referencia estará definida por la localización de cada semilla, pero en temporadas climáticas de sequía puede llegar a ser hasta superior a un metro.

El caso es que en la temporada de crecimiento activo del cultivo la presencia de oxígeno en los primeros 20 centímetros del perfil debe ser superior al 12%. Un último detalle a tener en cuenta consiste en procurar que la humedad relativa de la atmósfera del suelo nunca caiga por debajo del 100%, como consecuencia de un abatimiento severo en la humedad del suelo, con aproximación al PMP, lo cual puede generar lesiones irreversibles en el sistema radical del cultivo.

19.4.3. Estructura.

Como se ha dicho varias veces a lo largo de este texto, las suplencias de aire y agua para las plantas se desenvuelven en una prolongada dialéctica de oposición, en la cual la armonía bascula en el concepto del desarrollo estructural del suelo. Por tal razón, las consideraciones relativas al clima, la pendiente, la profundidad al freático y el tipo de planta seleccionado para cultivar llegan a modificar la estructura original del perfil del suelo. En el desarrollo del cultivo deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones relativas al manejo de la estructura del suelo. El suelo superficial, 20 a 30 centímetros por debajo de la superficie, debe ser alto en porosidad no capilar que posibilite una alta rata de infiltración y los agregados deben ser lo suficientemente estables para que la situación de porosidad referida se mantenga a través de toda la temporada de cultivo. Esto es, deben estar en una condición de óptima preparación mecánica. La porosidad en la capa en referencia debe reducir su diámetro a medida que se profundiza en la misma, ya que, en caso contrario, una abundancia de poros capilares en la superficie, no solo generarán mayores escurrimientos por dificultades en la infiltración, sino que también incentivarán las pérdidas por evaporación, al potenciar los ascensos capilares desde capas más profundas.

La capa siguiente, entre 30 y 150 centímetros, también debe exhibir una baja porosidad no capilar, pero en menor proporción que la capa anterior, con el fin de posibilitar los flujos percolantes que son de esperar después de lluvias intensas. Pero a

diferencia de lo que ocurría con la capa superficial, en esta segunda capa debe existir una proporción importante de porosidad meso y micro que faciliten la rápida redistribución de la humedad en toda la capa, asegurando así la suplencia hídrica para las raíces.

El suelo por debajo de los 150 centímetros de profundidad afecta el crecimiento de las plantas superiores en términos del almacenamiento de humedad que puede brindar, ya que en él es deseable la ausencia total de la porosidad no capilar, constituyéndose por tanto en una barrera al drenaje del perfil para que, por ascenso capilar, la porosidad meso y micro presente en la segunda capa ejecute ese transporte ascendente de la suplencia hídrica.

Contrario a todo lo anterior, en suelos con nivel freático superficial o en climas húmedos y muy húmedos será necesario contar con altos porcentajes de poros con diámetro amplio en todas las tres capas antes mencionadas.

19.4.4. Régimen Térmico del Suelo.

Las variaciones diarias de temperatura, siempre que no sean extremas, resultan interesantes para los flujos evapotranspirativos y de absorción de humedad de cada planta. Las variaciones entre temporadas secas y húmedas del trópico afectan a la agricultura, en cuanto a que modulan los sistemas de producción agrícola de cada región.

19.4.5. Color.

Los cambios de color de la superficie del suelo tienen un uso más expandido en zonas estacionales, específicamente en áreas dedicadas a la producción intensiva de flores y de hortalizas y fruticultura. En la zona tropical, el uso de coberturas en cultivos como el de las fresas tiene una finalidad preponderantemente sanitaria. En cualquiera de las condiciones latitudinales que se considere, el color de la cobertura pierde su influencia sobre el comportamiento del suelo, una vez la cobertura vegetal arropa la superficie del terreno.

19.5. RECONOCIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO.

Los temas que se tratan a continuación tienen una discusión más amplia en el capítulo de “Erodabilidad del Suelo” incluido en el libro “Gestión Moderna de la Salud del Suelo” que los profesores Bustamante y Cantero, desarrollan por estas fechas.

El Reconocimiento Agrológico de un terreno busca evaluar aquellas condiciones permanentes del suelo, el terreno y su entorno que viabilicen o constituyan obstáculos a un uso determinado. Todo ello inspirado en la sentencia emitida en 1939 por Hugh Hammond Bennett, considerado el Padre de la Conservación de Suelos, y que reza: “El uso del suelo debe basarse en el aprovechamiento de sus capacidades y a la vista de sus limitaciones.

A su vez, el planteamiento del reconocido investigador H.H Bennett se fundamenta en los dos paradigmas siguientes:

“EL SUELO SIEMPRE SE ENCUENTRA EN EQUILIBRIO METASTABLE CON LOS FACTORES QUE LO IMPACTAN”

Y éste a su vez deviene en el siguiente y último de este análisis de fundamentos:
“EL SUELO ES ALFA Y OMEGA DEL ECOSISTEMA”

Haciendo eco de las tres sentencias anteriores, en 1965 ve la luz el texto: “Klingebiel, A.A y Montgomery, P.H.1965. Clasificación por Capacidad de Uso de las Tierras, México. Centro Regional de Ayuda Técnica”.

En el trabajo de Klingebiel y Montgomery se presentan los planteamientos para el desarrollo de la Clasificación Agrológica de las Tierras de la Unión Americana, bajo los auspicios del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA). En dicho sistema se encuentran las particularidades que se señalan a continuación:

1. Se visiona el concepto de terreno, como unidad básica del territorio, integrado por el suelo y sus atributos, las condiciones de su entorno como grado de erosión, pendiente del terreno, morfología del mismo, clima y drenaje. El suelo, dentro de este sistema de clasificación, es solo el componente vertical del terreno.

2. Se califica la laborabilidad de los terrenos de acuerdo con la pendiente del terreno, visionado como los terrenos que puedan ser laboreados con un tractor, así entonces, se consideran arables los terrenos con pendiente inferior a 12%. De 12% a 20% se consideran transicionales y se recomienda usarlos con coberturas permanentes, en tanto que los terrenos con pendientes superiores a 20% se consideran marginales para la producción agropecuaria.
3. Este sistema se visiona como una Clasificación Dinámica, por cuanto se fundamenta en resaltar una limitación, que, en el caso de ser temporal, da base para plantear un ameritamiento, el cual, sí se aplica correctamente, tiene el efecto inmediato de mover el terreno en estudio hasta la clase agrológica anterior. Por

ejemplo, un suelo ácido, en presencia de una serie de condiciones óptimas, puede llevar a un terreno a ser clasificado como Clase II; pero sí se somete a enmienda por encalado, asciende automáticamente a Clase I

4. Se establecen las cuatro categorías taxonómicas: Clases, subclases, Grupos de Manejo y Unidad de Capacidad. A continuación, una explicación breve de las cuatro categorías:

   a. CLASE: Las Clases agrupan terrenos con aptitudes y limitaciones similares, es el nivel más general de esta clasificación y se numeran de I a VIII, correspondiendo el incremento en su numeración con el aumento en sus riesgos y limitaciones a la producción, así entonces la Clase I, reúne tierras con cero limitaciones a la producción agropecuaria y forestal, en tanto que la Clase VIII reúne territorios solo utilizables como reserva ecológica o estratégia ecosistémica.

      Es necesario anotar en este nivel de la discusión que, en el año 2010, el profesor Ph D Dimas Malagón Castro, Director de Agrología del IGAC definió cambiar el sistema de nominación de Clases Agrológicas en Colombia, del sistema de ocho clases nominadas por números romanos a números arábigos

      Como ejemplo de lo expuesto, y con miras a desarrollos posteriores diremos que el terreno de prácticas de tractorismo de la Sede Central de la Universidad de Córdoba en Montería, ubicada dentro de la Serie Guardería pertenece a Clase 2, lo mismo que el predio aledaño a la vía Lorica – San Pelayo y vecino a la Estación de Servicio “Carrillo”; al igual que el predio ubicado en la Hacienda “Capellanía”, sobre la margen izquierda del Río Sinú y exactamente enfrente del Cuartel de Bomberos de Lorica.

      Las clases 1 a 3 son consideradas arables o laborables con maquinaria, la Clase 4 se considera transicional. La clase 5 corresponde a terrenos con limitaciones por drenaje, más no por pendiente. Finalmente, las Clases 6 y 7 se consideran sólo aptas para actividad forestal, con cultivos permanentes. La Clase 8, ya fue referida anteriormente.

   b. SUBCLASE. Las subclases corresponden a terrenos dentro de una clase que presentan limitaciones generales por suelo (s); topografía (t); drenaje (h); erosión (e) o clima (c). Siguiendo con el ejemplo que traemos diremos acerca de los tres predios en estudio que el lote de UNICOR es Clase 2 s, lo mismo que el predio de Carrillo. En tanto que el predio de Lorica es 2 h

c. GRUPOS DE MANEJO: agrupan terrenos que tienen limitaciones específicas similares dentro de una subclase. Siguiendo con nuestro ejemplo, el predio de Unicor será 2 s p, el de Carrillo será 2 s s y el de Lorica será 2 h d. Todo ello en razón a que el predio de Unicórdoba tiene limitaciones a la profundidad efectiva por un caso de sepultamiento, con ocurrencia de un lecho arenoso a los 68 centímetros de profundidad; el predio de Carrillo tiene inconvenientes por parches de salinidad, como área que fue desecada a partir de una antigua zona de ciénaga. Y el sitio de Lorica presenta limitaciones por drenaje natural.

d. UNIDAD DE CAPACIDAD: Reúnen suelos con grados de limitaciones especificas similares. En el ejemplo que venimos desarrollando tendríamos la unidad de capacidad para el predio de Unicórdoba será 2 s p 2, en razón a exhibir una profundidad efectiva de moderadamente profunda a muy profunda, siendo el limitante el lecho arenoso a los 68 centímetros de profundidad. De otro lado, el predio de Carrillo tendrá como Unidad de Capacidad a la 2 s s 1, debido a que la incidencia de parches salinos es inferior al 20% y pueden controlarse por inundación secular de los mismos, o aprovechándolos con el uso de vegetación resistente. Finalmente, el predio de Lorica corresponde al Grupo de Manejo 2 h n 2, por presentar limitaciones en el drenaje interno del perfil, con ocurrencia de gleyzación a los 32 centímetros de profundidad.

Desde 1965, organismos como el DETENAL, Departamento de Estudios Técnicos del Territorio Nacional en México. Y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, en Colombia comenzaron una serie de ajustes técnicos al Sistema de Clasificación propuesto por el USDA en la publicación de Klingebiel y Montgomery, tratando de lograr una aproximación a las condiciones seculares de ambos países, llegando a obtener planteamientos colombianos destacados en 2004, a cargo de Burgos y en 2010 por Malagón. El caso es que para el año 1998 el IGAC reportaba los datos referentes a porcentajes de extensión del territorio nacional cubiertos por las diferentes clases agrológicas como se presentan en la Tabla 24.

Para una fecha anterior a la generación de los datos presentados,1986. Específicamente 1985, por convenio entre IGAC e ICA se generó la Zonificación Agroecológica de Colombia, en escala 1:500.000, esto es, a nivel de Levantamiento General. En la Tabla 25, se presentan los resultados de dicho estudio.

A los conflictos de uso se arriba comparando el Uso potencial con el uso actual que se esté dando a cada fracción del territorio. Así entonces, el conflicto puede ser nulo cuando hay total coincidencia entre potencialidad y uso actual. Cuando se está usando

Tabla 24. Incidencia de las diferentes Clases Agrológicas en Colombia, según IGAC, 1985

Clase Agrológica	% de la Superficie Nacional	Comentarios
1	--	
2	1.0	Entre Clases 1 y 2
3	4.7	
4	5.6	Total Arables 11,3%
5	7.5	Principalmente por inundaciones
6	25.1	Principalmente ubicada en la Zona Cafetera
7	45.6	Uso factible haciendo Conservación de Suelos, Cultivos Multiestrata y ganadería
8	10.5	Reserva Ecológica

la tierra por encima de su capacidad se habla de conflicto agrológico. Cuando el uso recurso se esté dando por debajo de su potencialidad, se habla de conflicto social, ya que se están dejando de utilizar las potencialidades del recurso en contra de la oferta de empleo y de generación de flujos de capital en un conglomerado social. Así entonces, en la gráfica de la Figura 179 se aprecia un conflicto social en el hecho de que existiendo un 12.70% de tierras en capacidad de ser utilizadas en agricultura, sólo se utiliza un 4.66%. De otro lado. El hecho de que de un 68.50% ocupado por tierras con aptitud forestal, solo un 49.00% se esté utilizando con tal fin, constituye un conflicto agrológico, donde tierras con baja capacidad productiva, o con altas limitaciones para cualquier otro uso más exigente, sean forzadas a sostener un empleo con exigencias que rebasan las aptitudes naturales de ese terreno. No obstante, al cuantificar la diferencia entre las dos cifras de uso potencial y actual, arroja una diferencia de 19.0%, guarismo éste que al compararse con el 9.8% que refiere la Tabla 25, como terrenos con aptitud forestal, pero con posibilidades agropecuarias, lo cual estaría apuntando a una incidencia de conflictos agrológicos en una extensión que abarca el 9.7% del área intervenida en la nación que para el año 1986 era igual al 48.45% del territorio continental colombiano. Por contrastación realizada por el IGAC entre los resultados de la Zonificación Agroecológica, 1985, y el uso actual del territorio en el año 1986 se generó la gráfica que se presenta en la Figura 179. Esta gráfica marca el momento de abordar el concepto de “Conflictos de uso de la tierra”.

Finalmente, llama la atención el hecho de que existiendo solo un 16.80% de tierras con aptitud para sostener ganadería, esta actividad cubra un 35.11% del territorio nacional. La explicación es bien sencilla. Se han sacrificado vastas zonas con aptitud agrícola, en un flagrante conflicto social. Y, de otra parte, se han forzado terrenos con altas limitaciones para llevarlos a sostener actividades de ganadería, tipificando el clásico

conflicto agrológico de uso. Conviene a esta altura de la discusión, llamar la atención de altísimo interés coyuntural que reviste este fenómeno de la ganaderización de los bosques, en razón a que la intensa deforestación que ha sucedido a la firma del Acuerdo de Paz en Septiembre 26 de 2016, y se ha recrudecido aprovechando en forma rampante las limitaciones que ha traído la pandemia del COVID 19, se ha enfocado al aprovechamiento ganadero de amplias zonas forestales de la Amazonia, la Orinoquia, el Pacífico colombiano y la zona del Catatumbo, ésta última a su vez, ampliamente favorecida por la crisis socio-política que se vive en Venezuela desde hace más de diez años.

Tabla 25. Agrupación por aptitud de la tierra, según la Zonificación Agroecológica de Colombia, IGAC – ICA. Escala 1 : 500.000,1985.

APTITUD	S (ha)	% SN
Aptitud agrícola	14'362.867	12.7
Vocación ganadera	19'251.400	16.8
Aptitud forestal	78'301.484	68.5 **

** De la superficie con aptitud Forestal, presentan :

Posibilidades agropecuarias	11'205.275 ha	9.8 % SN
Bosque Pt – Pd, Pt	67'093.209 ha	58.7 % SN

* Bosque Pt – Pd: Bosque Protector – Productor

** Bosque Pt: Bosque Protector.

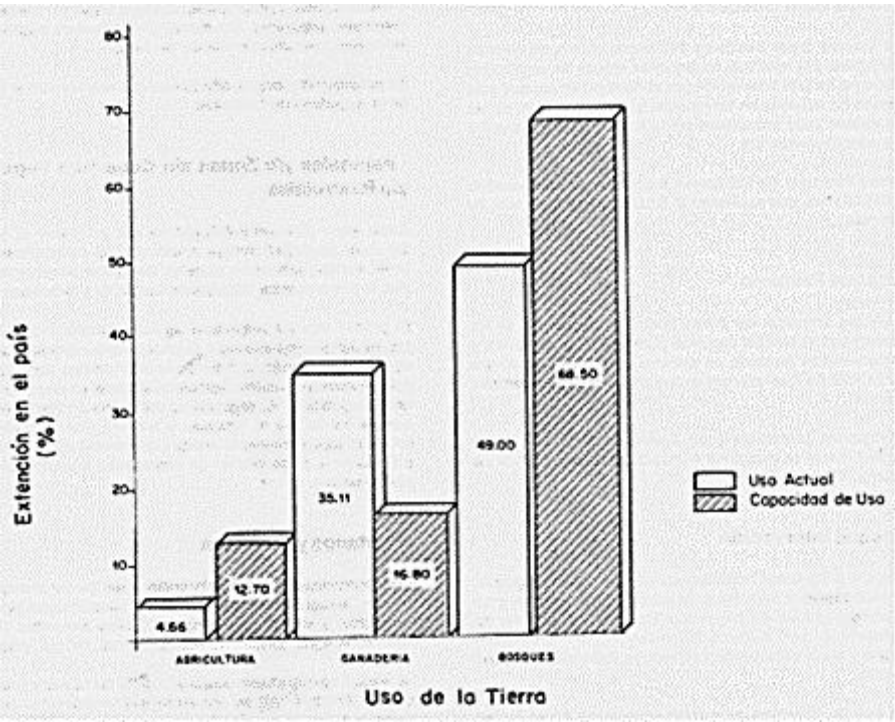


Figura 179. Uso actual, capacidad de uso de las tierras en Colombia y conflictos de uso generados. IGAC, 1987.

En el año 2014, Malagón y otros en su publicación “Manejo de Suelos Colombianos” presenta algunas cifras un tanto más actual acerca del tema que nos ocupa. Así entonces, en la Tabla 26 se presenta el cubrimiento de las diferentes clases de tierras, clasificadas según su capacidad de uso, como resultado resumido del Levantamiento Agrológico Nacional, realizado por IGAC en el año 2012.

Correlativamente con la Tabla 26 se presenta la Agrupación de Clases por capacidad de Uso, Figura 180, con el fin de establecer las limitaciones y potencialidades de las tierras del país, IGAC 2012, y la vocación de las mismas. Tabla 27. Finalmente, en la Figura 181 se presenta el Uso Actual de la tierra, según IGAC et al, 2012.

Tabla 26. Cubrimiento nacional de las diferentes Clases de Tierras por Capacidad de Uso en Colombia. IGAC 2012.

Clase Agrológica	% de la Superficie Nacional
1	--
2	0.9
3	2.0

4	12.7
5	7.4
6	26.2
7	36.1
8	12.5
No suelo*	2.1

**: Área carente de cubierta edáfica, glaciares, bosques de xerófitas, pajonales, rastrojos y páramos*

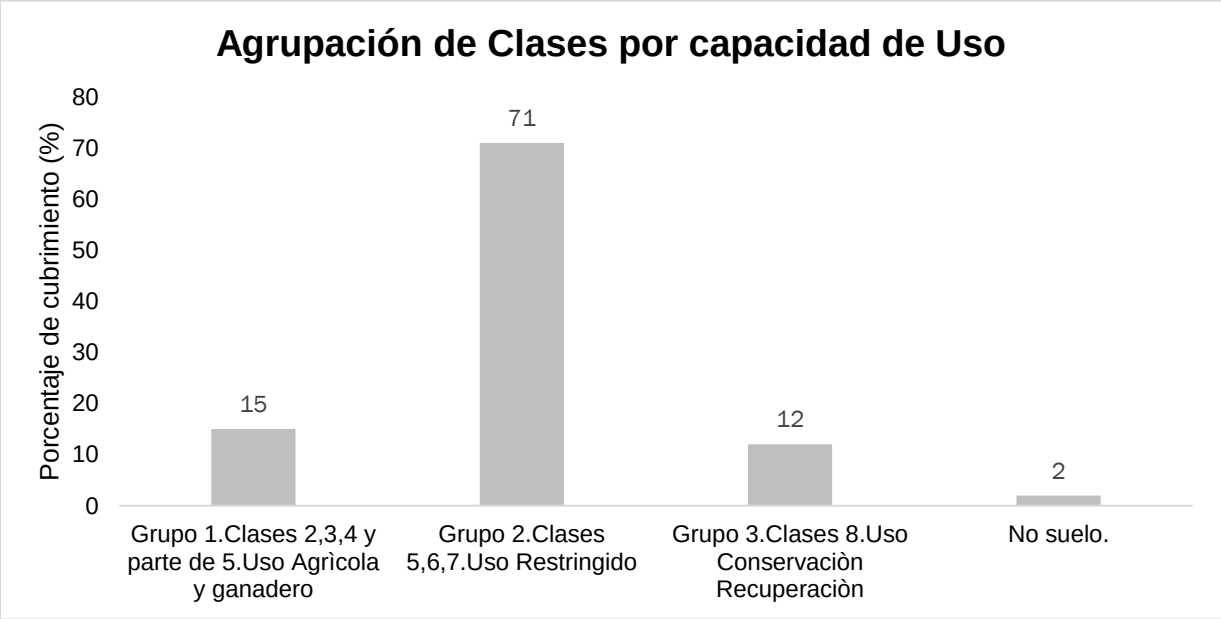


Figura 180. Agrupación de Clases por capacidad de Uso, con el fin de establecer las limitaciones y potencialidades de las tierras del país, IGAC 2012.

Tabla 27. Recomendación enfocada a la Vocación general del uso que tienen las tierras en Colombia. IGAC, 2010

Vocación	**Porcentaje de cubrimiento nacional**
Forestal	56.2
Conservación / Recuperación	5.5
Agrosilvopastoril	3.6
Ganadera	13.3
Agrícola	19.3
No Suelo	2

Adicionalmente, confrontando las coberturas señaladas en la Figura 180 con los datos que se muestran en la Tabla 27y la Figura 181 se llegan a dimensionar los Conflictos de Uso de la Tierra presentados en la Figura 182, según el IGAC, 2012 y el PNUD. Ministerio de Agricultura de la República de Colombia, 2013.

Un resumen de la situación presentada en la Figura 182, se muestra en la Figura 183, en términos de Uso adecuado, sobreutilizado o conflicto agrológico; y subutilizado o con conflicto social de la fracción intervenida del territorio nacional, 47% del área total continental (1’141.748 Km^2). Según datos reportados por IGAC en 2014. Desafortunadamente, para 2022, cuando estas páginas se publiquen, el área intervenida del país se espera que aparezca incrementada, en obediencia a la alta incidencia de la deforestación, a partir de los últimos días de 2016

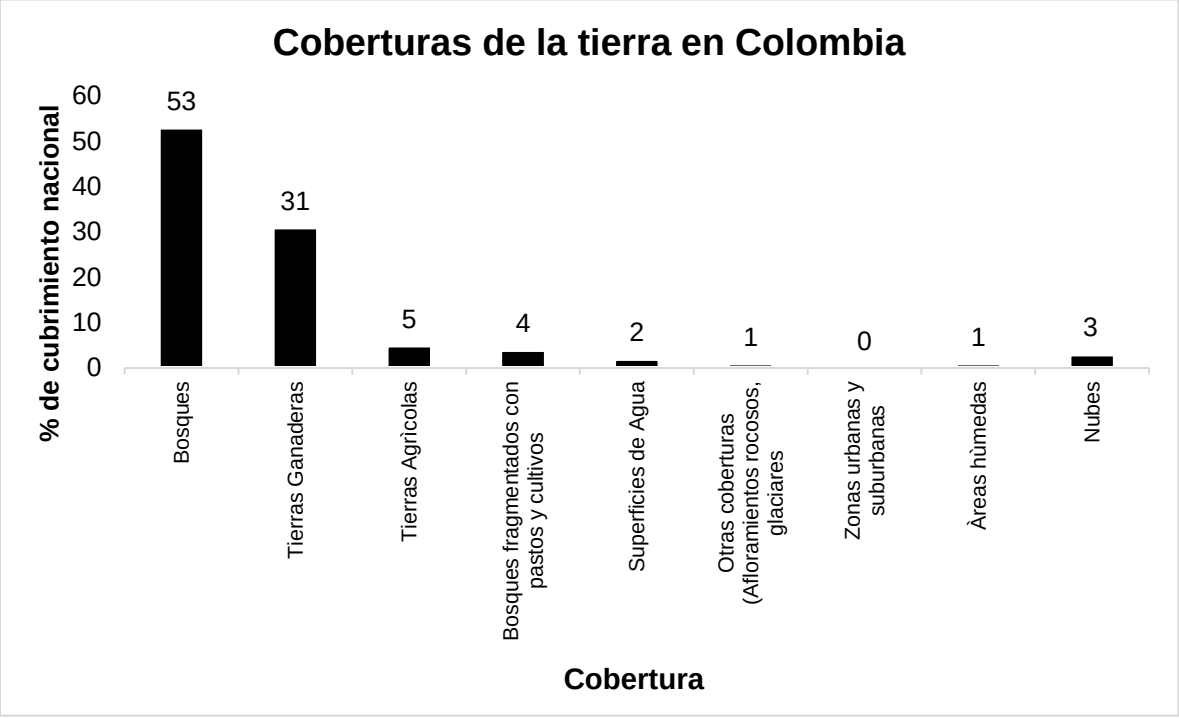


Figura 181. Coberturas de la tierra en Colombia. Metodología Corine Land Cover adaptada a Colombia a partir de imágenes Land SAT – TM de los años 2000 – 2002. Con verificación de campo entre 2006 y 2008, IGAC et al, 2012

19.6. MÉTODOS PARA EL MANEJO DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO.

Se conocen varios métodos para el manejo de propiedades como los regímenes hídrico, térmico y gaseoso del suelo, lo mismo que para el manejo de la estructura edáfica. Aunque debe aclararse que resulta imposible tener un método que afecte única

y exclusivamente un solo atributo del suelo. Por ejemplo, el riego, que, si bien se proyecta como una técnica para el manejo del régimen hídrico del suelo, termina afectando también la aireación, la temperatura, el color y la estructura del suelo. Para no alargar la discusión teniendo en cuenta a las condiciones químicas y biológicas del suelo.

Por tanto, en la siguiente discusión se dará esa misma entremezcla de impactos que pueden tener los diferentes métodos de manejo que serán analizados.

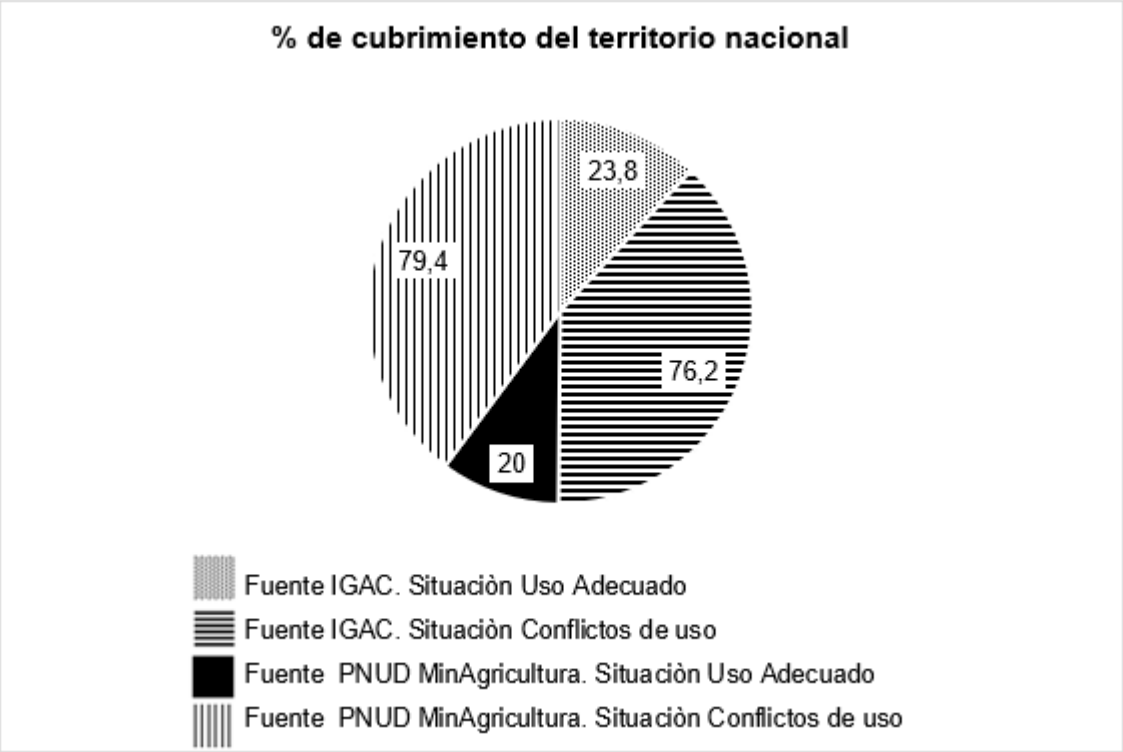
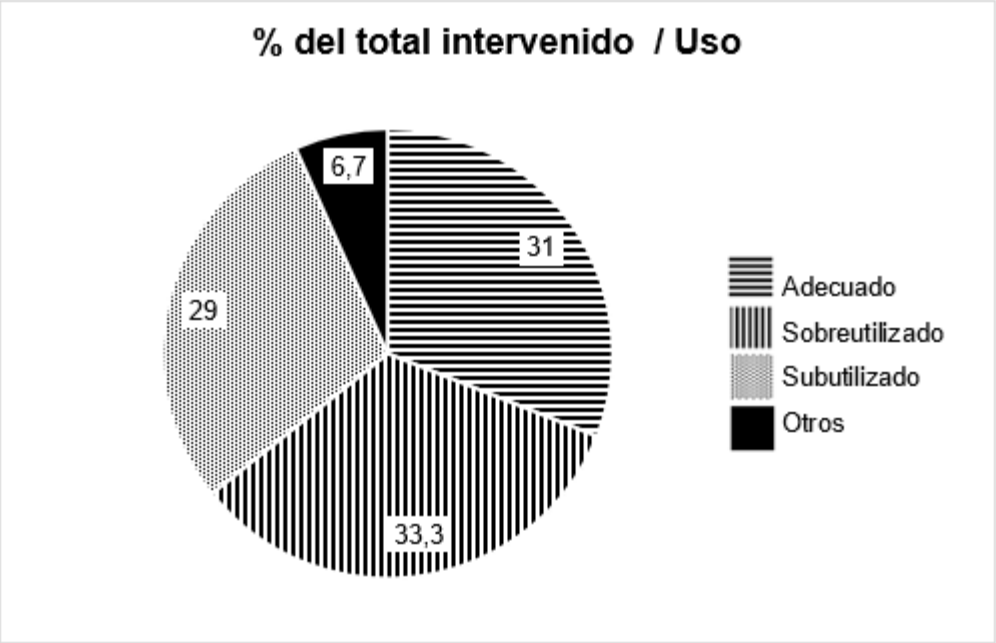


Figura 182. Uso adecuado del suelo y Conflictos de Uso, con base en datos del IGAC, 2012 y el PNUD. Ministerio de Agricultura de la República de Colombia, 2013.

.

19.6.1. Uso del Suelo.

El tipo de cultivo que cubra el suelo tiene un impacto profundo en las condiciones del suelo, por esto mismo puede decirse que el uso del suelo es la principal medida agrológica y que por ello impacta intensamente el comportamiento del medio edáfico, ya que cada cultivo tiene unos comportamientos únicos en diferentes aspectos que resultan cruciales para el suelo, como son sus requerimientos de labranza, profundidad de raíces, métodos de cosecha y de disposición de residuos vegetales en temporada de postcosecha. Esta es la condición que hace recomendable la rotación de cultivos,



* Otros: Corresponde a usos mineros e infraestructura urbana y suburbana.

Figura 183. Proporción del territorio nacional intervenido (47% del área total continental (1'141.748 Km^2)) bajo conflictos de uso, y de uso adecuado de los suelos. IGAC, 2014.

considerada como la práctica central de la agricultura moderna por Antoine Demolon. Quittet, E. 1968. Sin embargo, los detractores de dicha práctica argumentan que se sacrifican algunas temporadas que podrían ser buenas económicamente con cultivos más rentables, en tanto que el agricultor en rotación estará ocupado con otros cultivos de menor rendimiento económico, y mucho peor sí en ese período el terreno está en descanso o barbecho. A este respecto es conveniente anotar que muchos agricultores algodoneros ubicados en el eje Montería – Cereté – San Pelayo, Córdoba durante la temporada de Bonanza Algodonera, ocurrida en los años 80's llegaron a adoptar la práctica de dedicar el primer semestre del año al barbecho y a la preparación temprana de terrenos para el cultivo del Algodón, a despecho de dedicar el primer semestre del año al cultivo alternante de maíz o sorgo, con lo cual la labranza para el segundo semestre se tenía que dar en un tiempo muy corto, con una alta escasez de maquinaria, y por ende con una baja calidad de laboreo del suelo, lo cual redundaba en reducciones en la producción algodonera entre 30% y 35%. No obstante, no existen datos debidamente documentados de esta práctica, dada también la alta variabilidad de los suelos del Valle del Sinú.

La densidad de población de un cultivo impacta claramente la temperatura y la humedad de un suelo. Así entonces, un cultivo con alta densidad de población aumentará el sombreamiento del suelo, por lo que afectará a la temperatura de las primeras capas de suelo, y si bien generará mayores demandas transpirativas sobre el agua del suelo,

reducirá las salidas por evaporación en atención al mayor grado de aislamiento térmico del suelo, al tiempo que podrá incentivar las ganancias de humedad edáfica, por vía de posibles fenómenos de condensación intensa sobre la voluminosa masa vegetal que presentará.

Para terminar este apartado sobre uso del suelo conviene dejar establecido que seguramente la cobertura más conveniente para un terreno es la cobertura permanente que evite frecuentes laboreos y no exponga al suelo al impacto del agua y el viento. Sin embargo, conviene aclarar que la cobertura forestal aventaja a la de pastos, ya que, en éstos, el continuo tráfico animal, el entorno climático, las condiciones del perfil de suelo y las características del sistema de pastoreo que se implemente conducirán a la generación de capas compactadas a una determinada profundidad, acorde con el peso promedio por animal y la frecuencia de pastoreo.

No obstante, conviene hacer algunas aclaraciones acerca de la cubierta forestal, ya que no necesariamente constituye una panacea al manejo de suelos. Así entonces, la primera discusión que es necesaria es distinguir entre los conceptos de forestación y reforestación. Mientras la primera actividad está enfocada simplemente al cubrimiento de un área con forestales, la segunda, también conocida como repoblamiento forestal, apunta hacia el restablecimiento de la vegetación nativa, que alguna vez cubrió el área, según las condiciones ecológicas de cada zona, constituyendo el bosque nativo de la región particular.

Es común ver forestaciones con plantas introducidas con criterios de selección llamativos pero que se quedan cortos, por lo que dejan de lado otros temas trascendentales acerca de su comportamiento en el trópico, tal es el caso de la Acacia mangium (*Acacia mangium*), la cual si bien presenta una amplia adaptabilidad a condiciones limitantes de suelo; sus filodios, ramas y espigas , no son susceptibles a la descomposición por la fauna nativa de las regiones donde se implanta, comprendidas entre los 0 y los 720 msnm, ya que según se desprende de datos colectados en el Bajo Cauca antioqueño, por estudiantes del Programa de Maestría en Ciencias Agrarias, con Énfasis en Suelos, Convenio Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira - Universidad de Córdoba, solo después de 12 años del establecimiento de un rodal de esta especie, sobre suelos degradados por minería de aluvión, se comienzan a detectar algunos especímenes pioneros de la macrofauna del suelo, como son algunos miriápodos y coleópteros. Esta misma condición de escasez biótica en el entorno edáfico y la ausencia de población de insectos en el rodal actúa repeliendo la población ornitólogica sobre el mismo, lo cual lo catapulta como medio de anidamiento preferido para la abeja africanizada (híbridos procedentes del cruzamiento de la subespecie natural africana *Apis mellifera scutellata* con abejas domésticas pertenecientes a varias

subespecies de *A. mellifera*, como *Apis mellifera mellifera*, *Apis mellifera iberica* y posiblemente otras). Esta condición hace riesgoso el tránsito por este tipo de rodales.

Otro caso similar lo constituyen las forestaciones con Teca (*Tectona grandis*) valorada por la belleza, calidad y alto precio de venta de su madera. Además de su floración permanente, condición ventajosa para la población apícola regional, pero por su condición de productora de hojas cartáceas cuando secas, de forma similar a lo que ocurre con los filodios de la Acacia Mangium; como plantas que son de régimen climático monzónico, bajo el cual la evolución húmica de tales materiales es agenciada por las condiciones climáticas extremas propias de esa zona, donde contrastan las intensas sequias con fuertes precipitaciones del monzón. En condiciones tropicales, como las de Colombia, esta condición conduce a acumulación excesiva de los materiales en referencia, lo que a su vez genera una serie de concentraciones de escurrimientos en forma subsuperficial al "mantillo" de material vegetal cartáceo, y esta condición repercute en la generación de fuertes carcavamientos en los terrenos. Algo similar ocurre bajo el mantillo de acículas y conos de las plantaciones de coníferas y eucaliptos (Eucalyptus spp), genero botánico éste caracterizado por sus altas exigencias evapotranspirativas y por su sistema de raíces axonomorfo y de profundidad considerable, lo cual ha acarreado en no pocas ocasiones a fracasos en extensos rodales, como ocurrió con el plantado en la localidad de Marralú, Ayapel, Córdoba entre 1986 y 1987 sobre una fracción de la Segunda Terraza Aluvial del Río San Jorge.

19.6.2. Métodos de Cosecha.

En realidad, toda cubierta vegetal es cosechada, aunque en el caso forestal se habla de extracción y en el caso de pasturas se denomina pastoreo y corte, mientras que en los demás cultivos se menciona como recolección. De todas formas, se constituye en otra labor, que cuando es dada en forma mecanizada, como ocurre en la mayoría de los casos, implica el tráfico de equipos muy pesados sobre el campo, lo cual puede generar compactaciones en el suelo, sobretodo, cuando la labor en referencia se realiza con el suelo húmedo. En general una cosecha implica un efecto mayor o menor sobre la estructura del suelo, su tenor de materia orgánica y su nivel de nutrimentos; por lo que generalmente, el manejo sostenible del suelo implica la implementación de programas de mantenimiento de las condiciones referidas en un determinado nivel de equilibrio, y ello solo es posible sí se cuenta con un rígido programa de monitoreo de las condiciones del suelo.

En el caso de los sistemas de pastoreo, se impone la adopción de una visión de manejo pastoril de los hatos. Así entonces, habida cuenta de los hábitos de ramoneo de ovinos y caprinos, adaptados a cosechar la pastura a ras de suelo, habrá que estar muy atentos al momento de desocupación del lote de apacentamiento, evitando dejar el

terreno totalmente descubierto. Para la misma decisión se podrá ser un tanto más laxo cuando el pastoreo sea con equinos y aún más amplio sí se trata de bovinos, siempre en atención a los hábitos de ramoneo de estos géneros animales.

19.6.3. Manejo de residuos de cosecha y uso de mantillos.

El manejo de residuos de cosecha en agricultura de escala y de supervivencia en Colombia es una práctica de muy bajo nivel de adopción a nivel nacional. Se sabe por ejemplo del manejo comercial de los tamos de arroz en unos cuantos lotes del Tolima, los cuales son cortados y enfardados en pacas para su venta a las Plantas Industriales de Champiñones, donde son utilizados como sustratos en las camas para cría del hongo comestible. En el resto de la mayoría de casos, los tamos de arroz y socas de los demás cultivos tienen un uso temporal como material de pastoreo, preferiblemente con ganado hembra y seguidamente son consumidos por el fuego, Esta práctica es definitivamente lesiva para la biota, la materia orgánica y la estructura del suelo, en razón a que se trata de “quemas” de larga duración, algunas veces superior a las 12 horas y con la sola salvaguarda de unos exiguos “guardafuegos” que no son más que zanjas superficiales y de plantilla o anchura reducida, lo cual no garantiza su eficiencia en el control de chispas y de la acción de los vientos que pueden acontecer fácilmente en un período de tan larga duración. En el norte del Departamento del Cauca, Colombia, la GTZ (Agencia de Cooperación Técnica Alemana en Colombia) y el CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) estudiaron entre los años 1995 y 1999 la práctica de la “quema controlada” que acostumbran a realizar tradicionalmente los indígenas de la etnia Nasa, asentados entre los municipios de Santander de Quilichao y Mondomo, Cauca. Según dicha práctica, un grupo de indígenas en “minga” se reúnen en las horas de la madrugada, cuando son menos frecuentes y veloces los vientos, y aperados con azadones y palos rodean la parcela de uno de ellos en una operación de quema, que no dura más de una hora, con ello se reduce la biomasa y los efectos negativos sobre el suelo, que entrañan las “quemas del colono blanco”

De otro lado, en ámbitos distantes de las grandes extensiones ocupadas por la agricultura industrial colombiana, en áreas como el Valle Geográfico del Río Cauca, las zonas llanas del Tolima y el Huila, algunas zonas del altiplano Cundiboyacense, las áreas circundantes a Villavicencio, Puerto López y Granada, Meta y buena parte del Caribe, la técnica del manejo de residuos de cosecha siguiendo los lineamientos de la práctica del “mantillo”, impulsada por diversos grupos que propagan la idea de agriculturas alternativas resulta bastante interesante como práctica protectora contra la acción del agua y el viento sobre la superficie del suelo, reduce las pérdidas de humedad por evaporación y aminora las fluctuaciones térmicas en el perfil. No obstante, la práctica del “mantillo” debe analizarse detenidamente en cuanto a su comportamiento frente al agua, por lo que “mantillos” relativamente hidrofóbicos podrían resultar contraproducentes.

19.6.4. Labranza.

Es un hecho comprobado que la labranza impacta las condiciones físicas del suelo. En un principio, la labranza se concibió como una técnica de manejo físico del suelo que permitía el control de malas hierbas e insectos, al mismo tiempo que permitía reducir la densidad aparente del suelo, aflojando los suelos endurecidos, para facilitar el contacto de las semillas con el mismo. Hoy la situación ha cambiado bastante a la luz de los desarrollos en el campo de los herbicidas y en la mecanización agrícola. Otros desarrollos considerables se han dado en los requerimientos vegetales por un determinado grado de mullimiento del suelo, hasta el punto de que existe un contexto generalizado de que no siempre es deseable un máximo grado de desterronamiento del suelo, y las labranzas ásperas pueden resultar recomendables en muchos casos.

Teniendo en cuenta que el manejo de las malas hierbas puede ser abordado con la herramienta química, entonces el objetivo central de la labranza apunta a lograr un perfil estructural acorde con las condiciones del medio y los requerimientos hídricos y de aireación de las raíces del cultivo que se trate, así entonces, un suelo con un laboreo óptimo debe brindar una cama firme para cada semilla en el surco de siembra, ausencia total de sellos y costras en la superficie, contacto capilar adecuado entre la cama de semillas y el subsuelo, de tal manera que se posibilite el ascenso capilar de humedad hasta las radículas, mientras que sobre las semillas y en la zona entresurcos se debe ubicar una delgada capa de suelo, en la cual dominan los poros no capilares que posibilitan una infiltración eficaz, un intercambio gaseoso fluido, mientras que reducen las perdidas por evaporación desde el suelo.

Para lograr las condiciones ideales señaladas en el párrafo anterior debe partirse del conocimiento detallado de las condiciones texturales, estructurales y de tenor orgánico de cada suelo. En este orden de ideas debe decirse que los suelos medios a gruesos, con un adecuado tenor orgánico, resultan apropiados para someterlos a labranza mínima o siembra sin labranza, dada su estabilidad estructural alta. Por el contrario, suelos con alta presencia de limos y arcillas presentan una marcada tendencia a la masividad, sobre todo sí están acompañados por bajos tenores orgánicos, en tales condiciones se requerirán laboreos más frecuentes y elaborados sobretodo la mejora del drenaje. En el caso de los suelos orgánicos la selección de la técnica de labranza exige un depurado criterio técnico, por lo que debe ser aplicada con muy ligera intensidad, de tal manera que no se desencadene una oxidación excesiva del suelo, con la consecuente subsidencia del perfil, la pérdida de contacto con el subsuelo y el incremento excesivo de la erodabilidad del suelo por acción del viento.

El arado de vertedera opera disrumpiendo el suelo endurecido y torneando los fragmentos de suelo así obtenidos. Cuando esta labor es dada dentro del ROLD se

obtienen resultados ideales ya que los macroagregados se fracturan siguiendo sus planos de fragilidad naturales, lo cual conduce a un desterronamiento óptimo del suelo. Este implemento aparentemente también tiene la ventaja de incorporar los residuos vegetales que se encuentran sobre el terreno, por lo que la superficie de éste queda totalmente despejada al término de la labor, aunque esta condición no se considera ventajosa, por la desprotección a la erosión que entraña para la superficie del terreno. Otro inconveniente de este arado es que la hoja de corte de la vertedera deja tras de sí una capa de partículas muy finas, que, con el tiempo, sí no se varía periódicamente la profundidad de laboreo, conduce a la generación de un piso de arado. Igualmente, otro inconveniente que presenta el uso de este arado es que invierte los horizontes de suelo, dejando la superficie del suelo descubierta, a veces saprolizada y expuesta a los factores erosivos. Debe quedar claro que los materiales orgánicos deben quedar sobre la superficie del suelo para protegerlo. El uso de sembradoras especializadas permite plantar las semillas dejando el suelo protegido.

Un aspecto muy importante, y que muchas veces se deja de lado, consiste en conocer la condición de consistencia del subsuelo, ubicado inmediatamente más profundo que la capa de laboreo. Así entonces, si dicho subsuelo se encuentra en condición friable, el laboreo puede darse con toda seguridad y a una profundidad considerable. Pero sí el subsuelo se encuentra en condición plástica, hay que tener demasiado tacto con el control de profundidad del implemento, porque de no hacerse, es muy posible que lleguen a generarse una considerable profusión de capas compactadas en el campo. En algunos suelos “nobles”, o sea, de bajo requerimiento de labranza, será posible adaptar en tándem una rastra pulidora y una sembradora detrás del arado, de tal manera que se reduzcan costos y pases del tractor sobre el campo, con lo cual se incrementan la duración de los agregados obtenidos por la labranza y el control de malas hierbas, en razón a la más rápida germinación del cultivo.

Por su parte, la arada con discos tiene una marcada tendencia a cortar el suelo y los residuos vegetales ocurrentes sobre la superficie. Esa acción de corte conduce a la generación de una cama de semillas mucho más fina que la producida por una vertedera. Los discos no penetran demasiado en el suelo, pero a diferencia de lo que sucede con la vertedera, ya que ésta invierte la columna de suelo intervenida, el disco corta y mezcla, mientras la inversión es mínima. Además de lo anterior, el plano de avance de este implemento, debido a su misma condición de implemento de corte, deja detrás de sí una capa de material muy fino, que con el tiempo llegará a generar una capa de densidad incrementada.

De otro lado, las cultivadoras son implementos diseñados fundamentalmente para operar en el sistema de “Labranza de mantillo”, esto es, bajo cubierta de residuos vegetales. Su accionar no va más allá de los primeros 3 a 10 centímetros del suelo; por

tal razón se han utilizado con alguna intensidad en el Valle medio del Río Sinú, como implemento de aporque en plantaciones de sorgo y de maíz. En algunas ocasiones se adosan en tándem, delante de una fertilizadora de chorro para ejecutar la aplicación de nitrógeno en la etapa de “rodilleo” del maíz. Actualmente su uso ha caído bastante y se han constituido en implemento central para el control de “sellos” y “costras” de ocurrencia significativa en las áreas de “bacines”, muy comunes en el eje geográfico: Las Palomas - Montería – Cereté – San Pelayo - Nariño, Lorica.

Aunque no es una práctica generalizada, el uso de las cultivadoras como implemento central de preparación de terrenos con suelos gruesos a medios, en ausencia casi total de material vegetal en la superficie del terreno, y en ausencia total de coberturas de pasto, de hecho se realiza, pero con una modulación consistente en su alternación con labranza convencional, que incluya un paso de arado, de tal manera que se garantice una profundidad apropiada para la aplicación de fertilizantes de lenta solubilidad y/o volátiles. En tal caso, la frecuencia con la cual debe darse dicha alternación estará en función de la riqueza nutrimental de cada suelo.

Los subsoladores buscan romper la condición de cohesionamiento en suelos con horizontes de alta arcillosidad en el subsuelo, de modo que en las hendiduras provocadas por el paso del implemento pueda colocarse el fertilizante que actúe como atractivo del crecimiento de raíces, las cuales al concentrarse en dichos sitios pueda bloquear el acercamiento excesivo de los materiales arcillosos. Sin embargo, esta medida solo es exitosa en algunos casos. Como alternativa se presenta la técnica de “Mantillos verticales”, según la cual, en las zanjas dejadas por el subsolador se rellenan con materiales de alta relación C: N, como cisco de arroz y pajas de pastos y cereales.

Las niveladoras resultan útiles para impartir tersura a la superficie de terrenos desiguales, algunas veces como consecuencia de procesos erosivos. La labor de estos implementos facilita la distribución del agua en el sistema de riego de superficie. En todo caso, en las labores de mecanización de terrenos hay que tener muy en cuenta el peso de los equipos que se proyecta desplazar sobre el terreno, y, lo que, es más, la relación de su peso con el área de sustentación de los mismos, ya que mientras mayor es ésta relación, mayor es el riesgo de afectación a la estructura del suelo. Cuando se tengan dos implementos de igual relación peso: área de sustentación, debe preferirse el de menor área de soporte, en razón a que éste producirá un menor esfuerzo de arco sobre el suelo. Aquí conviene llamar la atención en el aspecto de en la selección de un tractor deben analizarse los factores tracción y potencia. Así entonces, con el fin de reducir la relación peso: área de sustentación se recomienda reducir la presión de inflado de los neumáticos, al tiempo que se incrementa la tracción, no obstante, los neumáticos con baja presión de inflado afectarán negativamente la facilidad de operación sobre los suelos afirmados, propios de los caminos rurales.

19.6.5. Drenaje.

El drenaje se aplica a un suelo con el fin de evacuar el agua de exceso presente en el perfil en un momento dado, con el objetivo, bien de facilitar el intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera externa, o bien para lograr el desplazamiento de sales solubles presentes en el perfil.

Como se señaló en el Capítulo XVI, el drenaje puede ser externo e interno. En este apartado se tratará únicamente el drenaje interno, enfocado como está a liberar al perfil del agua de exceso que ha percolado a lo largo de la profundidad de este. Este objetivo se logra mediante la acción de tubos perforados y/o de canales a cielo abierto, denominados ambos como drenes. Unos y otros se ubican en su mayoría a 100 cm de profundidad. Con ellos se pretende abatir el nivel freático hasta una profundidad en la cual el agua freática y la franja capilar que siempre le acompaña dejen suficientemente libre de agua de exceso a la zona de raíces. Así pues, se espera que, una vez abatido el nivel freático, la succión matricial (τ_m) en la superficie del suelo será de 0.1 bars, en tanto que a 50 centímetros de profundidad será de 0.05 bars, que como se señaló en el Capítulo XVII es el límite de porosidad de aireación, en el cual todos los poros con diámetro (Ø>0.06 mm) estarán libres de agua. Es necesario resaltar aquí que el abatimiento freático será máximo en las vecindades del dren y mínimo en el punto medio entre dos drenes vecinos, por esta razón el espaciamiento entre drenes estará determinado por el grado de impermeabilidad de cada suelo. Así entonces, los drenes estarán más cercanos en suelos finos que en suelos gruesos.

Los planteamientos formulados en el párrafo anterior se cumplen con cierta regularidad en suelos gruesos, medios y moderadamente finos. En aquellos extremadamente finos la labor del drenaje se hace mucho más difícil debido al flujo extremadamente lento del agua a lo largo de los poros finos abundantes que caracterizan tales perfiles. Queda claro entonces que, en suelos finos, quizás no sea posible lograr la capacidad de campo ($\tau_m = 0.3$ bares) y ello conduce muchas veces a la necesidad de cambiar la demanda productiva sobre un sitio con tal oferta ambiental. Algo debe quedar claro a esta altura de la discusión y es que los suelos arcillosos no permiten ser sobredrenados. No obstante, en suelos gruesos, caracterizados por su baja capacidad de retención de humedad, hay que meditar con juicio extremo el plan de drenaje para los mismos, ya que entrañan un alto riesgo de sobredrenaje. Otros suelos con ese mismo riesgo son los suelos de muck, en los cuales, por su alto tenor de materia orgánica, presentan una marcada tendencia a la oxidación excesiva. Por tal motivo, cualquier ligereza en el diseño de su sistema de drenaje, como puede ser la excesiva profundidad de los drenes, que en tal caso debe ser inferior a un metro, es posible que conduzca a pérdidas de volumen edáfico, y consecuentemente a la subsidencia del terreno, con el

consiguiente colapso del mismo sistema de drenaje. Un caso intermedio y mucho más cercano lo constituye lo sucedido con los sistemas de drenaje construidos para plantaciones de banano (*Musa AAASimmonds*) en la región del Eje Bananero Antioqueño durante los años 70`s del siglo anterior, cuando el diseño y construcción de los sistemas de drenaje subterráneo corrió por cuenta de personal poco experto y con bajo conocimiento de la dinámica freatimétrica de la región, lo cual condujo al sobredrenaje de los suelos medios a finos de la zona. Esto llevó a que suelos de una zona típica del bosque húmedo tropical (Bh-t), que nunca había requerido de riego hasta esas fechas, durante sus estíos de años anteriores. En la década de los 80's se constituyó en lugar común de encuentro de las grandes transnacionales, vendedoras de equipos de riego, buscando mantener a flote el negocio del banano en la región.

Cuando el objetivo del sistema de drenaje es la remoción de sales solubles desde el perfil de suelo, la profundidad de los drenes debe ser mucho mayor que cuando el objetivo es el simple abatimiento del nivel freático, con el fin de garantizar el adecuado intercambio gaseoso en la capa de raíces. En este último caso es común observar drenes a profundidades que oscilan entre 2.0 y 2.5 metros.

19.6.7. Riego.

La aplicación de humedad adicional al perfil de suelo es una alternativa que debe analizarse solo cuando las condiciones naturales de un determinado sitio no hagan viable la producción de las plantas. En consecuencia, después de analizar la alternativa tendiente al cambio y ajuste en la demanda productiva y teniendo en cuenta el alto costo de los sistemas de riego, debe hacerse un análisis juicioso de la implementación de dicha práctica, en él debe considerarse la disponibilidad de agua para riego en la zona, y lo más importante, su calidad y posible evolución física y química dentro del perfil. Esto es, no debe despreciarse el hecho de que el agua adicionada siempre será un cuerpo extraño en el perfil, por lo que casi siempre será necesario analizar la viabilidad de un sistema de drenaje, enfocado al desplazamiento de materiales indeseables desde el perfil y que pudieran darse por el riego con aguas de calidad agrícola media a baja.

El análisis de factibilidad de la práctica del riego combina la consideración del uso consumptivo (C) del material vegetal que se pretenda cultivar en el sitio que se trate, la columna de agua almacenada (S) en el suelo al momento de la siembra, la precipitación probable (P) durante el período de cultivo, las pérdidas esperadas por evaporación desde el suelo (E), las pérdidas esperadas por transpiración (T), las pérdidas esperadas por escurrimiento (Q) y por drenaje (D). De tal forma que sí durante el ciclo del cultivo se cumple la condición:

$$S + P – E – T – Q – D > C$$

Entonces no se requiere del riego artificial. Sí la diferencia es muy poca, o sí solo ocurre durante unos cuantos períodos cortos, quizás el sistema de riego por aspersión en su versión de sistema modular pueda ser el más recomendable. Es menester tener en cuenta las condiciones de lluvia antecedentes al momento de la siembra, lo mismo que las condiciones físicas del suelo, en lo referente a textura, estructura, capacidad de infiltración y de retención de humedad. El análisis integral de tales aspectos permitirá depurar el juicio técnico conducente a la recomendación de riego.

El análisis de datos pluviométricos correspondientes a períodos prolongados de tiempo permitirá visionar las condiciones de precipitación y almacenamiento de humedad en el suelo durante el ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo. En aquellos sitios donde se den carencias hídricas leves, esporádicas o poco significativas no será apropiada la recomendación de riego, excepción hecha para cultivos con alto valor económico.

En el otro lado de las condiciones ambientales. En aquellos sitios donde el déficit hídrico para las plantas incrementa su frecuencia e intensidad, se hace imperioso el uso del sistema de riego superficial, el cual requiere de un voluminoso y riguroso despliegue de ingeniería de adecuación de tierras y de aprovechamiento hidráulico, que permitan una adecuada aplicación del agua, evitando los riegos erosivos y posibilitando al mismo tiempo el desenvolvimiento eficiente de las diferentes labores propias del cultivo.

Como se señaló inicialmente, el tipo de suelo del sitio y la disponibilidad de agua en cantidad y calidad apropiada definirán el nivel de éxito que se pueda alcanzar con el riego que se proyecta. Por ejemplo, en un área donde el abastecimiento de agua provenga netamente de reservorios de agua lluvia, la calidad de agua de riego estará garantizada. El factor determinante que habrá que juzgar en ese esquema de condiciones será la textura y estructura del suelo, de tal manera que facilite la adecuada aireación en condiciones como de que una temporada de abundantes y frecuentes precipitaciones suceda a la aplicación del riego. En tales condiciones los suelos arenosos y gruesos, caracterizados por una alta capacidad de aireación y una baja capacidad de retención de humedad tomarán ventaja sobre los suelos medios y finos, los cuales, por sus mismas condiciones en valores antípodas a los señalados para los arenosos, podrán poner en riesgo el comportamiento de la aireación de tales suelos en esas condiciones. Figura 184.

En áreas donde el régimen pluviométrico presenta limitaciones permanentes o estacionales, como son las del Caribe colombiano es común que tenga que echarse mano de recursos hídricos provenientes de pozos profundos, pozos artesanales y corrientes superficiales. En todos los casos, pero especialmente en los casos en los cuales el agua de riego del proyecto se piense traer de pozos artesanales y corrientes

superficiales, resulta de imperiosa necesidad actualizar el análisis de aptitud para riego de dichas aguas, sobre todo en zonas donde se haga uso intensivo de agroquímicos que vayan al suelo. En el caso de los pozos profundos la situación es menos apremiante, ya que se supone que para una obra de mejoramiento predial, de tan alto costo, como lo es un pozo de este tipo, el propietario del campo ha sabido asesorarse de un profesional idóneo e integral en ese tipo de labores, esto es, de alguien que maneje desde los sondeos eléctricos verticales (SEV) iniciales, hasta las fases de perforación prospectiva, aforo y estimación de calidad de agua para uso humano y agrícola, diseño y construcción final del pozo, incluyendo el diseño técnico de la fuente de potencia para el funcionamiento del mismo.

De todas formas, sí el análisis de aptitud de riego para el agua que habrá de emplearse en el proyecto marca alguna presencia de sales, será menester acompañar al sistema de riego que se implemente, con un sistema de drenaje, donde los drenes

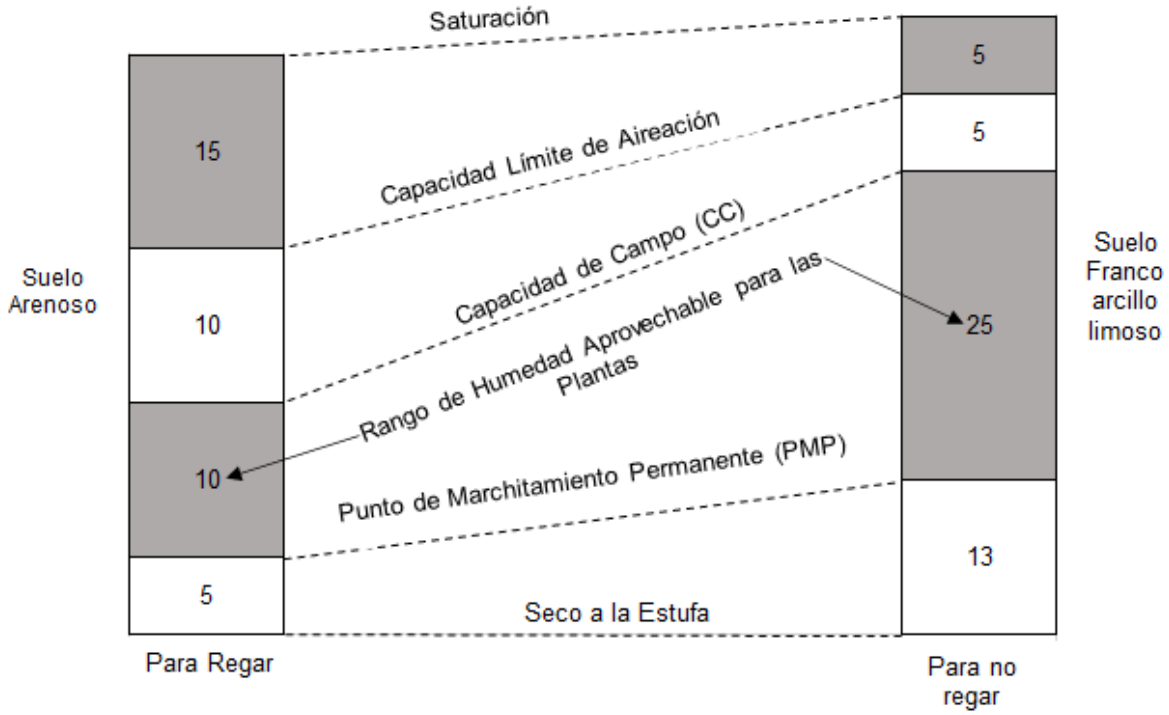


Figura 184. Comparación entre porcentajes con base a volumen de la capacidad de retención de humedad y la capacidad de aireación entre un suelo arenoso y uno franco arcillo limoso. Nótese la amplia adaptabilidad del suelo arenoso al riego. Y el alto riesgo de sufrir problemas de aireación del segundo suelo. Adaptado de Kohnke,1975.

tendrán profundidad entre 2.0 y 2.5 metros. Igualmente debe preferirse algún sistema de riego localizado por encima del riego superficial, con el fin de tener cierto control sobre la dispersión de la salinidad en toda la extensión del campo de cultivo. Y realizar

campañas de lavado de perfiles durante la temporada húmeda del año, utilizando, ahora sí, el sistema de riego superficial, enfocado a lograr el cubrimiento total del lote, empleando las aguas de lluvia de la temporada climática referida, presumiblemente de alta aptitud de riego. Sí las sales solubles presentes en el agua que ha de emplearse en el proyecto son de tipo sódico tendrá que meditarse detenidamente dicha situación, ya que se corre el riesgo de la sodización del terreno, con la consecuente impermeabilización de este, por acción de la dispersión que dicha agua cargada de sodio logrará realizar sobre los materiales coloidales del suelo.

Dada la amplia diversidad de condiciones de suelo, de cultivos y de tipos de agricultura, resulta imposible globalizar en el simple numeral de un capítulo de manejo de suelos un universo de condiciones combinatorias tan variadas. En cualesquiera de las condiciones anteriormente discutidas, el paradigma central del riego consistirá en brindar humedad a las plantas en las condiciones de estrés de humedad que no comprometa el rendimiento final del cultivo, esta condición da base al concepto de “Umbral de Riego”, ya referido en el Capítulo XVI de este texto, como parte de la Ingeniería de Riego, más no perteneciente a la Edafología clásica, si bien se apoya en Ella para su formulación. En la Figura 185 se presentan las curvas de desorción de humedad para los tres suelos clásicos, grueso, medio y fino, con sus correspondientes umbrales de riego, mismos que siendo de 0.5 atmósferas para suelos gruesos, alcanza el nivel de 5.0 atmósferas en suelos medios y de 7.0 atmósferas en suelos finos.

La aplicación de humedad adicional al perfil puede abordarse de cuatro formas diferentes: riego de superficie, riego por aspersión, subirrigación y riego por goteo. En el riego superficial, el método más antiguo de todos, el agua adicionada se deja correr sobre la superficie del terreno, el cual debe ser previamente nivelado y conformado con pendientes acordes con su grado de estabilidad estructural, de tal manera que se obvie el riesgo de que el flujo del agua sobre el terreno pueda tener comportamiento erosivo. Surgen entonces algunas variantes al sistema clásico, que entonces cambia al método de bordos o terraplenes de contorno, según el cual, la humectación del terreno se da en forma fraccionada, permitiendo la permanencia del agua sobre una determinada melga transversal a la pendiente general del terreno, por el tiempo que garantice la humectación apropiada de cada una, evitando siempre las acumulaciones excesivas de humedad en algunos sitios, por lo que la nivelación y conformación previa del terreno se hace de imperiosa necesidad. Este método es de uso común en pastos y en cultivos de crecimiento denso como arroz, cebada, trigo y avena. Una alternativa que logra una humectación mucho más uniforme del campo es el riego por surcos. En este método, empleando diversos dispositivos, como los sifones y la apertura y cierre de bordos construidos con suelo, el flujo del agua es llevado a correr a lo largo de los surcos de un cultivo, los cuales deben tener la textura, estabilidad estructural y longitud apropiadas, con el fin de obviar el riesgo de erosión a lo largo de los mismos.

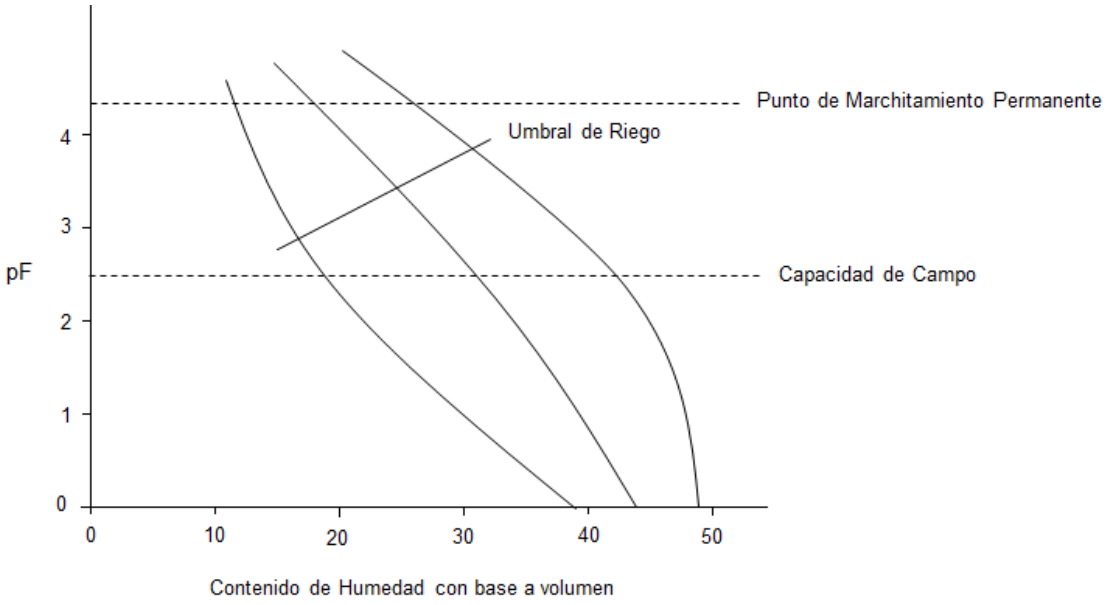


Figura 185. Comparación del comportamiento del "Umbral de Riego" entre los tres suelos, arenoso, medio y fino cuyas curvas de desorción de humedad son esquematizadas en su orden, de izquierda a derecha de esta figura. Adaptado de Kohnke,1975.

Mientras en el riego superficial, la gravedad es la fuerza motriz del agua sobre el terreno, en el sistema de aspersión se requiere de un subsistema de bombeo, el cual carga con agua a una red de tuberías metálicas, sobre algunas de las cuales se encuentran insertados los aspersores, ellos vienen en una gama amplia de especificaciones de caudal emitido, requerimientos de carga hidráulica y ángulo de giro. Es tan amplia la variedad de aspersores, diseñados para cada necesidad y condición, por ello es común ver en el cultivo de frutales, los llamados cañones de aspersión, los cuales más que gotas emiten chorros de agua que luego se fraccionan en gotas, a lo largo de un recorrido de distancia considerable que hace el chorro, desde el emisor hasta el suelo. Una última variación al sistema de aspersión lo constituye la microaspersión, en el cual pequeños aspersores emiten microgotas de agua, que más parecen nubes de pequeñísimas gotas de agua. Este método es de uso común en plantas suculentas y de bajo porte, como son las hortalizas y las flores. En términos generales, cabe señalar que, dado el alto costo de adquisición y funcionamiento de este sistema de riego, solo se recomienda usarlo para superar pequeñas diferencias entre precipitación diaria y uso consumptivo diario. Este sistema puede ser fijo o móvil, en cuyo caso se le conoce como sistema modular. En esta versión, un conjunto de tuberías y aspersores se mueven, como un sistema integral, de un lado a otro, dentro del lote de cultivo.

En el sistema de subirrigación o "drenaje controlado", los mismos tubos perforados y canales a cielo abierto que funcionan como drenes en la temporada húmeda, sirven como surtidores de humedad, por flujo de agua desde ellos hacia el suelo, por acción de

capilaridad en la temporada estival. Obviamente, no cualquier suelo es apto para la implementación de este sistema. Se requiere entonces de suelos altamente permeables como son los suelos arenosos y los suelos de muck, acompañados en ambos casos por niveles freáticos cercanos a la superficie, o con un sustrato altamente impermeable a profundidad considerable.

Finalmente, el riego por goteo es un riego presurizado de alta frecuencia diseñado por el Doctor David Karmeli, en Israel, acosado como estaba con el riego de hortalizas en su Kibut natal, cubierto por suelos arenosos y bajo una demanda evapotranspirativa propia de zona desértica. En este sistema de riego, un subsistema presurizador envía el agua por tuberías plásticas hasta los emisores o goteros, los cuales pueden tener desde una hasta seis boquillas, cada una de estas antecedidas por un microtubo en espiral que hace las veces de un disipador de energía, de tal manera que logra que el agua sea emitida al exterior en forma de gotas intermitentes y no de flujo constante.

19.6.8. Tratamientos químicos.

Al hablar de tratamientos químicos aplicables al manejo de suelos, lo primero que acude a nuestra conciencia son los llamados “Mejoradores de Suelo”, los cuales no son más que macromoléculas orgánicas, construidas por cadenas carbonadas extralargas, que actúan aglutinando los coloides del suelo, por lo que generan alto impacto en el mejoramiento de la estructura del suelo. Adicionalmente, los fertilizantes y las enmiendas calcáreas, en razón a potenciar la generación de altos volúmenes de material vegetal conducen también al mejoramiento de la estructura del suelo en razón a incrementar el suministro de sustrato a la biota del suelo. Los herbicidas actúan como controles de cubiertas vegetales preexistentes al laboreo de suelos, por lo que éste puede darse con menor intensidad, en beneficio también de la estructura del suelo. No obstante, el uso continuado de herbicidas, fungicidas e insecticidas, como puede ser en el caso de algunos cultivos intensivos como pastos de pastoreo, flores, algunos frutales y hortalizas, pueden conducir a generar impactos negativos en el complejo húmico del suelo, lo cual opera en detrimento de la estructura del suelo. Ver Capítulo XV, numeral 15.6.7 de este texto.

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

1. **AMERICAN GEOLOGICAL INSTITUTE, Ed.** 1997. Laboratory Manual in Physical Geology. American Geological Institute. Editorial Prentice Hall. 288 p.

2. **AZAÑÓN H, J M.; AZOR P, A.; ALONSO CH, F M; OROZCO F, M.** 2002. Geología Física. Thomson Editores Spain Paraninfo S.A. Madrid. 301 p.

3. **BAVER, L. D. GARDNER, W. H. GARDNER, W. R.** 1.980. Física de suelos. UTEHA. México.

4. **BLEY, C, jr.** 1999 "Degradación y Erosión de los suelos, riesgo para la agricultura en los trópicos. Revista Ciencia Hoy, BRASIL. Volumen 9 No 54.

5. **BOUL, S. W; HOLE, F. D. Y McCRACKEN, R.F.** 1.991. Génesis y clasificación de los suelos. Trillas. México.

6. **BORRERO M. E.** 1.987. Suelos. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia.

7. **BRADY N.C.** 1984. The Nature and Properties of Soils. The Macmillan Publishing Company. New York. USA.

8. **BUCKMAN, H. O & BRADY N.C** 1.996. Naturaleza y propiedades de los suelos. Unión Tipográfica Hispanoamericana. México. 590 pp.

11. **BURBANO H. O.** 1.989. El suelo, una visión sobre sus componentes bioorgánicos. Universidad de Nariño. Pasto, Colombia.

12. **BURBANO H. O; SILVA, M.F**. Eds. 2010. Ciencia del Suelo, Principios Básicos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. Colombia.

13. **BURCHFIEL, C.** 1982. Physical geology, the structure and processes of the earth. Columbus, Oh. Ed. Merril. 501 p. USA

12. **BUSTAMANTE, B. I. D** 1.996. El suelo, síntesis omnipresente y multitemporal del ecosistema. Publicaciones UNICOR. Montería, Colombia.

13. **BUSTAMANTE, B. I. D.** 2000. Factores edáficos asociados con la reducción progresiva de la productividad en el Distrito de Riego Córdoba Nº1. La Doctrina. Avance de Resultados, Período 1998 – 2000. XI Simposio Regional de

Investigaciones Agrícolas. Noviembre 22 - 24 de 2000. Universidad de Córdoba. Montería, Colombia. 247 pp.

14**. CANTERO B, M.C.** 2008. DIAGNÓSTICO GENERAL DEL NIVELDE SALINIZACIÓN EN LA ZONA ALEDAÑA A LA DESEMBOCADURA DEL RÍO SINÚ Y SU IMPACTO SOCIOECONÓMICO. FASE VII. PERÍODO: NOVIEMBRE/2000 – NOVIEMBRE/2008. (CONTRATO PRE – 0496 – 2008. Empresa Multipropósito Urrá, S.A, ESP. Montería, Córdoba, Colombia.

15. **CASTRO F, H.** 1.998. Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas, Manual Técnico. Instituto Universitario Juan de Castellanos. Tunja, Colombia. 362 pp.

16. **CHAPMAN, H., PRATT, P.** 1.997. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Trillas. México.

17. **CHARRY C, J.** 1.991. Los suelos, su clasificación, acidez, salinidad y fertilidad. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia.

18. **CIAT**. 1.985. Arroz, investigación y producción. CIAT & PNUD. Cali, Colombia.

19. **COLEGIO DE POSTGRADUADOS.** 1977. Manual de Conservación del Suelo y del Agua. Anaya, G.M. et al. Eds. 584 pp. Chapingo, México, México. CP, SARH. México.

20**. DALLMEYER R, D.** 1987. Physical Geology. Laboratory text and manual, a guide for study of the earth. Editorial Kendall Hunt. 382p. USA.

21. **FAO**. 2009. Guía para la Descripción de Suelos. 111 pp. Roma. ITALIA.

22. **FARIAS N, E.** 1.994. Física de Suelos, con enfoque agrícola. Trillas. México.

23**. FLOREZ, A.** 2003. Colombia evolución de sus relieves y modelados. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 238 p.

24. **FOSTER, A.** 1.990. Métodos aprobados en Conservación de Suelos. Trillas. México.

25. **GAVANDE, S. A**. 1.982. Física de Suelos. Limusa. México.

26. **GÓMEZ Z. J**. 1997. Cuantificaron del Carbono en la agricultura. En: Memorias del Curso Taller “Sustratos Orgánicos”. UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA. Montería, Colombia.

27.----------. 1.997. Compostaje. En: Memorias del Curso Taller “Sustratos Orgánicos”. UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA. Montería, Colombia.

28.----------. 1.997. Abonos Orgánicos. En: Memorias del Curso Taller “Sustratos Orgánicos”. UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA. Montería, Colombia.

29.----------. 1.997. Mezclas de abonos orgánicos: una alternativa de optimización. En: Memorias del Curso Taller “Sustratos Orgánicos”. UNIVERSIDAD DE CORDO-BA. Montería, Colombia.

30. **GÓNZÁLEZ, A.** 1977. Apuntes de Agrogeología. Mimeógrafo. Universidad de Córdoba. Montería, Colombia. 167 pp.

31. **HAMBLIN, K.** 1998. Earth’s dynamic systems. Octava edición. Ed Prentice Hall, USA. 739 p.

32. **HARDY, F.** 1970. SUELOS TROPICALES. Pedología Tropical. CON ÉNFASIS EN ÁMERICA. Editorial Herrero Hermanos, México, D.F. 334 p.

33**. HERRERA, J. – TORO-QUIJANO, M, I.** 2000. Lineamientos de la dimensión física para el Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Concordia. Tesis de grado para optar al título de Ingeniería Geológica. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

34. **HENNIN, S. GRASS, R. Y MONNIER, G.** 1.972. El perfil cultural, el estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Mundi prensa. Madrid.

35. **HOLMES, A. W.** 1987. Geología Física. Tercera Edición. Editorial Omega. Barcelona. 812p.

36. http://www.regmurcia.com/servlet/. Consultado el 21 de marzo de 2014.

37. http://www.geologypage.com. Consultado el 20 de febrero - 1 de abril de 2014.

38. http://cig.museo.unlp.edu.ar/docencia/sed/meteorizacion.pdf. Consultado el 1 de abril de 2014.

39. http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MineralFind. Consultado el 20 de abril de 2014.

40. http://www.mineralogia.es/. Consultado el 21 de abril de 2014.

41. http://www.uhu.es/museovirtualdemineralogia/. Consultado el 21 de abril de 2014.

42. http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/mineralog_ri.jpg. Consultado el 26 de abril de 2014.

43.http://www.unalmed.edu.co/.../cap%201%20y%202%20libro%20erosion.pdf. Consultado el 4 de mayo de 2014.

44.http://mitrabajodelpaisaje.blogspot.com/2012/05/tipos-de-meteorizacion.html. Consultado el 26 de abril de 2014.

45. http://www.fotonostra.com/grafico/index.htm. Consultado el 22 y 23 de Julio de 2014.

46. https://webs.ucm.es/info/petrosed/rd/tex/index.html. Consultado el 25 de enero de 2023.

47. **HULBURT, C. & KLEIN, C**: 1984. Manual de mineralogía de Dana. Edit. Reverte. México, D.F. México.

48. **ICA.** 1.992. Fertilización en diversos cultivos, V aproximación. Tibaitatá: ICA. Colombia.

49. **IGAC.** 1.995. Suelos de Colombia. IGAC. Bogotá, Colombia.

50. **IGAC**. 2009. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras. Departamento de Córdoba. IGAC. Bogotá, Colombia.

51**. INGEOMINAS.** 1988. Mapa Geológico de Colombia; escala 1: 1’500.000.

52. **JARAMILLO J, D.; PARRA S, L. y GONZALEZ S, L.** 1.994. El recurso suelo, distribución y evaluación. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia.

53. **JARAMILLO, D.** 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia.

54. **JUNG-HÜTTL, A.** 2008. Canción de la Tierra. New York, Phaidon Press. 232 p. USA

55. **KOHNKE, H.** 1975. Soil Physics, Mc Graw Hill Book Company. New York. 244 pp.

56. **KRAUSKOPF, K B.** 1990. El Universo de las Ciencias Físicas. Editorial McGraw –

Hill. Bogotá. 633 p.

57. **KUTILEK, M & NIELSEN, D.R.** 1994.SOIL HIDROLOGY. Catena Verlag. Germany.

58. **LAHEC, F.** 1.979. Geología Práctica. Edit. Omega. Barcelona.

59. **LEÓN PELÁEZ, J.** 2001. Estudio y control de la erosión hídrica. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, Medellín. ISBN 9589352278

60. **LEOPOLD, L.B; WOLMAN, M.G; MILLER, J.P.** 1992. Fluvial Processes in Geomorphology. Ed. Dover. New York. USA. 522 p.

61. **LETEY, J and STOLZY, L.H.** 1964. Measurement of Oxigen Diffusion Rates with the Platinum Microelectrode. I. Theory and Equipment. Hilgardia 35 (20): 545 – 554.

62. **LETT, D. JUDSON, S.** 1.998. Fundamentos de Geología Física. Limusa. Wiley. México D.F, México.

63. **MADRIÑAN, M.R Y RAMIREZ, R.J M**. 2020. Acotaciones referentes al proceso de Diseño y Puesta a punto de un dispositivo mecánico, asistido por Software y dos Cámaras Infrarrojas, con el fin de estimar el Punto de Friabilidad de los Suelos. Comunicación Personal, junio 29/2020.

64. **MALAGON, D. y MONTENEGRO, H.** 1.990. Propiedades Físicas de los Suelos. IGAC. Bogotá, Colombia.813 pp.

65. **MALAGON, D. y otros.** 1.995. Suelos de Colombia. IGAC. Bogotá, Colombia. 632 pp

66. **MALAGÓN, D. y otros.** 2014. Manejo de Suelos Colombianos. Bogotá, Colombia. 323 pp.

67. **MEJIA L.** 1.980. Conceptos básicos comunes en la Geomorfología. Centro Interamericano de Fotointerpretación. CIAF. Bogotá, Colombia.

68. **MELENDEZ H, A; MELENDEZ H, F**. 1985. Geología. Tercera Edición. Editorial Paraninfo. Madrid. 528p.

69. **MIRANDA V. J.** 1.997. Las sustancias húmicas. En: Memorias del Curso Taller “Sustratos Orgánicos”. UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA. Montería, Colombia.

70. **MORENO, O. C.** 1.992. Fundamentos de Geomorfología. Trillas. México.

71. **MOSQUERA, D.** 2001. Introducción a la Geología con ejemplos de Colombia. Instituto de Investigación e Información Científica, Minero – Ambiental y Nuclear – Ingeominas-. Bogotá D.C. Colombia.177 p.

72. **MOTTA de M, B; RODRÍGUEZ T, C; MONTENEGRO, G, H; CORREA de C, A y BENDECK de V, M.** 1990. MÉTODOS ANALÍTICOS DEL LABORATORIO DE SUELOS (Quinta Edición). IGAC. Bogotá, Colombia, 502 pp.

73. **MUNSELL** Color Company. 1980. Munsell Soil Color Charts. Baltimore, MD.

74. **NARRO F. E**. 1.994. Física de suelos. Trillas. México.

75. **NRCS**. 2002. The color of soil. NRCS, USDA. URL: http://soils.usda.gov/education/resources/k_12/lessons/color/index.html

76. **ORTIZ-VILLANUEVA B.** 1.975. Edafología. México. Patronato Escuela Nacional de Agricultura. PATENA. Chapingo, Mex, México. 291 pp.

77. **ORTIZ, V. B Y ORTIZ, S. C.** 2000. Edafología. Patronato de la UACH.

Chapingo, Méx., México. 394 pp.

78. **OSORIO V, W., y OROZCO P, F**. 1998. Residuos orgánicos, aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. Medellín:SCCS y Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia.

79. **OVALLES V, F**. 2003. El Color del Suelo: definiciones e interpretación En**:** CENIAP HOY no. 3, septiembre-diciembre 2003. Maracay, Aragua, Venezuela. URL: www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm. visitado en fecha: 20 a 23 de Julio de 2014.

80. **PINZÓN, P.A.** 2006. Apuntes sobre Física de Suelos. Cargraphics S.A. Bogotá, Colombia.

81. **PINZÓN, P.A.** 2010. Edafología. Cargraphics S.A. Bogotá, Colombia

82. **PIZARRO C, F.** 1.978. Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Editora Agrícola Española, S.A. Madrid.

83.----------. 1.996. Riegos Localizados de Alta Frecuencia. Mundi prensa.

Madrid.

84. **PLA, S.I.** 2012. Compactación de Suelos y Productividad Agrícola. MEMORIAS PRIMER SEMINARIO INTERNACIONAL: FÍSICA DE SUELOS Y MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA. ELAFIS. EIA. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

85. **PLASTER, E.J.**2000. La Ciencia del Suelo y su Manejo. Ed. Paraninfo. España.

86. **PLUMMER, Ch C; Mc GEARY, D.** 1996. Physical Geology with interactive plate tectonics. Dubuque, Iowa Wm. Ed Browm. 539 p.

87. **PORTA C. J.; LOPEZ - ACEVEDO R, M., y ROQUERO, C.** 1.994. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Mundi prensa. Madrid.

88. **QUITTET, E.** Editor. AGRICULTURE. Tomos 1 a 4. Editorial DUNOD. París

89. **REY Q, I.** 1989. Anotaciones y Problemas para un curso de Procesos Geológicos. Trabajo presentado para la promoción a Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia.

90. **RICHARDS, L. A.** 1.954. Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. USA.

91. **ROBINSON, E S.** 1990. Geología Física Básica. México Talleres de Impresiones Editoriales. 699 p.

92. **ROVEDA, G. CHOPOR, J.L. BILQULIERD, J.E. ALMANZA, E.**.2002. Modelamiento del Sistema de Raíces en plantas de Maíz y sus interacciones con las Condiciones Edáficas. Suelos Ecuatoriales. Colombia. Volumen 32.

93. **RUIZ V, M; GONZÁLEZ H, S.** 2001. Geología aplicada a la Ingeniería Civil. Editorial Limusa. México D.F. 256 p.

94. **RUSELL, E.J, y RUSELL, E.W.** 1968. LAS CONDICIONES DEL SUELO y el Crecimiento de las Plantas. Edit. Aguilar. Madrid, España. 801 pp.

95. **SAÑA V., J., MORE R., J., & COHI R., A.** 1.996. La Gestión de la Fertilidad de los Suelos: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos y la recomendación de abonado. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

96. **SENESI, N** 1997. CURSO INTERNACIONAL DE SUSTANCIAS HUMICAS DEL

SUELO Y DE OTRAS FUENTES NATURALES Y ARTIFICIALES. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SECCIONAL MEDELLIN. NOTAS DEL CURSO. Medellín, Colombia.

97 **SERVANDO, R de la C.** 1994. Geología. Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica. Mexico DF. México. 203p.

98. **S.C.C.S.** 1.991. Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. SCCS. Bogotá.

99. **SKINNER, B J.** 1995. The Dynamic Earth, an introduction to Physical Geology. New York, Ed John Wiley & Sons. USA. 581 p.

100. ----------1999. The Blue Planet; an introduction to earth system science. Second Edition. New York, Ed John Wiley & Sons. USA. 552 p.

101. **STANLEY, S. M**. 1998**.** Earth System History. Ed. WH Freeman. USA. 615 p.

102. **STRAHLER, A. & STRAHLER, A.** 1997. Geología Física. Segunda reimpresión del texto original de 1992. Edit. Omega. Barcelona. España. 629 p.

103. **TAYLOR, S. A. & ASCHROFT, G. L.** 1.972. Physical Edaphology, the Physics of irrigated and nonirrigated soils. W.H Freeman and Co. San Francisco. USA.

104. **TARBUCK, E. J; LUTGENS, F.K.** 2005. Ciencias de la Tierra: una introducción a la Geología Física. Octava edición. Madrid. Editorial Prentice Hall. 686 p.

105. **THOMPSON, L. M. 1965.** El Suelo y su Fertilidad. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España. 409 pp.

106. **WEGENER, A.** 1983. El Origen de los Continentes y los Océanos, edición en Castellano. Editorial Pirámide. Madrid. 230 p.

107. **YAKUSHOVA, A. F.** 1986. Geology with the elements of Geomorphology. Moscú. Mir Publishers. 400 p.