

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO DE UN ÁREA REHABILITADA Y
SU RELACIÓN CON LA VEGETACIÓN Y AVIFAUNA PRESENTE EN UNA
MINA DE FERRONÍQUEL, MONTELÍBANO – CÓRDOBA, COLOMBIA**

HEYDA MENDOZA MACEA

Bióloga

Aspirante a M. Sc en Ciencias Químicas.

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS QUÍMICAS
MONTERÍA – CÓRDOBA**

2021

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO DE UN ÁREA REHABILITADA Y
SU RELACIÓN CON LA VEGETACIÓN Y AVIFAUNA PRESENTE EN UNA
MINA DE FERRONÍQUEL, MONTELÍBANO – CÓRDOBA, COLOMBIA**

HEYDA MENDOZA MACEA

**Trabajo de grado en la modalidad investigación presentado como requisito
parcial para optar al título de magíster en Ciencias Químicas.**

DIRECTOR

BASILIO DÍAZ PONGUTÁ

Químico; M.Sc en Ciencias Ambientales

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS QUÍMICAS

MONTERÍA

2021

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto serán responsabilidad del autor.

Artículo 17, acuerdo No. 039 del 24 de Junio de 2005 del Consejo Superior de la Universidad de Córdoba.

Nota de aceptación

Director

Jurado

Jurado

Montería, julio de 2021

DEDICATORIA

Dedico ésta tesis con todo mi corazón a mi mamá, pues sin ella no lo habría logrado. Tu apoyo absoluto y entrega han permitido hoy materializar éste sueño.

Heyda Mendoza Macea

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien en su infinito amor me ha dado la oportunidad de ver cumplido éste sueño de ser Magíster en Ciencias Químicas.

A mi mamá, mi hija y mi hermana Vanessa por ser apoyo absoluto en cada momento de mi vida, por ser palabra de aliento y siempre ser mí sustento. Esto es para ustedes.

A Germán Elías, quien se ha convertido en motivación para superar cada obstáculo en el camino.

A la Universidad de Córdoba, en especial, al departamento de Química quienes desde el primer momento me brindaron apoyo para asumir éste reto.

A mis estimados profesores Basilio Díaz y Gilmar Santafé por haber creído en mí y motivar la realización de éste trabajo. Les estoy eternamente agradecida.

A la empresa Cerro Matoso S.A., por ayudarme en la realización de mi trabajo de grado. En especial a Maria Eugenia Quiroga y el equipo de ambiente por estar prestos a ayudarme en la consecución de mis objetivos.

Agradecimiento especial al grupo de investigación de aguas, pesticidas y metales pesados (GIAMP) y al laboratorio de suelos de la Universidad de Córdoba quienes fueron parte fundamental en el desarrollo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	19
2.1. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO.....	19
2.2. DEGRADACIÓN DEL SUELO POR MINERÍA A CIELO ABIERTO.....	22
2.3. LOS SUELOS Y EL MANTENIMIENTO DE LA BIODIVERSIDAD.....	23
2.4. AVES EN LOS PAISAJES INTERVENIDOS.....	24
3. OBJETIVOS.....	26
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	26
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
4.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	27
4.2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA.....	27
4.3. METODOLOGÍA.....	28
4.3.1. Toma de muestras del suelo.....	28
4.3.2. Análisis de las características químicas del suelo.....	29
4.3.3. Cobertura vegetal.....	30
4.3.4. Diversidad de aves.....	32
4.3.5. Análisis de los datos.....	33
5. RESULTADOS.....	35
5.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO.....	35

5.2. COBERTURA VEGETAL	37
5.2.1. Relaciones simbióticas con otras especies de flora o fauna.....	38
5.3. DIVERSIDAD DE AVES	39
5.4. RELACIÓN ENTRE VARIABLES	42
6. DISCUSIÓN.....	43
6.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO	43
6.2 COBERTURA VEGETAL	48
6.3 DIVERSIDAD DE AVES.....	50
7. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS	73

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Verificación de los métodos del Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba con sus referencias para el análisis de los parámetros químicos del suelo.	29
Tabla 2. Análisis químico de los puntos de muestreo.....	35
Tabla 3. Composición florística y estados de crecimiento de la vegetación Fustales (F), Latizales (L) y Brinzales (B) en el área de estudio.	38
Tabla 4. Especies vegetales que presentan simbiosis con otros grupos de interés biológico.....	38
Tabla 5. Registro de aves en el área de rehabilitación Sajana.....	39
Tabla 6. Análisis de correlación de Pearson entre los parámetros químicos y la abundancia de planta en el área de rehabilitación Sajana.....	42

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del área (Antiguo depósito de escoria sin metal).....	27
Figura 2. Toma de las muestras de suelo.	29
Figura 3. Monitoreo de la vegetación en parcelas permanentes y delimitación de subparcelas para evaluar los estados de crecimiento de la vegetación (fustales, latizales y brinzales).....	32
Figura 4. a. Marcación de los individuos en estado latizal. b. Registro del DAP ...	31
Figura 5. a. Punto de observación de aves b. Registro de aves en redes.	33
Figura 6. Distribución Biplot, de los CP1 y CP2, de las variables químicas y sitios muestreados.	36
Figura 7. Abundancias de las especies de plantas registradas en las parcelas de muestreo en el área de rehabilitación Sajana.	37
Figura 8. Porcentaje de las abundancias de los órdenes de aves registrados en los tres puntos de muestreo en el área de rehabilitación Sajana.	41

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Listado de especies de aves con sus categorías de amenaza	73
Anexo 2. Resultados estadísticos de la correlación de Pearson entre los parámetros químicos del suelo y la abundancia de las plantas. En color rojo se muestran aquellas variables que presentaron relación significativa.	75
Anexo 3. Resultados estadísticos de la correlación de Pearson entre los parámetros químicos del suelo y las especies de las plantas.....	77
Anexo 4. Resultados estadísticos de la correlación de Pearson entre las especies de plantas y la abundancia de las aves. En color rojo se muestran aquellas variables que presentaron relación significativa.....	79
Anexo 5. Resultados estadísticos de la correlación de Pearson entre la abundancia de las plantas y la abundancia de las aves.....	80

RESUMEN

La práctica de la minería a cielo abierto es una de las actividades que más genera impactos en el suelo, pues se trata de una actividad que elimina generalmente todos los compartimentos que sustentan la vida en este y ocasiona fuertes cambios en su estructura y funcionamiento.

El objetivo del presente trabajo fue determinar la relación entre los parámetros químicos del suelo, la cobertura de la vegetación y la diversidad de avifauna en un área en proceso de rehabilitación minera por la extracción de ferroníquel en Montelíbano – Córdoba, Colombia. Las propiedades químicas de los suelos muestreados fueron características de áreas en proceso de revegetalización. La diversidad de especies de plantas vasculares y la composición de la comunidad de aves es característica de áreas con sucesión temprana. No se presentaron relación entre las variables estudiadas.

Palabras claves: Diversidad, Flora, Fauna, Minería, Suelos

ABSTRACT

The practice of open-pit mining is one of the activities that generates the most impacts on the ground, since it is an activity that generally eliminates all the compartments that support life in it and causes strong changes in its structure and operation. The objective of this work was to determine the relationship between the chemical parameters of the soil, the vegetation cover and the diversity of birds in an area in the mining rehabilitation process due to the extraction of ferronickel in Montelíbano - Córdoba, Colombia. The chemical properties of the sampled soils were characteristic of areas undergoing revegetation. The diversity of vascular plant species and the composition of the bird community is characteristic of areas with early succession. The relationship between the variables studied is not reported.

Keywords: Diversity, Flora, Fauna, Mining, Soils

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso indispensable para los sistemas naturales, repercute en actividades biológicas en igual medida que el agua y el aire, puesto que es, esencial para la regulación y mantenimiento del ecosistema (Malagón, 2006). Además, este es determinante para la producción de alimentos, medicinas y madera, así mismo, son el hogar de una amplia biodiversidad (Leiva et al., 2013). La formación de este recurso puede tardar hasta 500 millones de años y depende de diversas características, entre las que se destacan el material parental y de la zona de vida en la cual se forme, lo que ocasiona que cada suelo posea características diferentes (Hernández, 2013). En este sentido, Jaramillo (2002) describió que el sistema edáfico comprende una variedad de componentes que se dividen en características físicas, químicas y biológicas, las cuales se ven directamente relacionadas con la flora y fauna que se puede encontrar en el mismo, siendo la calidad del sistema el resultado de la interacción entre estos componentes.

En la actualidad existen muchas actividades antrópicas, que perturban el suelo, sin embargo, la práctica de la minería a cielo abierto es una de las actividades que más genera impactos en estos ecosistemas naturales, pues se trata de una actividad que elimina todos los compartimentos que sustentan la vida en los sistemas vulnerados (Martínez-Ruiz & Fernández-Santos, 2001) y ocasiona fuertes cambios en la estructura y funcionamiento de dichos sistemas (Alday et al., 2010), dejando tierras fuertemente excavadas con riesgo de derrumbes, suelos compactados, con pérdida de estructura, con deficiencias químicas, pH extremos y restos de metales pesados tóxicos (Wheeler & Miller, 1990). La remoción de la cubierta vegetal reduce la biodiversidad y el contenido de materia orgánica (MO) del suelo que incrementan los riesgos de erosión (Izquierdo et al., 2005; Banning et al., 2008).

Una de las alteraciones químicas más comunes en los suelos explotados por minería, es la hiperacidez, en el que se produce un intenso ataque de los minerales.

Así mismo, se presenta biodisponibilidad de compuestos o elementos con características iónicas en estos ambientes tales como: Al^{+3} , Fe^{+2} ; Mn^{+2} ; Pb^{+2} ; Cu^{+2} , Zn^{+2} y que son altamente tóxicas para los organismos acuáticos o terrestres. En definitiva, todo ello hace que el medio no sea apto para el desarrollo de los organismos. También, suele encontrarse escasez o desequilibrio en el contenido de los nutrientes fundamentales, dado que la actividad biológica está fuertemente reducida, encontrándose fuertes carencias de elementos como C, N y P, esenciales para los ciclos biogeoquímicos en el suelo (Sánchez-Espinosa, 2010).

Debido al gran impacto que ejerce esta actividad en el suelo, este pierde muchas de sus funciones, una de las alternativas para su recuperación es el uso de coberturas vegetales, ya que estas mejoran el suelo agregando materia orgánica, además es una práctica que contribuye a la conservación de la humedad del suelo y mejora las propiedades alteradas que el suelo sufrió por la actividad minera (Castillo-Chávez, 2020). Sin embargo, la rehabilitación de suelos usados para la minería comprende la implementación de medidas tanto mecánicas como biológicas; entre estas últimas se han ensayado plantaciones de árboles fijadores de nitrógeno (Dagar, 1998). También, se ha utilizado comúnmente, una práctica de remediación implantada en los últimos años, que es sembrar las bancadas con gramíneas de rápido crecimiento, para consolidarlas y estabilizarlas. Luego de un período indeterminado, se establecen especies forestales, tales como: *Casuarina equisetifolia* y *Acacia mangium*, las cuales presentan amplia capacidad de adaptación a las condiciones edafoclimáticas de las aéreas usadas para la explotación minera (Pérez et al., 2012). Estos procesos de rehabilitación han conllevado al establecimiento de coberturas vegetales homogéneas, debido a la utilización de un limitado número de especies y muchas veces no suelen ser especies nativas, que en ocasiones impide conectividad en los patrones de la distribución de la diversidad de especies (Dauber et al., 2005; Vanbergen et al., 2005). Igualmente, las coberturas nativas de los paisajes, modificados a coberturas uniformes de uso intensivo con pocos elementos de cubierta vegetal variada para

el establecimiento de sistemas de producción (Robinson & Sutherland, 2002), a menudo resultan en la pérdida del hábitat y la disminución de la diversidad local de especies (Bengtsson et al., 2005; Dauber et al., 2005).

Las características biológicas de los suelos, tales como distribución de las poblaciones de la flora y fauna, la densidad de población, desarrollo, crecimiento y actividad están determinadas y controladas por las propiedades químicas de los suelos, la cobertura vegetal y el uso y manejo de éstos entre otras. Aunque no existen estudios específicos sobre distribución de flora y fauna en estos suelos, los estudios sobre mesofauna realizados por Van der Hammen (1989) permitieron tener una aproximación sobre esta distribución de estos organismos, dadas que las condiciones de estudio son similares.

Las aves son buenas indicadoras de la calidad del hábitat, con muchas funciones ecológicas clave (Sekercioglu, 2006; Whelan et al., 2008). La sensibilidad de las especies a los cambios en la heterogeneidad de la estructura y composición del paisaje puede diferir entre grupos de especies definidos tróficamente (Holmes et al., 1979; Ambuel & Temple, 1983). Por ejemplo, la diversidad de algunos gremios de forrajero de aves insectívoras del bosque, son particularmente sensible a la perturbación de hábitat y a la fragmentación, debido a que están presentan habilidad limitada para dispersarse a través de lugares deforestados (Sekercioglu, 2006). Por el contrario, también existen algunos gremios de forrajero de aves oportunistas y generalistas que se ven favorecidas por los gradientes de paisajes modificados (Velásquez-Valencia et al., 2005).

En este contexto, la heterogeneidad del hábitat y las prácticas de uso del suelo se encuentran entre los factores potenciales que influyen en los patrones de la distribución de la biodiversidad a escala de paisaje (Benton et al., 2003). Mejorar la heterogeneidad del hábitat para la conservación de la biodiversidad en los sistemas en general es un paradigma actual, donde se proponen alternativas silvopastoriles y agroforestales en el manejo de la intensidad del pastoreo (Batáry et al., 2010;

Concepción et al., 2012). Además, existe una creciente necesidad de considerar los requisitos específicos de las especies que influyen en su respuesta a la heterogeneidad del paisaje (Fahrig et al., 2011).

En este sentido, es importante determinar la incidencia de las propiedades químicas del suelo en los patrones de distribución de la composición y estructura de la biodiversidad, la presente investigación pretende determinar la relación entre los parámetros químicos del suelo, la cobertura de la vegetación y la diversidad de avifauna en un área en proceso de rehabilitación minera por la extracción de ferróníquel en Montelíbano – Córdoba, Colombia.

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

La química del suelo está dominada por la interacción entre sus componentes sólidos; insolubles de sílice, calcio y aluminio, y su fase acuosa. Dentro de los factores que influyen en la dinámica de las propiedades químicas del suelo están las geformas y la topografía, que definen los patrones de flujo del agua y sedimentos, cuya magnitud está asociada con la altitud, gradiente y forma de la pendiente (Santiago-Mejía et al., 2018). Comprender la química del suelo es de suma importancia, ya que es la base de la fertilidad del suelo y proporciona el conocimiento necesario para comprender las diferencias de fertilidad entre diferentes suelos y su respuesta a la fertilización (Delgado & Gómez, 2016). Sin embargo, los suelos alterados por minería son considerados como semejantes a los formados de modo natural, ya que carecen de materia orgánica y por lo tanto de nitrógeno (Arranz-González, 2011) propiedades químicas importantes para las plantas.

Los parámetros químicos que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos, son considerados indicadores de la calidad del suelo (Castillo-Chávez, 2020). Dentro de estos encontramos: pH y materia orgánica, el nitrógeno, fósforo y potasio; como los nutrientes considerados mayores para las plantas, el calcio, azufre y magnesio; como elementos esenciales abundantes, el boro, hierro, silicio, cinc, manganeso, cobre, molibdeno, cobalto y cloro; como elementos menores (Guzmán-Martínez et al., 2020).

El pH es esencial en la química del suelo y factor primario de su fertilidad, la función del pH va más allá del simple suministro de nutrientes para la planta (Neina, 2019; Saavedra-Romero et al., 2020), indica si contiene niveles tóxicos de aluminio y manganeso, si el contenido de elementos básicos como el calcio y el magnesio es bajo, por lo que, la disponibilidad de otros nutrientes esenciales para la planta

depende de los valores de pH (Rivera et al., 2018). Por otra parte, la materia orgánica es un componente complejo y dinámico que tiene una gran influencia en las propiedades, funciones y comportamiento del suelo (De Andrade Bonetti et al., 2017). Está compuesta de oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y principalmente carbono (50-58%) (Ziska et al., 2018). La cantidad de materia orgánica depende del material vegetal, de la textura del suelo y del pH y la proporción adecuada de esta favorece el desarrollo de una buena estructura, debido a que mejora la aireación del suelo y capacidad de retención del agua (Andrades & Martínez, 2014; Castillo-Chávez, 2020). A medida que aumenta el pH del suelo, la materia orgánica desarrolla más cargas negativas debido a la disociación del ion H^+ del OH^- adsorbido en los coloides de este (o en los grupos funcionales carboxílicos, fenólicos y/o alcohólico) por una mayor disponibilidad de OH^- en la solución del suelo, formando H_2O . Mientras que, cuando el pH disminuye, la materia orgánica del suelo desarrolla menos carga negativa por el efecto inverso a la acción descrita anteriormente, por tanto, la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) depende del pH del suelo (Jaremko & Kalembasa, 2014).

Los macronutrientes son los elementos consumidos en mayor cantidad y, a menudo, limitan el crecimiento de las plantas. Dentro de los macronutrientes está el nitrógeno, el cual se encuentra en el suelo en forma de grandes moléculas orgánicas que imposibilitan la absorción por las raíces de las plantas. Por lo que se hace necesario que los microorganismos del suelo y en menor medida las raíces de las plantas degraden estas moléculas, mineralizándolas para poder ser absorbido (Gama, 2020). Otro macronutriente es en fósforo, las formas orgánicas de este representan solo el 20-30% del total del horizonte superficial del suelo. El P es parte de los compuestos fundamentales del metabolismo (NADP, NADPH y ATP) siendo un componente de varios compuestos bioquímicos (ácidos nucleicos, fosfolípidos, fosfoproteínas y fosfatasas (De la Peña-Lastra et al., 2020; Makttoof et al., 2020). El contenido de fósforo en el suelo es de gran importancia para el desarrollo de las plantas, por intervenir en funciones fundamentales como, favorecer el desarrollo de las raíces, estimular el crecimiento y el desarrollo vigoroso de las plantas, favorecer

la floración y fructificación; con ello la cantidad y calidad de los frutos y semillas (Porta et al., 2014; Castillo-Chávez, 2020).

Finalmente, la cantidad de potasio que se mantiene en condiciones intercambiables, entre las diversas superficies coloidales y la solución del suelo, suele ser muy pequeña (i.e., 2-8% del total) debido a que la mayoría del K contenido en el suelo se encuentra retenido en sus minerales primarios y secundarios y, por tanto, no se encuentra disponible. Por ello, son las tasas de meteorización de los minerales y la adición antropogénica las que influyen en el comportamiento del K en el suelo (Sanghamitra y Bhaskar, 2015; Abd El-Mageed et al., 2017). Por esta razón, mantener determinados niveles de potasio en el suelo son fundamentales para que las plantas puedan desempeñar funciones como favorecer a la formación de hidratos de carbono, incrementar la consistencia y dureza de los tejidos de las plantas dando una mayor resistencia a ciertas enfermedades (Castillo-Chávez, 2020).

Entre los macronutrientes secundarios del suelo se destaca el calcio, el cual, se encuentra principalmente en forma de minerales de calcio (calcita, plagioclasas), formando complejos con la materia orgánica y adsorbido en los coloides del suelo. Las principales fuentes de Ca en la solución del suelo son el Ca intercambiable y el Ca presente en minerales fácilmente degradados, como los carbonatos y la apatita. Por otro lado, las principales fuentes de azufre provienen de la meteorización de las formas minerales (sulfatos y sulfuros), la mineralización de la materia orgánica (sulfatos), la deposición del contenido en la atmósfera y la aplicación de fertilizantes. Por último, la principal fuente de Mg^{2+} fácilmente disponible en la solución del suelo proviene del complejo de intercambio arcillo-húmico. A medida que este elemento es consumido, la solución del suelo y el complejo de intercambio se reponen mayoritariamente por el Mg proveniente de la meteorización de minerales, como la dolomita o la biotita, o mediante fertilización (Gama, 2020).

Los elementos menores son esenciales para el crecimiento de las plantas, sin embargo, se requieren en menor cantidad que los macronutrientes. Cuando estos elementos presentan bajos contenidos en la solución del suelo, las plantas no se desarrollarán de manera óptima. Sin embargo, una elevada concentración de estos elementos puede ocasionar fitotoxicidad (Weil & Brady, 2017). En estériles mineros, usualmente, los contenidos en elementos menores son adecuados para el desarrollo vegetal, y los elementos nutritivos que aparecen en concentraciones limitantes en estos suelos son el N y el P, a los que se une el Ca y Mg en suelos ácidos (Arranz-González, 2011).

2.2. DEGRADACIÓN DEL SUELO POR MINERÍA A CIELO ABIERTO

Los impactos directos por la actividad minera a cielo abierto suelen ser severos, por la destrucción de los ecosistemas naturales, ya sea mediante la eliminación parcial o total de todos los suelos, las plantas y animales (Díaz-Mueque, 2017). Esta destrucción del suelo natural, así como la creación de nuevos suelos que presentan fuertes limitaciones físicas, químicas y biológicas, dificultan la reinstalación de la vegetación (Castro, 2017), y se debe a la escasez de componentes coloidales, especialmente de los orgánicos y la ausencia de actividad biológica, que generan situaciones extremas en los principales parámetros químicos en estos suelos (Sánchez-Espinosa, 2010).

El Nitrógeno, Fósforo y Potasio son nutrientes considerados mayores para las plantas, y junto con Calcio, Azufre y Magnesio son los elementos esenciales a los que se suman los oligoelementos como el Boro, Hierro, Silicio, Cinc, Manganeso, Cobre, Molibdeno, Cobalto y Cloro. Usualmente, en suelos afectados por minería los contenidos en elementos menores son adecuados para el desarrollo vegetal, y los elementos nutritivos que aparecen en concentraciones limitantes en estos suelos son el N y el P, a los que se une el Ca y Mg en suelos ácidos (Arranz-González, 2011).

La no disponibilidad de nutrientes como el Nitrógeno (N) y el Fósforo (P) en suelos afectados por minería limitan el éxito de una revegetación exitosa y la estabilidad a largo plazo en los terrenos alterados. El Fósforo puede verse limitado como consecuencia de la alta capacidad de fijación del mismo en estériles con grandes contenidos en fragmentos gruesos procedentes de areniscas, por ello, el mantenimiento del nivel de P asimilable en los suelos mineros es otro de los aspectos importantes desde el punto de vista de la fertilidad. Además, la pérdida de la materia orgánica del suelo se considera como un componente clave en terrenos alterados drásticamente, afectando las funciones de los ecosistemas (Díaz-Muegue, 2017).

El pH es considerado un elemento de juicio fundamental en la caracterización de suelos, debido a que afecta a la disponibilidad de nutrientes y a la actividad microbiana (Arranz-González, 2011). A pH bajo, ciertos elementos tales como aluminio y manganeso se convierten en tóxicos para las plantas y pueden contribuir a fracasos en el restablecimiento de vegetación y las concentraciones de hierro, cobre, cinc, níquel también pueden ser tóxicos para las plantas, y es más probable que ocurran cuando aluminio y manganeso están presentes (Díaz-Muegue, 2017).

2.3. LOS SUELOS Y EL MANTENIMIENTO DE LA BIODIVERSIDAD

El suelo es uno de los ecosistemas más complejos de la naturaleza y uno de los hábitats más diversos de la tierra, albergando una infinidad de organismos diferentes que interactúan entre sí y contribuyen a los ciclos globales que hacen posible la vida (FAO, 2015). La degradación de este, genera la pérdida de su productividad y utilidad actual o potencial, lo que implica el desmejoramiento del suelo en su capacidad inherente para producir servicios ecosistémicos (Lal, 1998). El impacto generado por actividad minera invalida la utilización primaria del suelo, lo que conlleva generalmente a una pérdida irreversible del mismo (López, 2002).

La mayoría de los trabajos de rehabilitación realizados sobre terrenos mineros parten de la reposición de materiales edáficos preservados o importados sobre las

zonas denudadas o cubiertas estériles. En algunos de estos terrenos los problemas de carácter edáfico existentes pueden restringir el establecimiento de la vegetación durante mucho tiempo o impedirlo totalmente, pero en muchos otros han sido colonizados por la vegetación de forma natural o han sido revegetados, iniciándose un proceso de formación de suelo (Arranz-González, 2011). Sin embargo, en esta colonización o revegetación el proceso de sucesión vegetal sigue otros patrones que puede conllevar al establecimiento de comunidades herbáceas que dificultan o incluso impiden irreversiblemente la recuperación de la vegetación original de un modo natural, debido principalmente a la pérdida en el banco de semillas y la aparición de nuevos hábitats no originales, (Ramírez-Moreno, 2019). Por ello, los proyectos de remediación minera deben afrontar el desafío de recuperar la funcionalidad de un sistema cuasi esquelético, donde la vegetación y los suelos no están bien desarrollados y las comunidades que aparecen representan estadios iniciales de la sucesión (Díaz-Muegue, 2017).

En este contexto, la restauración ecológica de ecosistemas degradados depende directamente de la recuperación de la salud del suelo, sus interacciones con el agua y la vegetación, y su capacidad de sostener el funcionamiento de los ecosistemas (Arshad & Martin, 2002). La meta de la restauración debe ser entonces la de recuperar la “calidad” o “salud” del suelo, definida como la capacidad de un tipo de suelo para funcionar, dentro de parámetros naturales o de manejo, de mantener la productividad vegetal y animal, la calidad del agua y el aire, y mantener la salud humana y el hábitat (Karlen et al., 1997; Doran & Zeiss, 2000). Los suelos no se deben considerar como elementos aislados sino como parte de sistemas complejos, ya que hay una fuerte interrelación entre los suelos y las plantas que determina procesos y ciclos a nivel del ecosistema (Jonasson et al., 1999; Herrick et al., 2006; Bardgett & Wardle, 2010; Aponte et al., 2013, Pregitzer et al., 2013).

2.4. AVES EN LOS PAISAJES INTERVENIDOS

La rica diversidad de aves de Colombia se debe a una combinación única de características geográficas y topográficas no compartidas por ningún otro país en la

región: ubicación geográfica, historia geológica, clima, y variedad de ecosistemas distribuidos en las seis regiones biogeográficas principales, los Andes, la Amazonía, los Llanos, las regiones Pacífica y del Caribe, y las islas periféricas (Hilty & Brown, 1986, Stotz et al., 1996). Esta riqueza biológica se encuentra comprometida por varias amenazas, como la minería, la deforestación e incendios provocados para abrir paso a la agricultura y al pastoreo, la obtención de madera como combustible y el desarrollo de infraestructuras (Neate-Clegg et al., 2020). La fauna residente de un sitio se puede considerar como indicadora de la salud de un ecosistema y puede indicar además cómo los cambios ambientales pueden afectar su condición futura (Mejía-Tobón, 2010; Nieto-Orellana, & Silva-Alemán, 2012). Se espera encontrar en la zona de estudio especies generalistas y con requerimientos de hábitat poco exigentes, que encuentran en el área los recursos para desarrollar sus actividades básicas: fuentes de alimentación, refugio y zonas para su reproducción.

Particularmente las aves son organismos que pueden ser de gran utilidad para valorar las características del hábitat, sus dinámicas se asocian a su distribución a escala de paisaje y sobre grandes áreas de estudio. Las características de los hábitats forestales están relacionadas con la distribución de las aves a diferentes escalas espaciales (Mitchell et al., 2006; Yamaura et al., 2011) y no únicamente a escala local. Sin embargo, aún existe un gran desconocimiento sobre la distribución de las aves de los cambios en el bosque a escala de paisaje, producidos por los sistemas de producción y otras perturbaciones del suelo (Mitchell et al., 2008).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar los parámetros químicos del suelo en un área en proceso de rehabilitación minera por la extracción de ferroníquel y evaluar su relación con la cobertura de la vegetación y la diversidad de avifauna.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar las propiedades químicas como pH, bases, macro y micronutrientes del suelo en un área en proceso de rehabilitación afectada por la explotación minera de ferroníquel.

Identificar las especies vegetales en el área de rehabilitación afectada por la explotación minera.

Determinar la riqueza y abundancia de la avifauna en el área de rehabilitación afectada por la explotación minera.

Evaluar si existe una relación entre las propiedades químicas como pH, bases, macro y micronutrientes del suelo sobre la cobertura vegetal y la cobertura vegetal sobre la diversidad de aves en el área de estudio.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

El proyecto minero industrial Cerro Matoso - South32 se encuentra ubicado al noroccidente de Colombia, al sur del departamento de Córdoba, en jurisdicción de los municipios de Montelíbano, Puerto Libertador y San José de Uré. A 22 km de la cabecera municipal de Montelíbano y a 122 km de Montería. El área de rehabilitación se encuentra ubicado en La Sajana, con un área total de 155,15 ha, de las cuales 66,51 ha se encuentran rehabilitadas desde el año 2015 (Figura 1).

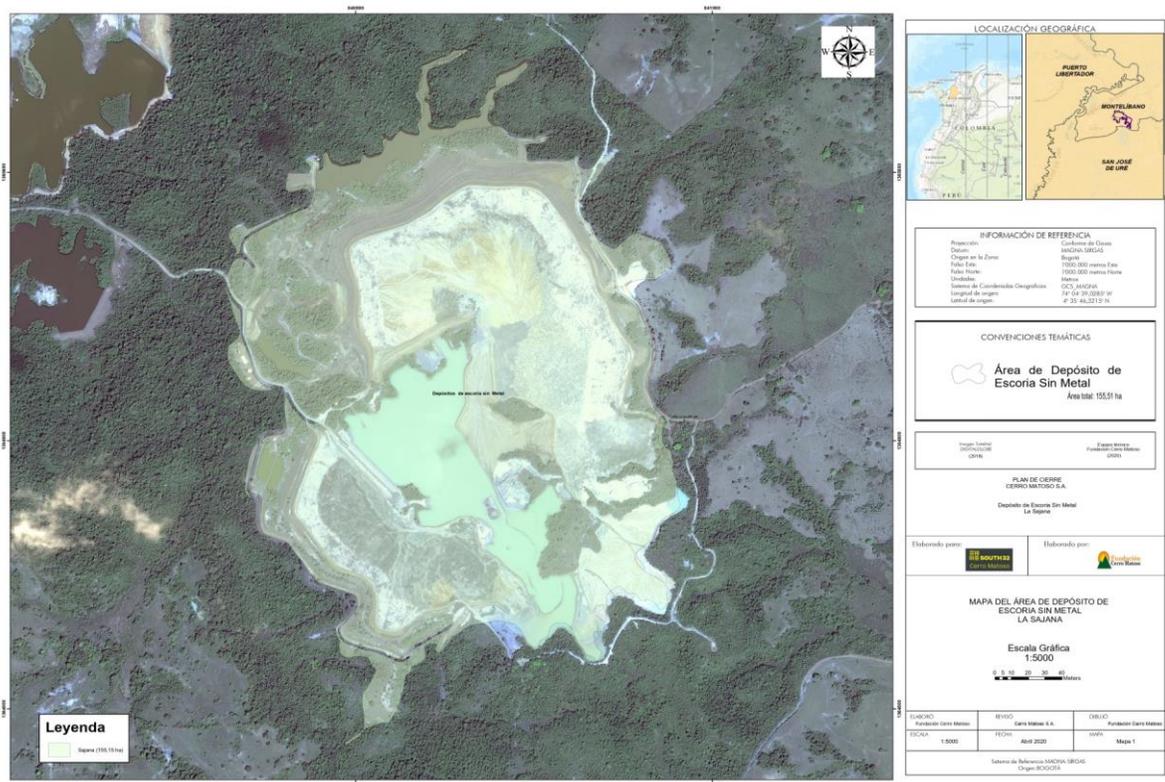


Figura 1. Localización del área (Antiguo depósito de escoria sin metal).

4.2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA

El suelo de la zona de estudio se caracteriza por encontrarse en relieve ligeramente quebrado hasta moderadamente escarpado y pendientes entre 7 y 75%, en los paisajes de lomerío y montaña. El uso del suelo presenta limitaciones como

susceptibilidad a la erosión y a los movimientos en masa, profundidad efectiva superficial, capas gravilosas, baja fertilidad, drenaje excesivo, deficiencia o exceso de lluvias, pendientes fuertes y alta saturación de aluminio (IGAC, 2009).

La zona de rehabilitación corresponde a un antiguo depósito de escoria en la que se utilizó suelo almacenado de la zona y se han estado llevando a cabo actividades de revegetalización. La cobertura vegetal predominante es vegetación secundaria baja y pastos enmalezados. Se observan numerosos árboles jóvenes propios de estadios sucesionales tempranos junto con arbustos y numerosas plantas herbáceas. También, se tienen algunas áreas de tierras desnudas y degradadas que no han podido ser revegetalizadas.

4.3. METODOLOGÍA

Con el fin de resolver el objetivo; Analizar las propiedades químicas como pH, bases, macro y micronutrientes del suelo en un área en proceso de rehabilitación afectada por la explotación minera de ferroníquel, se realizaron las siguientes actividades:

4.3.1. Toma de muestras del suelo

Se seleccionaron tres puntos de manera aleatoria en el área de estudio. En cada uno de los tres puntos seleccionados se tomaron tres submuestras de suelo rizosférico a una profundidad de 30 cm. Estas submuestras se homogeneizaron para obtener una única muestra de aproximadamente 1 kg por punto para el análisis químico del suelo (figura 2).



Figura 2. Toma de las muestras de suelo.

4.3.2 Análisis de las características químicas del suelo.

Posterior a la toma de muestras de suelo, estas se llevaron al laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba, donde se procesaron y analizaron de acuerdo con los parámetros de la tabla 1.

Tabla 1. Verificación de los métodos del Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba con sus referencias para el análisis de los parámetros químicos del suelo.

Parámetros químicos de suelos	Métodos		Norma De Referencia/Procedimiento De Ensayo	Intervalo de trabajo
	Extracción	Cuantificación		
pH	Relación 1 : 1 Suelo : Agua	Potenciométrico	NTC - 5264	4,00 - 10,00 unidades de pH
Carbono Orgánico	Walkley - Black	Titulación	NTC - 5403. Numerales 4.3 Método de extracción: B. oxidación húmeda.	
Azufre Disponible	Monofosfato de calcio 0.008 M	Turbidimétrico	NTC - 5402. Numerales 4.4.1	
Fósforo Disponible	Bray II/Olsen	Colorimétrico	NTC - 5350. Numerales 4.2. Empleando como reductor ácido ascórbico	
Calcio Intercambiable		Espectrofotometría de absorción atómica		0,10 - 56,6 cmol kg ⁻¹
Magnesio Intercambiable	Acetato de amonio 1.0 M pH 7.0	Espectrofotometría de emisión atómica	NTC - 5349	0,03 - 16,7 cmol kg ⁻¹
Sodio Intercambiable		Titulación		0,11 - 1,51 cmol kh ⁻¹
Potasio Intercambiable		Suma de bases y acidez intercambiables	NTC - 5263	0,030 - 1,62 cmol kg ⁻¹
Al + H	KCl 1.0 M			
CICE	Acetato de amonio 1.0 M pH 7.0		NTC - 5349	
Elementos Menores (M)	Extracción	Cuantificación	Norma De Referencia/Procedimiento De Ensayo	
Cobre Disponible		Espectrofotometría de absorción atómica	NTC - 5526: Numerales 5.1.3.2 y 5.4.2	0,40 - 13,6 mg/kg
Hierro Disponible	DTPA			2,0 - 383 mg/kg
Zinc Disponible				0,20 - 19,1 mg/kg
Manganeso Disponible				0,20 a 208 mg/kg
Boro Disponible	Agua caliente - Horno	Colorimétrico	NTC - 5404. Numerales 6	

Se siguió la metodología para los análisis de las variables químicas: pH, por el método del potenciómetro pH en agua (1:1, suelo: agua), Carbono orgánico el cual se determinó por el método de Wakley-Black en el cual el suelo se oxida con una

solución de dicromato de potasio estandarizada, utilizando el calor producido por la dilución de ácido sulfúrico concentrado, Azufre (S) que se extrajo mediante Fosfato monocalcico y contabilizado con el método Turbidimétrico, Fósforo (P) con el método de Bray II / Olsen, donde Bray II se utiliza como medio de extracción del fósforo una solución de fluoruro de amonio en ácido clorhídrico diluido, la cual conduce a la disolución de algunos fosfatos presentes en el suelo como los de calcio, hierro y aluminio y en el método de Olsen utiliza como extractante una disolución de NaHCO_3 0.5 M moderadamente alcalina (pH = 8,5) ideada para controlar la actividad de los iones calcio. Igualmente, se determinaron las bases intercambiables de Potasio (K^+), Calcio (Ca^{+2}) y Magnesio (Mg^{+2}) con acetato de amonio (1N a pH 7) como solución extractante y se calculó el porcentaje de saturación de bases. Se determinó la capacidad de intercambio catiónico (suma de bases). Los contenidos en suelo de hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeso (Mn), Aluminio (Al) y Zinc (Zn) fueron cuantificados con el método DTPA (Ácido Dietilentriaminopenta-Acético) de espectroscopia de absorción atómica y el Boro (B) con el método colorimétrico.

Los resultados de los analisis de cada muestra de suelo fueron comparados entre ellas y con los valores aceptados como bajos medio y alto según el parámetro o variable determinado.

4.3.3. Cobertura vegetal

Para resolver el objetivo: Identificar las especies vegetales en el área de rehabilitación afectada por la explotación minera, se realizaron las siguientes actividades.

Monitoreo de la vegetación establecida, que se llevó a cabo entre los días 21 y 26 de junio de 2019. Se utilizaron las parcelas permanentes ya establecidas en el área depósito de escoria sin metal para el monitoreo de la vegetación. Cada parcela tiene una dimensión de 10 x 10 m (100 m² para un área total muestreada de 200 m²,

equivalente a 0,02 ha). Con el fin de evaluar los estados de crecimiento de la vegetación, se midieron los individuos pertenecientes a especies arbóreas en distintos estados de crecimiento: fustales, latizales y brinzales (Figura 3), dentro de cada parcela se establecieron subparcelas, la primera presentaba una dimensión de 5 x 5 m, mientras que la subparcela 2 cuenta con un área de 2 x 2 m. Paralelamente se iban anotando en una libreta de campo si existía algún tipo de relación ecológica con otras especies de flora o fauna (Figura 4).

Las especies fueron identificadas empleando la ayuda de fotografías tomadas en campo y bibliografía especializada como las guías ilustradas de plantas (Cardona et. al., 2010), guías de campo (Gentry, 1993; Mendoza & Jiménez, 2004) y las bases de datos virtuales del herbario nacional colombiano – COL (Colecciones científicas en línea, 2016), y del Herbario de la universidad de Chicago (Field Museum Chicago, 2016). Para la corroboración de la escritura científica. Las abreviaciones de autores están de acuerdo a (Brummitt & Powell, 1992).

De acuerdo a las especies que se identificaron en campo, se procedió a realizar una búsqueda de información secundaria sobre cuáles especies presentan algún tipo de relación ecológica, en particular relaciones simbióticas, que es una relación que se dan entre especies interdependientes que comparten un mismo entorno.



Figura 3. a. Marcación de los individuos en estado latizal. b. Registro del DAP.

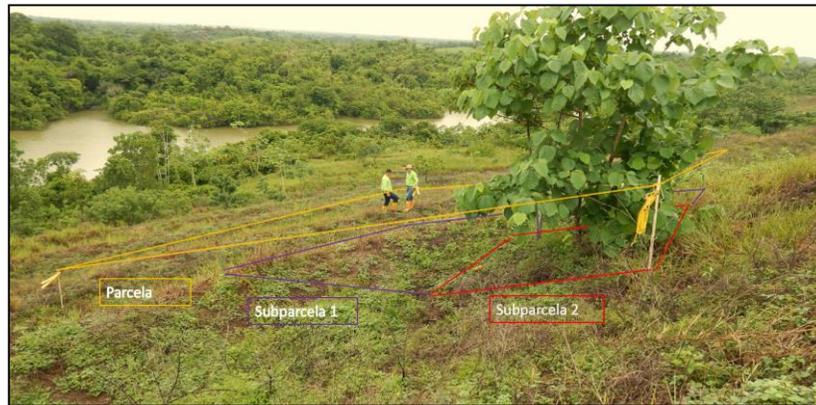


Figura 4. Monitoreo de la vegetación en parcelas permanentes y delimitación de subparcelas para evaluar los estados de crecimiento de la vegetación (fustales, latizales y brinzales).

Finalmente la información fue consignada en tablas.

4.3.4. Diversidad de aves

Para resolver el objetivo específico: Determinar la riqueza y abundancia de la avifauna en el área de rehabilitación afectada por la explotación minera, se siguió la metodología descrita a continuación:

El registro de las aves se realizó en dos muestreos, durante diciembre de 2019 y junio de 2020, mediante la metodología de observación en puntos fijos y redes. Se seleccionaron tres puntos al azar en el área de rehabilitación Sajana. Este tipo de muestreo permite integrar la detección visual de especies distribuidas en cualquier estrato vertical de la zona de estudio (Stiles & Rosselli, 1998). En cada punto de observación se registraron los individuos en un radio de 30 metros durante 15 minutos, e identificación hasta el menor nivel taxonómico posible siguiendo la taxonomía sugerida por SACC (South American Classification Committee) para aves de Suramérica (Remsen et al., 2018).



Figura 5. a. Punto de observación de aves **b.** Registro de aves en redes.

Finalmente la información colectada en campo fue consignada en tablas y analizada estadísticamente para establecer valores de riqueza y abundancia de las especies de aves presentes en los puntos de muestreo.

4.3.5. Análisis de los datos

Para resolver el objetivo: Evaluar si existe una relación entre las propiedades químicas como pH, bases, macro y micronutrientes del suelo sobre la cobertura vegetal y la cobertura vegetal sobre la diversidad de aves en el área de estudio se realizaron las siguientes actividades:

Se realizó un Análisis de componentes principales (ACP) con el propósito de explorar diferencias y analizar la relación entre las propiedades químicas del suelo en los sitios muestreados. Con este análisis se realizó un gráfico bidimensional (BiPlot) a partir de los dos primeros componentes con mayor varianza en el ACP. Igualmente, se hizo un análisis de varianza no paramétrico (ANOVA de Kruskal Wallis) para determinar las diferencias entre la riqueza de especies de aves en los en los sitios muestreados. Finalmente, para determinar la relación entre los parámetros químicos del suelo y la cobertura vegetal, y entre la cobertura vegetal y la diversidad de aves, se llevó a cabo un análisis de correlación (Análisis de

correlación de Pearson). Los análisis estadísticos se realizaron en el software estadístico R versión 4.0.4. (2021-02-15).

Los datos arrojados fueron analizados rigurosamente teniendo en cuenta los valores obtenidos y comparados con estudios previos.

5. RESULTADOS

5.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO

Las características químicas de los suelos de los puntos muestreados se evidencian en la tabla 1, donde el pH registró una media de 5,07 que corresponde a fuertemente ácido, con contenido orgánico medio (1,24 %), al igual que el Azufre (12,79 mg kg⁻¹); en cuanto al contenido de fósforo este presentó niveles bajos (3,47 mg kg⁻¹). Con relación al contenido de bases, se encontró que el Ca⁺² en suelo muestreado fue bajo (2,91 cmol kg⁻¹), alto contenido de Mg⁺² (4,28 cmol kg⁻¹) y en cuanto al K⁺ se encontró un contenido medio (0,23 cmol kg⁻¹), además, el contenido de Na⁺ evidenciado se encuentra dentro de rangos óptimos para el establecimiento de cobertura vegetal. La acidez intercambiable (Al³⁺+H⁺) encontrada fue elevada (2,48 cmol kg⁻¹). La CICE encontrada está dentro de rango medio (10,0 cmol kg⁻¹). Respecto a los elementos menores, el contenido de Cu (2,05 mg kg⁻¹) presentó niveles óptimos, al igual que el Fe (64,37 mg kg⁻¹) y Mn (15,43 mg kg⁻¹), mientras que el Zn y B presentaron contenidos bajos (1,14 mg kg⁻¹) y (0,25 mg kg⁻¹) respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis químico de los puntos de muestreo.

Parámetros	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Media ± desviación estándar*
pH	5,84	4,58	4,80	5,07 ± 0,67
C	2,17	0,30	1,24	1,24 ± 0,93
S	6,3	20,1	11,9	12,79 ± 6,95
P	4,2	0,3	5,9	3,47 ± 2,85
Ca	3,62	0,30	4,82	2,91 ± 3,62
Mg	6,917	0,643	5,267	4,28 ± 3,25
K	0,202	0,191	0,308	0,23 ± 0,06
Na	0,030	0,035	0,132	0,07 ± 0,06
Al+H	0	4,22	3,23	2,48 ± 2,21
CICE	10,8	5,4	13,8	10 ± 4,26
Cu	1,79	0,40	3,96	2,05 ± 1,79
Fe	120,9	9,2	63,0	6,43 ± 55,6
Zn	1,54	0,20	1,68	1,14 ± 0,82
Mn	10,1	0,6	35,6	15,43 ± 18,10
B	0,34	0,14	0,28	0,25 ± 0,10

Ca/Mg		0,5	0,5	0,9	0,63 ± 0,23
Ca/K	Relaciones de cationes	17,9	1,6	15,6	11,17 ± 8,82
Mg/K		34,2	3,4	17,1	18,23 ± 15,43
(Ca+Mg)/K		52,2	4,9	32,8	29,97 ± 23,78
Ca	% saturación de cationes	33,5	5,6	34,9	24,67 ± 16,53
Mg		64,0	11,9	38,2	38,03 ± 26,05
K		1,9	3,5	2,2	2,53 ± 0,85
Na		0,3	0,6	1,0	0,63 ± 0,35

*desviación estándar determinada para el grupo de muestras analizadas

El 100% de la variación de los datos se explicó basada en los dos primeros componentes del ACP (Figura 6). De acuerdo al CP1, la muestra de suelo en el punto 1 (Suelo 1) posee mayor pH, mayor contenido de Carbono, Hierro, Boro y Magnesio, además de altos valores en la relaciones de Mg/K y (Ca+Mg)/K y fueron separados en magnitud y dirección con aquellos que estaban en la muestra de suelo de los puntos 3 y 2 (Suelo 3 y Suelo 2). Al considerar el componente principal 2 (CP2), la muestra de suelo en el punto 3 (Suelo 3) se ubicó en el cuadrante superior derecho, principalmente debido al peso relativo del Sodio, Potasio, Fósforo y Calcio y por los altos valores en la capacidad de intercambio catiónico. Las variables K.1, S, AlH tienen un alto valor en la muestra de suelo tomada en el punto 2 (Suelo 2), pero tienen un bajo valor para las variables del punto 1 (Suelo 1).

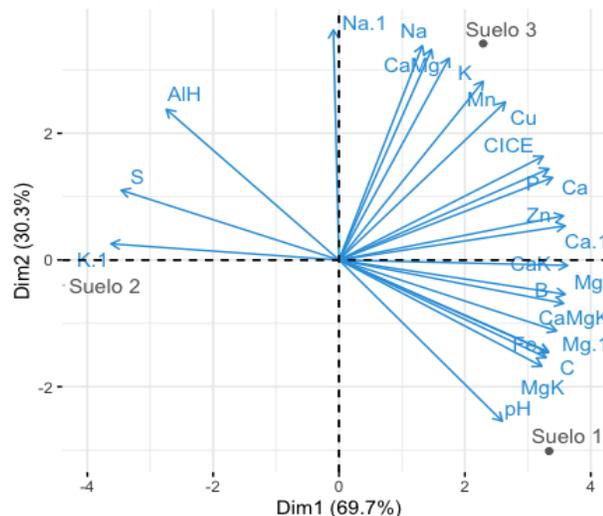


Figura 6. Distribución Biplot, de los CP1 y CP2, de las variables químicas y sitios muestreados.

5.2. COBERTURA VEGETAL

En total se registraron 13 especies de plantas vasculares (Figura 7), que se agrupan en 12 géneros y 11 familias.

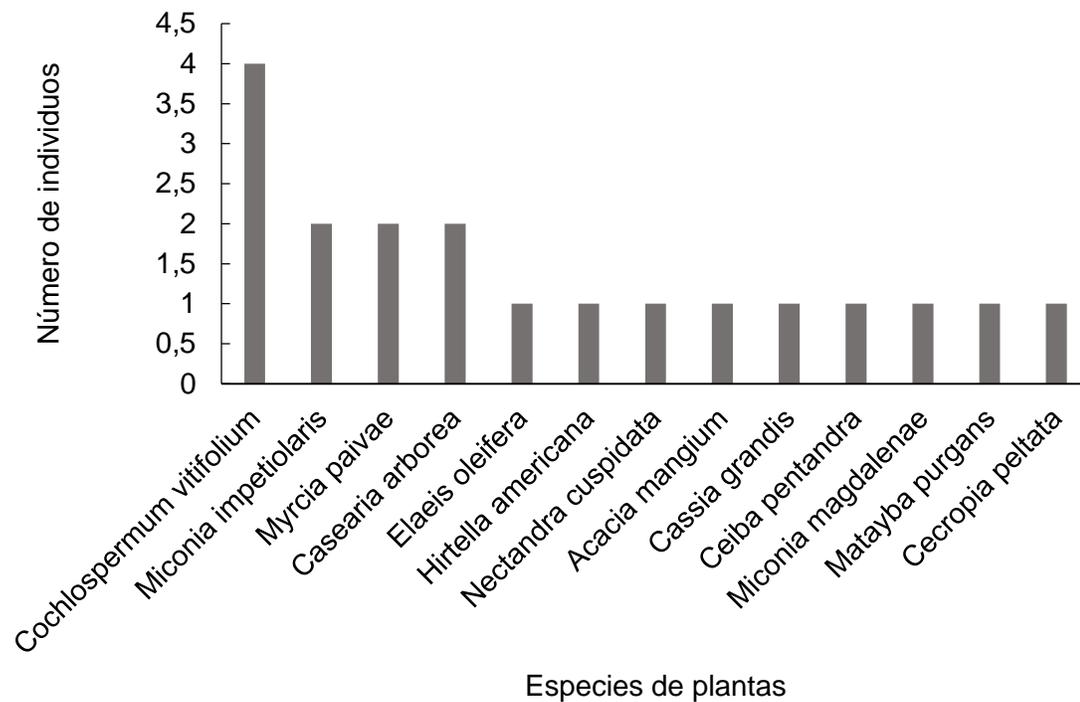


Figura 7. Abundancias de las especies de plantas registradas en las parcelas de muestreo en el área de rehabilitación Sajana.

Las familias más representativas en términos del número de géneros y especies fueron Leguminosae (16,6 % de los géneros y 15,3 % de las especies) y Melastomataceae (8,3%, y 15,3 % respectivamente). Los géneros restantes tuvieron representaciones inferiores a dos especies. Por otro lado, se registraron latizales en todas las especies reportadas (13) mientras que la categoría Brinzal sólo se registró la especie *Cochlospermum vitifolium* (Willd.) Spreng (Tabla 3).

Tabla 3. Composición florística y estados de crecimiento de la vegetación Fustales (F), Latizales (L) y Brinzales (B) en el área de estudio.

Familia	Género	Especie	Nombre Común	F	L	B
Arecaceae	Elaeis	<i>Elaeis oleifera (Kunth) Cortés</i>	Coroza	-	1	-
Bixaceae	Cochlospermum	<i>Cochlospermum vitifolium (Willd.) Spreng.</i>	Papayote	-	1	3
Chrysobalanaceae	Hirtella	<i>Hirtella americana L.</i>	Garrapato	-	1	-
Lauraceae	Nectandra	<i>Nectandra cuspidata Nees & Mart.</i>	Laurel	-	1	-
Leguminosae	Acacia	<i>Acacia mangium Willd.</i>	Acacio	1	1	-
	Cassia	<i>Cassia grandis L. f.</i>	Cañeñolo	4	1	-
Malvaceae	Ceiba	<i>Ceiba pentandra (L.) Gaertn.</i>	Ceiba bonga	-	1	-
		<i>Miconia impetiolearis (Sw.) D. Don ex DC.</i>	Cancho	-	2	-
Melastomataceae	Miconia	<i>Miconia magdalenae Triana</i>	Tuno	-	1	-
Myrtaceae	Myrcia	<i>Myrcia paivae O. Berg</i>	Arrayán	-	2	-
Salicaceae	Casearia	<i>Casearia arborea (Rich.) Urb.</i>	Vara blanca	-	2	-
Sapindaceae	Matayba	<i>Matayba purgans (Poepp.) Radlk.</i>	Cachicarnero	-	1	-
Urticaceae	Cecropia	<i>Cecropia peltata L.</i>	Guarumo	-	1	-
Total general				5	16	3

5.2.1. Relaciones simbióticas con otras especies de flora o fauna

Las especies de plantas identificadas en el área de estudio presentaron relaciones simbióticas como: relación con hongos micorrizicos; simbiosis con bacterias de raíces y suelos; mutualismo con insectos, aves y mamíferos; mutualismo con insectos; mutualismo con aves, plantas e insectos; simbiosis con otras plantas e insectos; mutualismo con aves; depredación y mutualismo con diferentes organismos y relación con hongos principalmente. Siendo la relación mutualismo con insectos, aves y mamíferos la más frecuente (Tabla 4).

Tabla 4. Especies vegetales que presentan simbiosis con otros grupos de interés biológico.

Espece	Nombre común	Simbiosis	Observaciones
<i>Acacia mangium Willd.</i>	Acacio	Si	Relación con hongos micorrizicos
<i>Casearia arborea (Rich.) Urb.</i>	Vara blanca	Si	Simbiosis con bacterias de raíces y suelos
<i>Cassia grandis L. f.</i>	Cañeñolo	Si	Mutualismo con insectos, aves y mamíferos
<i>Cecropia peltata L.</i>	Guarumo	Si	Mutualismo con insectos
<i>Ceiba pentandra (L.) Gaertn.</i>	Ceiba bonga	Si	Mutualismo con aves, plantas e insectos
<i>Cochlospermum vitifolium (Willd.) Spreng.</i>	Papayote	Si	Simbiosis con otras plantas e insectos
<i>Elaeis oleifera (Kunth) Cortés</i>	Coroza	Si	Mutualismo con insectos, aves y mamíferos
<i>Hirtella americana L.</i>	Garrapato	Si	Mutualismo con aves
<i>Miconia impetioaris (Sw.) D. Don ex DC.</i>	Cancho	Si	Depredación y mutualismo con diferentes organismos
<i>Miconia magdalenae Triana</i>	Tuno	Si	Mutualismo con insectos, aves y mamíferos
<i>Myrcia paivae O. Berg</i>	Arrayán	Si	Relación con hongos principalmente
<i>Nectandra cuspidata Nees & Mart.</i>	Laurel	Si	Mutualismo con insectos, aves y mamíferos

5.3. DIVERSIDAD DE AVES

Se registraron en total 38 especies de aves que se agrupan en 11 órdenes y 15 familias. El orden con mayor número de familias registrado fue Passeriformes con un total de tres, al igual de Galliformes. Los otros nueve órdenes estuvieron representados por menos de dos familias. Las familias más representativas por su riqueza de especie fueron Thraupidae (18,42%), Tyrannidae (15,79%), Columbidae (13,16%) y Ardeidae (10,53%), el resto de familias estuvieron representados por dos o menos especies (Tabla 5).

Tabla 5. Registro de aves en el área de rehabilitación Sajana.

Orden	Familia	Especie	Nombre común
Anseriformes	Anatidae	<i>Dendrocygna autumnalis</i>	Pisingo
Apodiformes	Trochilidae	<i>Anthracothorax nigricollis</i>	"Mango pechinegr
Caprimulgiformes	Caprimulgidae	<i>Nyctidromus albicollis</i>	Bujío
Cathartiformes	Cathartidae	<i>Cathartes aura</i>	Guala cabecirroja
		<i>Cathartes burrovianus</i>	Guala sabanera
		<i>Coragyps atratus</i>	Gallinazo negro
Columbiformes	Columbidae	<i>Columbina minuta</i>	Tortolita diminuta
		<i>Columbina talpacoti</i>	Tortolita rojiza
		<i>Leptotila verreauxi</i>	Tórtola colipint
		<i>Patagioenas cayennensis</i>	Paloma morada
		<i>Zenaida auriculata</i>	Torcaza naguiblanca
Cuculiforme	Cuculidae	<i>Crotophaga ani</i>	Garrapatero piquiliso
Falconiformes	Falconidae	<i>Caracara cheriway</i>	Caracara moñudo
		<i>Milvago chimachima</i>	Pigua
Galliformes	Odontophoridae	<i>Colinus cristatus</i>	Perdiz chilindra
	Corvidae	<i>Cyanocorax affinis</i>	Carriquí pechiblanco
	Cracidae	<i>Ortalis garrula</i>	Guacharaca caribeña
Passeriformes	Icteridae	<i>Psarocolius decumanus</i>	Oropéndola crestada
		<i>Icterus chrysater</i>	
	Thraupidae	<i>Ramphocelus dimidiatus</i>	Toche pico de plata
		<i>Sporophila intermedia</i>	Espiguero gris
		<i>Sporophila minuta</i>	Espiguero ladrillo
		<i>Thraupis palmarum</i>	Azulejo palmero
		<i>Nemosia pileata</i>	Trinadora pechiblanco
		<i>Coereba flaveola</i>	Mielerero común
		<i>Volatinia jacarina</i>	Espiguero
	Tyrannidae	<i>Todirostrum cinereum</i>	Espatulilla
		<i>Tyrannus melancholicus</i>	Sirirí común
		<i>Camptostoma obsoletum</i>	Tiranuelo silbador
		<i>Elaenia flavogaster</i>	Elaenia copetona
		<i>Myiozetetes cayanensis</i>	Suelda crestinegra
		<i>Tyrannus melancholicus</i>	Sirirí común
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Ardea alba</i>	Garza real
		<i>Bubulcus ibis</i>	Garzita bueyera
		<i>Egretta thula</i>	Garza patiamaril
		<i>Nycticorax nycticorax</i>	Guaco común
Psittaciformes	Psittacidae	<i>Ara macao</i>	Guacamaya roja
		<i>Brotogeris jugularis</i>	Periquito bronceado

El punto de muestreo que presentó mayor abundancia de individuos fue el Punto 1, mientras que presentó mayores vales de riqueza fue el Punto 3 durante todo el muestreo (Figura 8). Sin embargo, no hubo diferencias significativas entre los diferentes puntos (Kruskal-Wallis test: $H = 3.30$ $p = 0.1917$). Lo que quiere decir, que la abundancia de aves agrupadas en los diferentes órdenes no es diferente entre los puntos de muestreo.

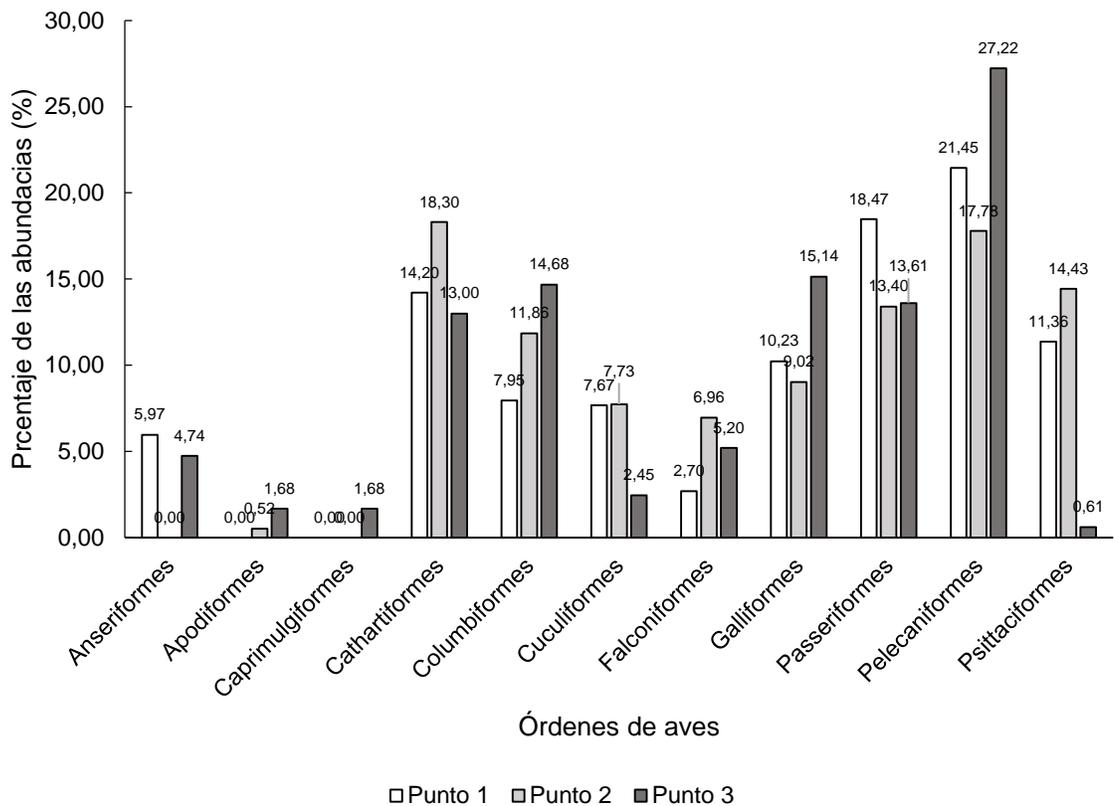


Figura 8. Porcentaje de las abundancias de los órdenes de aves registrados en los tres puntos de muestreo en el área de rehabilitación Sajana.

Entre las especies con algún grado de sensibilidad se resaltan dos especies registradas en CITES como es el caso de las aves rapaces: *Milvago chimachima* y *Caracara cheriway*. También se registró una especie endémica: *Ortalis garrula* (Guacharaca caribeña) y dos especies con algún tipo de migración: *Cathartes aura* y *Tyrannus melancholicus* (Anexo 1).

5.4. RELACIÓN ENTRE VARIABLES

El análisis de correlación entre los parámetros químicos y la abundancia de plantas (Tabla 6) arrojó que el único nutriente que mostró una relación significativa inversa fue Ca ($r = -0,9991$, $p = 0,0270$), lo que indica que a mayor valor del Ca en el suelo menor número de plantas se desarrollaran. No se presentó correlación entre los parámetros químicos del suelo y las especies de las plantas (Anexo 3). Mientras que hubo correlación positiva entre las especies de las plantas y la abundancia de las aves ($r = 0,6134$, $p = 0,0448$), lo que indica que a mayor número especies de plantas se observa un mayor número de individuos de aves. Sin embargo, no se presentó una relación entre la abundancia de las plantas y la abundancia de las aves ($r = -0,1513$, $p = 0,657$).

Tabla 6. Análisis de correlación de Pearson entre los parámetros químicos y la abundancia de planta en el área de rehabilitación Sajana.

Parámetros químicos	Correlación de Pearson (r)	p valor
pH	-0,6348	0,5620
C	-0,8656	0,3340
S	0,9160	0,2630
P	-0,9531	0,1960
Ca	-0,9666	0,1650
Mg	-0,9673	0,1630
K	-0,5719	0,6120
Na	-0,4619	0,6940
Al + H	0,6815	0,5230
CICE	-0,9359	0,2290
Cu	-0,7964	0,4130
Fe	-0,8552	0,3470
Zn	-0,9963	0,0550
Mn	-0,7098	0,4980
B	-0,9563	0,1890
Ca/Mg	-0,5000	0,6670
Ca/K	-0,9915	0,0830
Mg/K	-0,8325	0,3740
(Ca+Mg)/K	-0,9130	0,2680
Ca	-0,9991	0,0270
Mg	-0,8688	0,3300
K	0,9843	0,1130
Na	-0,0822	0,9480

6. DISCUSIÓN

6.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO

Respecto de los resultados encontrados, con relación a la media del pH (5,07), estos valores se asocian con los altos niveles de hidrogeno y aluminio, producto de la descomposición mineral de estos elementos (Zapata-Hernández, 2004). Este parámetro, presentó valores similares a los estudios reportados por Daniels & Amos, (1982), Ciolkosz et al, (1985) y Skousen et al. (1998), quienes reportaron pH en suelos mineros con rangos que oscilaron entre 2,9 hasta un máximo de 8,2. Sin embargo, este estudio presentó valores por debajo de los reportados por Chávez, (2020) y Pérez et al. (2012) quienes encontraron valores de pH por encima de 5,31 y 6,07 respectivamente, en suelos degradados por la minería con previo establecimiento de cobertura vegetal.

Con relación a los reportes de Carbono orgánico (C.O.), en la presente investigación reportó un contenido de 1,24%, que indica un contenido adecuado de material orgánico en los suelos muestreados. Esto se asocia con los procesos de rehabilitación que se llevaron a cabo en las zonas de muestreo, donde se emplearon suelos con alto valor orgánico el fin de facilitar la revegetalización, información similar reportaron Izquierdo et al. (2005), quienes determinaron la importancia de coberturas vegetales, para favorecer adecuadamente cambios en el contenido de C y N del suelo utilizados en minería, luego de periodos cortos de tiempo. Igualmente, Pérez et al. (2012), encontraron datos en los suelos sometidos a diferentes procesos de remediación con *Acacia* o *Casuarina*, que poseen menor pH, mayor contenido de materia orgánica (M.O.) situación que se originó por la cobertura vegetal, que permite una acumulación de carbono orgánico y la mineralización de los restos vegetales (Šourková et al., 2005). Sin embargo, la información reportada sobre contenidos de carbono orgánico no puede considerarse funcionalmente equivalente a la materia orgánica edáfica, por vacíos en la metodología de identificación y cuantificación de estos contenidos, como lo mencionaron autores como Daniels & Amos, (1982), Amichev et al. (2008), y Arranz-

González (2011), quienes reportaron falencias en la utilización de la técnica Walkley-Black (WB).

El contenido de azufre encontrado en el presente estudio puede explicarse por los niveles medios de materia orgánica del suelo, debido a que esta es la principal fuente de S orgánico, ya que representa más del 90% de la reserva total existente (Janzen & Ellert, 2001), aunque su velocidad de transformación en formas aprovechables no supera el 2% (Saggar & Bolan, 2003). Asimismo, la acidez intercambiable reportada puede estar relacionada con este elemento, pues a medida que se aumenta la concentración de azufre la tendencia es a presentarse mayor acumulación de aluminio intercambiable (Combatt et al., 2003).

El contenido de P encontrado fue bajo, desde el punto de vista nutricional, sin embargo, estos registros son comúnmente encontrados, tanto para suelos naturales (IGAC, 2004), como en suelos estériles producto de explotación minera (Bradshaw, 1983; Arranz-González, 2011). No obstante, los resultados estuvieron por debajo de los encontrados por Pérez et al. (2012) quienes reportaron una media de 8,23 mg kg⁻¹ en el contenido de P en suelos rehabilitados con *Casuarina*, después de tres años. Igualmente, hay que mencionar también, que existe poca influencia en el cambio de la vegetación sobre el contenido de este elemento (Farley & Eugene, 2004).

Por otro lado, esta investigación, coincide con los datos de Chávez, (2020), donde no hubo registros significativos de P en suelos en procesos de rehabilitación minera, lo que posiblemente se presentó por el valor bajo de pH que disminuye la disponibilidad del fósforo en el suelo, el cual tuvo niveles bajos y poco disponible para el desarrollo del material vegetal (Sanchez, 2006). Brady (1984) demostró que la máxima disponibilidad de fósforo tiene lugar en un rango de pH entre 6,0- 7,0, por tanto, en suelos ácidos como los de la presente investigación, los aniones fosfato que se encuentran en la solución del suelo forman complejos con los cationes de Fe, Al y Mn, dando lugar a hidroxifosfatos, insolubles y por ende no disponibles para

las plantas, donde también se forman, ácidos orgánicos que contienen P y el humus pueden formar compuestos insolubles con Fe, Al y Mn, cuando la reacción del suelo es ácida. Esta situación puede ser ventajosa y al mismo tiempo generar inconvenientes, la ventaja es que la interacción de los cationes metálicos con los fosfatos orgánicos aumenta la disponibilidad de fosfatos inorgánicos para la mayoría de la vegetación, sin embargo, el fósforo orgánico puede quedar retenido en los compuestos formados y por tanto inutilizable para las plantas (Sánchez-Villaluenga, 2015). Es importante mantener los niveles de fósforo asimilable en los suelos mineros, por lo que es necesario fertilizar en la mayoría de los casos o asegurar su presencia con enmiendas orgánicas (Arranz-González, 2011).

En general el nivel de Ca^{+2} fue bajo, no obstante, estos resultados coinciden con los reportes de Lipa-Mercado, (2017), quien encontró contenidos bajos de Ca^{+2} en suelos mineros en procesos de rehabilitación con vegetación. Por otro lado, Ramírez-Moreno, (2019) reportó en áreas degradadas por minería a cielo abierto con procesos de revegetalización, mayor disponibilidad de contenidos K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} en el suelo. Estas variaciones de elementos (incrementos y reducciones) pueden presentarse, debido a que, las áreas degradadas por minería se comportan de manera similar, a los procesos de desarrollo del suelo o pedogénesis, en los cuales la disponibilidad de nutrientes y fertilidad edáfica aumentan en las primeras etapas de este proceso; pero luego de determinado tiempo, por diferentes factores (clima y biota), alcanza un equilibrio dinámico y es cuando la concentración de nutrientes disminuye (Peet, 1992; Hedin et al., 2003).

El reporte de Mg^{+2} en el suelo, en el presente estudio fue alto, diferentes resultados encontraron Sandoval et al. (1973), Bradshaw & Chadwick (1980), Roberts et al. (1988) y Daniels & Zipper (1988) quienes, en suelos mineros con procesos de revegetalización con pH ácidos, reportaron concentraciones limitantes de Ca^{+2} y Mg^{+2} . El contenido de Mg registrado puede estar relacionado con el material parental del suelo, el cual pudo generar que este elemento presentara altos niveles. Teniendo en cuenta que, las deficiencias de Mg se presentan en suelos ácidos, de

textura gruesa y con baja CIC (García & Ciapitti, 2010). También, hay que mencionar, que los datos aquí reportados, fueron similares a los de Jiménez-Morales, (2020), quien en muestras de suelo estériles de carbón encontró valores altos de Mg^{+2} .

Los datos del presente estudio revelaron un contenido medio de K^+ , resultandos similares a los reportados por Pérez et al. (2012) donde el contenido de K^+ intercambiables fue mayor en los suelos rehabilitados, comportamiento que puede ser atribuido al aporte de biomasa de las especies vegetales plantadas y a su descomposición. Datos que podrían ser buen indicador del proceso rehabilitación en estos suelos, puesto que el potasio es considerado uno de los cationes más importante en la fisiología de las plantas, por su contenido en los tejidos vegetales y las funciones que este desempeña, ya que, su velocidad de absorción es alta, como consecuencia de la permeabilidad selectiva de las membranas vegetales; hecho que propicia la difusión facilitada de este nutriente para diversos procesos fisiológicos, entre los cuales se destaca, el crecimiento meristemático, estado hídrico y la fotosíntesis (Marschner, 1986; Mengel & Kirkby, 2000).

La acidez intercambiable encontrada fue elevada, lo que asocia con valores de pH bajos, esto es característico en suelos donde se practica la explotación minera a cielo abierto, donde el Al edáfico se incrementa producto de la acción mecánica de las retroexcavadoras sobre el suelo y subsuelo, dejan expuestos fragmentos de rocas ígneas y metamórficas que por procesos de meteorización liberan paulatinamente minerales (Al, Fe, S, P, Mg, K, etc.) al suelo residual (Chacón 1992; Díaz & Elcoro, 2009; ELAW, 2010). Una gran parte de estos minerales meteorizados son liberados al suelo y lixiviados por la acción de las lluvias (Austin & Vitousek, 1998; Santiago et al., 2005; Osorio, 2014); no obstante, la concentración de Al tiende a incrementar, probablemente, por el hecho de que su tasa de lixiviación es menor que la de los otros minerales. Además, este elemento puede estar en formas soluble en la solución del suelo intercambiable, si es absorbido sobre la superficie de las arcillas cargadas negativamente y/o precipitado como mineral secundario en

forma de óxido e hidróxido en el suelo, lo cual sustenta su alta disponibilidad en suelos altamente meteorizados (Osorio 2014), adicionalmente, la acidez reportada en los suelos muestreados, también puede ser atribuida al régimen de precipitaciones y el deficiente drenaje del sector de estudio (Bohn et al., 1993; Jaramillo, 2002; Chandrasekaran & Ravisankar, 2015).

La CICE encontrada estuvo dentro de rango medio, lo que se podría traducir en un buen indicador edáfico, debido a que esta propiedad es muy importante para el desarrollo de la vegetación, ya que contribuye a la capacidad de los suelos de retener nutrientes necesarios para las plantas (Krull et al., 2004), adicionalmente, los valores registrados pueden estar influenciados por el nivel de C.O. que se presentó, puesto que la CICE está relacionada de manera directa con la materia orgánica (Hofstede, 1995; Hofstede et al., 2002). También es importante mencionar, que los datos reportados para este parámetro, posiblemente se presentaron por la adición de las enmiendas orgánicas y de los residuos vegetales incorporados al suelo en los procesos de rehabilitación (Zornoza et al., 2013). En este sentido, Kabas et al. (2014) reportaron una correlación positiva entre la CIC del suelo y el contenido de C.O. aportado por el purín de cerdo en depósitos mineros, igualmente, Ottenhof et al. (2007) estudiaron la influencia de la vegetación sobre la disponibilidad de nutrientes esenciales en suelos mineros y concluyeron que la materia orgánica procedente de las plantas y la actividad radicular contribuyó a aumentar la CIC.

Con relación a los elementos menores, estos en su mayoría presentaron niveles óptimos, como es el caso del Cu, Fe y Mn, sin embargo, hay que decir que los resultados estuvieron por debajo de los reportes de Martínez & González (2017), quienes, en suelos mineros de Córdoba Colombia, encontraron promedios altos para los micronutrientes Cu, Fe, Zn y Mn. Respecto al contenido de Fe, hay que mencionar que su contenido estuvo influenciado por el pH, lo que pudo amentar su solubilidad (Römheld & Nikolic, 2007), igualmente, la movilidad del Zn está directamente relacionada con el pH, presentando una correlación negativa con él

(Conesa et al., 2008; Alvarenga et al., 2009; Bes et al., 2014). De acuerdo con Lagomarsino et al. (2011), los principales contribuyentes en la retención del Cu en los suelos son los óxidos de Fe y Mn, sin embargo, al igual que con el resto de los elementos menores, este proceso depende del pH, puesto que es esta variable la que determina la carga de los grupos funcionales y sitios de cambio de los componentes del suelo. En el caso del B, también es susceptible al pH, no obstante, los resultados encontrados en esta investigación fueron similares a los reportes de Pérez et al. (2012), donde en suelos mineros de reacción ácida y niveles bajos de B, no fueron un obstáculo para el establecimiento y desarrollo de la vegetación.

6.2 COBERTURA VEGETAL

La vegetación contribuye en la retención de humedad y al amarre del suelo debido al entramado de sus raíces, por lo tanto, la vegetación constituye un factor primordial en recuperación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. De acuerdo con Castellanos-Barliza & León (2011), dado que sirven como núcleos de condensación que generan humedad, además, con los aporte de residuos vegetales como hojarascas retienen humedad y se descomponen y se trasladan al suelo en sus elementos resultantes (contenidos celulares, nutrientes, hidratos de carbono, y otros), de igual forma generan sombra, permiten la regulación de ciclos biogeoquímicos de los nutrientes y finalmente juegan un papel primordial desde el punto de servicios ecosistémicos ya que sirven de hábitat para otras especies. Con respecto a esta afirmación Dutta & Agrawal (2003) y Mendes-Filho et al. (2010) afirman que las especies vegetales por su velocidad y aporte pueden ser importantes, por lo que unas especies pueden ser pioneras y permiten la posterior llegada de otras especies vegetales.

En las parcelas muestreadas en total se registraron 13 especies de plantas vasculares que se agrupan en 12 géneros y 11 familias. Estos datos suponen una baja riqueza de especies en el área de estudio, con relación a la riqueza de especies reportadas para el municipio de Montelibano. Rangel-Ch et al. (2012) registraron para el municipio 189 especies distribuidas en 132 géneros y 56 familias de plantas

vasculares, ambos estudios coinciden en que la mayoría de los géneros se registrados reportan una sola especie. En común para ambos estudios se reportan las especies *Cochlospermum vitifolium*, *Matayba purgans* y *Cecropia peltata*, es decir, que el área estudiada contiene ensamblaje característico de las especies nativa que tenía en el ecosistema original, lo que coincide con dos de las nueve recomendaciones para la restauración de ecosistemas con áreas degradadas (Society for Ecological Restoration International and IUCN Commission on Ecosystem Management, 2004).

Las especies encontradas en el área de estudio han sido reportadas por diversos autores como uno de las medidas biológicas más importante en la rehabilitación de suelos usados para la minería (Dagar, 1998). especies forestales, tales como: *Acacia mangium*, la cual presenta una capacidad de adaptación a las condiciones edafoclimáticas de las aéreas usadas para la explotación minera. Debido a que es unas de las especies arbóreas de rápido crecimiento más utilizado en los programas de reforestación en diferentes regiones, debido a su rápido crecimiento y capacidad para crecer en suelos degradados de baja fertilidad (Francis, 2002), lo que coincide con lo reportado por Mendes-Filho et al. (2010) quienes establecen que especies leñosas como *A. mangium* tienen uso potencial para el establecimiento en residuos de minería.

Maiti (2007) y Castellanos-Barliza & León (2011) afirman que el empleo de especies forestales para la recuperación de suelos degradados por minería mediante depende de la capacidad de adaptación de algunas de esas especies a las condiciones restrictivas físico-químicas con las que queda los residuos mineros, por lo que se debe asegurar la elección apropiada de las especies vegetales para la revegetación, lo que contribuye con recuperación de la biodiversidad.

Cecropia Peltata y *Cochlospermum vitifolium* fueron reportados por Camargo-León & Lozano-Beltrán (2019) como especies con efecto restaurador en sitios donde se lleva a cabo explotación minera y de igual forma señalan que pueden servir en los

procesos de revegetalización ecológica, el cual es término que define el proceso por el cual las plantas colonizan un área de la cual ha sido removida su cobertura vegetal original de un disturbio. La revegetalización no necesariamente implica que la vegetación original se reestablece, solamente que algún tipo de vegetación ahora ocupa el sitio.

De acuerdo con Giraldo (2017) quien realizó un estudio con el fin de diagnosticar los procesos de degradación de suelos e impactos ambientales ocasionados por la minería aurífera en el Bajo Cauca Antioqueño, resalta entre su hallazgo que algunas de las especies reportadas en este estudio (*Acacia Mangium*, *Cochlospermum vitifolium*) tienen la capacidad de recuperar los ecosistemas afectados, incluyendo las propiedades físicas, nutrimentales, biológicas y químicas (Fitoextracción y Fitoestabilización).

6.3 DIVERSIDAD DE AVES

Este estudio registró un número inferior de especies y familias de aves que las reportadas para el municipio de Montelibano, en el que se registraron 87 especies, distribuidas en 13 órdenes y 33 familias (Rangel-Ch et al., 2012), sin embargo, ambos estudios coinciden en que el orden con mayor diversidad de especies fue Passeriformes y la familia con más especies fue Tyranidae.

La estructura de la vegetación en términos del uso del hábitat juega un papel importante en la composición de la comunidad de las aves (Simberloff & Dayan, 1991; Fahring & Nuttle, 2005; Lemus-Ramírez, 2016). En áreas con sucesión temprana o de zonas abiertas, la comunidad de especies se caracteriza por ser de hábitos generalistas, y a mayor complejidad en la estructura vegetal las especies son especialistas del hábitat (Salas-Correa & Mancera-Rodríguez, 2018). La mayoría de las especies reportadas en este estudio corresponden a aves sinantrópicas y generalistas que habitan en áreas abiertas. En estas áreas abiertas las funciones de dispersión de semillas y polinización son de gran importancia, debido a que una mayor presencia de aves que cumplan estas funciones se explica

posiblemente, debido a que las aves son consideradas conectores móviles que facilitan la transferencia de materia y energía en los ecosistemas (Aguilar-Garavito & Ramírez, 2015), así como en la provisión de servicios ecosistémicos (Whelan et al., 2008; Haines-Young & Potschin, 2012).

Al no encontrarse diferencias estadísticamente significativas entre los puntos de muestreo, se asume que la diversidad fue similar entre ellos, sin embargo, podemos resaltar que el punto de muestreo que presentó mayor riqueza de especies estuvo asociado a la estructura vegetal de la zona. Las áreas que se encuentran en una etapa temprana de sucesión, las cuales se encuentran dominadas principalmente por plantas herbáceas y arbustivas, generalmente predominarán especies de aves granívoras, omnívoras y en menor cantidad insectívoras. A medida que la estructura vegetal presenta una mayor complejidad, las especies de aves con mayor abundancia serán las especies frugívoras y nectarívoras (Rengel-Salazar et al., 2009; Becker et al., 2013; Lemus-Ramírez, 2016).

Los estudios realizados en el que analizan la composición de la comunidad de aves en sitios rehabilitados en donde hubo extracción minera, coinciden en que esta fueron similares en las áreas o coberturas estudiadas (Márquez-Ferrando, 2008; Gould, 2010; Lemus-Ramírez, 2016). Además, cuando se compara la diversidad de aves de estos sitios rehabilitados por minería con áreas naturales se llegó a la conclusión, que entre los primeros cuatro o cinco años de abandono la comunidad de aves puede alcanzar hasta un 65% de similitud, y entre un 73,5% después de los 16 o 17 años (Armstrong & Nichols, 2000). Sin embargo, hay que destacar que en las áreas rehabilitadas se favoreció el crecimiento de especies nativas.

El monitoreo de la avifauna y sus procesos ecológicos es importante en los proyectos de restauración ecológica ya que están directamente relacionados con el restablecimiento de la funcionalidad de los ecosistemas degradados y, en consecuencia, los servicios ecosistémicos asociados (Contreras-Rodríguez & Peralta-Zapata, 2015). El presente estudio se tomó a las aves como un indicador

ecológico de los ecosistemas intervenidos, donde la presencia de ciertas especies señala que existen hábitats que pueden satisfacer sus necesidades de alimento y refugio temporal o permanentemente, teniendo en cuenta que cada especie puede responder independientemente a la variación ambiental y que la presencia o ausencia de una de éstas, puede indicar condiciones ecológicas particulares (Villegas & Garitano-Zavala, 2008).

Las aves también son consideradas como indicadoras de la calidad del hábitat ya que responden a los cambios ambientales que se producen por actividades antrópicas (Altamirano et al., 2003). Este trabajo tuvo en cuenta aquellas especies que han sido catalogadas como en peligro de extinción en las categorías establecidas a nivel global por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza UICN (2020), y a nivel nacional por la Resolución 1912 del 2017 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2017). Igualmente, se identificaron aquellas especies que presentan restricción en su comercio a través de la lista de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, 2020), al igual que aquellas que presentan rangos de distribución muy pequeños o restringidos (endémicas) y las especies con algún patrón de migración dentro del territorio, para lo cual fue evaluado el Plan Nacional de especies Migratorias de Naranjo & Amaya (2009). Las especies catalogadas en alguna de estas listas son de gran importancia en estudios de áreas con procesos de rehabilitación, debido a que si bien las aves son indicadoras del estado sucesional del bosque, también, cumplen funciones importantes que determinan la salud de los ecosistemas, produciéndose un esquema de retroalimentación positivo, donde los bosques proporcionan varios recursos para las aves y las aves influyen en los bosques (Stratford & Sekercioglu, 2015).

7. CONCLUSIONES

Las propiedades químicas de los suelos muestreados fueron características de áreas en proceso de rehabilitación, los cuales suelen ser suelos ácidos (pH 5,07), con contenido de P bajo, igualmente, con nivel de Ca^{+2} bajos y elevada acidez intercambiable. Aquellos nutrientes que se encontraron en niveles medios pueden estar asociados a los procesos de revegetalización en donde la sucesión de la vegetación ha contribuido a mejorar algunos contenidos nutricionales del suelo.

La diversidad de especies de plantas vasculares fue baja, sin embargo, el área estudiada contiene ensamblaje característico de las especies nativas en el ecosistema original.

La composición de la comunidad de aves es característica de áreas con sucesión temprana o de zonas abiertas, por ser de hábitos generalistas.

En este trabajo el análisis de correlación realizado arrojó que los parámetros químicos del suelo no presentaron relación con la abundancia de las plantas, ni tampoco, hubo una relación entre la abundancia de las plantas y la de la comunidad de aves.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Garavito, M., & Ramírez, W. (2015). Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Alday, J., Marrs, G. & Martínez-Ruiz, C. (2010). The importance of topography and climate on short-term vegetation of coal wastes in Spain. *Ecological Engineering*, 36, 579-585.
- Altamirano, M. A., Guzmán, J., Martín, M., & Dominguez, L. (2003). Un método para la selección de aves bioindicadoras con base en sus posibilidades de monitoreo. Huitzil.
- Alvarenga, P., Gonçalves, A., Fernandes, R., de Varennes, A., Vallini, G., Duarte, E., & Cunha-Queda, A. (2009). Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization:(I). Effects on soil chemical characteristics. *Chemosphere*, 74, 1292-1300.
- Ambuel, B. & Temple, S. A. (1983). Area-dependent changes in the bird communities and vegetation of southern Wisconsin forests. *Ecology* 64: 1057–1068.
- Amichev, B., Burger, J. & Rodrigue, J. (2008). Carbon sequestration by forests and soils on mined land in the Midwestern and Appalachian coalfields of the U.S. *Forest Ecology and Management*, 256, 1949–1959.
- Andrades, M., & Martínez, E. (2014). Fertilidad del suelo y parámetros que la definen (Universidad de Rioja (ed.); 3rd ed.).
- Aponte C., Garcia, L. V. & Maranon, T. (2013). Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: a feedback mechanism favouring species coexistence. *Forest Ecology and Management* 309:36–46.

- Armstrong, K. N., & Nichols, O. G. (2000). Long-term trends in avifaunal recolonisation of rehabilitated bauxite mines in the jarrah forest of south-western Australia. *Forest Ecology and Management*, 126(2), 213-225.
- Arranz-González, J. C. (2011). Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto en España: una revisión. *Boletín Geológico Minero*, 122, 3-16.
- Arshad, M. A., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 153-160.
- Austin A. T. & Vitousek, P. M. (1998). Nutrient dynamics on a precipitation gradient in Hawaii. *Oecologia* 113: 519–529.
- Banning, N. C., Grant, C. D., Jones, D. L. & Murphy, D. V. (2008). Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2021-2031.
- Bardgett R.D. & Wardle, D.A. (2010). *Aboveground Belowground Linkages: Biotic Interactions, Ecosystem Processes, and Global Change*. Oxford Series in Ecology and Evolution. Oxford University Press.
- Batáry, P., Matthiesen, T. & Tschardtke, T. (2010). Landscape-moderated importance of hedges in conserving farmland bird diversity of organic Vs. conventional croplands and grasslands. *Biological Conservation* 143: 2020–2027.
- Becker, R. G., Paise, G., & Pizo, M. A. (2013). The structure of bird communities in areas revegetated after mining in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ornitologia*, 221-234.
- Bengtsson, J., Ahnström, J. & Weibull, A. C. (2005). Los efectos de la agricultura orgánica en la biodiversidad y la abundancia: un metanálisis. *Revista de ecología aplicada*, 42 (2), 261-269.

- Benton, T. G., Vickery, J. A. & Wilson, J. D. (2003) Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution*, 18, 182–188.
- Bes, C. M., Pardo, T., Bernal, M. & Clemente, R. (2014). Assesment of the environmental risks associated with two mine tailing soils from the La Unión-Cartagena (Spain) mining district. *Journal of Geochemical Exploration*, 147, 98-106.
- Bohn, H., McNeal, B. & O'Connor, G. (1993). *Química del suelo*. Limusa, México. 370p.
- Bradshaw, A. D. (1983). The reconstruction of ecosystems. *J. Appl. Ecol*, 20, 1-27.
- Bradshaw, A. D. & Chadwick, M. J. (1980). *The Restoration of Land. The ecology and reclamation of derelict and degraded land*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.}
- Brady, N. (1984). *The nature and properties of soils* (9ª ed.). New York: Macmillan Publishing Company.
- Brummitt, R., & Powell, C. (. (1992). *Authors of plant names. A list od authors os scientific names of plants, whith recommended standard forms of their names, including abbreviations*. St. Louis, Missouri: Royal Botanic Gardens, KEW.
- Camargo-León, M. C., & Lozano-Beltrán, L. R. (2019). *Propuestas de intervención ecológica en zonas afectadas por explotación minera a cielo abierto*.
- Cardona, N., Hoyos-G., S., & David-H., H. (2010). *Flora de la Miel, Central Hidroeléctrica Miel I, Oriente de Caldas, Guía ilustrada*. Medellin, Colombia: ISAGEN - Universidad de Antioquia (HUA).
- Castellanos-Barliza, J., & León, J. D. (2011). *Descomposición de hojarasca y liberación de nutrientes en plantaciones de Acacia mangium (Mimosaceae)*

establecidas en suelos degradados de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 59(1), 113–128.

Castillo-Chávez, P. M. (2020). *Recuperación de la fertilidad y fitoextracción del Hg con cultivos de cobertura en suelos degradados por la minería aurífera aluvial en Puerto Maldonado*. (Dissertation, Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ciencias).

Castro, R. F. (2017). *Recuperación de suelos de mina combinando la aplicación de enmiendas elaboradas con residuos con la fitoremediación* (Doctoral dissertation, Universidade de Vigo).

Chacón, I. E. (1992). *Pequeña y mediana minería aluvional. Oro y diamante. Tomo II*. Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar. Fundaudo, Ciudad Bolívar.

Chandrasekaran, A. & Ravisankar, R. (2015). Spatial distribution of physicochemical properties and function of heavy metals in soils of Yelagiri hills, Tamilnadu by energy dispersive X-ray florescence spectroscopy (EDXRF) with statistical approach. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 150:586–601.

Chávez, P. M. C. (2020). *Recuperación de la fertilidad y fitoextracción del hg con cultivos de cobertura en suelos degradados por la minería aurífera aluvial en Puerto Maldonado*. (Trabajo de Grado) Universidad Nacional Agraria La Molina Facultad De Ciencias, Maldonado. Uruguay.

Ciolkosz, E. J., Cronce, R. C., Cunningham, R. L. & Petersen, G. W. (1985). Characteristics, genesis, and classification of Pennsylvania minesoils. *Soil Science*, 139, 232-238.

Colecciones científicas en línea. (2016). Obtenido de Herbario Nacional Colombiano - COL. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá: biovirtual.unal.edu.co/ICN/

- Combatt, E. M. C., Palencia, G., & Marin, N. (2003). Clasificación de suelos sulfatados ácidos según azufre extraíble en los municipios del medio y bajo Sinú en Córdoba. *Temas Agrarios*, 8(2), 22-29.
- Concepción, E. D., Díaz, M., Kleijn, D., Báldi, A., Batáry, P., Clough, Y., Gabriel, D., Herzog, F., Holzschuh, A., Knop, E., Marshall, E. J. P., Tscharrntke, T. & Verhulst, J. (2012). Interactive effects of landscape context constrain the effectiveness of local agrienvironmental management. *Journal of Applied Ecology* 49: 695-705.
- Conesa, H., Robinson, B., Schulin, R., & Nowack, B. (2008). Metal extractability in acidic and neutral mine tailings from the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain). *Applied Geochemistry*, 23, 1232-1240.
- Contreras-Rodríguez, S. M. & Peralta-Zapata, N. A. (2015). El monitoreo de la avifauna y sus procesos ecológicos en proyectos de restauración ecológica. En: Aguilar-Garavito, M. & Ramírez, W. (eds.). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres. (2020). Apéndices I, II y III. <https://cites.org/esp/app/appendices.php>
- Dagar, J. C. (1998). Nitrogen fixing fodder trees for degraded and problematic lands. pp. 73-81. In: J. N. Daniel and J. M. Roshetko (eds.). *Nitrogen fixing trees for fodder production*. Winrock International.
- Daniels, W. L. & Amos, D. F. (1982.) Chemical characteristics of some southwest Virginia minesoils. En *Proceedings of the 1982 Symposium on Surface Mining, Hydrology, Sedimentology, and Reclamation* (p. 377-381). Lexington, KY: University of Kentucky.

- Daniels, W. L. & Zipper, C. E. (1988). Improving coal Surface mine reclamation in the Central Appalachian region. In: Cairns, J. Jr. (Ed.) Rehabilitating damaged ecosystems. Vol I. CRC Press, Boca Ratón, FL. pp. 139-162.
- Dauber, J., Purtauf, T., Allspach, A., Frisch, J., Voigtländer, K. & Wolters, V. (2005). Local vs. landscape controls on diversity: a test using surface-dwelling soil macroinvertebrates of differing mobility. *Glob. Ecol. Biogeog.* 14, 213–221.
- De Andrade Bonetti, J., Anghinoni, I., de Moraes, M. T., & Fink, J. R. (2017). Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. *Soil and Tillage Research*, 174, 104-112.
- De la Peña-Lastra, S., Affre, L., & Otero, X. L. (2020). Soil nutrient dynamics in colonies of the yellow-legged seagull (*Larus michahellis*) in different biogeographical zones. *Geoderma*, 361, 114109.
- Delgado, A. & Gómez, J. A. (2016). The Soil. Physical, Chemical and Biological Properties. F.J. Villalobos, E. Fereres (eds.), *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture*, Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-46116-8_2
- Díaz-Muegue, L. C. (2017). Remediación de suelos alterados por actividad de minería del carbón a cielo abierto, mediante aplicación de biochar procedente de residuos biomásicos de la palma de aceite en la zona carbonífera del departamento del Cesar.
- Díaz, W.A., & Elcoro, S. (2009). Plantas colonizadoras en áreas perturbadas por la minería en el Estado Bolívar, Venezuela. *Acta Botánica Venezuela* 32 (2): 453-466.
- Doran J. W. & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15: 3–11.

- Dutta, R. K., & Agrawal, M. (2003). Restoration of opencast coal mine spoil by planting exotic tree species: A case study in dry tropical region. *Ecological Engineering*, 21(2–3), 143–151.
- Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW). (2010). *Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs*. Eugene, OR 97403. U.S.A. Pp. 110. ISBN 978-0-9821214-36. www.elaw.org
- Fahrig, L., Baudry, J., Brotons, L., Burel, F. G., Crist, T. O., Fuller, R. J., Sirami, C., Siriwardena, G. M. & Martin, J. L. (2011). Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology Letters* 14: 101-112.
- Fahrig, L. & Nutton, W. K. (2005). Population ecology in spatially heterogeneous environments. In: Lovett, G. M., Jones, C. G. & Turner, M. G. (eds.). *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*. Springer-Science.
- Farley, K., & Eugene, K. (2004) Effects of afforestation of a páramo grassland on soil nutrient status. *Forest Ecol Manag* 195: 281–290.
- Field Museum Chicago. (2016). Obtenido de Neotropical Herbarium Specimens: fm1.fieldmuseum.org/vrrc/
- Francis, J. K. (2002). *Acacia mangium* Willd. pp. 256-257. In: J. A. Vozzo (ed.).
- Gama, J. A. V. C. T. (2020). Impacto del riego en las propiedades químicas de suelos mediterráneos. Un caso de estudio en el perímetro de riego del Caia (Portugal) (Doctoral dissertation, Universidad de Extremadura).
- García, F. O., & Ciampitti, I. A. (2010). Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque “tradicional”. [www. ipni. net](http://www.ipni.net), 17.
- Gentry, A. (1993). *A Field Guide to the Families and Genera of Woody Plants of North west. South America : (Colombia, Ecuador, Peru)*. . University of Chicago Press, Chicago.

- Giraldo, R. D. (2017). Procesos de degradación de suelos asociados a minería aurífera a cielo abierto, caso de estudio Bajo Cauca Antioqueño. Escuela de Geociencias.
- Gould, S. F. (2010). Does post-mining rehabilitation on the Weipa bauxite plateau restore bird habitat values?.
- Guzmán-Martínez, F., Arranz-González, J. C., Ortega, M. F., García-Martínez, M. J., & Rodríguez-Gómez, V. (2020). A new ranking scale for assessing leaching potential pollution from abandoned mining wastes based on the Mexican official leaching test. *Journal of Environmental Management*, 273, 111139
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2012). Common international classification of ecosystem services (CICES, Version 4.1). European Environment Agency, 33, 107.
- Hedin, L.O., Vitousek, P. M. & Matson, P.A. (2003). Nutrient losses over four million years of tropical forest development. *Ecology* 84(9): 2231–2255.
- Hernández, J. (2013). Edafología y fertilidad, Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y del medio ambiente. Colombia: Universidad Nacional abierta y a distancia.
- Herrick J. E., Schumanb, G. E. & Rango, A. (2006). Monitoring ecological processes for restoration projects. *Journal of Nature Conservation* 14: 161-171.
- Hilty, S. L., & Brown, W. L. (1986). *Birds of Colombia*. Prince-ton University Press.
- Hofstede, R. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. *Plant Soil* 173: 111-132.
- Hofstede, R., Groenendijk, P., Coppus, R., Fehse, J. & Sevink, J. (2002). Impact of Pine Plantations on Soils and Vegetation in the Ecuadorian High Andes. *Mt Res Dev* 22 (2): 159–167.

- Holmes, R. T., Schultz J. C. & Nothnagle, P. (1979). Bird predation on forest insects: an enclosure experiment. *Science* 206: 462–463.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras, departamento de Nariño.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (2009). Estudio general de suelos y zonificación de tierras de Córdoba.
- Izquierdo, I., Caravaca, F., Alguacil, M., Hernández, G. & Roldán, A. (2005). Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining área under subtropical conditions. *Appl. Soil Ecol.* 30: 3-10.
- Janzen, H, & Eller, B. (2001). Sulfur dynamics in cultivated, temperate agroecosystems. In: Douglas, G; Maynard, D. (Eds). *Sulfur in the environment*. New York, Marcel Dekker. Pp 11-44.
- Jaramillo, D. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, p415-432.
- Jiménez-Morales, D. (2020). Generación de suelos artificiales a través del uso de estériles de carbón provenientes de la mina la primavera, Puerto Libertador–Córdoba. (Trabajo de grado). Universidad de Córdoba. Facultad de Ingenierías. Montería. Colombia.
- Jonasson S., Michelsen, A. & Schmidt, I. K. (1999). Coupling of nutrient cycling and carbon dynamics in the Arctic, integration of soil microbial and plant processes. *Applied Soil Ecology* 11: 135–146.
- Kabas, S., Faz, Á., Acosta, J., Arocena, J., Zornoza, R., Martínez-Martínez, S., & Carmona, D. M. (2014). Marble wastes and pig slurry improve the environmental and plant-relevant properties of mine tailings. *Environ Geochem Health*, 36, 41-54.

- Karlen D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F. & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.
- Krull, E., Skjemstad, J. O. & Baldock, J. A. (2004). Functions of soil organic matter and the effect on soil properties pag. 129. Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting.
- Lagomarsino, A., Mench, M., Marabottini, R., Pignataro, A., Grego, S., Renella, G., & Stazi, S. (2011). Copper distribution and hydrolase activities in a contaminated soil amended with dolomitic limestone and compost. *Ecotoxicology and environmental safety*, 74, 2013-2019.
- Lal, R. (1998). Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical reviews in plant sciences*, 17(4), 319-464.
- Leiva, F., Carrizosa, J., Gómez, C., Latorre, A., Martínez, L., Mesa, G., León, N., Afanador, J., Sánchez, L., Melo, F., Velasco, L., Silva, J. & Mejía, H. (2013). Política nacional para la gestión. República de Colombia, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.
- Lemus-Ramírez, K. I. (2016). Efecto remanente de la industria minera en comunidades de aves de bosque templado del estado de Michoacán, México.
- Lipa-Mercado, J. R. (2017). Caracterización Físico-Química del suelo y vegetación de referencia con fines de restauración ecológica en la concesión minera Sol Naciente v, Distrito de Inambari, Tambopata, Madre de Dios. Puerto Maldonado. Perú.
- López, R. (2002). Degradación del suelo: causas, procesos, evaluación e investigación. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de los Andes, Mérida Venezuela.

- Maiti, S. K. (2007). Bioreclamation of coalmine overburden dumps - With special emphasis on micronutrients and heavy metals accumulation in tree species. *Environmental Monitoring and Assessment*, 125(1–3), 111–122.
- Makttoof, E. A., Kassim, J. K., & Khuzale, K. H. (2020). Distribution of different forms of phosphorus in calcareous soils from middle and south of Iraq. *Al-Qadisiyah Journal For Agriculture Sciences (QJAS)*(P-ISSN: 2077-5822, E-ISSN: 2617-1479), 10(1), 293-303.
- Malagón, D. (2006). *Los suelos de Colombia*. IGAC.
- Márquez-Ferrando, R. (2008). *Las comunidades de aves y reptiles del corredor verde del Guadiamar después del vertido minero de Aznalcóllar* (Doctoral dissertation, Universidad de Granada).
- Marschner, H. (1986). *Mineral nutrition of higher plants*. Second edition. Academic Press, London. 889 p.
- Martínez-Ruiz, C., & Fernández-Santos, B. (2001). Papel de la hidrosiembra en la revegetación de escombreras mineras. *Informes de la Construcción*, 53, 27-37.
- Martínez, Z. & González, M. (2017). Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El Alacrán, Colombia. *Temas agrarios*, 22(2), 21-31.
- Mejía-Tobón, A. (2010). *Aves de las ciénagas de Córdoba*. Colombia Diversidad Biotica IX Ciénagas de Córdoba: Biodiversidad-ecología y manejo ambiental. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia y Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge, CVS. Bogotá, 399-416.
- Mendes-Filho, P. F., Vasconcellos, R. L. F., De Paula, A. M., & Cardoso, E. J. B. N. (2010). Evaluating the potential of forest species under “microbial management” for the restoration of degraded mining areas. *Water, Air, and Soil Pollution*, 208(1–4), 79–89. doi: 10.1007/s11270-009-0150-5.

- Mendoza, H. B., & Jiménez, & L. (2004). Rubiaceae de Colombia. Guía ilustrada de géneros. Bogotá, Colombia.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Mengel, K. & Kirby, E. A. (2000). Principios de nutrición vegetal. Traducción al español de la 4a edición (1987). Internacional Potash Institute. Basel, Switzerland. 692 p.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución por la cual se establece el listado de las especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica Colombiana que se encuentra en el territorio nacional. <http://www.minambiente.gov.co>
- Mitchell, L. R., Gabrey, S., Marra, P. P., & Erwin, R. M. (2006). Impacts of marsh management on coastal-marsh bird habitats. *Terrestrial Vertebrates of Tidal Marshes: Evolution, Ecology, and Conservation*.
- Mitchell, M. S., Reynolds-Hogland, M. J., Smith, M. L., Wood, P. B., Beebe, J. A., Keyser, P. D., ... & White Jr, D. (2008). Projected long-term response of Southeastern birds to forest management. *Forest ecology and management*, 256(11), 1884-1896.
- Naranjo, L. G. & Amaya, J. D. (2009). Plan Nacional de las especies migratorias: diagnóstico e identificación de acciones para la conservación y el manejo sostenible de las especies migratorias de la biodiversidad en Colombia. Primera Edición.
- Neate-Clegg, M. H., Horns, J. J., Adler, F. R., Aytakin, M. Ç. K., & Şekercioğlu, Ç. H. (2020). Monitoring the world's bird populations with community science data. *Biological Conservation*, 248, 108653.
- Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019.

- Nieto-Orellana, A. V., & Silva-Alemán, C. F. (2012). Influencia de la alteración de hábitat en el uso de recursos florísticos por el ensamble de colibríes en bosques altoandinos del sur del Ecuador (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2015). Suelos y biodiversidad.
- Osorio, N. W. (2014). Manejo de nutrientes en suelos del Trópico. Segunda edición. Editorial L. Vieco S.A.S. Medellín. Colombia. 416 p.
- Ottenhof, C., Faz, Á., Arocena, J., Nierop, K., Verstraten, J., & van Mourik, J. (2007). Soil organic matter from pioner species and its implications to phytostabilization of mined sites in the Sierra de Cartagena (Spain). *Chemosphere*, 69, 1341-1350.
- Page, A. L., Miller, R. H. & Keeney, D. R. (1982). Method of soil analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties. ASA, SSSA. Madison, WI, USA.
- Peet, R. K. (1992). Community structure and ecosystem function. 103- 151. In Glen.Lewin, Peet, R.K. and T.T. Veblen (eds). Plant succession. Theory and prediction. Chapman and Hall. London. UK. 352 p.
- Pérez, A., Céspedes, C., Almonte, I., Sotomayor Ramírez, D., Cruz, C. E., & Núñez, P. A. (2012). Evaluación de la calidad del suelo explotado para la minería después de diferentes sistemas de manejo. *Terra Latinoamericana*, 30(3), 201-211.
- Pregitzer C. C., Bailey, J. K. & Schweitzer, J. A. (2013). Genetic by environment interactions affect plant-soil linkages. *Ecology and evolution* 3: 2322-2333.
- Ramírez-Moreno, G. (2019). Afectación del patrimonio natural por la minería mecanizada de oro y platino al cielo abierto, en áreas de terrazas y colinas bajas del municipio de Condoto, distrito minero del San Juan-Chocó (Tesis de maestría). Universidad Nacional De Colombia. Facultad de Ciencias.

Departamento de Biología-Instituto De Ciencias Naturales. Posgrado En Biología. Bogotá, Colombia.

- Rangel-Ch., J. O., Cortés, D. & Carvajal-C, J. E. (2012). La Biodiversidad de Municipios de la región Caribe de Colombia. En: J.O. Rangel-Ch., J. Aguirre-C. & C.L. Rodríguez (eds). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales. 713 pp. Bogotá D. C., Colombia.
- Remsen, J. V., Areta, Jr., J. I., Bonaccorso, E., Claramunt, S., Jaramillo, A., Pacheco, J. F., Ribas, C., Robbins, M. B., Stiles, F. G., Stotz, D. F. & Zimmer, K. J. (2018). A classification of the bird species of South America. American Ornithological Society.
- Rengel-Salazar, J. L., Enríquez, P. L., & Sántiz-López, E. C. (2009). Variación de la diversidad de aves de sotobosque en el Parque Nacional Lagos de Montebello, Chiapas, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 25(3), 479-495.
- Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revista de Iniciación Científica*, 4, 101-105.
- Roberts, J. A., Daniels W. L., Bell, J. C. & Burger, J. A. (1988). Early Stages of Mine Soil Genesis in a Southwest Virginia Spoil Lithosequence. *Soil Science Society America Journal*, 52, 716-723.
- Robinson, R. A., & Sutherland, W. J. (2002). Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *Journal of applied Ecology*, 39(1), 157-176.
- Römheld, V. & Nikolic, M. (2007). Iron, 329-350 pp. In: BARKER A, PILBEAM D (eds) *Handbook of Plant Nutrition*. CRC Press. Taylor & Francis Group, New York, EU.
- Saavedra-Romero, L. L., Alvarado-Rosales, D., Martínez-Trinidad, T. & Hernández-de la Rosa, P. (2020). Propiedades físicas y químicas del suelo urbano

del Bosque San Juan Aragón, Ciudad de México. *Terra Latinoamericana* 38: 529-540.

Saggar, S., & Bolan, N. (2003). Gaseous emissions of nitrogen from grazed pastures: processes, measurements and modeling, environmental implications, and mitigation. *Advances in Agronomy* 84, 37-102.

Salas-Correa, Á. D., & Mancera-Rodríguez, N. J. (2018). Relaciones entre la diversidad de aves y la estructura de vegetación en cuatro etapas sucesionales de bosque secundario, Antioquia Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 519–529.

Sánchez-Espinosa, D. N. (2010). Bases para la rehabilitación ambiental y paisajística de los pasivos ambientales mineros en el distrito de Hualgayoc, Cajamarca, Perú. (Doctoral dissertation, Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca. Facultad de Forestal y Agronomía. Departamento Forestal).

Sánchez-Villaluenga, C. (2015). Evolución de la calidad del suelo, disponibilidad de metales pesados y vegetación en un depósito minero de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión tras su rehabilitación mediante fitoestabilización asistida (Trabajo de grado) Universidad Politécnica De Cartagena. Escuela Técnica Superior De Ingeniería Agronómica. Cartagena. España.

Sanchez, C. (2006) Phosphorus, 51-90 pp. In: BARKER A, PILBEAM D (eds) *Handbook of plant nutrition*. CRC Press. Taylor & Francis Group, New York, US.

Sandoval, F. M., Bond, J. J., Power, J. F. & Willis, W. O. (1973). Lignite mine spoils in the Northern Great Plains: Characteristics and potential for reclamation. *Restoration and Applied Technology Symposium on Mined-Land Reclamation*, Pittsburgh, PA. pp. 117-133.

- Santiago, L. S., Schuur, E. A. G. & Silvera, K. (2005). Nutrient cycling and plant-soil feedbacks along a precipitation gradient in lowland Panama. *Journal of Tropical Ecology* 21(4): 461–470.
- Santiago-Mejía, Blanca E., Martínez-Menez, Mario R., Rubio-Granados, Erasmo, Vaquera-Huerta, Humberto, & Sánchez-Escudero, Julio. (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 15(2), 275-288.
- Sekercioglu, C.H. (2006). Increasing awareness of avian ecological function. *Trends Ecol. Evol.* 21: 464–471.
- Simberloff, D. & Dayan, T. (1991). The guild concept and structure of ecological communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 22: 115-143.
- Skousen, J., Hoover, S., Owens, K. & Sencindiver, J. (1998). Physical Properties of Minessoils in West Virginia and Their Influence on Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Quality*, 27, 633-639.
- Society for Ecological Restoration International and IUCN Commission on Ecosystem Management. (2004). *Ecological restoration, a means of conserving biodiversity and sustaining livelihoods*. Gland, Switzerland:Tucson, Arizona, USA and IUCN, pp. 1–8.
- Šourková, M, Frouz, J. & Šantrůčková, H. (2005). Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). *Geoderma* 124: 203-214.
- Stiles, F. G., & Rosselli, L. (1998). Inventario de las aves de un bosque altoandino: comparación de dos métodos. *Caldasia*, 29-43.
- Stotz, D. F., Fitzpatrick, J. W., Parker III, T. A., & Moskovits, D. K. (1996). *Neotropical birds: ecology and conservation*. University of Chicago Press.

- Stratford, J., & Sekercioglu, C. H. (2015). Birds in Forest Ecosystems. In R. Corlett, K. Peh, & Y. Bergero (Eds.), *Handbook of Forest Ecology* (pp. 281–296). Routledge Press.
- UICN. (2020). The IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org>.
- Van der Hammen, T. (1989). Historia de los bosques montanos del norte de los Andes. En las plantas leñosas: evolución y distribución desde el Terciario (págs. 109-114). Springer, Viena.
- Vanbergen, A.J., Woodcock, B.A., Watt, A.D. & Niemela, J. (2005). Effect of land-use heterogeneity on carabid communities at the landscape scale. *Ecography* 28, 3–16.
- Velásquez-Valencia, A., Ricaurte, LF., Lara, F., Cruz, EJ., Tenorio, GA. & Correa M. (2005). Lista anotada de las aves de los humedales de la parte alta del departamento de Caquetá. *Memorias: Manejo de Fauna Silvestre en Amazonia y Latinoamérica; Iquitos, Perú.* pp. 320-9.
- Villegas, M., & Garitano-Zavala, A. (2008). Las comunidades de aves como indicadores ecológicos para programas de monitoreo ambiental en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 43(2), 146-153.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (Fifteenth edition, global edition). Harlow London New York NY: Pearson Prentice Hall.
- Wheeler, C. T. & Miller, I. M. (1990). Current and potential uses of actinorhizal plants in Europe. pp. 365-389. In: C. R. Schwintzer and J. D. Tjepkema (eds.). *The biology of frankia and actinorhizal plants*. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Whelan C. J., Wenny, D. G. & Marquis, R. J. (2008). Ecosystem Services Provided by Birds. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134: 25-60.

- Yamaura, Y., Andrew Royle, J., Kuboi, K., Tada, T., Ikeno, S., & Makino, S. I. (2011). Modelling community dynamics based on species-level abundance models from detection/nondetection data. *Journal of applied ecology*, 48(1), 67-75.
- Zapata-Hernández, R. (2004). *Química de la acidez del suelo*. Medellín: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/1735/1/9583367125.1.pdf>
- Ziska, L. H., Bradley, B. A., Wallace, R. D., Barger, C. T., LaForest, J. H., Choudhury, R. A., ... & Vega, F. E. (2018). Climate change, carbon dioxide, and pest biology, managing the future: coffee as a case study. *Agronomy*, 8(8), 152.
- Zornoza, R., Faz, Á., Carmona, D., Acosta, J., Martínez-Martínez, S., & Vreng, A. (2013). Carbon mineralization, microbial activity and metal dynamics in tailing ponds amended with pig slurry and marble waste. *Chemosphere*, 90, 2606-2613.

ANEXOS

Anexo 1. Listado de especies de aves con sus categorías de amenaza

Orden	Familia	Especie	Nombre común	CATEGORÍA DE AMENAZA				Tipo de migración
				UICN	MADS	Libro rojo	CITES	
Anseriformes	Anatidae	<i>Dendrocygna autumnalis</i>	Pisingo	LC	No	LC	Apéndice III	Loc
Apodiformes	Trochilidae	<i>Anthracothorax nigricollis</i>	Mango pechinegro	LC	No	LC	Apéndice II	Ninguna
Caprimulgiformes	Caprimulgidae	<i>Nyctidromus albicollis</i>	Bujío	LC	No	LC	No	Ninguna
Cathartiformes	Cathartidae	<i>Cathartes aura</i>	Guala cabecirroja	LC	No	LC	No	Lat - Trans
		<i>Cathartes burrovianus</i>	Guala sabanera	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Coragyps atratus</i>	Gallinazo negro	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Columbina minuta</i>	Tortolita diminuta	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Columbina talpacoti</i>	Tortolita rojiza	LC	No	LC	No	Ninguna
Columbiformes	Columbidae	<i>Leptotila verreauxi</i>	Tórtola colipinta	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Patagioenas cayennensis</i>	Paloma morada	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Zenaida auriculata</i>	Torcaza naguiblanca	LC	No	LC	No	Ninguna
Cuculiformes	Cuculidae	<i>Crotophaga ani</i>	Garrapate ro piquilliso	LC	No	LC	No	Ninguna
Falconiformes	Falconidae	<i>Caracara cheriway</i>	Caracara moñudo	LC	No	LC	II	Ninguna
		<i>Milvago chimachima</i>	Pigua	LC	No	LC	Apéndice II	Ninguna
	Odontophoridae	<i>Colinus cristatus</i>	Perdiz chilindra	LC	No	LC	No	Ninguna
Galliformes	Cracidae	<i>Ortalis garrula</i>	Guachara ca caribeña	LC	No	LC	No	Ninguna
	Icteridae	<i>Psarocolius decumanus</i>	Oropéndola crestada	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Icterus chrysater</i>	Icteridae	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Nemosia pileata</i>	Trinadora pechiblanco	LC	No	LC	No	Ninguna
Passeriformes	Thraupidae	<i>Ramphocelus dimidiatus</i>	Toche pico-de- plata	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Sporophila intermedia</i>	Espiguero gris	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Sporophila minuta</i>	Espiguero ladrillo	LC	No	LC	No	Ninguna

		<i>Thraupis palmarum</i>	Azulejo palmero	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Coereba flaveola</i>	Mielero común	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Volatinia jacarina</i>	Espiguero saltarín	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Elaenia flavogaster</i>	Elaenia copetona	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Myiozetetes cayanensis</i>	Suelda crestinegra	LC	No	LC	No	Ninguna
	Tyrannidae	<i>Camptostoma obsoletum</i>	Tiranuelo silbador	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Todirostrum cinereum</i>	Espatulilla común	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Tyrannus melancholicus</i>	Sirirí común	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Ardea alba</i>	Garza real	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Bubulcus ibis</i>	Garzita bueyera	LC	No	LC	Apéndice III	Ninguna
	Ardeidae	<i>Egretta thula</i>	Garza patiamarilla	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Nycticorax nycticorax</i>	Guaco común	LC	No	LC	No	Ninguna
		<i>Ara macao</i>	Guacamaya roja	LC	No	LC	Apéndice I	Ninguna
	Psittaciformes	<i>Brotogeris jugularis</i>	Periquito bronceado	LC	No	LC	Apéndice II	Ninguna

Abundancia plantas Ca/K	2,0000 11,7000	1,7321 8,8221	-0,5000	0,2500	-0,5774	0,6667	3	4,3750	-3,7500	0,7667	-0,0667
Abundancia plantas Mg/K	2,0000 18,2333	1,7321 15,4312	-0,9915	0,9830	-7,6060	0,0832	3	4,2775	-0,1947	21,8000	-5,0500
Abundancia plantas (Ca+Mg)/K	2,0000 29,9667	1,7321 23,7769	-0,8325	0,6930	-1,5025	0,3739	3	3,7037	-0,0934	33,0667	-7,4167
Abundancia plantas Ca	2,0000 24,6667	1,7321 16,5270	-0,9130	0,8336	-2,2380	0,2675	3	3,9930	-0,0665	55,0333	-12,5333
Abundancia plantas Mg	2,0000 38,0333	1,7321 26,0504	-0,9991	0,9982	-23,5889	0,0270	3	4,5828	-0,1047	43,7333	-9,5333
Abundancia plantas K	2,0000 2,5333	1,7321 0,8505	-0,8688	0,7548	-1,7544	0,3298	3	4,1970	-0,0578	64,1667	-13,0667
Abundancia plantas Na	2,0000 0,6333	1,7321 0,3512	0,9843	0,9689	5,5811	0,1129	3	-3,0783	2,0046	1,5667	0,4833
Abundancia plantas	2,0000	1,7321	-0,0822	0,0068	-0,0825	0,9476	3	2,2568	-0,4054	0,6667	-0,0167

Especies	102,0000	1,0000	0,8660	0,7500	1,7321	0,3333	3	99,6250	3,7500	-19,7667	0,2000
Ca/K	11,7000	8,8221									
Especies	102,0000	1,0000	-0,1304	0,0170	-0,1315	0,9168	3	102,1729	-0,0148	129,0000	-1,1500
Mg/K	18,2333	15,4312									
Especies	102,0000	1,0000	-0,5541	0,3070	-0,6656	0,6261	3	102,6547	-0,0359	890,3333	-8,5500
(Ca+Mg)/K	29,9667	23,7769									
Especies	102,0000	1,0000	-0,4080	0,1664	-0,4468	0,7325	3	102,5142	-0,0172	1019,3667	-9,7000
Ca	24,6667	16,5270									
Especies	102,0000	1,0000	0,0424	0,0018	0,0424	0,9730	3	101,9368	0,0026	-46,7333	0,7000
Mg	38,0333	26,0504									
Especies	102,0000	1,0000	-0,4952	0,2452	-0,5700	0,6702	3	102,7230	-0,0190	1353,8333	-12,9000
K	2,5333	0,8505									
Especies	102,0000	1,0000	0,1764	0,0311	0,1792	0,8871	3	101,4747	0,2074	-12,7667	0,1500
Na	0,6333	0,3512									
Especies	102,0000	1,0000	0,9966	0,9932	12,1244	0,0524	3	100,2027	2,8378	-35,0667	0,3500

Anexo 4. Resultados estadísticos de la correlación de Pearson entre las especies de plantas y la abundancia de las aves. En color rojo se muestran aquellas variables que presentaron relación significativa.

Correlations

Marked correlations are significant at $p < .05000$

Var. X & Var. Y	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	r ²	t	p	N	Constant dep: Y	Slope dep: Y	Constant dep: X	Slope dep: X
Especies	106,0000	3,3166									
Abundancia aves	158,7273	119,7924	0,6134	0,3762	2,3299	0,0448	11	-2189,6545	22,1545	103,3044	0,0170

Anexo 5. Resultados estadísticos de la correlación de Pearson entre la abundancia de las plantas y la abundancia de las aves.

Correlations

Marked correlations are significant at $p < .05000$

Var. X & Var. Y	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	r²	t	p	N	Constant dep: Y	Slope dep: Y	Constant dep: X	Slope dep: X
Abundancia plantas	1,5455	0,9342									
Abundancia aves	158,7273	119,7924	-0,1513	0,0229	-0,4593	0,6569	11	188,7188	-19,4063	1,7328	-0,0012