



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



ANÁLISIS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL Y LA OFERTA HÍDRICA A ESCALA LOCAL: ESTUDIOS DE CASO EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA, COLOMBIA

TEOBALDIS MERCADO FERNANDEZ
PhD. en Hidrociencias

LEONARDO GÓNIMA GÓNIMA
Dr. rer. nat. en Meteorología

ÁLVARO JOSÉ ZABALETA ORTEGA
Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
MONTERÍA, CÓRDOBA
MAYO DE 2021



Autores:

Teobaldis Mercado Fernández:

Ingeniero Agrónomo con especialización en Manejo de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba, Colombia en 1995. Titulado como Magister y Doctor en Hidrociencias en el Colegio de Postgraduados, México en 2000 y 2012 respectivamente. Docente de planta de la Universidad de Córdoba desde 1996. Investigador en las temáticas de uso eficiente del agua y la energía, cambio climático y recurso hídrico. Ofrece los cursos Riegos y Drenajes, Climatología, Hidrología, Manejo de Cuencas Hidrográficas e Hidrociencias. Miembro de los grupos de investigaciones Aguas, Química Aplicada y Ambiental; Cultivos Tropicales de Clima Cálido y Centro de Investigación Piscícola de la Universidad de Córdoba CINPIC.

Leonardo Gónima Gónima:

Físico de la Universidad del Valle, obtuvo su título de magister en Meteorología y Geofísica en la Humboldt-Universität zu Berlín, Alemania, en el año 1983. Luego, en 1987 se tituló como doctor en Meteorología de esa misma universidad. Desde entonces ha realizado alrededor de 14 estancias postdoctorales en Teledetección Ambiental, Sensores Hiperespectrales, Climatología, Modelación por medio de datos satelitarios, Cartografía Ambiental, Física Espacial, entre otros. Actualmente se desempeña como docente de tiempo completo del programa de Física de la Universidad de Córdoba en las líneas de Física de la Atmósfera, Física Atómica, Óptica, Meteorología y Ciencias de la Tierra y Medioambientales.

Álvaro Zabaleta Ortega:

Ingeniero Ambiental de la Universidad de Córdoba en 2017. Realizó cursos de profundización referentes a cambio climático y recurso hídrico. Actualmente es candidato a Magister en el Programa de Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional IPN, México.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

JAIRO MIGUEL TORRES OVIEDO

Rector

2021 – 2026



**CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LOS VALLES SINÚ Y DEL SAN
JORGE**

ORLANDO MEDINA MARSIGLIA

Director General

2020 -2023



**FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DE LAS REGIONES
COLOMBIANAS - FUNSOSTENIBLE**

JOHANA VENEGAS SALCEDO

Directora General

Análisis del calentamiento global y la oferta hídrica a escala local: Estudios de caso en el departamento de Córdoba, Colombia.

ISBN: 978-958-5104-28-0

Primera edición: 2021.

Universidad de Córdoba

Carrera 6 No 77 – 305. Montería, Córdoba, Colombia.

Teobaldis Mercado Fernandez: tmercado@correo.unicordoba.edu.co

Leonardo Gónima Gónima: lgonima@correo.unicordoba.edu.co

Álvaro Zabaleta Ortega: azabaletao1900@alumno.ipn.mx

Diseño: Jesús García Gallego. Ingeniero Ambiental.

Foto de contracubierta: Hermes Cogollo. Funsostenible.



TABLA DE CONTENIDO

PÁG.

1.	INTRODUCCIÓN	11
2.	CONCEPTOS BASICOS	15
2.2.	Efecto invernadero	17
2.4.	Variabilidad climática	19
2.5.	El ciclo hidrológico	20
3.	ANÁLISIS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL	21
3.1.	Modelo utilizado para la identificación del calentamiento global a escala local	21
3.2.	Ubicación de la zona de estudio	24
3.3.	Descripción climática	25
3.4.	Identificación del calentamiento global	29
3.5.	Influencia del fenómeno ENSO	39
4.	ANÁLISIS DE LA OFERTA HÍDRICA	42
4.1.	Cálculo de la Escorrentía por el método del número de curva.....	42
4.1.1.	Grupo hidrológico de suelo (HGS)	44
4.1.2.	Determinación de la cobertura vegetal del terreno y condición hidrológica.....	44
4.2.	Microcuenca Arroyo Carolina (Planeta Rica)	48
4.3.	Microcuenca del río Canalete.....	54
4.4.	Zona de Sabana de Córdoba.....	63
5.	RECOMENDACIONES PARA LA RECUPERACION Y MANEJO DE LA OFERTA HÍDRICA.....	67
a)	Restauración de bosques de galería en las corrientes de las cuencas.....	67
b)	Reforestación en zonas de altas escorrentías en las cuencas	68
c)	Cosecha de agua lluvia para manejo de escorrentía.....	68
d)	Buenas prácticas agropecuarias	68
6.	BIBLIOGRAFÍA	69
	ANEXO.....	76

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Temperatura media terrestre (1900-2000), cambios de nivel del mar (1900-2010) y cubierta de nieve del hemisferio Norte entre 1920 y 2010, según (IPCC, 2007). Línea roja: tendencia estadística.....	16
Figura 2. Balance anual de energía del planeta Tierra (Trenberth et al., 2009).	17
Figura 3. Variación histórica de los principales GEI en la atmósfera (IPCC, 2007).....	18
Figura 4. El ciclo hidrológico (https://s1.significados.com/foto/evaporacion-3.png).	21
Figura 5. Modelo metodológico para identificación de calentamiento global a escala local (Pérez, 2014).	22
Figura 6. Ubicación de la zona de estudio: cuenca media y baja del río Sinú. Área de influencia climática relacionada con las estaciones meteorológicas (color verde) 1: La Doctrina, 2: Lorica, 3: El Salado, 4: Turipaná, 5: Unicórdoba, 6: Galán y 7: Planeta Rica.....	25
Figura 7. Comportamiento mensual de la temperatura del aire T (promedio mensual multianual), para cada de las estaciones meteorológicas seleccionadas y la zona integrada (1975-2014).	27
Figura 8. Comportamiento mensual de la precipitación pp (promedio mensual multianual), para cada de las estaciones meteorológicas seleccionadas con datos completos de pp y para la zona integrada (promedio ponderado entre estaciones), entre 1975 y 2014.	28
Figura 9. Comportamiento interanual de T (estaciones meteorológicas de la cuenca media y baja del río Sinú: 1975-2014). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay.	30
Figura 10. Comportamiento interanual de d_v (estaciones meteorológicas de la cuenca media y baja del río Sinú: 1975-2014). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay.	31
Figura 11. Comportamiento interanual de pp (estaciones meteorológicas con datos completos de la cuenca media y baja del río Sinú: 1975-2014). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay.....	32
Figura 12. Comparación del comportamiento de T (promedios anuales) en condiciones climáticas actuales bajo la influencia del calentamiento global (línea roja) y la simulación realizada suponiendo la inexistencia de este fenómeno (línea azul), para todas las estaciones meteorológicas seleccionadas (1975 – 2014).	40
Figura 13. Esquema para determinación de la cobertura vegetal del terreno (Zabaleta, 2017)...	47
Figura 14. Esquema para el cálculo de escorrentías superficiales (Zabaleta, 2017).	48
Figura 15. Comportamiento interanual de T, d_v y pp (estación meteorológica de Planeta Rica: 1975-2014). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay.....	49
Figura 16. Comparación entre la simulación estadística del comportamiento de T (promedios anuales) en condiciones de inexistencia del calentamiento global (línea azul: simulación estadística) y en condiciones actuales de presencia de este fenómeno (línea roja). Estación meteorológica de Planeta Rica (1975-2014).....	51
Figura 17. Mapa del Número de Curva calculado CN para la microcuenca Arroyo Carolina.	53

Figura 18. Temperatura promedio mensual multianual T y precipitación promedio mensual multianual pp (estación meteorológica Cristo Rey: 1978-2015).	55
Figura 19. Comportamiento interanual de T, d_v y pp (estación meteorológica Cristo Rey: 1978-2015). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay.	56
Figura 20. Mapa del Número de Curva calculado CN para la microcuenca del río Canalete.	60
Figura 21. Escorrentía promedio anual, Zona de Sabana de Córdoba: municipios de Planeta Rica, Pueblo Nuevo, Sahagún y Chinú (Zabaleta, 2017).	65

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Estadísticas para la definición de períodos climáticos en zona integrada de la cuenca media y baja del río Sinú entre 1975 y 2014 (p: valor p, t: distribución t de Student).	26
Tabla 2. Promedio ponderado de T y valores acumulados de pp, calculados para cada uno de los períodos climáticos de la zona integrada de la cuenca media y baja de río Sinú (1975-2014). ...	29
Tabla 3. Incrementos multianuales de la temperatura del aire ΔT ($^{\circ}\text{C}$), densidad de vapor de agua atmosférico Δd_v (g/m^3) y precipitación Δpp (mm), calculados utilizando los valores de los filtros (Savitzky-Golay), correspondientes a cada una de las líneas de color rojo de las Figuras 9, 10 y 11 (estaciones meteorológicas de la cuenca media y baja del río Sinú: 1975-2014), DI: datos incompletos.	33
Tabla 4. Incrementos multianuales de la temperatura del aire ΔT ($^{\circ}\text{C}$), densidad de vapor de agua atmosférico Δd_v (g/m^3) y precipitación Δpp (mm), calculados utilizando los valores del filtro (línea roja: Figuras 9, 10 y 11) correspondientes a los períodos de tiempo 1: 1975-2009 y 2: 2010-2014, DI: datos incompletos.	34
Tabla 5. Incrementos mensuales multianuales de la temperatura del aire ΔT ($^{\circ}\text{C}$) calculados utilizando los valores del filtro de Savitzky-Golay (línea roja: Figura 9), correspondientes a los períodos de tiempo 1.: 1975-2009 y 2.: 2010-2014 para las estaciones meteorológicas seleccionadas.	35
Tabla 6. Incrementos mensuales multianuales de la densidad de vapor de agua atmosférico Δd_v (g/m^3) calculados utilizando los valores del filtro de Savitzky-Golay (línea roja: Figura 10), correspondientes a los períodos de tiempo 1.: 1975-2009 y 2.: 2010-2014 para las estaciones meteorológicas seleccionadas.	36
Tabla 7. Incrementos de los promedios mensuales multianuales de la precipitación Δpp (mm), calculados utilizando los valores del filtro (línea roja: Figura 11) correspondientes a los períodos de tiempo 1.: 1975-2009 y 2.: 2010-2014, para las estaciones meteorológicas seleccionadas con datos completos.	38
Tabla 8. Precipitación acumulada para definición de AMC (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).	43
Tabla 9. Incrementos de T, d_v y pp (estación meteorológica de Planeta Rica) calculados por medio del filtro Savitzky-Golay (Figura 15: línea roja) para diferentes periodos de tiempo.	50

Tabla 10. Concordancia en porcentaje de los máximos y mínimos de T, d_v y pp (estación meteorológica Planeta Rica: 1975-2014) con los eventos El Niño y La Niña respectivamente...	51
Tabla 11. Áreas en hectáreas con escorrentía en 24 horas a diferentes períodos de retorno. Microcuenca Arroyo Carolina.	54
Tabla 12. Resultados de la aplicación del método Gumbel a la predicción de eventos máximos de pp_{24} a diferentes períodos de retorno (estaciones meteorológicas de Cristo Rey y pluviométrica de Jaramagal, Santa Lucía y Canalete: 1978-2015).....	59
Tabla 13. Áreas de escorrentía a diferentes períodos de retorno, microcuenca del río Canalete (Tr: tiempo de retorno).....	61
Tabla 14. Áreas de escorrentía mensuales medias multianuales, microcuenca del río Canalete.	62
Tabla 15. Estimación de la precipitación superficial a diferentes periodos de retorno (estaciones meteorológicas de Centro Alegre, Planeta Rica, Colomboy y Sahagún, y pluviométricas de Cintura y Chinú).	64

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Estimación del número de Curva (CN).....	76

*Estudiosos del Clima e Hidrociencias... Enseñemos
que aún hay tiempo de actuar.*

Teobaldis Mercado Fernández

PRÓLOGO

Este libro es el resultado de 12 años de estudio y análisis del fenómeno del calentamiento global en lugares específicos del Departamento de Córdoba (Colombia), representados por la ejecución de diversos proyectos de investigación aplicada y trabajos de grado a nivel de pregrado y maestría. Los resultados aquí discutidos se pueden considerar como una contribución al conocimiento y análisis hidroclimático de casos representativos del Departamento de Córdoba, como la Cuenca media y baja del río Sinú, la Microcuenca Arroyo Carolina, la Microcuenca del río Canalete y la Zona de Sabana. Con este libro se pone a disposición de la comunidad en general, un insumo académico para la comprensión del fenómeno del calentamiento global y su influencia sobre la oferta hídrica de las zonas de estudio seleccionadas.

Luego de una breve exposición sobre los principales conceptos que determinan actualmente el comportamiento del clima a nivel global, se procede a realizar un análisis climático detallado de la Cuenca media y baja del río Sinú, característica en general, del régimen climático de todos los casos de estudio, con el fin de identificar la presencia del fenómeno del calentamiento global. Al final de esta parte, se dedica especial atención a la discusión sobre la estrecha relación del calentamiento global con el fenómeno ENSO (El Niño y La Niña). La segunda parte de este libro, se ocupa del análisis pormenorizado de la oferta hídrica de las microcuencas del Arroyo Carolina y río Canalete, y la Zona de Sabana de Córdoba, basado en la determinación de la escorrentía superficial a partir del cálculo del número de curva y la influencia que tiene la cobertura vegetal y el uso del suelo sobre este, previa identificación de la existencia del calentamiento global en cada uno de estos casos.

Este libro se podría considerar como una referencia y una guía práctica para aplicaciones metodológicas futuras, que permitan generar nuevas ideas y conceptos para el estudio y análisis futuro del fenómeno del calentamiento global a nivel local y aún regional.

Los autores

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de calentamiento y enfriamiento de la superficie terrestre ocurren de manera natural debido principalmente a la cantidad de radiación solar incidente en la superficie de la Tierra, variaciones en la composición de la atmósfera y en el uso del suelo (WMO, 2011). Estos procesos han experimentado alteraciones observables desde hace ya varias décadas, representadas en un aumento anómalo de la temperatura global como resultado de la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, que al absorber la mayor parte de la energía infrarroja térmica emitida por el Sol y la Tierra, producen cambios en el clima global (Posada, 2012). Es así como el calentamiento climático global del Planeta es una realidad, no sólo evidenciado en el aumento de la temperatura promedio del aire y el océano, sino también en el deshielo de nieves y el aumento del nivel del mar (IPCC, 2007).

En este sentido, GEI como el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3) y clorofluorocarbonos (CFC) (Echeverri, 2006; Pérez y Gónima, 2014; Larios, 2008), desempeñan un papel muy importante en la actual alteración del clima a nivel mundial. De acuerdo con registros históricos, la concentración de CO_2 ha pasado de 280 ppm en la era preindustrial a valores que superan actualmente los 400 ppm (OMM, 2017). Por otra parte, la presencia de metano aumentó de 715 a 1774 ppm, la concentración de NO_2 varió de 270 a 319 ppm, estos valores representan el aumento de las concentraciones desde 1750 a 2005 (IPCC, 2007; Larios, 2008). A esta situación hay que añadirle el hecho de que es el vapor de agua el gas que más contribuye al efecto invernadero por su abundancia en la atmósfera, el cual debido a su gran variabilidad espacial y temporal muestra un efecto diferenciado sobre el calentamiento global a escala local (Zveryaev y Allan, 2005; Echeverri, 2006; IPCC, 2007; Larios, 2008; Gui et al., 2017). De acuerdo a lo anterior, la temperatura mundial para el periodo comprendido entre 1995 a 2006 presenta una tendencia lineal de incremento medio de $0.74\text{ }^\circ\text{C}$, resultando en el aumento promedio de 3.1 mm/año en el nivel del mar producido por el deshielo de glaciares, derretidos como resultado del incremento gradual principalmente de la temperatura del aire y en menor grado de la dilatación térmica del hielo marino, lo que ha causado su disminución a razón del 7.4% por década (IPCC, 2007).

El fenómeno del calentamiento global afecta fuertemente al ciclo hidrológico, entendido este último como el flujo del agua a través de la atmósfera en sus distintas fases. Es así como la precipitación en la actualidad, no solo depende de la variabilidad climática sino también cada vez más de los cambios en el clima producidos por el calentamiento global (IPCC, 2007). Al calentarse continuamente la atmósfera, se producen variaciones en el régimen de lluvias que afectan negativamente la oferta hídrica de un lugar determinado, pudiéndose presentar sequías y estrés hídrico (Bryson et al., 2008).

Una variable muy importante para el estudio hidroclimático de un lugar es la cobertura vegetal, al ser fundamental en la descripción de los procesos de retención hídrica del suelo, la estabilización de su temperatura y el control en la dinámica de la escorrentía superficial (FAO, 2006). En este sentido, el estado físico de la cobertura vegetal se convierte en un indicador del calentamiento global dado su rol como regulador de la temperatura del suelo. La insuficiente cobertura vegetal incrementa la absorción de la radiación solar incidente sobre el suelo, provocando un mayor calentamiento de este y al mismo tiempo una mayor evaporación de su contenido de humedad. Es así como la vegetación se convierte en un indicador del grado de afectación de los suelos a la infiltración de agua lluvia, que se refleja en la magnitud de la escorrentía superficial y en consecuencia en la disponibilidad de agua por parte de estos. Este comportamiento de los suelos muestra claramente la relación entre el calentamiento global y la respuesta hidrológica de una zona determinada, la cual se puede describir mediante la estimación de escorrentías y balances hídricos que involucran las variables termodinámicas atmosféricas.

Las consecuencias del calentamiento global para Colombia se reportan en disminuciones de los glaciares entre 0.5 m y 1.0 m de espesor anual, aumentos en el nivel medio del mar de 100 mm y 220 mm para el Caribe y Pacífico respectivamente e incrementos de 0.65 °C y fluctuaciones drásticas del régimen pluviométrico: aumentos y disminuciones (Costa, 2007). Así mismo, en García et al. (2012) se hace un análisis de la vulnerabilidad de los recursos hídricos de Colombia frente a los impactos posibles que se producirán por efecto del cambio climático. A nivel del Departamento de Córdoba, los estudios más significativos en este tema están referidos a los realizados por Pérez y Gónima (2014), que demuestran la existencia del calentamiento global a escala local en la cuenca media y baja del río Sinú. Finalmente, Nobles (2016) reporta amenaza por sequía para el Departamento al aplicar el índice de aridez calculado en 40 estaciones

climatológicas (1970-2012), para la generación de escenarios con el fin de analizar la oferta hídrica, bajo la ocurrencia del fenómeno del calentamiento global a escala local.

Como se mencionó anteriormente, el calentamiento global es la consecuencia de variaciones en el comportamiento de la atmósfera, que a la vez están directamente relacionadas con el tipo y estado de la cobertura vegetal, y del ciclo hidrológico al cual ésta está sometida. Bajo estas condiciones, la dinámica climática actual involucra alteraciones del régimen pluviométrico, que se manifiestan en la cantidad y uniformidad de la disponibilidad de agua en zonas donde la oferta hídrica superficial tiene como aportante principal la precipitación.

A continuación, se presentan algunos trabajos de investigación que analizan los impactos del calentamiento global sobre el recurso hídrico. Krol y Bronstert (2007) usaron el Modelo Semiárido Integrado (SIM) para simular el sistema Hombre-Ambiente sometido a la presión del clima, la disponibilidad hídrica y procesos sociales seleccionados en la zona semiárida del noreste de Brasil, reportando como resultado disminuciones dramáticas en las precipitaciones a un horizonte de 50 años y afectaciones sobre la disponibilidad de agua ante los escenarios actuales de cambio climático provocados por el calentamiento global. Correia et al. (2007) utilizaron los modelos BTA y SSIB en la región amazónica para indagar sobre el impacto de las variaciones climáticas sobre la cobertura del suelo, los resultados mostraron aumentos en la temperatura de 2.0 a 2.8 °C, los cuales han afectado considerablemente la disponibilidad de agua del suelo y la cobertura vegetal. Lentés et al. (2010) modelaron el balance hídrico con base en la distribución de la precipitación y la temperatura, con el fin de analizar la influencia de estas sobre la industria lechera en Honduras bajo diferentes escenarios de cambio climático. Ruiz (2010) modeló el comportamiento de la temperatura, la precipitación y la humedad relativa con horizonte 2011-2100 usando modelos meteorológicos de alta resolución para el territorio colombiano reportando aumento en la temperatura media, disminuciones y aumentos en la precipitación para algunas zonas y aumentos en el nivel del mar. Buytaert et al. (2011) utilizaron el modelo regional PRECIS para evaluar los efectos del cambio climático en el recurso hídrico en los Andes Tropicales, concluyendo que la tendencia más notable es el aumento en la evapotranspiración a causa del incremento en la temperatura promedio del aire.

Al estar la temperatura del aire y la precipitación estrechamente relacionadas con el contenido de vapor de agua de la atmósfera, este último se convierte en un factor descriptor del calentamiento global. Zveryaev y Allan (2005) estudiaron las variaciones de la temperatura y el vapor de agua en función de la dinámica atmosférica y la precipitación en los Trópicos. Dessler et al. (2008) analizaron la relación entre el vapor de agua y el comportamiento de la temperatura entre 2003 y 2008, encontrando que esta aumenta en la medida en que la troposfera y la superficie terrestre se calientan, siendo este proceso más notorio en el trópico Ecuatorial. Sitnov et al. (2017) analizaron el comportamiento del vapor de agua, el ozono y las anomalías de temperatura asociadas con eventos de bloqueo atmosférico en el este de Europa, encontrando que la presencia de vapor de agua en la estratosfera baja debilita la concentración de ozono al ocasionar reacciones químicas atmosféricas. Gui et al. (2017) analizaron el contenido de vapor de agua y la temperatura superficial en China utilizando datos del sensor MODIS, mostrando que un aumento y/o disminución en el contenido de este gas en la atmósfera implica el calentamiento o enfriamiento de la atmósfera, respectivamente.

En Colombia, Ruiz (2010), citando a Gónima (2009), reporta la ocurrencia del calentamiento global local debido a variaciones en la temperatura del aire, la evapotranspiración y el déficit hídrico que difieren con los reportados mediante el uso de modelos regionales aplicados al territorio colombiano. Pabón (2012) analizó el comportamiento de la temperatura del aire en el territorio colombiano para el periodo 1961-1990 mediante el modelo PRECIS aplicado a 1072 estaciones climáticas, prediciendo incrementos en la temperatura del aire de 2 °C a 4 °C entre 2011 y 2100 y variaciones en la distribución y cantidad de las precipitaciones. Posteriormente, Alzate et al. (2015) definieron una metodología para el estudio del cambio climático global y la variabilidad climática en el territorio de las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita en Norte de Santander, con el fin de establecer inicialmente medidas potenciales de adaptación al cambio climático y la variabilidad climática actuales.

Para el Departamento de Córdoba, Palencia et al. (2006) en su Estudio Agroclimático analizaron los registros históricos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa y brillo solar para la descripción del régimen climático y su relación con las actividades agropecuarias del Departamento. Ruíz (2013) reporta a Córdoba como uno de los Departamentos de Colombia con mayor afectación por calentamiento global con aumento promedio de la temperatura del aire de

0.13 °C/década para el periodo 1971-2000, prediciendo al mismo tiempo una disminución de la precipitación de hasta un 35.5 % para el periodo 2011–2100, mientras que Pérez y Gónima (2014) identifican evidencias del calentamiento global local al analizar las tendencias de la densidad de vapor de agua atmosférico y la temperatura del aire para la cuenca media y baja del río Sinú, encontrando correlación entre el aumento de la densidad de vapor y de la temperatura del aire. Estos antecedentes crean la necesidad de estudiar la disponibilidad del recurso hídrico bajo el escenario del calentamiento global, como base científica para el ordenamiento del territorio, adaptación y mitigación de los efectos de dichos fenómenos.

2. CONCEPTOS BASICOS

2.1. Clima

Antes de abordar el análisis del calentamiento global y la oferta hídrica en la zona de estudio (casos), es pertinente aclarar los conceptos de tiempo y clima. El tiempo meteorológico se refiere al comportamiento y evolución de atmósfera sobre un lugar determinado en cortos periodos de tiempo, desde horas hasta 15 días, mientras que el clima se define como el análisis de los valores a largo plazo (promedios) de la temperatura del aire, la humedad relativa, la precipitación, el viento (dirección y velocidad) y la radiación solar principalmente, correspondientes a un período de tiempo, que va desde varios años hasta miles o millones de años. El período mínimo establecido para hablar del clima es de 30 años, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

De acuerdo con la OMM (WMO, 2011), el sistema climático puede definirse entonces como un conjunto interactivo y complejo de variables, factores y procesos, constituido por la atmósfera y la superficie terrestre. Bajo este concepto de sistema climático o simplemente clima, y como aspecto inherente, su alto dinamismo precisa estudiar a fondo algunos de los comportamientos de este con el fin de predecir la ocurrencia de eventos. En tal sentido, el cambio climático puede ser entendido como “un cambio en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos” (IPCC, 2014a). Para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por su sigla en inglés), el cambio climático

se refiere a “un cambio significativo de una condición climática a otra” (US EPA, 2016), otra concepción es “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (United Nations, 1992). La Figura 1 muestra el comportamiento de algunas de las variables globales descriptoras de cambio climático, considerando el calentamiento global (aumento de la temperatura promedio) como el principal causante de los cambios climáticos.

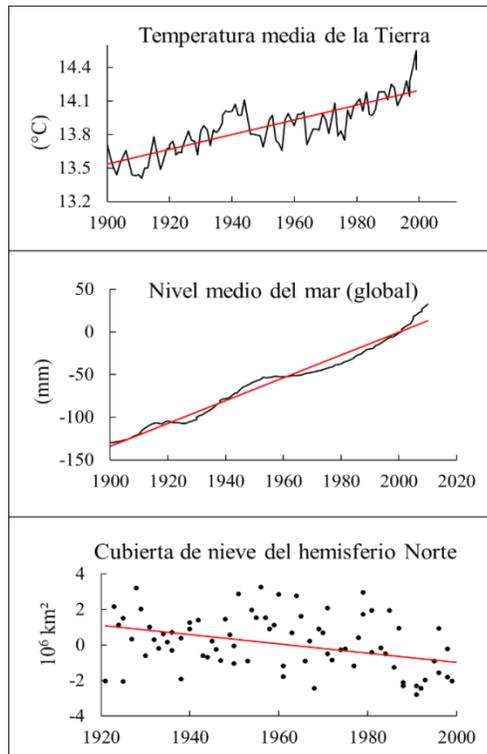


Figura 1. Temperatura media terrestre (1900-2000), cambios de nivel del mar (1900-2010) y cubierta de nieve del hemisferio Norte entre 1920 y 2010, según (IPCC, 2007). Línea roja: tendencia estadística.

En la Figura 1 se puede observar como la temperatura promedio y el nivel del mar del Planeta se han incrementado con el transcurso de los años, mientras que la cubierta de nieve está en retroceso.

2.2. Efecto invernadero

La Tierra, como todo cuerpo, absorbe radiación solar incidente y emite posteriormente radiación en forma de calor. De acuerdo a la Figura 2, al absorber la superficie terrestre 161 W/m^2 provenientes del Sol (radiación de onda corta: flujo de color amarillo), la superficie se calienta y emite radiación térmica (onda larga) en una cantidad de 396 W/m^2 hacia la atmósfera (flujo de color rojo). De estos sólo el 10.1 % (40 W/m^2) atraviesa la atmósfera y sale al espacio, mientras que el resto es absorbida por los gases atmosféricos (356 W/m^2 ó 89.9 %), que luego reemiten en gran medida hacia la superficie terrestre (333 W/m^2). De no existir el efecto invernadero la temperatura promedio del Planeta sería de $-22 \text{ }^\circ\text{C}$ (IPCC, 2007; IDEAM, 2012; Larios, 2008). Por consiguiente, el efecto invernadero puede ser considerado como el fenómeno por el que los gases atmosféricos retienen la energía térmica emitida por la superficie una vez esta ha sido calentada por la radiación solar, proceso fundamental para la existencia de vida en la Tierra.

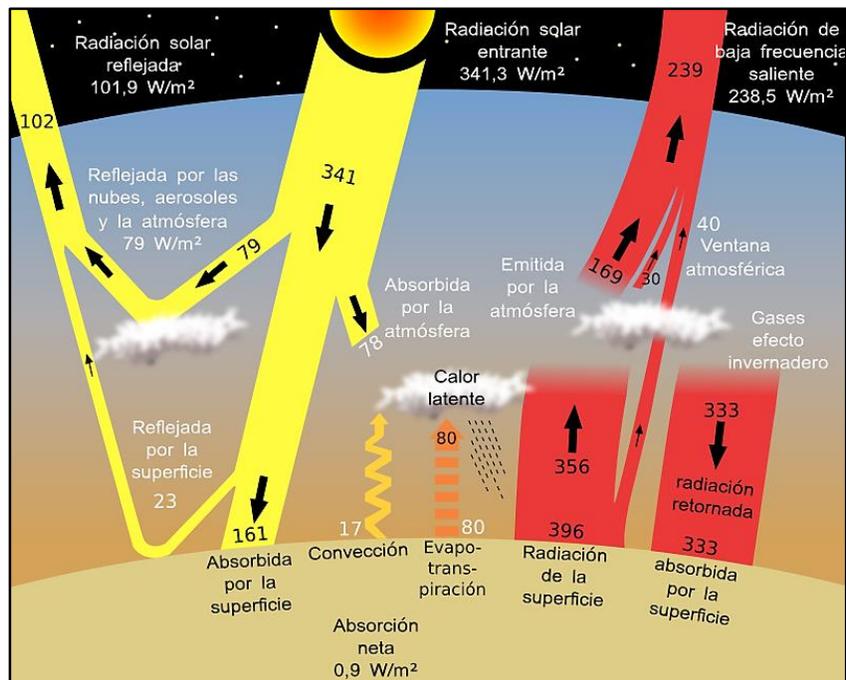


Figura 2. Balance anual de energía del planeta Tierra (Trenberth et al., 2009).

2.3. Gases de efecto invernadero

A partir de la segunda mitad del siglo XVII, el aumento en la concentración de los GEI en la atmósfera, derivados de las actividades humanas, ha provocado el calentamiento de la atmósfera

y con ello cambios sustanciales en el clima (IPCC, 2014a; IPCC, 2014b). La Figura 3 muestra la variación de los principales GEI reconstruída históricamente y a partir de mediciones realizadas desde el siglo XX.

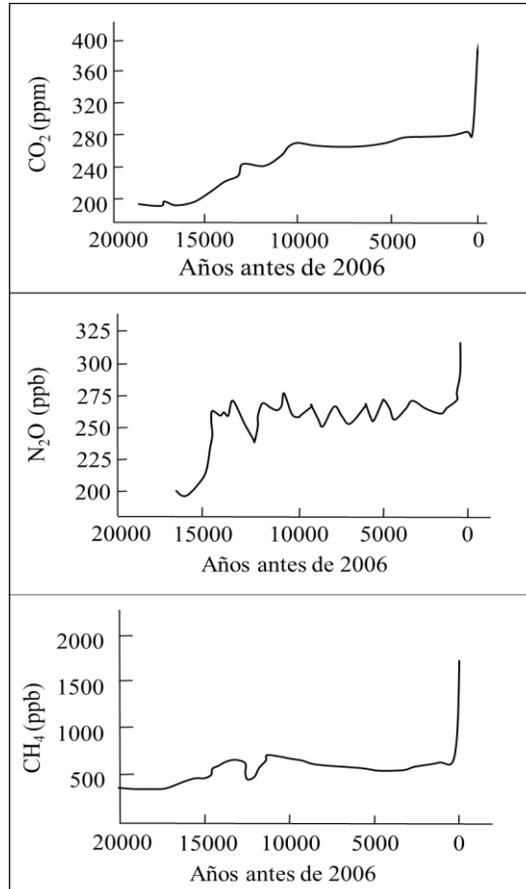


Figura 3. Variación histórica de los principales GEI en la atmósfera (IPCC, 2007).

Además de los gases GEI de la Figura 3, el vapor de agua también contribuye al efecto invernadero, debido a su abundancia en la atmósfera (WMO, 2011). Bajo estas condiciones, el aumento de la temperatura del aire y las variaciones en cantidad y distribución de la precipitación a escala mundial son la consecuencia directa de este fenómeno (Tao et al., 2017). En particular, la precipitación global ha venido mostrando variaciones que no obedecen a las fluctuaciones de variabilidad naturales del régimen (Chen et al., 2002; Adler et al., 2003; Bryson et al., 2008). Esta situación genera conflictos en la disponibilidad de agua y con ello problemas en el desarrollo humano y ecosistémico (Quevauviller, 2017).

El aumento de la temperatura del aire, las variaciones en el contenido de humedad del aire, los cambios en los regímenes de lluvias y el incremento del nivel del mar son las variables más evidentes del calentamiento global (IPCC, 2011; Specht et al., 2016). Es así como la identificación de este fenómeno depende de las condiciones climáticas de cada zona en particular, por ejemplo, para climas tropicales está íntimamente relacionado con el contenido de humedad de la atmósfera (Buytaert et al., 2011; Pérez y Gónima, 2014). De acuerdo a Pérez (2014) y Pérez y Gónima (2014), el contenido de vapor de agua es un mejor indicador del fenómeno del calentamiento global a escala local en ambientes tropicales, en comparación con la humedad relativa, que muchas veces no muestra variaciones significativas para zonas climáticas con condiciones diferentes de temperatura. Dicho contenido de vapor de agua está relacionado con la distribución de calor de la atmósfera, así como del balance energético de la misma y el ciclo hidrológico de ambientes tropicales que muestran temperaturas y humedades relativas altas (New et al., 1999; New et al., 2000; Camuffo, 2002). Dirmeyer et al. (2009) sostienen que la precipitación, la temperatura y humedad del aire, el contenido de humedad del suelo y la vegetación, así como la evaporación del agua superficial están estrechamente relacionadas con el contenido de vapor de agua de la atmósfera.

2.4. Variabilidad climática

La variabilidad climática, que son los cambios del clima durante determinados períodos de tiempo (días, meses o años) de una determinada región, es propia del sistema climático terrestre. Parte de esta variabilidad lo constituye el fenómeno ENOS (El Niño y La Niña), el cual ocurre en el Pacífico (Capel, 1999; Pabón y Torres, 2006). Estos dos fenómenos se identifican por variaciones (anomalías) en la temperatura superficial del Océano Pacífico, que cuando su diferencia con respecto a la temperatura media es ≥ 0.5 °C corresponde a la ocurrencia de El Niño, mientras que cuando estas diferencias son ≤ -0.5 °C se presenta La Niña, modificando en algunos casos los patrones de precipitación en términos de distribución, intensidad y duración. A este respecto, Poveda y Mesa (1999) utilizando los datos del NCEP/NCAR estudiaron la dinámica de tres corrientes de aire atmosférico que actúan sobre Colombia, llegando a la conclusión de que la aparición de El Niño tiene como efecto el debilitamiento de la corriente de chorro del Chocó, así como el de la corriente de los 700 hPa y la convergencia superficial de vientos sobre Sudamérica tropical, mientras que la divergencia de la zona de 700 hPa se debilita

con la disminución de la precipitación, lo cual explica en parte, la disminución de lluvias durante El Niño y las condiciones opuestas durante La Niña. Posteriormente, Pérez y Gónima (2014) encontraron que el 85 % de los máximos y mínimos de la temperatura del aire, entre 1968 y 2011 para la cuenca media y baja del río Sinú, concuerdan con la ocurrencia de ambos fenómenos, mientras que cuando se analiza la densidad de vapor de agua atmosférico, la concordancia aumenta a un 92 %. Arango et al. (2015) sostienen que, en el territorio colombiano, los trimestres noviembre-diciembre-enero; diciembre-enero-febrero, y enero-febrero-marzo presentan una mayor correlación entre la precipitación y ENOS, mientras que los trimestres marzo-abril-mayo; abril-mayo-junio; mayo-junio-julio, y septiembre-octubre-noviembre presentan correlaciones cercanas a cero. Como se va a mostrar en una sección posterior de este documento, en Gónima y Pérez, (2016) se reportan resultados similares respecto a la concordancia de ocurrencia del ENOS para la precipitación, lo cual confirma la influencia de dicho fenómeno en la cuenca media y baja del río Sinú.

A pesar de la marcada influencia del ENOS sobre Colombia y la región Caribe en particular, la variabilidad climática no explica completamente las alteraciones que experimentan en las últimas décadas los patrones de precipitación que influyen directamente sobre la oferta hídrica de una región en particular. Por consiguiente, en este estudio el comportamiento hidrológico se abordará desde el punto de vista de la ocurrencia del calentamiento global, como el principal factor que está modificando los regímenes climáticos del Planeta.

2.5. El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico puede ser definido como “el movimiento perpetuo del agua en sus distintas fases en los diversos componentes del sistema global” (Labat, 2006). Este consta de los procesos primarios de precipitación, intercepción, almacenamiento, infiltración, escorrentía, percolación, evaporación y transpiración (Hartmann, 2015), los cuales están estrechamente relacionados con la cobertura vegetal al regular los procesos de flujo de agua y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera (Figura 4).

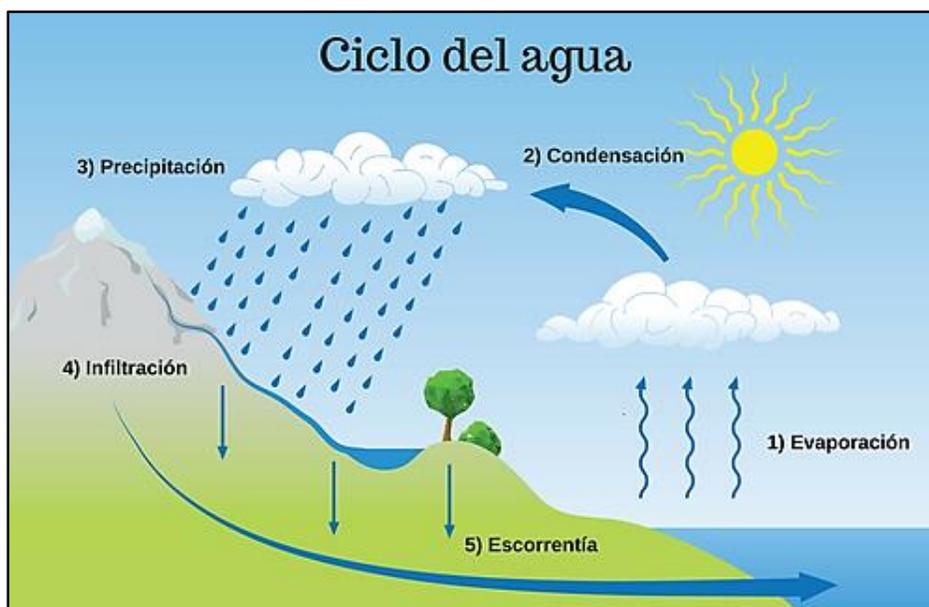


Figura 4. El ciclo hidrológico (<https://s1.significados.com/foto/evaporacion-3.png>).

La descripción de cada uno de los flujos del ciclo hidrológico (Figura 4) se determina, en forma general, mediante el balance hídrico: la evaporación es el proceso de transición directa del agua al cambiar de líquido a vapor desde la superficie a la atmósfera, la evapotranspiración es el agua que se evapora del suelo y de las plantas (transpiración) hacia la atmósfera. La precipitación se forma por la saturación de vapor de agua provocando condensación, que por acción de la gravedad se precipita, siendo interceptada en primera instancia por las plantas en su camino hacia el suelo (intercepción), la infiltración es el agua precipitada que penetra el suelo y que avanza lentamente a través de su perfil (percolación), Una vez se han suplido las necesidades del suelo con la infiltración y este se ha saturado de agua, ocurre la escorrentía superficial, que es el proceso en el cual el agua lluvia fluye libremente sobre la superficie de un terreno.

3. ANÁLISIS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

3.1. Modelo utilizado para la identificación del calentamiento global a escala local

Para la identificación del calentamiento global a escala local en una zona determinada se utilizó el modelo metodológico desarrollado por Pérez (2014), ilustrado en la Figura 5, el cual está

basado en el análisis climático y estadístico de temperatura del aire T , el contenido de vapor de agua de la atmósfera (humedad relativa HR y densidad de vapor d_v) y la precipitación pp .

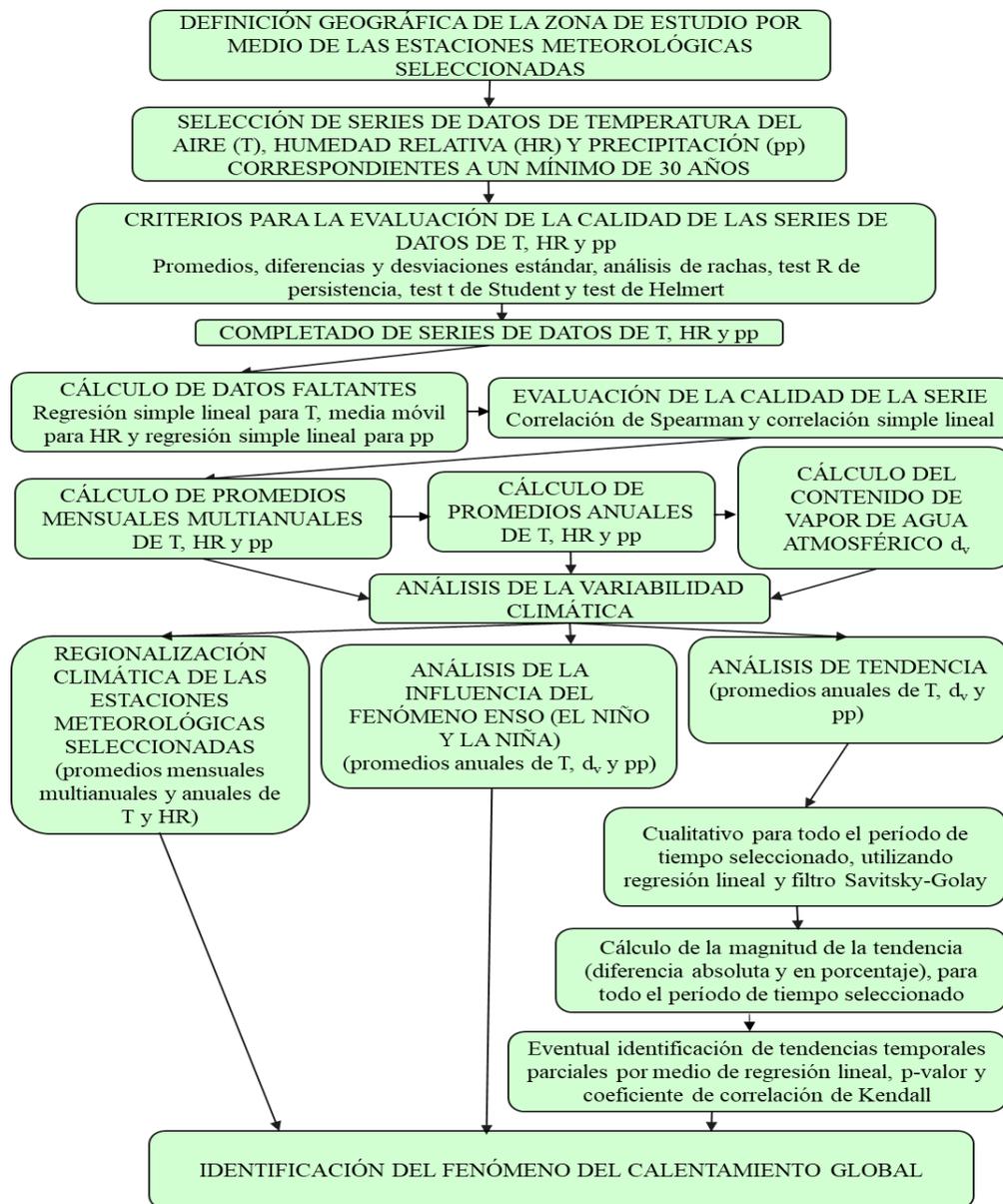


Figura 5. Modelo metodológico para identificación de calentamiento global a escala local (Pérez, 2014).

De acuerdo a la Figura 5, luego de seleccionada la zona de estudio, se procede al análisis exhaustivo de la calidad de la información climática de las estaciones meteorológicas existentes en ésta, basado en el cálculo de promedios, diferencias y desviaciones estándar, para detectar

datos atípicos o anómalos que pudieran alterar significativamente el comportamiento de las series por errores de registro o calibración de equipos de medición empleados para tal fin. Seguidamente se utilizan análisis de rachas, test de persistencia R y test de Helmert para determinar la aleatoriedad, homogeneidad y persistencia de los datos. Una vez realizado esto, los datos faltantes se calculan mediante regresión simple lineal para T y pp, y medias móviles para HR. Es de anotar que, para la generación de datos faltantes de T y HR de estaciones con baja calidad en la información y en caso de no conseguir resultados significativos en la verificación estadística de su calidad, se recurre al análisis de regresión por regionalización entre las estaciones meteorológicas involucradas (similar régimen climático). Finalmente, las series de datos así analizadas y corregidas se verifican nuevamente en calidad aplicando los métodos de correlación de Spearman y regresión simple lineal.

Después de verificada la calidad de las nuevas series de datos, se calculan los promedios mensuales y anuales multianuales de T y HR, para posteriormente determinar d_v . El cálculo de la densidad de vapor de agua atmosférico d_v se realiza utilizando la ecuación termodinámica del vapor de agua considerado como un gas ideal (Pérez y Gónima, 2014):

$$d_v = \frac{t_v}{R_v T} \quad (1)$$

Donde T es la temperatura del aire en Kelvin (K), R_v es la constante específica de vapor de agua ($461,8 \frac{J}{kg K}$), t_v es la tensión de vapor de agua en la atmósfera calculada de acuerdo con Fernández (1995), así:

$$t_v = \frac{HR}{100} t_s \quad (2)$$

Donde, HR es la humedad relativa y t_s es la tensión de vapor de agua para una condición de saturación estimada, de acuerdo con la siguiente expresión (Leckner, 1978):

$$t_s = \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (3)$$

Posteriormente, se procede a realizar un análisis de la variabilidad climática representado por una regionalización climática (similitud climática entre estaciones meteorológicas), el estudio

detallado de la influencia del fenómeno ENSO y un análisis del comportamiento temporal T , d_v y pp , para finalmente proceder a la identificación del fenómeno del calentamiento global en la zona de estudio seleccionada.

3.2. Ubicación de la zona de estudio

A continuación, se muestra la aplicación de este modelo (Figura 5) a la identificación del calentamiento global en la Cuenca media y baja del río Sinú, basado en un estudio previo realizado por Gónima y Pérez, 2016. La Cuenca está conformada por los municipios de Lorica, Purísima, Momil, Chimá, Cotorra, Ciénaga de Oro, San Pelayo, Cereté, San Carlos, Montería y Planeta Rica en el Departamento de Córdoba, y representados por las estaciones meteorológicas La Doctrina, Lorica, El Salado, Turipaná, Unicórdoba, Galán y Planeta Rica. La zona cubre un área aproximada de 8917 km^2 (891700 ha), plana en general y con una altura media de 20 msnm (Figura 6). Según CVS et al. (2006), el régimen climático está caracterizado por una temperatura media y una precipitación anuales de $27.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1300 mm respectivamente. Además, esta zona está sometida a los vientos Alisios que fluyen de Este a Oeste, especialmente entre los meses de diciembre a marzo. La red hídrica está constituida principalmente por el río Sinú, que atraviesa el Departamento de sur a norte y por un sistema de ciénagas entre las cuales se encuentran las ciénagas de la Redonda, Martinica, Corralito, La Pacha, Betancí, Bañó y Grande del Bajo Sinú. La cobertura vegetal está representada por pastos, cultivos y algunas áreas con bosques y vegetación ribereña asociada a las orillas del río Sinú, mientras que los suelos suburbanos y rurales son utilizados para la actividad agrícola y la ganadería extensiva. La zona de estudio se encuentra altamente intervenida, debido a la sub-utilización del suelo y a la desecación de los humedales, producida por las actividades realizadas por los pobladores de la zona.

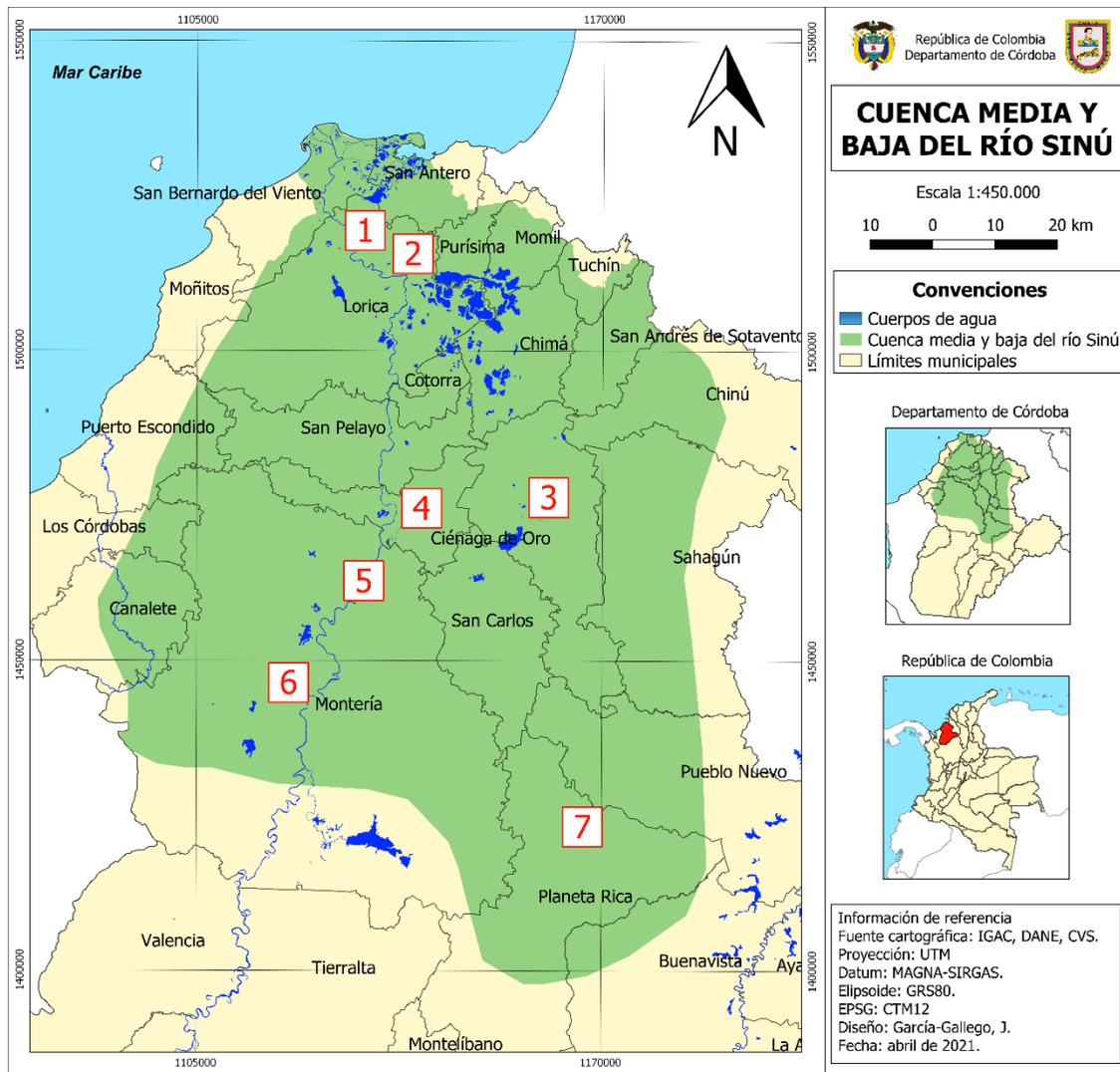


Figura 6. Ubicación de la zona de estudio: cuenca media y baja del río Sinú. Área de influencia climática relacionada con las estaciones meteorológicas (color verde) 1: La Doctrina, 2: Lórica, 3: El Salado, 4: Turipaná, 5: Unicórdoba, 6: Galán y 7: Planeta Rica.

3.3. Descripción climática

Un análisis detallado del comportamiento temporal de los promedios mensuales multianuales de T y pp (Figuras 7 y 8), permitió diferenciar cuatro períodos climáticos diferentes existentes en la zona de estudio seleccionada, basados en el incremento continuado, la disminución continuada y/o el comportamiento gaussiano de las curvas respectivas, definidos por los meses de enero, febrero y marzo (EFM); abril, mayo y junio (AMJ); julio, agosto y septiembre (JAS), y por último octubre, noviembre y diciembre (OND). Estos periodos fueron validados estadísticamente

utilizando las distribuciones de probabilidad de los valores p y t de Student (Wilks, 2006), como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Estadísticas para la definición de períodos climáticos en la zona integrada de la cuenca media y baja del río Sinú entre 1975 y 2014 (p: valor p, t: distribución t de Student).

		EFM-AMJ	AMJ-JAS	JAS-OND	OND-EFM
T	p	0.08*	0.001	0.00078	1.93×10^{-5}
	t	1.41*	3.10	3.27	4.37
pp	p	3.43×10^{-42}	6.33×10^{-6}	2.01×10^{-19}	7.36×10^{-26}
	t	28.74	4.68	11.89	16.43

En la Tabla 1, la zona integrada se define como los valores de T y pp, representativos de las siete estaciones meteorológicas seleccionadas en conjunto, calculados por medio del promedio aritmético de T y el promedio ponderado de pp para ellas. Todos los valores de p y t de la Tabla 1 son significativos al compararlos con los $p_{\text{crítico}} = 0.05$ y $t_{\text{crítico}} = 1.66$, excepto los marcados con * que corresponden a $p_{\text{crítico}} = 0.10$ y $t_{\text{crítico}} = 1.29$, lo que significa que los cuatro períodos climáticos EFM, AMJ, JAS y OND son estadísticamente diferentes.

La Figura 7 muestra el comportamiento temporal de T para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas y la zona integrada.

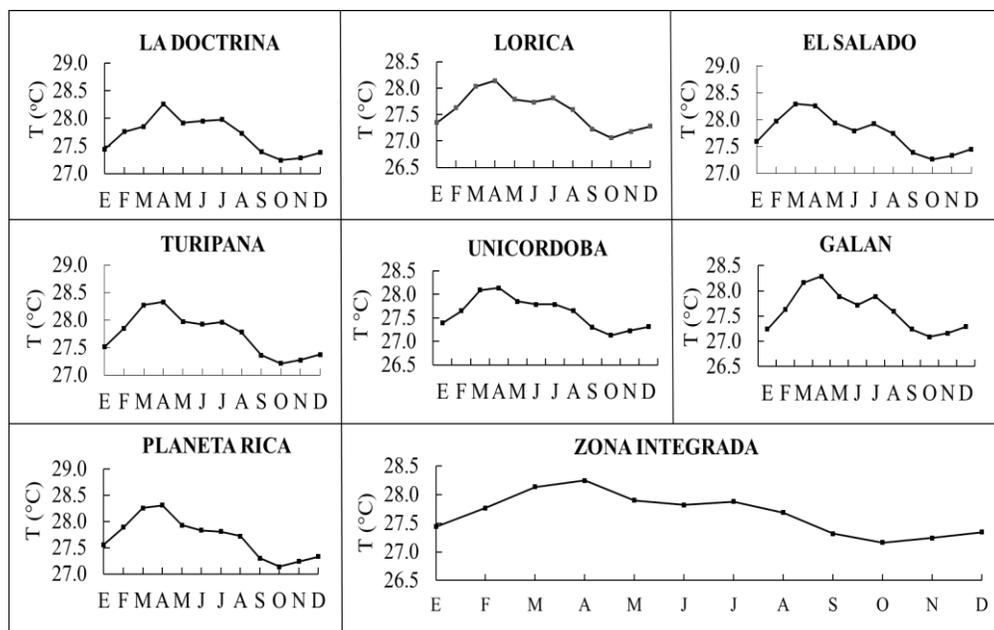


Figura 7. Comportamiento mensual de la temperatura del aire T (promedio mensual multianual), para cada de las estaciones meteorológicas seleccionadas y la zona integrada (1975-2014).

Analizando detalladamente la Figura 7 para la zona integrada, el periodo denominado EFM se caracteriza por el aumento continuo de T a partir de enero. Durante AMJ, T desciende continuamente a partir de abril, mes que se constituye como el más caluroso del año (T media: 28.2 °C). Para JAS, en julio T aumenta (media de 27.9 °C) con respecto a junio como consecuencia de la aparición del denominado “veranillo de San Juan”, disminuyendo continuamente en agosto y septiembre. Finalmente, OND muestra un descenso continuado de T, lo que hace que estos meses sean los menos calurosos del año, siendo octubre el mes con la menor T de los cuatro períodos climáticos (T media: 27.2 °C).

A continuación, la Figura 8 muestra el comportamiento temporal de pp para cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas y la zona integrada.

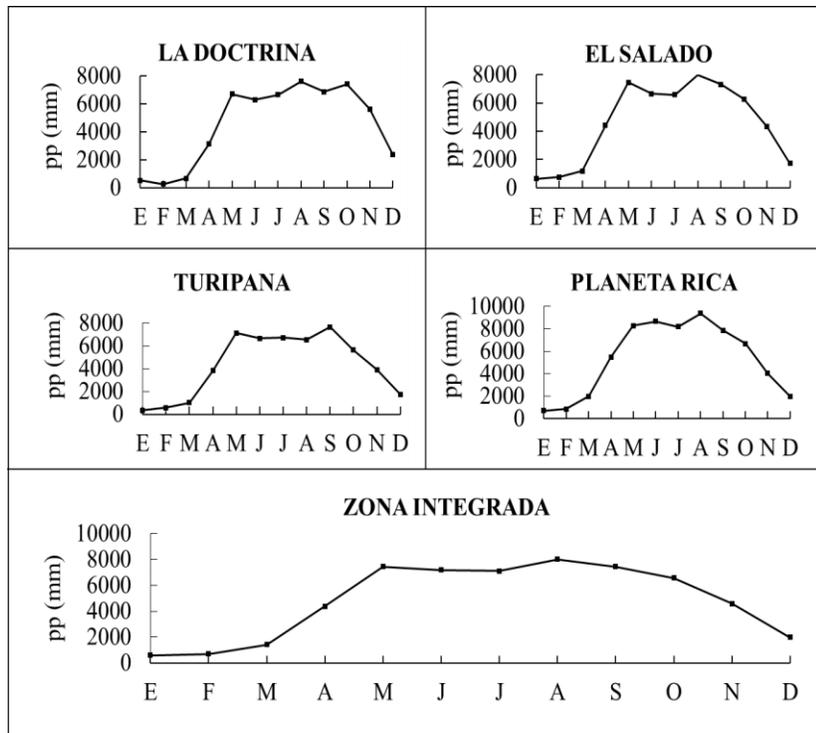


Figura 8. Comportamiento mensual de la precipitación pp (promedio mensual multianual), para cada de las estaciones meteorológicas seleccionadas con datos completos de pp y para la zona integrada (promedio ponderado entre estaciones), entre 1975 y 2014.

Así mismo en la Figura 8 (zona integrada) para pp, EFM muestra los valores más bajos de todo el año, acumulado de 9586 mm, ocurriendo el mínimo en enero con 2222 mm. En este periodo predominan los vientos Alisios (ZCIT del Noreste), que fuerzan a las masas de aire húmedas existentes sobre la zona de estudio a desplazarse en dirección Este, generándose un clima seco durante estos tres meses en la zona de estudio. En AMJ las lluvias comienzan a incrementarse paulatinamente (acumulado: 74730 mm), siendo mayo el mes más lluvioso de este período con 29585 mm. Durante JAS, que es el período más lluvioso del año con 89398 mm de acumulado, pp muestra un comportamiento gaussiano en el cual agosto se constituye como el mes con las mayores precipitaciones del año (31545 mm) y el mes de julio el de menor pp del período con 28164 mm (veranillo de San Juan). Este comportamiento de pp, durante los dos periodos climáticos mencionados anteriormente (AMJ Y JAS), está estrechamente relacionado con la correspondiente disminución de T (Figura 7: zona integrada). Esto se debe a que a causa de la cada vez mayor confluencia de las dos ZCIT (Noreste y Sureste) en esta zona, la evaporación de

los suelos y la poca frecuencia de los vientos aumentan el contenido de vapor de agua atmosférico que, al condensarse a determinada altura, forma nubes que dan origen a la lluvia. El último periodo OND con un acumulado de 517791 mm está caracterizado por una disminución continua de pp, contrario a lo que sucede con T para este mismo periodo (Figura 7: zona integrada).

Por otra parte, los resultados de la Tabla 2 muestran claramente que, de acuerdo a los valores de T, AMJ es el periodo más caluroso del año seguido de EFM y JAS en ese orden, mientras que OND es el de menor temperatura. Respecto a pp, el periodo más seco del año (menos lluvias) es EFM seguido secuencialmente de OND, AMJ y JAS, siendo JAS el periodo más lluvioso.

Tabla 2. Promedio ponderado de T y valores acumulados de pp, calculados para cada uno de los períodos climáticos de la zona integrada de la cuenca media y baja de río Sinú (1975-2014).

	EFM	AMJ	JAS	OND
T (°C)	27.8	28.0	27.6	27.2
pp (mm)	948	6645	7349	5188

En síntesis, la anterior caracterización del régimen climático de la cuenca media y baja del río Sinú realizada a partir del comportamiento temporal de T y pp, es un insumo muy importante para entender el clima reinante en esta zona del Departamento de Córdoba, principalmente en lo que tiene que ver con la disponibilidad hídrica, indispensable para la adecuada planificación del territorio.

3.4. Identificación del calentamiento global

Una vez descrito el régimen climático de la zona de estudio, la Figura 9 muestra el comportamiento de T bajo la influencia del fenómeno del calentamiento global.

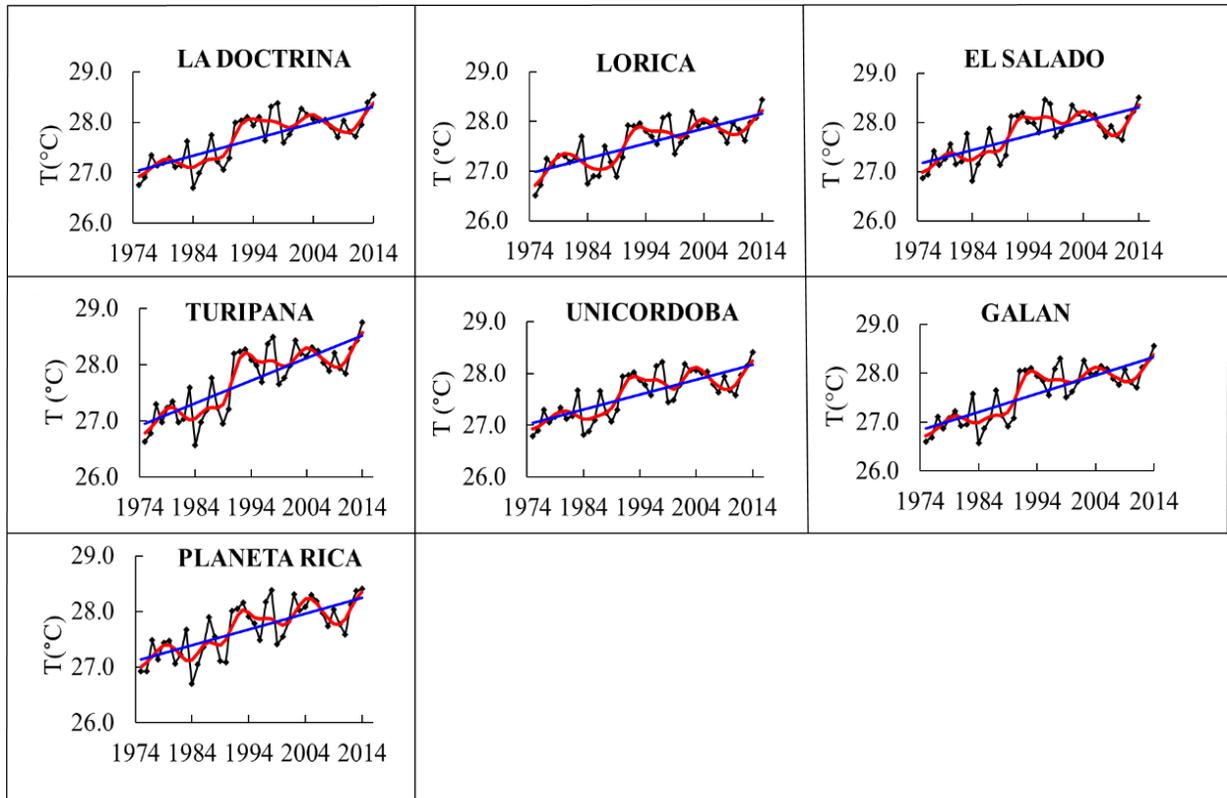


Figura 9. Comportamiento interanual de T (estaciones meteorológicas de la cuenca media y baja del río Sinú: 1975-2014). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay.

Analizando la Figura 9, se observa claramente que tanto el filtro aplicado (línea roja) como la tendencia lineal (línea azul) muestran un incremento gradual de T desde 1975 hasta 2014. Teniendo en cuenta el comportamiento interanual del contenido de vapor de agua de la atmósfera d_v (Figura 10), también se comprueba la existencia del calentamiento global en la zona de estudio (filtro y tendencia lineal). En general para el periodo 1975-2014, al incrementarse T interanualmente (Figura 9), se genera un aumento de d_v en la atmósfera al evaporarse cada vez más una mayor cantidad de agua de la superficie (suelos, vegetación y agua), lo que incrementa la humedad que contiene la atmósfera.

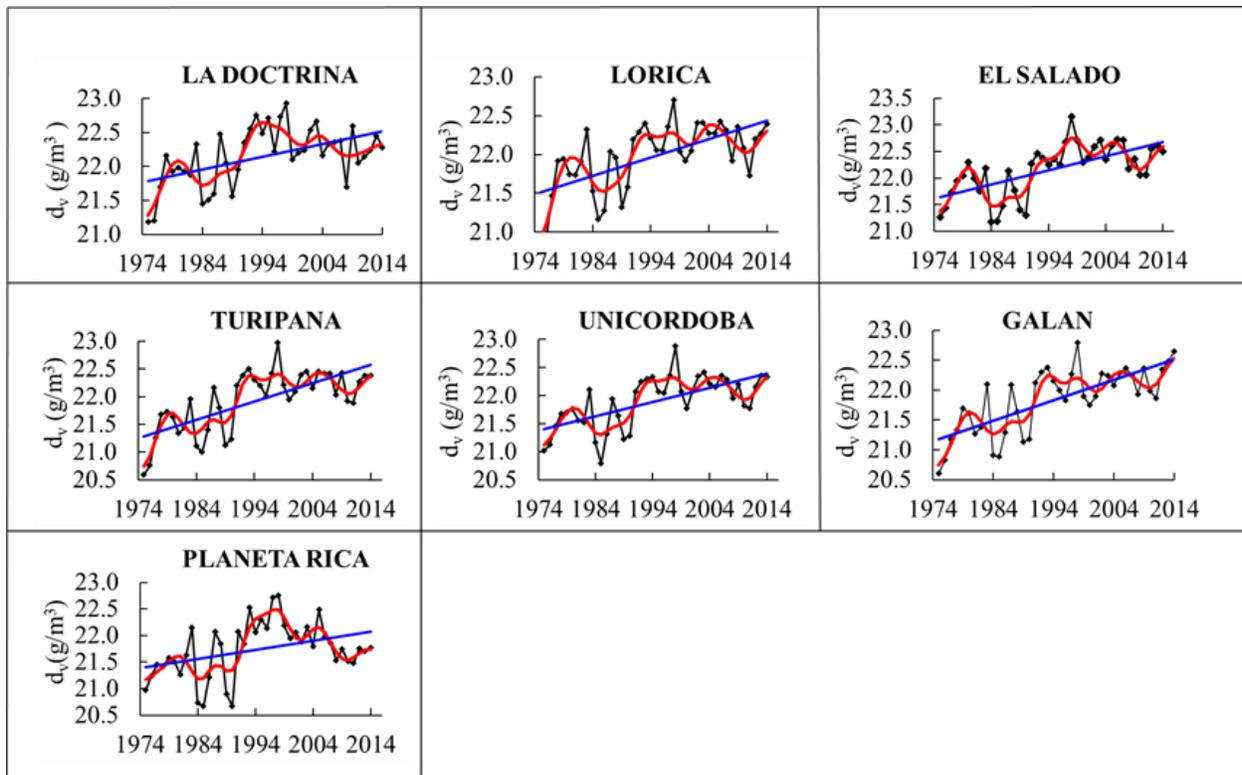


Figura 10. Comportamiento interanual de d_v (estaciones meteorológicas de la cuenca media y baja del río Sinú: 1975-2014). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay.

Al existir en la zona de estudio una mayor disponibilidad de vapor de agua atmosférico d_v , como consecuencia del aumento paulatino de la T durante 1975 y 2014 (Figura 9), pp también ha aumentado en general con el transcurso de los años, como lo muestran el filtro (línea roja) y la tendencia lineal (línea azul) de la Figura 11.

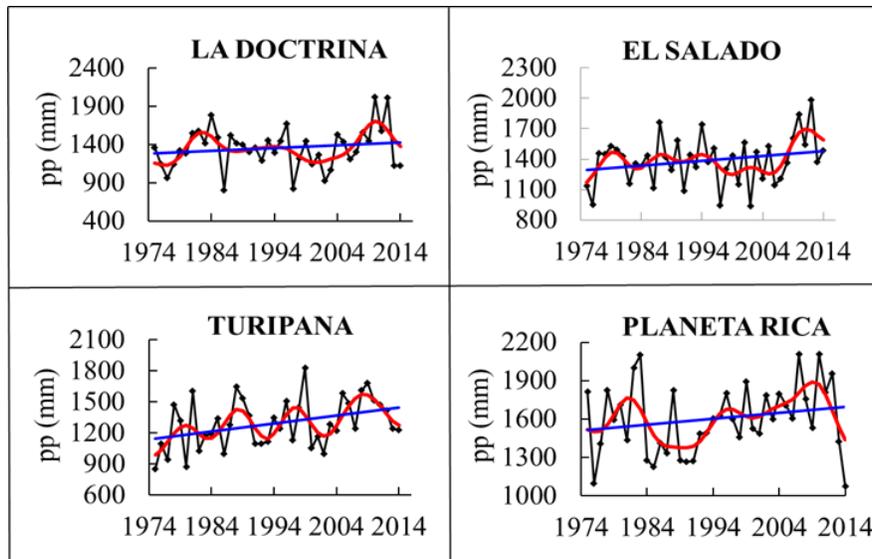


Figura 11. Comportamiento interanual de pp (estaciones meteorológicas con datos completos de la cuenca media y baja del río Sinú: 1975-2014). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay

Estos resultados confirman lo expuesto en Pérez y Gónima (2014) y Gónima y Pérez (2016), de que la zona de estudio está sometida al fenómeno del calentamiento global, el cual cada vez tiene un mayor efecto sobre esta. Esta situación, que se debe a la fuerte intervención antrópica de la cuenca media y baja del río Sinú, principalmente la desecación de humedales existentes en ella para actividades agropecuarias, también se puede analizar a partir de los incrementos interanuales calculados de T expuestos en la Tabla 3.

De acuerdo con la Tabla 3, los diferentes incrementos de T representativos de la diversidad climática de la zona de estudio, confirman el calentamiento global que está experimentando la atmósfera sobre esta.

Tabla 3. Incrementos multianuales de la temperatura del aire ΔT ($^{\circ}\text{C}$), densidad de vapor de agua atmosférico Δd_v (g/m^3) y precipitación Δpp (mm), calculados utilizando los valores de los filtros (Savitzky-Golay), correspondientes a cada una de las líneas de color rojo de las Figuras 9, 10 y 11 (estaciones meteorológicas de la cuenca media y baja del río Sinú: 1975-2014), DI: datos incompletos.

	La Doctrina	Lorica	El Salado	Turipaná	Unicórdoba	Galán	Planeta Rica
ΔT	1.47	1.49	1.38	1.70	1.32	1.68	1.36
Δd_v	1.02	1.46	1.20	1.70	1.26	1.80	0.70
Δpp	215	DI	348	285	DI	DI	-80

Estos resultados demuestran que son justamente aquellos lugares en los cuales la intervención antrópica es mayor (agricultura y ganadería), el aumento de T es más grande (estaciones meteorológicas de La Doctrina, Lorica, Turipaná y Galán). Al observar los valores de Δd_v de la Tabla 3, las estaciones Lorica, Turipaná y Galán muestran los mayores valores del incremento durante el periodo 1975-2014, lo que está en concordancia con el comportamiento de los respectivos incrementos de T para esas estaciones. Esto significa que, al aumentar T por efecto del calentamiento global, la interfaz suelo-vegetación evapora mayor cantidad de agua a la atmósfera, incrementando su densidad. Así mismo, al evaporarse mayor cantidad de agua de la superficie por efecto del calentamiento global, aumenta la cantidad de vapor de agua atmosférico sobre un lugar (Figura 10: aumento de d_v) y en presencia de vientos de poca intensidad, esta se condensa al llegar a determinada altura de la atmósfera, conformando nubes que posteriormente pueden dar origen a la aparición de lluvias sobre un lugar determinado, lo que se puede observar con los valores de Δpp para La Doctrina, Lorica, El Salado y Turipaná. El incremento negativo de pp para Planeta Rica se debe probablemente a la fuerte disminución de d_v a partir de 2005 (Figura 10).

Como se puede observar más detalladamente en las Figuras 9 y 10, el comportamiento de T y d_v (filtro: línea roja) permite identificar, por ejemplo, un aumento parcial de éstas a partir de 2010, el cual fue verificado estadísticamente por medio del análisis del p-valor y la distribución t de

Student. Es necesario anotar de que el incremento de estas dos variables, conjuntamente con la disminución de pp (Figura 11, filtro: línea roja), a partir de 2010, posiblemente podría ser la explicación a la percepción que tienen los productores agropecuarios de la zona de estudio, de que a partir de ese año el clima de la zona de estudio se está volviendo cada vez más caluroso y seco.

Los incrementos calculados de la Tabla 4 confirman lo expuesto anteriormente sobre que, por ejemplo, a partir del año 2010 se presenta un cambio notorio en la variabilidad del clima de la zona de estudio. En general, los incrementos en T y d_v son proporcionalmente más importantes que los correspondientes al período inmediatamente anterior 1975-2009, lo cual podría indicar que la atmósfera, a partir de 2010, se está calentando cada vez más. Al mismo tiempo, entre 2010 y 2014, todas las estaciones meteorológicas con datos completos de pp muestran déficit de lluvias. En particular, la estación Planeta Rica es la que mayor disminución ha experimentado, debido a la fuerte presión antrópica ejercida en ese territorio durante ese periodo.

Tabla 4. Incrementos multianuales de la temperatura del aire ΔT ($^{\circ}C$), densidad de vapor de agua atmosférico Δd_v (g/m^3) y precipitación Δpp (mm), calculados utilizando los valores del filtro (línea roja: Figuras 9, 10 y 11) correspondientes a los períodos de tiempo 1: 1975-2009 y 2: 2010-2014, DI: datos incompletos.

	La Doctrina		Lorica		El Salado		Turipaná		Unicórdoba		Galán		Planeta Rica	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
ΔT	0.88	0.58	1.02	0.48	0.75	0.63	1.16	0.62	0.76	0.56	1.11	0.56	0.77	0.59
Δd_v	0.88	0.14	1.18	0.28	0.80	0.40	1.38	0.32	0.86	0.41	1.31	0.51	0.40	0.30
Δpp	501	-333	DI	DI	397	-72	582	-255	DI	DI	DI	DI	376	-434

Las Tablas 5, 6 y 7 para cada uno de los meses del año y para cada estación meteorológica, representan al mismo tiempo una comprobación del diferente comportamiento del clima en los dos periodos claramente definidos, 1975-2009 y 2010-2014.

Tabla 5. Incrementos mensuales multianuales de la temperatura del aire ΔT ($^{\circ}\text{C}$) calculados utilizando los valores del filtro de Savitzky-Golay (línea roja: Figura 9), correspondientes a los períodos de tiempo 1.: 1975-2009 y 2.: 2010-2014 para las estaciones meteorológicas seleccionadas.

MES	La Doctrina		Lorica		El Salado		Turipaná		Unicórdoba		Galán		Planeta Rica	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Ene	1.38	0.65	1.38	0.56	1.06	0.77	1.57	0.66	1.05	0.65	1.29	0.41	1.04	0.90
Feb	0.98	0.61	1.21	0.44	0.90	0.75	1.35	0.66	0.93	0.40	1.20	0.54	1.28	0.66
Mar	0.34	0.75	1.04	0.37	0.71	0.78	1.03	0.83	0.73	0.75	1.17	0.85	0.82	1.18
Abr	0.83	0.55	1.05	0.43	0.87	0.60	1.17	0.65	0.83	0.67	1.23	0.70	0.71	0.75
May	0.78	0.38	0.82	0.30	0.37	0.18	0.94	0.26	0.62	0.30	1.02	0.29	0.50	0.11
Jun	0.97	0.80	1.17	0.98	0.61	1.16	1.22	0.89	0.91	0.75	1.17	0.79	0.81	0.86
Jul	0.73	1.41	0.91	1.20	0.74	1.27	1.03	1.33	0.66	1.06	1.02	1.42	0.52	0.24
Ago	0.82	0.72	0.44	0.22	0.97	0.47	1.23	0.45	0.85	0.41	1.12	0.35	0.64	0.45
Sept	1.13	0.16	1.45	0.06	1.00	0.33	1.38	0.30	1.01	0.23	1.24	0.22	1.02	0.32
Oct	0.81	0.05	0.93	0.10	0.73	0.20	1.10	0.10	0.59	0.08	0.99	0.01	0.88	0.15
Nov	0.76	0.57	0.70	0.56	0.29	0.33	0.99	0.62	0.33	0.67	0.76	0.53	0.34	0.81
Dic	1.06	0.67	0.69	0.73	0.78	0.70	1.18	0.69	0.76	0.72	1.19	0.58	0.66	0.73

Los incrementos de T de la Tabla 5, entre 2010 y 2014 para todas las estaciones meteorológicas seleccionadas, muestran que en general los mayores del año ocurren en el periodo climático EFM (periodo seco) seguido de JAS (periodo intermedio), mientras que los menores corresponden a OND (periodo lluvioso) y después a AMJ (periodo intermedio). Esto significa que son los meses de enero, febrero, marzo y julio (veranillo de San Juan) aquellos que con mayor intensidad están experimentando el calentamiento global en la zona de estudio. En particular, para EFM marzo es el mes con el mayor incremento de T, excepto para la estación Lorica que ocurre en enero, mientras que para AMJ junio muestra el mayor ΔT para todas las estaciones meteorológicas. Por otra parte, para JAS julio se muestra como el mes que más intensamente está sufriendo los rigores del calentamiento global en este periodo, excepto para Planeta Rica que es en el mes de agosto. Es de anotar que julio también es el mes del año que presenta el incremento más grande de T de todo el año. Finalmente, para OND es diciembre el de mayor aumento de T, excepto para Planeta Rica que se presenta en noviembre. Estos resultados para T demuestran no solamente la variabilidad del efecto del calentamiento global, sino también

las especificidades de cada municipio, representado por la correspondiente estación meteorológica.

La Tabla 6 muestra los incrementos Δd_v para los períodos 1975-2009 y 2010-2014, para las estaciones seleccionadas.

Tabla 6. Incrementos mensuales multianuales de la densidad de vapor de agua atmosférico Δd_v (g/m^3) calculados utilizando los valores del filtro de Savitzky-Golay (línea roja: Figura 10), correspondientes a los períodos de tiempo 1.: 1975-2009 y 2.: 2010-2014 para las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Mes	La Doctrina		Lorica		El Salado		Turipaná		Unicórdoba		Galán		Planeta Rica	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Ene	1.22	-0.30	0.93	0.39	0.84	0.22	1.17	0.41	0.59	0.45	1.15	0.21	0.50	0.60
Feb	1.51	-0.25	1.64	-0.33	0.75	0.39	1.91	-0.50	1.08	0.10	1.14	0.03	0.70	-0.20
Mar	0.32	0.25	1.13	-0.16	0.01	1.01	0.97	0.40	0.61	0.32	0.85	1.13	1.30	-0.20
Abr	0.56	0.15	1.56	0.64	1.53	0.64	1.90	0.75	1.82	0.48	1.81	1.04	1.20	0.20
May	0.93	0.20	1.48	0.23	0.94	0.09	1.79	0.15	1.00	0.61	1.68	0.31	0.10	0.00
Jun	1.12	0.75	1.22	1.16	0.84	1.31	1.45	0.93	1.00	0.87	1.68	1.07	0.10	0.60
Jul	0.90	-0.76	1.12	0.75	1.05	0.69	1.36	0.60	0.87	0.58	0.70	1.20	-0.10	-0.40
Ago	1.00	-0.39	1.07	-0.17	1.05	0.69	1.67	-0.09	1.00	0.25	1.24	0.35	-0.20	0.70
Sept	0.91	-0.09	1.56	0.11	1.12	0.68	1.49	0.27	0.96	0.23	1.38	0.24	0.80	0.20
Oct	0.83	-0.01	1.09	-0.20	0.90	0.20	1.43	0.15	0.73	0.10	1.29	0.11	0.40	0.00
Nov	0.44	0.28	0.65	0.16	0.12	0.09	0.78	0.26	0.34	0.59	0.93	0.27	-0.20	0.60
Dic	0.84	0.37	0.72	-0.65	0.76	0.05	1.14	0.47	0.58	0.41	1.21	0.45	0.30	0.40

En la Tabla 6, Δd_v entre 2010 y 2014 para todas las estaciones meteorológicas seleccionadas, se distribuye de la siguiente forma: los mayores del año ocurren en el periodo climático AMJ (periodo intermedio) y en el cual justamente comienzan las lluvias en el año (Figura 8), seguido de JAS (periodo intermedio) y OND (periodo lluvioso) en ese orden. EFM (periodo seco) es el que muestra el menor incremento de d_v de los cuatro periodos climáticos, debido a que esos

meses son los más secos del año. Particularmente y durante el año, el mes de junio es el que muestra el mayor Δd_v , mientras que en febrero y octubre prácticamente no hubo ningún incremento. En síntesis, al calentarse la atmósfera cada vez más durante esos últimos 5 años (2010-2015), la cantidad de evaporación de la interfaz suelo-vegetación aumentó, incrementándose simultáneamente la cantidad de vapor de agua que asciende a la parte alta de ella, lo que posiblemente produce al mismo tiempo, una disminución en el contenido de humedad del suelo y del aire en contacto con éste.

Respecto a pp , el comportamiento de los incrementos es diferente al de los de T y d_v , ya que mientras entre 1975 y 2009 se presenta un incremento de las lluvias (Δpp positivo), en el cuatrienio 2010-2014 Δpp es negativo para cada mes y cada estación (Tabla 7), como consecuencia de una disminución continuada de las lluvias a partir de 2010. Este comportamiento de Δpp permite confirmar en gran medida, la existencia del cambio experimentado por el clima a partir del año 2010. En particular, para el periodo de tiempo entre 2010 y 2014, el menor incremento negativo de la lluvia (menor disminución) ocurre en EFM, con el máximo en marzo y el mínimo en febrero, seguido en orden creciente por OND (máximo en noviembre, mínimo en octubre y diciembre) y AMJ con el máximo en junio que a la vez es el mayor de todo el año (mayor disminución de lluvias de todo el año) y el mínimo en abril. Por otra parte, JAS es el periodo con la mayor disminución de las lluvias de todo el año, siendo septiembre el máximo y agosto el mínimo. En general para la zona de estudio, los meses desde mayo a noviembre están experimentando a partir de 2010, la mayor disminución de las lluvias de todo el año (mayores incrementos negativos). Además, los meses, junio y julio muestran la mayor disminución relativa de pp de todo el año, lo que podría ser un indicativo de que el efecto del “veranillo de San Juan”, que comúnmente ocurre en julio, se podría estar extendiendo hacia junio.

Tabla 7. Incrementos de los promedios mensuales multianuales de la precipitación Δpp (mm), calculados utilizando los valores del filtro (línea roja: Figura 11) correspondientes a los períodos de tiempo 1.: 1975-2009 y 2.: 2010-2014, para las estaciones meteorológicas seleccionadas con datos completos.

Mes	La Doctrina		El Salado		Turipaná		Planeta Rica	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Ene	17	-14	12	-3	14	-10	4	-3
Feb	11	-1	6	-1	4	-1	11	-9
Mar	13	-4	49	-29	32	-23	30	-22
Abr	69	-30	81	-59	48	-39	52	-54
May	87	-63	75	-63	152	-132	106	-123
Jun	73	-110	62	-78	78	-93	134	-152
Jul	118	-88	118	-100	120	-115	112	-92
Ago	55	-85	82	-79	103	-65	155	-131
Sept	176	-127	136	-67	138	-92	162	-134
Oct	95	-71	91	-22	118	-63	112	-97
Nov	89	-94	102	-86	74	-58	64	-52
Dic	57	-35	43	-22	51	-36	44	-30

Los resultados analizados anteriormente confirman que el régimen climático de la zona de estudio se puede dividir en dos periodos de tiempo: 1975-2009 aumento continuo de T, d_v y pp, mientras que 2010-2014 se caracteriza por un incremento más pronunciado de T y d_v , y al mismo tiempo una disminución de pp, como también se expone en Gónima y Pérez (2016). Este comportamiento del clima está afectando sensiblemente las actividades agropecuarias en forma diferente para cada uno de los municipios de la zona de estudio (representados por las estaciones meteorológicas seleccionadas), debido a las características y efectos locales del mismo.

3.5. Influencia del fenómeno ENSO

En los últimos años se ha suscitado una gran discusión a todos los niveles, sobre la influencia del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) en el clima de Colombia. Opiniones que van desde su poca importancia hasta aquellas en las cuales se le asigna a dicho fenómeno la responsabilidad en la ocurrencia de sequías e inundaciones. En particular, la versión gubernamental es la de que El Niño es el principal causante de las pérdidas económicas provenientes de temporadas con déficit de lluvias y una gran sequedad de la atmósfera, mientras que a La Niña se la relaciona con las catástrofes originadas por las inundaciones que ha experimentado el territorio colombiano. En este sentido, la región Caribe es la que ha sufrido con mayor rigor los efectos de las sequías ocurridas en 1997-1998 y 2015-2016, así como los de las devastadoras inundaciones, especialmente las de 2010-2011.

Los siguientes resultados, que están basados en el análisis previo de la influencia del fenómeno ENSO en la zona de estudio (Gónima y Pérez, 2016) y que corresponden a un detallado análisis de la influencia del ENSO en la cuenca baja y media del río Sinú realizado a partir de las Figuras 9, 10 y 11, se pueden considerar como una contribución al conocimiento y comprensión de este fenómeno climático en la región Caribe.

De acuerdo a la comparación detallada entre las Figuras 9 y 10 y los valores del ONI (Índice Oceánico El Niño de la NOAA, en inglés,), la mayoría de los máximos de T y d_v corresponden a la presencia de El Niño ($ONI \geq 0.5$), equivalente a entre 81 % y 90 % de concordancia para todas las estaciones meteorológicas, mientras que durante La Niña ($ONI \leq -0.5$) estas dos variables muestran los valores más bajos (mínimos), con 85 % a 100 % de concordancia para la zona de estudio. Así mismo, del análisis de la Figura 11 se obtiene que la concordancia entre la disminución de pp causada por la presencia de El Niño (mayoría de mínimos) varía entre 81 % y 90 % para todas las estaciones seleccionadas, mientras que la coincidencia para La Niña (mayoría de máximos) es del 85 % para la zona de estudio. Estos resultados, confirman los obtenidos por Pérez y Gónima (2014), además de que reafirman la percepción general de que durante El Niño y La Niña las temperaturas aumentan (clima seco) y la humedad del aire se incrementa (clima lluvioso) respectivamente, comparados con los valores que por experiencia se han observado en condiciones de ausencia de ambos fenómenos.

El anterior análisis no permite aseverar que justamente la presencia de El Niño sea la causa fundamental y única de la aparición de periodos secos, ni tampoco que la ocurrencia de La Niña sea la única responsable del incremento de las precipitaciones sobre la zona de estudio, especialmente de inundaciones catastróficas. La Figura 12 muestra el comportamiento de T como actualmente está ocurriendo bajo la presencia del calentamiento global (línea roja), mientras que la línea azul representa la simulación estadística del mismo comportamiento, pero en el caso de la ausencia de este fenómeno.

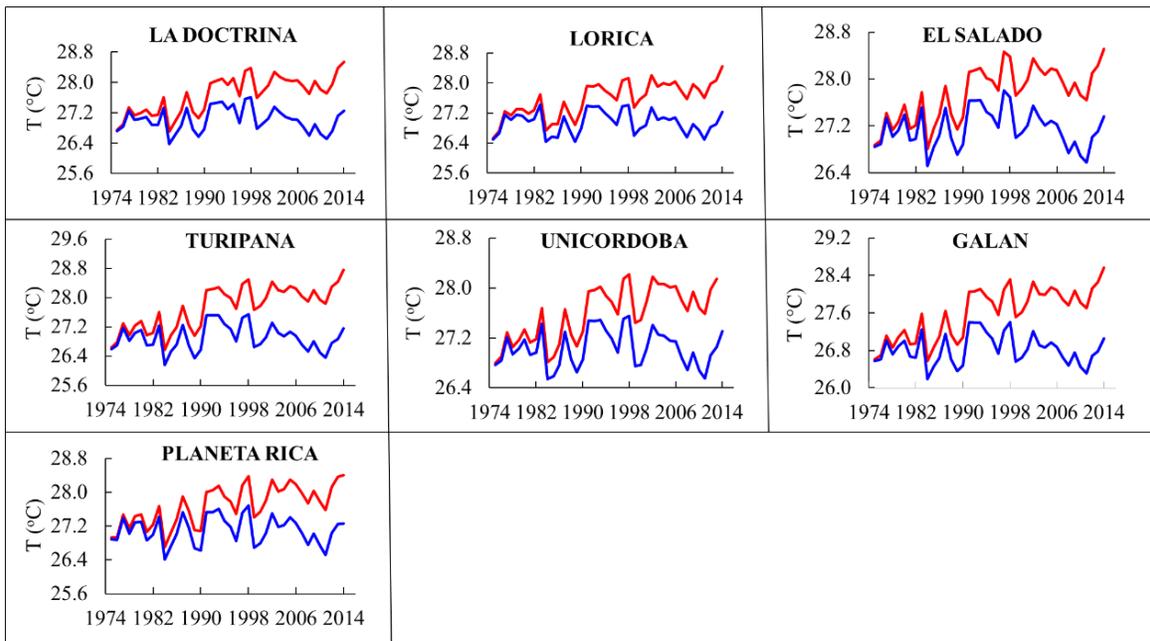


Figura 12. Comparación del comportamiento de T (promedios anuales) en condiciones climáticas actuales bajo la influencia del calentamiento global (línea roja) y la simulación realizada suponiendo la inexistencia de este fenómeno (línea azul), para todas las estaciones meteorológicas seleccionadas (1975 – 2014).

En la Figura 12 se puede observar claramente que el clima de la zona de estudio está fuertemente alterado desde 1975 por el fenómeno del calentamiento global, que a medida que transcurren los años su efecto se va incrementando, como lo demuestra la cada vez mayor separación de las dos curvas (líneas roja y azul), es decir, cada año T ha aumentado continuamente. Por lo tanto, para

relacionar el efecto del calentamiento global con el fenómeno ENSO, se procedió a identificar en la Figura 12 dos fuertes eventos El Niño y La Niña. En el caso de El Niño ocurridos en 1983 y 1998, representados en la Figura 12 por los respectivos máximos de T, se puede observar que a pesar de que la magnitud de El Niño fue igual en ambos años (ONI de 2.1), el incremento de T en 1998 fue mayor que el respectivo para 1983 al comparar los valores de esos años en las líneas azul y roja. En 1998, el rango de variación de dicho incremento osciló entre 0.60 °C y 1.00 °C para todas las estaciones meteorológicas, mientras que para 1983 el rango fluctuó entre 0.25 °C y 0.40 °C. Esta diferencia entre ambos incrementos se debió única y exclusivamente al efecto del calentamiento global, que en 1983 no era tan intenso como lo fue en 1998. Si se analiza lo sucedido con La Niña el resultado es el mismo, ya que para una misma intensidad del fenómeno (ONI de -1.4), el incremento de T en 1987 estuvo entre y 0.37 °C y 0.50 °C para todas las estaciones meteorológicas, siendo la variación de éste en 2008 entre 0.90 °C y 1.40 °C. Resultados equivalentes se obtuvieron para d_v .

Este análisis demuestra cuantitativamente que no es el fenómeno ENSO el único responsable de las altas temperaturas cuando ocurre El Niño, ni tampoco de las intensas lluvias (inundaciones) bajo la presencia de La Niña. Es el calentamiento global, al que está sometida la cuenca media y baja del río Sinú, el que modula T y d_v , incrementándolas continuamente a medida que transcurren los años. En este sentido, el calentamiento global produce un aumento continuo de T y d_v tanto durante El Niño como también durante La Niña. Respecto a pp, de seguir ocurriendo este fenómeno la tendencia es que cada vez ocurrirán menos lluvias en la zona de estudio, aún bajo la presencia de La Niña.

La presencia del calentamiento global que está experimentando la zona de estudio se debe principalmente a la desordenada intervención del territorio, representada por numerosos conflictos de uso del suelo, principalmente atribuidos a la desecación de humedales y al pastoreo de ganado (CVS et al., 2006). La ocurrencia de periodos secos y lluviosos frecuentes en la cuenca media y baja del río Sinú desde 1975, no pueden ser atribuidos exclusivamente al fenómeno ENSO, fenómeno que siempre ha hecho parte de la variabilidad climática de la región Caribe, sino a la forma muchas veces espontánea y mal planificada de como se ha realizado la intervención antrópica sobre el territorio y que desde ese año ha causado la aparición del calentamiento global en esta zona (Pérez y Gónima, 2014; Gónima y Pérez, 2016).

4. ANÁLISIS DE LA OFERTA HÍDRICA

La oferta hídrica está definida como la parte de agua, que después de haberse precipitado sobre una cuenca, en forma de lluvia, escurre a través del terreno y los cauces de quebradas, arroyos, ríos y demás corrientes y superficies de agua (lagos, ciénagas, reservorios, etc.). Su importancia radica en que, al cuantificar la escorrentía superficial a partir del balance hídrico de la cuenca, se está estimando la oferta de agua superficial de la misma.

Entonces, una vez definida la zona de estudio se procede al cálculo de la escorrentía, a través del número de curva, se clasifica la cobertura vegetal por medio de imágenes de satélite y se correlaciona con la ocurrencia del calentamiento global de la zona de estudio, para así caracterizar hidroclimáticamente dicha zona, con el fin de establecer finalmente la relación entre el calentamiento global y la oferta hídrica del lugar.

De acuerdo a lo anterior y para comprender la dinámica del clima local en la oferta hídrica, es necesario estudiar los procesos relativos al contenido de agua de la superficie, a través del balance hídrico superficial (Hartmann, 2015):

$$g_w = pp + D - E - Q \quad (4)$$

Donde, g_w es el almacenaje de agua en el suelo, pp es la precipitación, D la condensación superficial, E la evapotranspiración potencial y Q la escorrentía. A partir de la ec. (4) es posible determinar los requerimientos hídricos del suelo y su capacidad de almacenaje de agua.

4.1. Cálculo de la Escorrentía por el método del número de curva

El método de cálculo para la escorrentía Q depende en gran medida de la disponibilidad de información. Para su cálculo se utiliza el método de número de curva (CN, por sus siglas en inglés), por ser uno de los métodos más confiables y convencionales en la estimación de la escorrentía. Este método se basa en la determinación de la infiltración del suelo mediante el análisis de la relación precipitación – características físicas de la superficie (FAO, 2006), como limitante de la infiltración potencial que pueda tener dicho suelo. En la práctica, CN se puede estimar de acuerdo a NRCS (1986), utilizando ArcCN-Runoff desarrollado por Zhan y Huang (2004) y teniendo como insumo de entrada para el cálculo capas de cobertura del terreno y grupos hidrológicos de suelos. En consecuencia, Q (en mm) se determina por:

$$Q = \frac{(pp-0.2S)^2}{pp+0.8S} \quad (5)$$

Donde, S el potencial máximo de infiltración de agua por parte de los suelos (mm), determinado a partir de CN.

La estimación de la escorrentía total en láminas o volúmenes se puede realizar empleando la herramienta ArcCN-Runoff de acuerdo con los resultados obtenidos en la estimación de mapas de número de curva y la aplicación del método Ponce y Hawkins (1996):

$$Q_w = \frac{\sum Q_i A_i}{A_T} \quad (6)$$

Donde Q_w es la escorrentía total superficial, Q_i la escorrentía sobre un área determinada i y A_i una sección del área total de estudio A_T .

La estimación del CN se realiza teniendo en cuenta el grupo hidrológico del suelo y su condición hidrológica, la cual expresa la interacción entre el tipo de cobertura y el uso y tratamiento del suelo, que favorece el proceso de infiltración bajo una determinada condición de humedad antecedente de una cuenca (AMC por sus siglas en inglés). La AMC comprende los cinco días de precipitación previos a la ocurrencia de una tormenta (NRCS, 1986). Así por ejemplo, se define como AMCI a la condición de aridez de una zona en cuestión, AMCII para condición intermedia y AMCIII para condición húmeda, definidas en intervalos de acuerdo con lo expresado en la Tabla 8.

Tabla 8. Precipitación acumulada para definición de AMC (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).

Condición de humedad antecedente (AMC)	Precipitación acumulada de cinco días previos al evento (mm)	
	Temporada inactiva	Temporada de crecimiento
I	<5	<14
II	5 – 11	14 – 21
III	> 11	> 21

Como el método de cálculo para el número de curva CN (Anexo 1), base para la determinación de la escorrentía Q, está desarrollado para una AMCII; es necesario ajustarlo acorde con la AMC correspondiente a la zona de interés particular.

4.1.1. Grupo hidrológico de suelo (HGS)

Corresponde a una categorización en la que se agrupan los suelos que presentan condiciones similares en la generación de escorrentía, divididos en cuatro grupos (A, B, C y D). Estos están definidos de acuerdo a la clasificación textural de dicho suelo y las características que interfieren con la infiltración, en el que el contenido de arcillas y arenas son los principales condicionantes (NRCS, 1986). De acuerdo con Mongil y Navarro (2012), la clasificación es la siguiente:

- a. Grupo hidrológico A, son aquellos suelos cuya condición hidráulica a saturación es mayor que 144 mm/h, cuyo contenido de arcilla es menor al 10 % y arenas mayor al 90 %, presentando un drenaje natural catalogado de bueno a excesivo y texturas de arenosas a gravilosas.
- b. Grupo hidrológico B presenta una condición hidráulica a saturación entre 36.1 mm/h y 144 mm/h para una profundidad de hasta 50 cm, caracterizado por presentar contenidos entre el 10 % y el 20 % de arcillas y entre el 50 % y 90 % de arenas. Estos suelos presentan texturas entre moderadamente finas y moderadamente gruesas.
- c. Grupo hidrológico C: condición hidráulica a saturación entre 13.6 mm/h a 36 mm/h a una profundidad de 50 cm, contenido de arena menor al 50 %, mientras que el contenido de arcilla fluctúa entre el 20 % al 40 % con texturas de moderadamente finas a finas.
- d. Grupo hidrológico D presenta condiciones limitadas de infiltración y alto potencial de escorrentía con una condición hidráulica a saturación menor que 3.6 mm/h con contenidos de arcilla mayores al 40 % y de arena menores que el 50 %.

4.1.2. Determinación de la cobertura vegetal del terreno y condición hidrológica

El tipo de cobertura del terreno hace referencia a la condición física de la superficie en cuanto al tipo de vegetación presente y la forma en la que esta interviene en el proceso de intercepción del agua lluvia, lo que influye en la infiltración de agua por los suelos. El uso del suelo está referido a la descripción del tipo de manejo, teniendo en cuenta el tipo de prácticas mecánicas realizadas en zonas agrícolas (contorneado, terraceo, etc.).

La influencia del tipo de cobertura vegetal se refleja en las condiciones del suelo, al interceptar las plantas el agua lluvia precipitada, en el contenido de materia orgánica de este, en el mejoramiento de su permeabilidad por penetración radicular, produciendo al mismo tiempo la disminución de la energía de impacto de la lluvia. Estos procesos reducen el desprendimiento de material y la alteración de algunas de las propiedades físicas del suelo como el aumento de la rugosidad. Por otra parte, al depositarse material foliar sobre el suelo y descomponerse, aumenta su capacidad de retener humedad, incrementándose la infiltración superficial y el contenido de agua en él (NRCS, 1986; NRCS, 2009).

En la realización de estudios hidrológicos en zonas de difícil acceso o de gran extensión se utilizan imágenes de satélite de sensores remotos (Dessler et al., 2008; Lorenzo y García, 2011; Sitnov et al., 2017; Gui et al., 2017) y sistemas de información geográfica (SIG), para el levantamiento de información primaria sobre la cobertura vegetal (identificación y clasificación), necesaria para la estimación de escorrentía superficiales realizados a partir del método de curva (Ferrér et al., 1995; Melesse y Shih, 2002; Espejo, 2006; Díaz y Mercado, 2017).

Por consiguiente, para la identificación y clasificación de la cobertura vegetal se utilizaron imágenes del satélite Landsat Data Continuity Mission (LDCM), que entró en operación en febrero 2013. Los sensores a bordo del LDCM son el OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor), los cuales recolectan imágenes de la Tierra con una periodicidad de 16 días y resolución espacial de 30 metros.

El método utilizado para la identificación y clasificación de la cobertura vegetal fue el de la clasificación supervisada de imágenes de satélite, el cual consiste en la agrupación de unidades espaciales (píxel) con similares características espectrales (datos radiométricos similares), para la segmentación de la información contenida en una imagen satelital, lo que permite la categorización de los diferentes tipos de coberturas existentes en un área de interés (Chuvieco, 1996; Gil et al., 2003). El procedimiento de clasificación propuesto por Posada (2012), Figura 13, es el siguiente: luego del reconocimiento visual de la imagen, se analiza estadísticamente la información contenida en esta mediante la revisión de promedios, máximos, mínimos, desviación estándar y análisis de histogramas. Posteriormente, se determina el factor de índice óptimo (OIF) para así seleccionar la mejor combinación de tres bandas espectrales, con las cuales se obtiene

una mayor discriminación estadística de las diferentes coberturas vegetales existentes, de la siguiente manera (Ariza, 2013):

$$OIF = \frac{\sum DS^2}{\sum r} \quad (7)$$

Donde, DS^2 es la desviación estándar de cada banda individual y r es el coeficiente de correlación entre las tres bandas a combinar obtenida a partir de la matriz de correlación.

Una vez determinado el OIF, se procede a definir la leyenda de cada clase de vegetación apoyándose en la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia por el IDEAM, estableciéndose como clases de cobertura a clasificar: bosques, pastos, suelo desnudo, superficies de agua, cobertura de nubes y sombras, vegetación secundaria y zonas urbanas. A continuación, se eligen áreas de “muestreo” en las imágenes seleccionadas, representativas de cada una de las clases de cobertura vegetal definidas anteriormente, las cuales son evaluadas estadísticamente para establecer su separabilidad radiométrica (promedios, máximos y mínimos, desviación estándar, análisis de histogramas, perfiles de dispersión espectral y de divergencia transformada). Seguidamente, se agrupan las clases utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud (Chuvieco, 1996), produciéndose una nueva imagen con los resultados de la clasificación, los cuales se validan por medio de una matriz de confusión (Congalton y Green, 2009) y el coeficiente Kappa (Loya et al., 2013) con información de campo geoposicionada (datos de campo, mapas, imágenes de satélite de mayor resolución espacial u otras fuentes fidedignas). Finalmente, el resultado se vectoriza y se representa a escala 1:100.000, de acuerdo a IDEAM (2010), generándose un mapa digital de la cobertura vegetal de la zona de estudio.

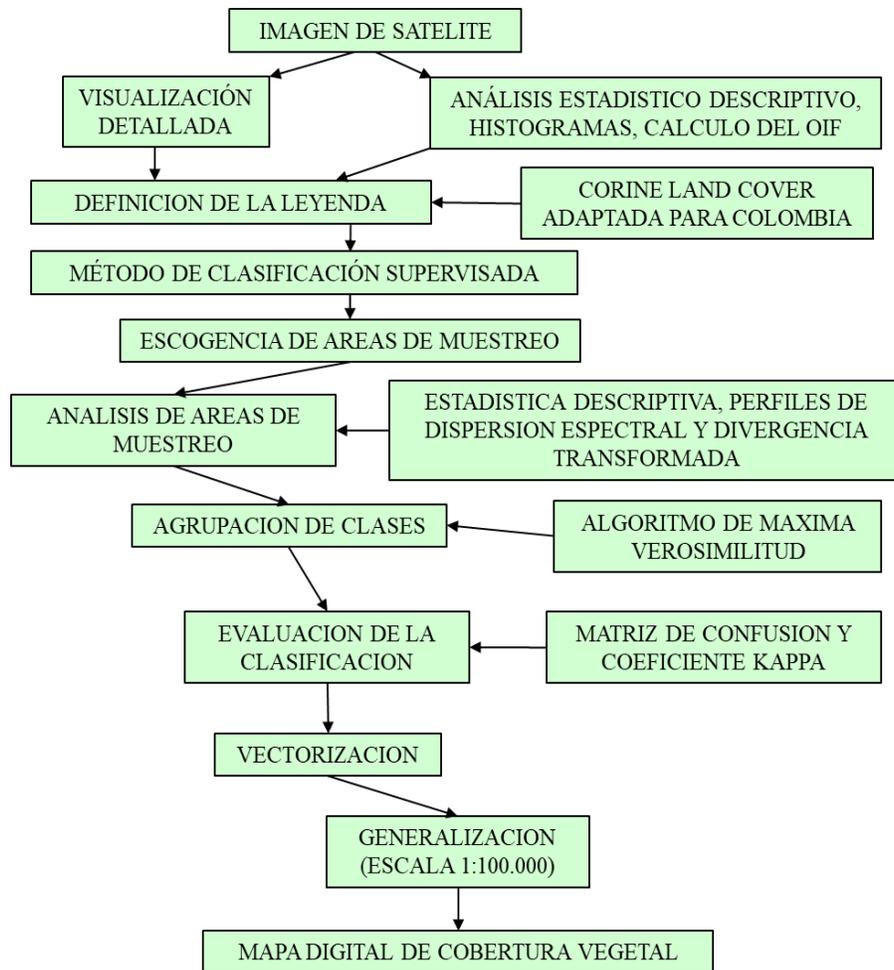


Figura 13. Esquema para determinación de la cobertura vegetal del terreno (Zabaleta, 2017).

Otro de los conceptos importantes para la determinación de la escorrentía superficial es el de la condición hidrológica del terreno, la cual está relacionada estrechamente con el tipo de cobertura y el uso del suelo. A esta condición, de acuerdo con la densidad de vegetación en el terreno, se le asigna la categoría de buena, regular o media, pobre o mala (NRCS, 2009; NRCS, 1986). Según la Resolución 0865 de 2004 del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2004), se categoriza como una condición hidrológica buena aquella cobertura que cubre más del 75 % del terreno, se denomina una condición hidrológica media aquella cobertura que abarca entre el 50 % y el 70 % de la extensión total de un terreno en cuestión y una condición pobre inferior al 50 % de cobertura.

Entonces y a partir de los conceptos expuestos anteriormente, la Figura 14 muestra las etapas definidas para determinar la escorrentía superficial.

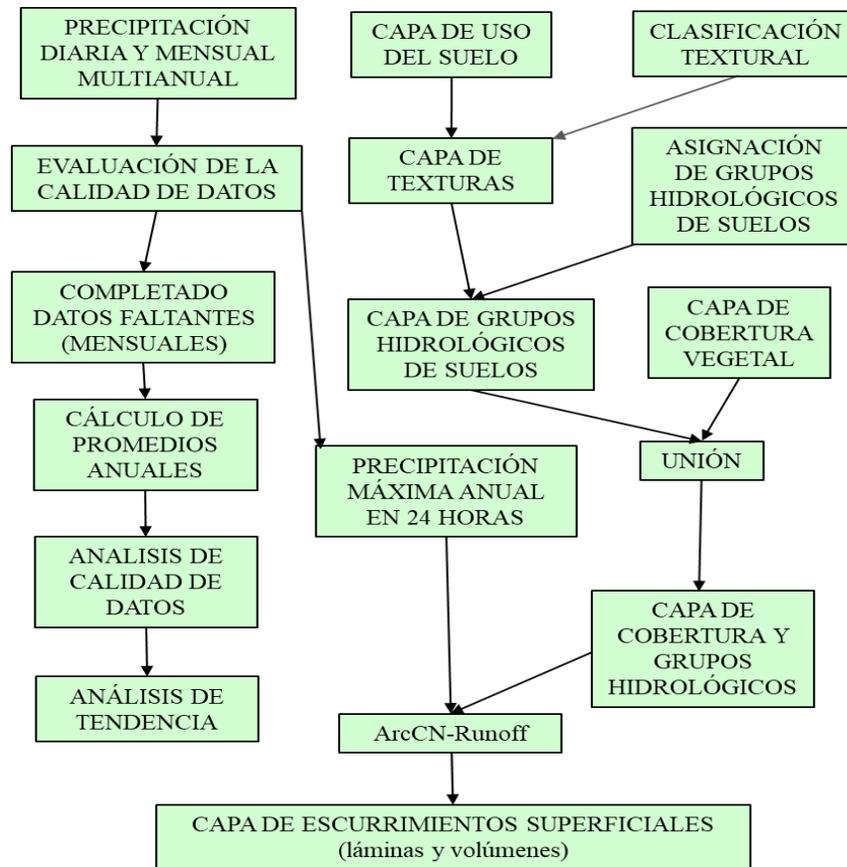


Figura 14. Esquema para el cálculo de escorrentías superficiales (Zabaleta, 2017).

A continuación en los numerales 4.2, 4.3 y 4.4 se presentan los estudios de casos de dinámica de escorrentía como indicador de la oferta hídrica en el territorio.

4.2. Microcuenca Arroyo Carolina (Planeta Rica)

La microcuenca del Arroyo Carolina hace parte de la cuenca del río San Jorge y tiene forma alargada en sentido Sur Oriente, con una longitud de 36 km y una extensión de aproximadamente 16586 ha (Figura 17). En los municipios del área de influencia directa del Arroyo Carolina predomina el piso térmico cálido seco a muy húmedo. Los valores de precipitación en la microcuenca fluctúan entre los 1600 mm y 2100 mm anuales, una humedad relativa promedio

anual de 82.7 % y una temperatura promedio anual de 27.7 °C (FUNSOSTENIBLE y CVS, 2017a).

Para el estudio de la oferta hídrica de la microcuenca, se realizó un análisis del comportamiento temporal de T, d_v y pp entre 1975 y 2014 (Figura 15).

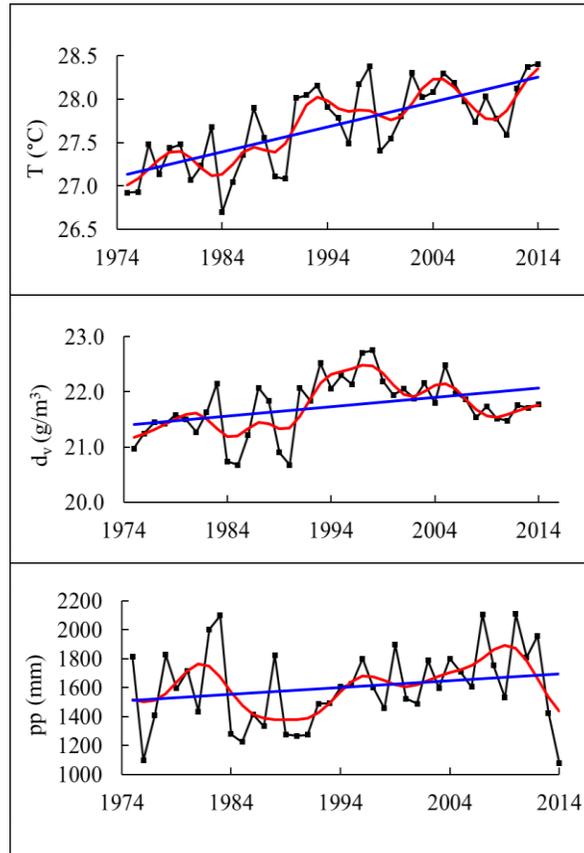


Figura 15. Comportamiento interanual de T, d_v y pp (estación meteorológica de Planeta Rica: 1975-2014). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay.

En Figura 15 se observa un incremento gradual de T desde 1975 hasta 2014, lo cual confirma la existencia del calentamiento global en la zona de estudio. Por otra parte, d_v muestra una tendencia marcada al aumento entre 1975 y 2000, pero a partir de 2001 el contenido de vapor de agua de la atmósfera disminuye paulatinamente hasta 2014. Este comportamiento de d_v se debe posiblemente a que aunque desde 1975 disminuía la cobertura vegetal de la zona de estudio, la cantidad de agua acumulada por los suelos y la vegetación existente era suficiente para generar un incremento continuo de la evaporación y de d_v hasta el año 2000. Pero al continuar

disminuyendo la cobertura vegetal con el tiempo, transformándose en pastos, rastrojos y suelos expuestos con menor contenido de humedad, estos últimos comenzaron a secarse por efecto de la radiación solar incidente, disminuyendo la cantidad de vapor de agua transferida a la atmósfera. El comportamiento diferenciado de d_v (1975-2000 y 2001-2014) explica claramente el efecto del calentamiento global sobre la zona estudiada, especialmente a partir del año 2000. Al igual que d_v , pp muestra un aumento hasta 2000, que posteriormente se convierte en una disminución de mayores proporciones (2001-2014). En particular, el aumento más pronunciado de T y la consecuentemente disminución de d_v entre 2001 y 2014, produjo una disminución de pp en comparación con el aumento registrado durante el período 1975-2000, lo que podría relacionarse con la cada vez mayor exposición de suelos con menor capacidad de retención de humedad y por consiguiente menor evaporación, pudiendo ser estos un indicio del comienzo de un posible proceso de desertificación del territorio. Como comprobación del análisis anterior, la Tabla 9 muestra los incrementos de T, d_v y pp correspondientes a los diferentes periodos de tiempo.

Tabla 9. Incrementos de T, d_v y pp (estación meteorológica de Planeta Rica) calculados por medio del filtro Savitzky-Golay (Figura 15: línea roja) para diferentes periodos de tiempo.

Variable	1975-2014	1975-2000	2001-2014
T (°C)	1.28	0.80	0.60
d_v (g/m ³)	0.58	1.17	-0.37
pp (mm)	-80	92	-185

De acuerdo con la Tabla 9, los diferentes incrementos de T confirman el calentamiento global que está experimentando la atmósfera sobre la zona de estudio. Si se comparan los dos periodos de tiempo, 1975-2000 y 2001-2014, se puede observar que este fenómeno ha tenido proporcionalmente un mayor incremento en los últimos 14 años, que en el período inmediatamente anterior. Las disminuciones de d_v y pp corroboran exactamente lo expuesto sobre estas variables en Figura 15, los cuales también son una demostración del efecto del calentamiento global sobre la microcuenca.

Los resultados de la Tabla 10 permiten inferir que la presencia de El Niño no es la única causa de las altas temperaturas y la sequedad de la atmósfera en épocas secas, ni tampoco que la ocurrencia de La Niña sea la única responsable del incremento de las precipitaciones en la zona de estudio.

Tabla 10. Concordancia en porcentaje de los máximos y mínimos de T, d_v y pp (estación meteorológica Planeta Rica: 1975-2014) con los eventos El Niño y La Niña respectivamente.

Fenómeno	T	d_v	pp
El Niño	64	64	73
La Niña	88	75	63

El análisis entre las líneas azul y roja de la Figura 16 para un evento El Niño intenso ocurrido en 1982/1983 (ONI: 2.1) con el ocurrido en 2009/2010 (ONI: 1.3), permite observar que el incremento de T en 2009/2010 fue mayor (0.98 °C) que el respectivo para 1982/1983 (0.02 °C). Con La Niña se obtiene el mismo resultado, para una intensidad del fenómeno de ONI = -1.7 en 1984/1985 el incremento en T fue de 0.26 °C, mientras que para La Niña del 2010/2011 con ONI = -1.4, T se incrementó en 1.03 °C. Esta diferencia entre ambos incrementos se debió única y exclusivamente al efecto del calentamiento global, que a medida que transcurren los años su magnitud va siendo cada vez mayor.

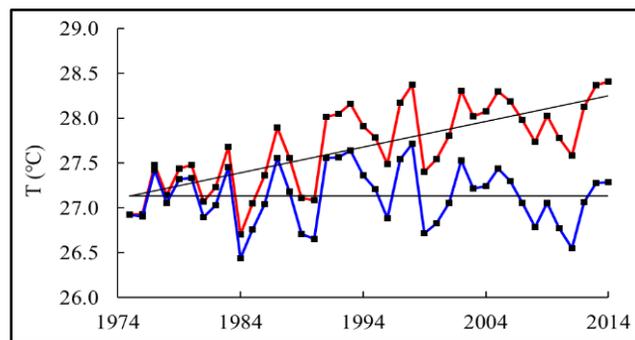


Figura 16. Comparación entre la simulación estadística del comportamiento de T (promedios anuales) en condiciones de inexistencia del calentamiento global (línea azul: simulación

estadística) y en condiciones actuales de presencia de este fenómeno (línea roja). Estación meteorológica de Planeta Rica (1975-2014).

Continuando con el análisis de la información pluviométrica, se encontró que ocurrieron eventos de lluvias máximas en 24 horas que superan los 100 mm, siendo la máxima precipitación diaria la medida entre 1977 y 2015 que fue de 159.6 mm en 1980. Según Palencia et al. (2006), estos eventos pueden generar altas escorrentías dependiendo de las condiciones de cobertura vegetal, tipo de suelo y pendiente del terreno. Al aplicar la distribución Gumbel de eventos máximos con duración de 24 horas (pp_{24}), se encontró que existe una alta probabilidad (0.8) de ocurrencia de lluvias de 116.5 mm con períodos de retorno de 5 años, la cual se puede considerar de alto riesgo, ya que puede generar altos caudales de escorrentía, ocasionando desbordamiento de la corriente principal y sus afluentes en la microcuenca Arroyo Carolina. Además, y de acuerdo con el análisis de tiempo del modelo Gumbeliano para un horizonte a 2066 y 2116, se obtiene que pueden ocurrir lluvias catastróficas con valores entre 167 mm a 182 mm. El análisis expuesto hasta aquí demuestra que la magnitud de las precipitaciones y la disminución de estas, no son explicadas en su totalidad por la ocurrencia del fenómeno ENSO, siendo el calentamiento global local un factor que cada vez influye más en la alteración del régimen de lluvias. De acuerdo con la Figura 17, en la microcuenca existe un área aproximada de 8521.8 ha con alta afectación en la capacidad de infiltración potencial del agua (CN: 76 a 98), ocasionada por un deterioro progresivo de las coberturas vegetales, en especial en zonas con pendientes mayores del 5 % y suelos con texturas arcillosas, lo cual ocasiona altas escorrentías, que se reflejan en crecidas súbitas de la corriente principal y sus afluentes.

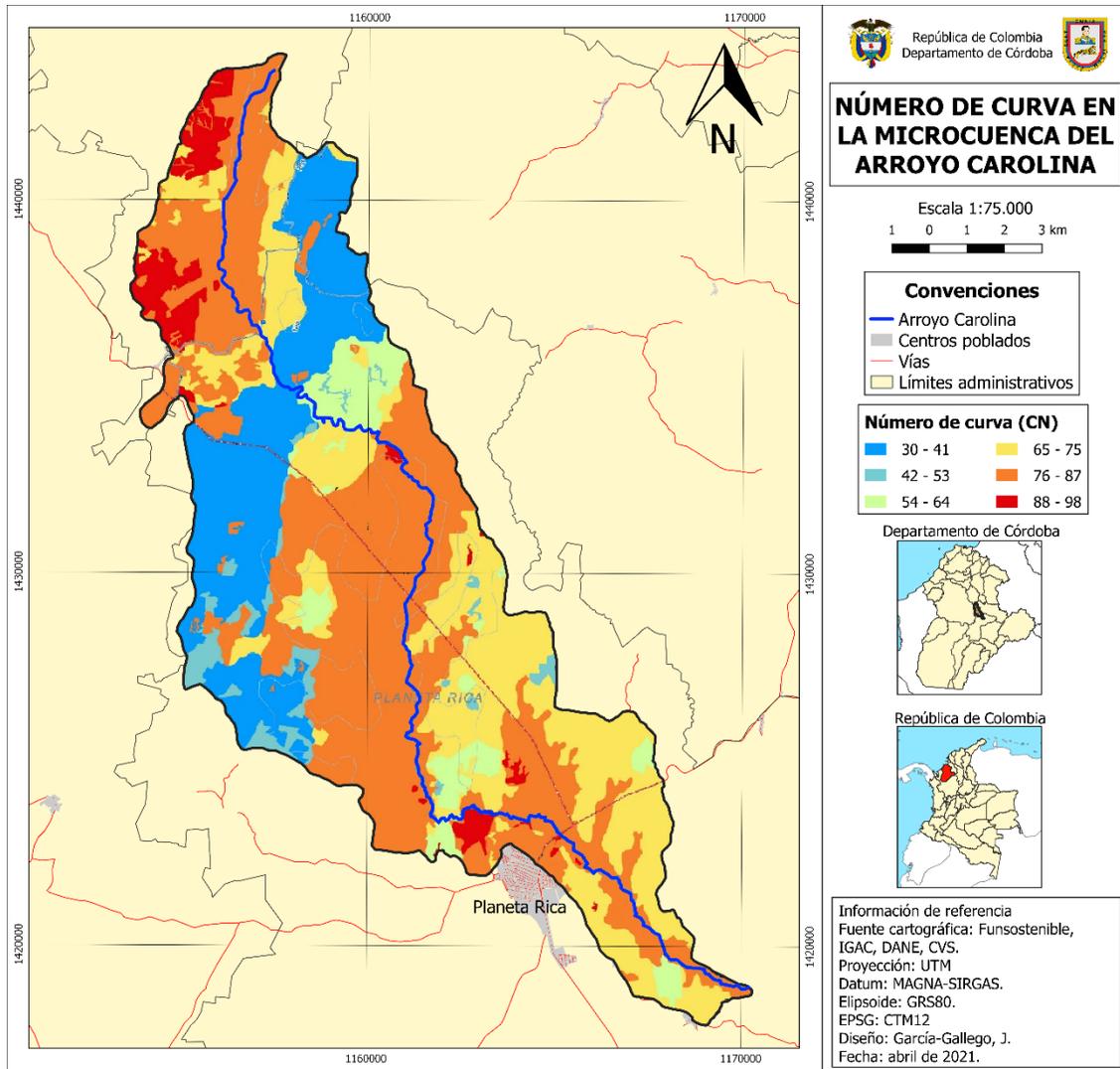


Figura 17. Mapa del Número de Curva calculado CN para la microcuenca Arroyo Carolina.

La Tabla 11 muestra diferentes valores de escorrentía en eventos de 24 horas con períodos de retorno de 2 hasta 100 años en extensas áreas de la microcuenca. Es de anotar que escorrentías mayores de 100 mm están asociadas con una alta amenaza de desbordamiento de cauces e inundación en sus áreas adyacentes.

Tabla 11. Áreas (ha) con escorrentías en 24 horas, a diferentes períodos de retorno. Microcuenca Arroyo Carolina.

Escorrentía (mm)	Períodos de retorno (años)					
	2	5	10	25	50	100
0 – 25	5283.7	4116.4	3505.8	3425.4	3148.8	3148.8
25 – 50	6442.7	4540.5	4559.1	966.0	967.5	356.9
50 – 75	4275.0	7198.2	2076.9	4265.4	4129.6	1777.9
75 – 100	585.2	688.4	5802.8	7037.7	1895.7	3411.3
100 - 125	0.0	43.1	642.1	306.8	5802.8	7160.1
> 125	0.0	0.0	0.0	585.2	642.1	731.5
Área total (ha)	16586.6	16586.6	16586.6	16586.6	16586.6	16586.6

En lo referente a escorrentías mensuales medias, se encontró que desde mayo a octubre predominan altos valores en la zona de estudio, en especial en la parte alta de la microcuenca. Meses como agosto, septiembre y octubre están caracterizados por valores de escorrentía mayores de 125 mm con áreas de 16586.6 ha, 13634.3 ha y 12470.2 ha respectivamente. Estas altas escorrentías generan crecientes en la corriente principal y sus afluentes, ocasionando además erosión de los suelos. Debido a la pobre condición hidrológica de los suelos combinada con el predominio de pendientes altas (mayor de 5 %), la infiltración es limitada, lo cual ocasiona que el almacenamiento del agua en los suelos sea bajo y el aporte a las zonas de recarga de los acuíferos muy limitado (Figura 17). Es así como en períodos secos la corriente principal no tiene flujo de agua, siendo su oferta hídrica nula.

4.3. Microcuenca del río Canalete

La cuenca del río Canalete está ubicada en la zona noroccidental del Departamento de Córdoba en la costa Caribe (Figura 20). El cauce principal tiene una longitud aproximada de 90.2 km desde su nacimiento cerca de la cota 300 msnm hasta su desembocadura en el Mar Caribe. El área de su cuenca hidrográfica es de 91940.7 ha y comprende territorio de los municipios de Canalete, Puerto Escondido, Los Córdoba y Montería (UPB y CVS, 2008). Presenta una

climatología de tipo climático cálido con temperaturas promedio de 27 °C. La precipitación promedio multianual es de 1390 mm, con una dinámica estacional muy variable. En los periodos secos se presentan caudales muy bajos cercanos a los 0.02 m³/s, mientras que en los meses más húmedos pueden llegar a ser de aproximadamente 15 m³/s (CVS, 2005; IGAC, 2009). FUNDSOSTENIBLE y CVS, 2017b).

Desde el punto de vista climático y de acuerdo con la serie de datos de la estación meteorológica Cristo Rey (1978-2015), la temperatura promedio anual multianual para la zona fue de 27.7 °C con variaciones mensuales multianuales entre 26.4°C y 29.2°C. Además, se identifica un régimen climático bimodal (Figura 18), con una T máxima en abril y una mínima en octubre.

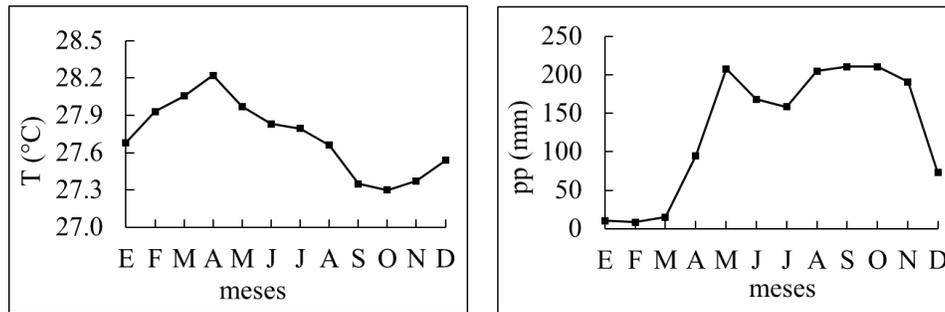


Figura 18. Temperatura promedio mensual multianual T y precipitación promedio mensual multianual pp (estación meteorológica Cristo Rey: 1978-2015).

De acuerdo con la Figura 18, la pp muestra dos periodos húmedos en el año correspondientes a los meses abril-junio (menor) y agosto-noviembre (mayor), y dos periodos secos diciembre-marzo (mayor) y julio (menor). Asimismo, abril es el mes más lluvioso y febrero el más seco del año.

A continuación, la Figura 19 muestra el comportamiento de T, d_v y pp de la zona de estudio, bajo la influencia del calentamiento global.

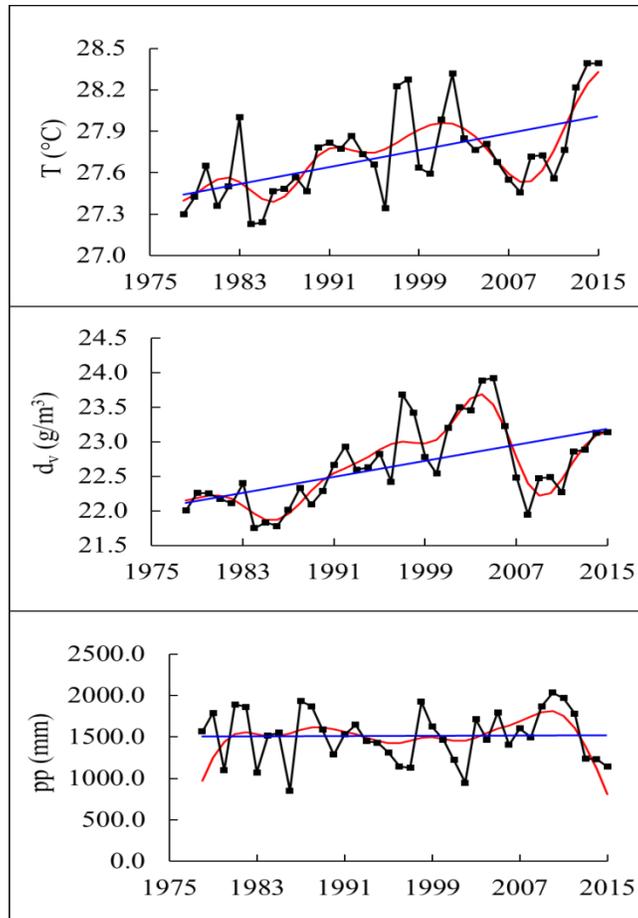


Figura 19. Comportamiento interanual de T , d_v y pp (estación meteorológica Cristo Rey: 1978-2015). Línea azul: tendencia lineal y línea roja: filtro de Savitzky-Golay.

En la Figura 19 se observa que la tendencia de T es al aumento, debido posiblemente a la modificación del estado físico de la superficie en términos de cobertura vegetal, lo cual genera mayor evaporación por incidencia directa de la radiación sobre la superficie del suelo. Al mismo tiempo, el suelo se calienta y comienza a emitir cada vez más mayor cantidad de calor hacia la atmósfera generando el fenómeno del calentamiento global, que entre 1978 y 2015 representó $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ de aumento. En particular y con base en los valores del filtro de Savitzky-Golay, el incremento entre 1978 y 2009 fue de solo $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que en el periodo 2010-2015 fue de $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que muestra claramente que en los últimos años del periodo 1978-2015 el fenómeno del calentamiento global fue más pronunciado. Esta situación es un factor preocupante en el comportamiento de la dinámica natural del clima y en las implicaciones ambientales que tiene en términos ecosistémicos, como futuras pérdidas de especies (amínales y vegetales), así como

afectaciones a la salud por exceso de calor. Los resultados de d_v (Figura 19) muestran que la tendencia del contenido de humedad del aire también es al aumento durante todo el periodo de tiempo de 38 años, comportamiento similar al de T. Al calcular el incremento en d_v entre 1978 y 2015 (filtro de Savitzky-Golay) se obtiene 0.9 g/m^3 , valor que es debido únicamente al aumento entre 2010 y 2015, ya que entre 1978 y 2009 no se experimentó ninguno (0 g/m^3). Estos resultados de d_v muestran claramente que a partir de 2010 el efecto del calentamiento global en la zona de estudio se ha magnificado.

Como consecuencia del aumento de T y d_v , en la Figura 19 se observa que la tendencia de la precipitación es a la disminución, siendo ésta de 434 mm entre 1978 y 2015 (filtro de Savitzky-Golay). Pero lo preocupante es que, mientras en el periodo 1978-2009 pp se incrementó en 551 mm, en los últimos 6 años (2010-2015) se presentó una fuerte disminución de 998 mm. Esto significa, que en la zona de estudio se están presentando disminuciones considerables en la disponibilidad de agua por precipitación directa, afectando el abastecimiento de agua para el consumo humano y las actividades agropecuarias. Además, este comportamiento de pp en los últimos años ha favorecido la degradación de la poca cobertura vegetal existente en la zona y la aparición de procesos significativos de erosión del suelo, degradándolos y afectando su fertilidad natural. El análisis anterior muestra que el comportamiento de las variables climáticas T, d_v y pp está influenciado por el calentamiento global que experimenta el Planeta. En el caso de pp, a diferencia del comportamiento de esta variable en la Cuenca media y baja del río Sinú, Arroyo y Carolina, Planeta Rica; esta se encuentra influenciada por el clima marino modulado por la ocurrencia de vientos, especialmente los Alisios (diciembre-marzo). El otro factor que influye en la zona de estudio, al igual que en las otras zonas mencionadas, es el fenómeno ENSO, cuya influencia se puede comprobar al analizar los máximos y mínimos de T durante los 38 años de estudio.

El comportamiento climático de la zona está relacionado directamente con la modificación de la cobertura vegetal del terreno. En este orden de ideas, en la microcuenca del río Canalete predominan las pasturas, que no favorecen los procesos de retención y regulación hídrica natural para uso humano y las funciones biológicas de las diferentes especies y ecosistemas en su conjunto. Es así como durante los meses secos (diciembre-marzo) se presentan grandes áreas con

suelo expuesto, lo que incrementa la evaporación del agua contenida en ellos al incidir mayor radiación solar, provocando al mismo tiempo un aumento del déficit hídrico y consecuentemente elevando su degradación. Bajo este escenario, la escasa cobertura del terreno potencializa los efectos que puede causar el aumento progresivo de T acentuando la escasez de agua. En este sentido, de continuar disminuyendo pp la zona de estudio se enfrentaría al posible desabastecimiento de agua y conflictos en su uso. Esta problemática se agudiza en la zona litoral, en particular en los municipios de Los Córdoba y Puerto Escondido, en los cuales la principal fuente hídrica aportante es la precipitación, dado que la condición del agua superficial y subterránea es de deficiente calidad por la intrusión marina y demás procesos localizados de contaminación.

Esta situación evidencia la necesidad actual en la conservación de los recursos naturales, mediante la protección del ecosistema. Es imperativo el restablecimiento de la cobertura vegetal como uno de los principales factores en el aumento de dicha resiliencia y la preservación de los recursos y en consecuencia del ecosistema. Los programas de reforestación como una herramienta coadyuvante en los procesos de regulación hidrológica deben priorizar las áreas de especial interés por su rol en la generación y conservación del agua, como rondas hídricas de los cuerpos de agua superficial, nacimientos de ríos, quebradas, etc., de manera que así también se pueda contribuir a ralentizar los efectos del calentamiento global.

El análisis de la precipitación para generación de planos de escurrimiento se realizó mediante el seccionamiento de la microcuenca en cuatro zonas teniendo en cuenta como criterio el área de influencia de las estaciones meteorológicas Cristo Rey, Jaramagal, Santa Lucía y Canalete, con el fin reducir la incertidumbre en la estimación de las escurrimientos. Se aplicó el método de Gumbel a eventos máximos de precipitación en 24 horas (pp_{24}) con períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años en la zona de estudio, así como a los promedios mensuales multianuales. La aplicación de método de Gumbel permitió predecir eventos máximos a períodos de retornos mayores a la serie de datos existentes, tal como se muestra en la Tabla 12; observando que la mayor probabilidad de eventos de lluvias intensas ocurre para períodos de retorno mayores de 25 años.

Tabla 12. Resultados de la aplicación del método Gumbel a la predicción de eventos máximos de pp_{24} a diferentes períodos de retorno (estaciones meteorológicas de Cristo Rey y pluviométricas de Jaramagal, Santa Lucía y Canalete: 1978-2015).

Periodo de retorno (años)	Estación				Probabilidad
	Cristo Rey	Jaramagal	Santa Lucía	Canalete	
	Precipitación (mm)				
2	99.9	91.8	81.9	88.8	0.50
5	124.1	123.9	104.2	108.4	0.80
10	140.1	145.1	119.0	121.4	0.90
25	160.2	172.0	137.7	137.8	0.96
50	175.2	191.9	151.5	150.0	0.98
100	190.1	211.7	165.3	162.1	0.99

En Figura 20 se muestra el mapa de CN para la microcuenca del río Canalete, en la cual se observa un alto porcentaje de afectación de la infiltración potencial, lo cual favorece la ocurrencia de altos valores de escorrentía (> 100 mm).

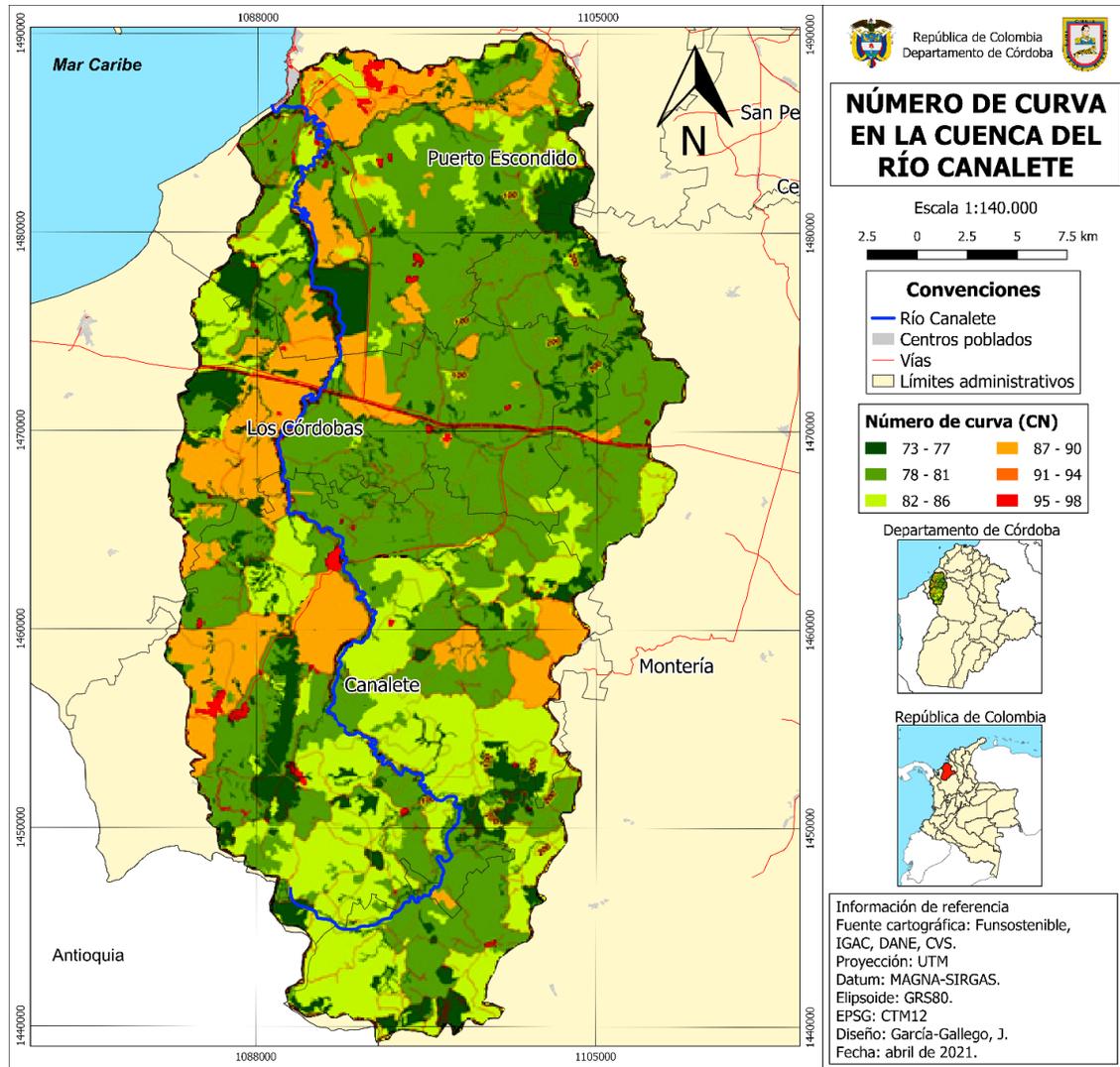


Figura 20. Mapa del Número de Curva calculado CN para la microcuenca del río Canalete.

Continuando con el análisis hidrodinámico, la Tabla 13 muestra los valores de escorrentía y área de territorio para diferentes períodos de retorno. Se encontró que cada dos años pueden ocurrir escorrentías mayores de 70 mm en un área de 717 ha y valores mayores de 89 mm cada 5 años en un área de 7680.9 ha, lo cual indica una alta amenaza de crecientes y procesos erosivos en la cuenca del río Canalete. Para períodos de retorno de 100 años es posible que ocurra un evento mayor que 107 mm en un área de 65355.7 ha (71.2 % del área total de la microcuenca), lo cual podría ocasionar un evento catastrófico de creciente y avalancha.

Tabla 13. Áreas de escorrentía a diferentes períodos de retorno, microcuenca del río Canalete (Tr: tiempo de retorno).

Escorrentía Tr: 2 años		Escorrentía Tr: 5 años		Escorrentía Tr: 10 años	
Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)
35 - 37	13532.3	41 - 48	4363.5	52 - 62	6208.7
38 - 48	53377.3	49 - 60	29847.0	63 - 78	44759.1
49 - 60	16358.5	61 - 71	37921.1	79 - 90	21272.5
61 - 71	7839.5	72 - 88	12012.3	91 - 104	12029.3
72 - 83	447.4	89 - 106	7393.7	105 - 122	7267.9
84 - 94	269.6	107 - 118	287.2	123 - 139	287.2
TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7
Escorrentía Tr: 25 años		Escorrentía Tr: 50 años		Escorrentía Tr: 100 años	
Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)
66 - 83	31268.6	76 - 95	26469.0	87 - 106	26469.0
84 - 96	19699.8	96 - 113	24499.4	107 - 126	21975.3
97 - 108	10900.3	114 - 131	13157.9	127 - 146	15565.2
109 - 122	20176.8	132 - 149	22928.0	147 - 166	23044.8
123 - 139	5008.8	150 - 168	4483.2	167 - 186	4582.2
140 - 166	4770.4	169 - 186	287.2	187 - 206	188.2
TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7

En la Tabla 14 se muestran los valores de escorrentía mensuales promedios multianuales, encontrando que en diciembre, enero, febrero y marzo predominan escorrentías menores a 25 mm, mientras de abril a noviembre ocurren valores mayores a 100 mm, con picos en mayo de 167 mm – 185 mm (8064.2 ha), agosto y septiembre con 164.5 mm – 181 mm (2942 ha) y octubre con 166 mm – 187 mm (3039.4 ha). Lo anterior indica que en los meses de ocurrencia de valores pico de escorrentía están asociados a crecidas y erosión. En el 100 % del área de estudio la escorrentía anual media es mayor que 1247 mm, con valores máximos de 1427 mm a 1516 mm en un área de 6098 ha, los cuales coinciden con el predominio del número de curva (CN) mayores a 85.

Tabla 14. Áreas de escorrentía mensuales medias multianuales, microcuenca del río Canalete.

Escorrentía Enero		Escorrentía Febrero		Escorrentía Marzo	
Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)
0 - 2	83098.8	0 - 1.2	90358.0	0 - 4	66935.6
3 - 5	7168.8	1.3 - 2.5	914.3	5 - 8	11181.6
6 - 7	1063.3	2.6 - 3.7	187.6	9 - 12	12983.6
8 - 10	286.3	3.8 - 4.9	157.3	13 - 17	265.4
11 - 12	0.0	5 - 6.1	0.0	18 - 21	78.5
13 - 15	207.6	6.2 - 7.4	207.6	22 - 25	380.0
TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7
Escorrentía Abril		Escorrentía Mayo		Escorrentía Junio	
Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)
32 - 45	22649.6	93 - 111	422.4	78 - 92	8912.9
46 - 57	12124.5	112 - 129	12488.4	93 - 107	27606.7
58 - 70	44380.5	130 - 148	54198.1	108 - 122	43392.7
71 - 83	4403.5	149 - 166	16174.5	123 - 136	7868.6
84 - 95	7983.8	167 - 185	8064.2	137 - 151	3723.9
96 - 108	282.8	186 - 203	477.2	152 - 165	319.9
TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7
Escorrentía Julio		Escorrentía Agosto		Escorrentía Septiembre	
Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)
78 - 92	6518.2	95 - 113	9146.1	94 - 111	11358.3
93 - 106	40843.7	114 - 130	56451.6	112 - 129	61604.7
107 - 121	34544.3	131 - 147	14288.2	130 - 146	14491.3
122 - 135	4699.7	148 - 164	8884.3	147 - 163	1316.1
136 - 149	4931.6	165 - 182	2942.0	164 - 180	2942.0
150 - 164	287.2	183 - 199	112.4	181 - 197	112.4
TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7
Escorrentía Octubre		Escorrentía Noviembre		Escorrentía Diciembre	
Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)	Rangos	Área (ha)
79 - 101	13753.7	57 - 75	30834.6	8 - 14	9555.1
102 - 122	58966.5	76 - 92	26071.7	15 - 19	7472.2
123 - 144	12496.7	93 - 110	21047.4	20 - 23	39398.3
145 - 165	3308.9	111 - 127	10973.9	24 - 31	20145.1
166 - 187	3039.4	128 - 145	2784.7	32 - 47	14759.3
187 - 209	259.5	146 - 163	112.4	48 - 57	494.7
TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7	TOTAL	91824.7

La probabilidad de ocurrencia y el período de retorno de eventos de precipitaciones pp_{24} , estimados a partir de la estocástica, permiten cuantificar los volúmenes o caudales de escorrentía y sus efectos. Al aplicar el modelo de distribución Gumbel a la información de eventos máximos (COLPOS, 1974; Arango, 2001; Monsalve, 2004) con duración de 24 horas de las estaciones de Santa Lucia, Canalete, Cristo Rey y Jaramagal se encontró que existe alta probabilidad de ocurrencia (0.80) de eventos de 104.2 mm – 124.1 mm con períodos de retorno de 5 años, lo cual se considera de alto riesgo, ya que pueden generar altos caudales de escorrentía que causan desbordamiento de la corriente principal y sus afluentes en la cuenca del río Canalete. De acuerdo con el análisis de tiempo del modelo Gumbeliano para un horizonte de 50 a 100 años, es decir, desde el año 2065 al 2115, podrían ocurrir lluvias de efectos catastróficos con valores entre 190.1 mm y 211.7 mm (Tabla 12).

4.4. Zona de Sabana de Córdoba

El área de estudio comprende una franja de la denominada Zona de Sabana del Departamento de Córdoba correspondiente a los municipios de Sahagún y Chinú (CVS, 2009), así como la superficie total de los municipios de Pueblo Nuevo y Planeta Rica (Figura 21). La extensión total de la zona estudio es de 3479 km² (347900 ha) con relieve en su mayoría de lomerío erosional estructural en forma de terrazas disectadas. La temperatura media anual es de 27 °C y la precipitación media varía entre 1050 mm y 1950 mm, siendo clasificada como una zona climática Cálido-Seco (IGAC, 2009; Zabaleta, 2017).

Con base en los valores de número de curva y las precipitaciones totales anuales, se estimó la escorrentía para dos escenarios. El primero, considerando la precipitación promedio anual (pp) con la finalidad de analizar los valores de escorrentía promedio, generados en el territorio y los posibles impactos sobre las condiciones actuales del estado físico de la superficie (cobertura vegetal) y la condición natural del suelo en términos granulométricos expresados en el grupo hidrológico de suelos (HGS). El segundo, mediante la estimación de escorrentías superficiales con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años (Tabla 15), como aproximación a los escenarios de cambio climático, considerando invariables las condiciones actuales del estado físico del terreno y su composición granulométrica.

La Tabla 15 muestra los valores de precipitación superficial calculados para diferentes períodos de retorno en las estaciones Centro Alegre, Planeta Rica, Cintura, Colomboy, Sahagún y Chinú.

Tabla 15. Estimación de la precipitación superficial a diferentes periodos de retorno (estaciones meteorológicas de Centro Alegre, Planeta Rica, Colomboy y Sahagún, y pluviométricas de Cintura y Chinú).

Período de retorno (años)	Precipitación (mm) por estación						Probabilidad de ocurrencia
	Centro Alegre	Planeta Rica	Cintura	Colomboy	Sahagún	Chinú	
2	1602	1532	1899	1461	1347	1306	0.50
5	1906	1693	2167	1641	1535	1516	0.80
10	2107	1800	2345	1761	1660	1654	0.90
25	2361	1935	2569	1912	1818	1830	0.96
50	2550	2035	2735	2024	1935	1960	0.98
100	2730	2134	2900	2135	2051	2089	0.99

Las predicciones de precipitación a los diferentes periodos de retorno se realizaron con el método predictivo de Gumbel, como aproximación al comportamiento medio de la escorrentía en cada uno de los municipios que conforman la Zona de Sabana. El cálculo de la escorrentía se realizó para cada uno de los municipios teniendo como insumo la información pluviométrica de las estaciones climatológicas con áreas de influencia sobre los mismos (Planeta Rica: estaciones Planeta Rica y Centro Alegre, Pueblo Nuevo: estación Cintura, Sahagún: estaciones Sahagún y Colomboy, Chinú: estación Chinú), cuyos resultados se muestran en la Figura 21.

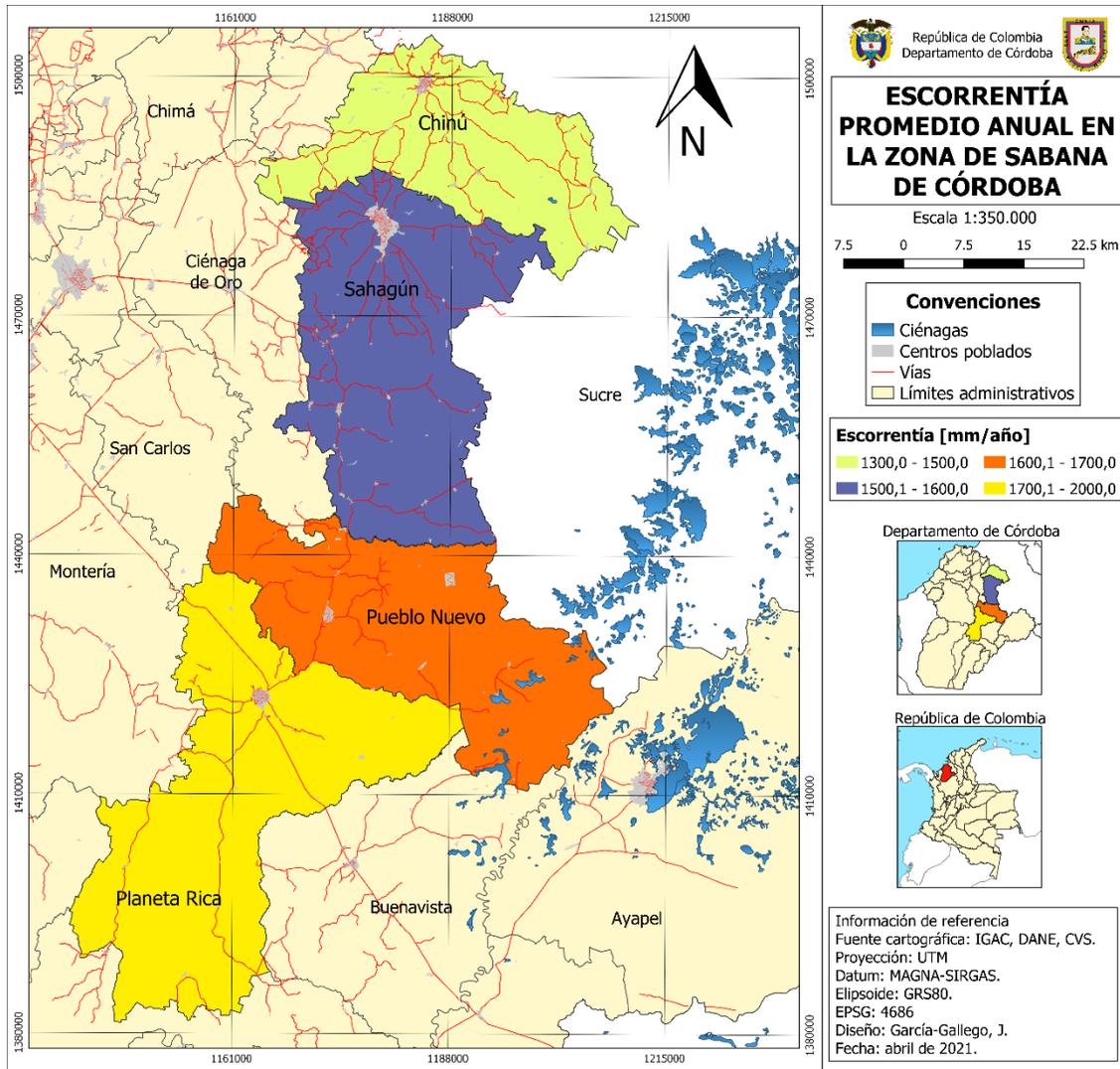


Figura 21. Escorrentía promedio anual, Zona de Sabana de Córdoba: municipios de Planeta Rica, Pueblo Nuevo, Sahagún y Chinú (Zabaleta, 2017).

La Figura 21 muestra que la escorrentía promedio anual para el área de estudio supera los 1300 mm, notándose en general un aumento en sentido Norte – Sur, excepto en el Noreste del municipio de Pueblo Nuevo, en el cual a la altura de las ciénagas de Cintura, Puerto Santo y El Arcial se estimaron escorrentías por encima de 1900 mm/año. Estos valores discrepan en magnitud con los publicados por el IDEAM (2010), donde se reportan valores de escorrentía superficial entre 1000 mm y 1500 mm para el Noreste de Pueblo Nuevo. Estas diferencias pueden deberse al método empleado por dicho Instituto, basado en la diferencia precipitación – evaporación, al aplicar el balance hídrico para la estimación de la escorrentía, mientras que en

este estudio se determinó empleando el método del número de curva, que relaciona el estado físico actual del terreno con la cantidad de lluvia que se precipita. Es de anotar, que los valores obtenidos de escorrentía (Figura 21) son similares a los de precipitación (Tabla 15) para la Zona de Sabana (baja capacidad de infiltración de los suelos), lo cual podría corroborar la pertinencia de este método. Puesto que las altas escorrentías representan un factor de riesgo inminente para el territorio representado por el eventual aumento de procesos erosivos y con ello la posterior degradación del suelo, crecientes súbitas, inundaciones, remociones en masa, entre otros, la estimación de la capacidad hidráulica de los cuerpos de agua superficial (corrientes y humedales) es indispensable para la recepción y transporte de los volúmenes generados por escorrentía.

En la zona de estudio se identifican cuatro microcuencas principales correspondientes a los arroyos Carolina, Arena, Aguas Claras y Santiago, cuyas corrientes principales recogen las aguas generadas por los tributarios. Estas corrientes tienen baja capacidad hidráulica de conducción de caudal, (CVS, 2006), lo cual indica que no pueden evacuar los volúmenes de escorrentía generados (14095059.4 m³/año), más aún con la ocurrencia de volúmenes pico que exceden entre el 50 % y 70 % el promedio anual, para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, generando riesgos de inundaciones con sus consecuentes desastres. Existe una condición natural del área de estudio representada por limitaciones en la infiltración de agua debido al tipo de granulometría del suelo, las cuales se expresan en que el 50.1 % de los suelos estén categorizados bajo los grupos hidrológicos C y D, dedicados fundamentalmente a la ganadería. El 87.7 % del total de la cobertura vegetal del territorio está ocupada principalmente por pastos de baja y regular calidad (90 %), sometidos a una gran presión por parte del ganado, lo cual también genera procesos de compactación de los suelos que dificultan aún más la infiltración de agua y potencializan la escorrentía. Este estado de la cobertura vegetal y los suelos no favorece los procesos de abstracción y por tanto de regulación hídrica, ni los procesos de regulación térmica, contribuyendo aún más al aumento de la temperatura de la superficie y por ende al calentamiento global.

5. RECOMENDACIONES PARA LA RECUPERACION Y MANEJO DE LA OFERTA HÍDRICA

El cambio de uso del suelo ha generado un alto grado de erosión, compactación y lixiviación, el cual ha incrementado paulatinamente la desertificación de estos, que aunado al déficit de agua hacen poco viables las actividades agrarias productivas; siendo necesario un trabajo social organizado para realizar proyectos de reforestación, restauración, manejo de residuos sólidos, control de vertimientos y actividades de agropecuarias responsables, que hagan un uso eficiente y sostenible del agua, aplicando las normas vigentes que obligan a los propietarios a conservar humedales, solicitar concesión de agua y conservar las rondas hídricas. En las cuencas es común encontrar déficits hídricos, altas escorrentías, disposición inadecuada de basuras, deforestación, vertimientos no controlados, prácticas extensivas de ganadería, agricultura con altos insumos, captaciones de agua no regularizadas, ampliación indebida de la frontera agrícola y pérdida de amortiguación de crecientes. La situación actual del recurso hídrico es resultado de un fuerte proceso de deterioro ambiental ocasionado por la alta presión sobre el mismo, la ausencia de procesos de educación y la pobreza de las comunidades que habitan la cuenca.

A continuación y a manera de conclusiones sobre el contenido del libro, se proponen algunas recomendaciones relacionadas con el comportamiento que se debe tener para evitar incrementar aún más el calentamiento global que experimenta la zona de estudio y por consiguiente a la disminución catastrófica de la oferta hídrica. Es muy importante tener en cuenta, que la situación actual del territorio, como lo demuestran los resultados analizados, requiere indispensable e inmediatamente del involucramiento de toda la sociedad con el fin de evitar llegar en el futuro cercano y medio a una situación de falta de agua suficiente por efectos del excesivo calentamiento de la atmósfera. Para lograr el restablecimiento de la cantidad y calidad de agua se recomienda realizar las siguientes acciones:

a) Restauración de bosques de galería en las corrientes de las cuencas

El bosque de galería es la vegetación natural de las orillas de las corrientes y sirve de reserva biológica, es zona de regulación hídrica y generación de biodiversidad. La eliminación de esta vegetación es uno de los factores que conduce a la desestabilización total o parcial de sus taludes

y de las franjas de terrenos adyacentes. Por tal motivo es estratégico realizar el enriquecimiento del bosque de galería de las corrientes de las cuencas, a partir de estrategias de rehabilitación con especies nativas.

b) Reforestación en zonas de altas escorrentías en las cuencas

La deforestación es la eliminación de la cobertura vegetal en aras de la agricultura, la ganadería, actividades mineras, represas, creación y mantenimiento de la infraestructura, expansión y crecimiento de las poblaciones. Los proyectos de reforestación no han sido suficientes para mitigar la problemática en las áreas que ofrecen y prestan servicios ecológicos de gran importancia, sirviendo de filtro entre los ecosistemas terrestres adyacentes y la corriente. Los bosques ayudan a reducir los procesos de sedimentación en los lechos de los ríos, tienen la capacidad de soportar inundaciones temporales y mantener la buena calidad del agua. La reforestación de áreas de alto potencial de escorrentía es una estrategia para la conservación *in-situ* de ecosistemas, biodiversidad y servicios ambientales, en particular la regulación hídrica, adoptando los planes de ordenamiento y manejo como áreas de protección y conservación.

c) Cosecha de agua lluvia para manejo de escorrentía

En microcuencas que presentan déficit hídrico, en período seco, el flujo de agua de las corrientes y el almacenamiento en reservorios puede desaparecer, afectando severamente los pobladores de la zona. El problema de la escasez de agua, no se debe solamente a la ocurrencia de una fuerte sequía, sino también a la disminución en la capacidad de regulación hídrica, como consecuencia de la tala indiscriminada del bosque, permitiendo alta escorrentía y grandes avenidas e inundaciones. Con la construcción de lagos o reservorios, se puede regular la escorrentía en períodos lluviosos y suministrar agua a las comunidades en sequías.

d) Buenas prácticas agropecuarias

La actividad ganadera es uno de los principales usos del suelo y juega un rol importante en la economía de muchas familias rurales, no obstante, se vienen realizando malas prácticas agropecuarias y ganaderas, que ocasionan contaminación de fuentes de agua, reducción de la biodiversidad, emisiones de gases de efecto invernadero, compactación del suelo y disminución de la cobertura vegetal. Por lo anterior, es urgente que los propietarios de tierras con el apoyo de

las autoridades ambientales, implementen acciones productivas sostenibles, tales como arreglos silvopastoriles, agroforestería y agricultura de bajos insumos, que permitan mejorar la productividad y reducir la degradación de los recursos suelo y agua.

De acuerdo a los análisis de caso expuestos en este libro, es de gran importancia que esta clase de estudios sean tenidos en cuenta en la discusión y elaboración de planes de desarrollo del territorio y en el direccionamiento de políticas, programas y proyectos dirigidos a la implementación de medidas de adaptación y mitigación al cambio climático, fenómeno que cada vez afecta más a la estabilidad de la Naturaleza y a la supervivencia de la Humanidad.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Adler, R., Huffman, G., Chang, A., Ralph, F., Xie, P., Janowiak, J. and E. Nelkin (2003). The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979 – Present). *Hydrometeorol*, 4(1), 1147–1167.
- Alzate, D., Rojas, E., Mosquera, J. y J. Ramón (2015). Cambio climático y variabilidad climática para el periodo 1981-2010 en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, Norte de Santander, Colombia. *Universidad de Caldas*, 40(21), 127–153.
- Arango, C. (2001). *Cuencas hidrográficas: Bases Conceptuales, Caracterización, administración*. Ibagué, Colombia: Universidad Del Tolima.
- Arango, C., et al Dorado, J., Guzmán, D. y F. Ruíz (2015). Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo El Niño, La Niña-Oscilación del Sur (ENSO). Bogotá D.C.: Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología (IDEAM).
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Bogotá D.C.: Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Bryson, B., Zbyszek, K., Shaohong, W. and P. Jean (2008). El cambio climático y el agua, Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra: Secretaría del IPCC.
- Buytaert, W., Tovar, C. and B. De Bièvre (2011). Potenciales impactos del cambio climático sobre el balance hídrico de los Andes Tropicales. Lima - Quito: Serie Panorama Andino sobre Cambio Climático. CONDESAN, SGCAN.

- Camuffo, D. (2002). Microclimate for Cultural Heritage. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111(5320), 415. http://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2074/S0168192302000400/1-s2.0S0168192302000400-main.pdf?_tid=8420da6a-ef16-11e6-92670000aacb35e&acdnat=1486679246_cf827c9ce6372c10ce6d05a16e2c2a37
- Capel, J. (1999). El fenómeno ENSO (El Niño/Oscilación del Sur) Alteraciones climáticas inducidas en el mundo. *NIMBUS*, 3 (2), 37–62.
- Chen, M., Xie, P. and J. Janowiak (2002). Global Land Precipitation : A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations. *Journal of Hydrometeorology*, 3(2), 249–266.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección espacial* (3 ed.). Madrid: Ediciones RIALP S.A.
- COLPOS (1974). *Manual de conservación del suelo y del agua. Capítulo II. Escurrimientos superficiales*. Chapingo, México: COLPOS-Colegio de Postgraduados.
- Correia, F., Alvalá, R. and A. Manzi (2007). Modeling the impacts of land cover change in Amazonia : a regional climate model (RCM) simulation study. . *Theoretical and Applied Climatology*, 93 (47), 225–244.
- Costa, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes*, 26(13), 74–80.
- CVS (2005). *Diagnóstico ambiental de la cuenca hidrográfica del río Canalete*. Montería, Colombia: Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge – CVS.
- CVS (2006). *Fases de prospección y formulación del Plan de Ordenamiento y Manejo Integral de la Cuenca Hidrográfica del Río San Jorge. Capítulo 6: recurso hídrico*. Montería, Colombia: Corporación Autónoma para los Valles del Sinú y San Jorge (CVS).
- CVS, Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN), Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE) y Universidad de Córdoba (2006). *Fases de prospección y formulación del Plan de Ordenamiento y Manejo Integral de la Cuenca Hidrográfica del Río Sinú (POMCA-RS)*. Montería.
- CVS (2009). *Plan de Gestión Ambiental Regional - PGAR Actualización 2008-2019*. Montería, Colombia: Corporación Autónoma para los Valles del Sinú y San Jorge (CVS).
- Dessler, A., Zhang, Z. and P. Yang (2008). Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003-2008. *Geophysical Research Letters*, 35(20), 10–13.
- Díaz, Á. y T. Mercado (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452 - 470.

- Dirmeyer, P., Brubaker, K. and T. Delsole (2009). Import and export of atmospheric water vapor between nations. *Journal of Hydrology*, 365(1-2), 11–22.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.016>
- Echeverri, C. (2006). Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 85–96.
- Espejo, F. (2006). Teledetección: nociones y aplicaciones . *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 378 .
- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO.
- Fernández, F. (1995). Manual de climatología aplicada. Síntesis. Madrid, España.
- Ferrér, M., Rodríguez, J. y T. Estrela (1995). Generación Automática Del Número De Curva Con Sistemas De Información Geográfica. *Ingeniería del agua*, 2(4), 43–58.
- FUNSOSTENIBLE y CVS (2017a). Formulación del Plan de Ordenación del Recurso Hídrico de la Microcuenca del Arroyo Carolina, Planeta Rica, Córdoba. Montería: Editores: Mercado, T. Schorr, F. Ruiz, H. Torres-Conde, E. Cogollo H. Páez E.
- FUNSOSTENIBLE y CVS (2017b). Realizar la formulación del Plan de ordenamiento del recurso hídrico -PORH- e implementar acciones de manejo para la cuenca del Río Canalete, en el departamento de Córdoba. Montería, Colombia: Torres, E. Mercado, T. Estrada, E. Chaker, S. Cogollo, H. Páez, E.
- García, M., Piñeros, A., Bernal, F. y E. Ardila (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes*, 36(18), 60–64.
- Gil, J., García, E., Sánchez, R. y M. Vega (2003). Enfoques para la clasificación digital de imágenes mono y multiespectrales y su implementación en el software cubano TN Estudio V2 . 0. *Revista de Teledetección*, 20(10), 35–52.
- Gónima, L. (2009). Evidencias del calentamiento global en el Caribe Colombiano. *Meteorología Colombiana*, 1-10.
- Gónima, L. y M. Pérez (2016). Análisis para la identificación de alteraciones a corto plazo del clima en la cuenca media y baja del río Sinú. Informe Final, convenio FENALCE-Universidad de Córdoba, Bogotá-Montería.
- Gui, K., Che, H., Chen, Q., Zeng, Z., Liu, H., Wang, Y. and T. Liao (2017). Evaluation of radiosonde, MODIS-NIR-Clear, and AERONET precipitable water vapor using IGS ground-based GPS measurements over China. *Atmospheric Research*, 197(89), 461–473.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.021>

- Hartmann, D. (2015). *Global Physical Climatology*, Chapter 5: the hydrologic cycle. Amsterdam: Elsevier Eds.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología Meteorología y estudios Ambientales.
- IDEAM (2012). *Sequía meteorológica y sequía agrícola en Colombia: incidencia y tendencias*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología Meteorología y estudios Ambientales.
- IGAC (2009). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Córdoba*. Bogotá D.C.: IGAC, Ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología.
- IPCC (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007; Informe Síntesis para Responsables de Políticas*. Ginebra: IPCC.
- IPCC (2011). *Cambio climático 2001: La base científica: Contribución del grupo de trabajo I al tercer informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático*. Ginebra.
- IPCC (2014a). *Cambio climático 2013: bases de la ciencia física*. Ginebra.
- IPCC (2014b). *Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del grupo de trabajo II al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre cambio climático*. Ginebra, Suiza.
- Krol, M. and A. Bronstert (2007). Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. *Environmental Modelling & Software*, 22 (11), 259–268.
- Labat, D. (2006). Oscillations in land surface hydrological cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, 242(1-2), 143–154.
- Larios, J. (2008). Calentamiento global al borde del límite. *INET*(8).
- Leckner, B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface. *Elements of a model*. *Solar Energy*, 20(2), 143–150.
- Lentes, P., Peters, M. and F. Holmann (2010). Regionalization of climatic factors and income indicators for milk production in Honduras. *Ecological Economics*, 69(3), 539–552. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.09.001>
- Lorenzo, R. y C. García (2011). Estimación de caudales de avenidas y delimitación de áreas inundables mediante métodos hidrometeorológicos e hidráulicos y técnicas S.I.G., estudio aplicado al litoral sur de la región de Murcia. *Papeles de Geografía*, 54(53-54), 107–123.
- Loya, J., Aguilar, S., Bravo, L. y E. Sánchez (2013). Evaluación espacio-temporal del impacto del crecimiento urbano sobre la cobertura vegetal en la región fronteriza Nogales ,

- México y Arizona , Estados Unidos , durante el periodo 1995-2010. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(1), 124–140.
- Melesse, A. and S. Shih (2002). Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3), 173–183.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). Resolución 865 de 2004. Bogotá D.C.
- Mongil, J. y J. Navarro (2012). Infiltración y grupos hidrológicos de suelos en las laderas de los páramos (Valladolid). *Cuadernos de Investigacion Geografica*, 38(1), 131–153.
- Monsalve, G. (2004). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá-Colombia: Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- New, M., Hulme, M. and P. Jones (1999). Representing Twentieth-Century Space – Time Climate Variability . Part I: Development of a 1961 – 90 Mean Monthly Terrestrial Climatology. . *American Meteorological Society*, 12(6), 829–856.
- New, M., Hulme, M. and P. Jones (2000). Representing Twentieth-Century Space – Time Climate Variability . Part II : Development of 1901 – 96 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate. *American Meteorological Society*, 2217–2238.
- Nobles, E. (2016). *Evaluación de la Amenaza por Sequía en el Departamento de Córdoba. Montería, Colombia.: Universidad de Córdoba.*
- NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55*. NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55*. USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release. Natural Resources Conservation Service. doi:[http://doi.org/Technical Release 5](http://doi.org/Technical%20Release%205).
- NRCS. (2009). *Small Watershed Hydrology: WinTR-55 User Guide*. Natural Resources Conservation Service . USDA (United States Department of Agriculture).
- OMM. (2017). *Declaración sobre el estado del clima mundial en 2016*. Genève: Organización Meteorológica Mundial, OMM. N°1189.
- Pabón, J. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Academia Colombiana de Ciencia*, 32(16), 261–278. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v36n139/v36n139a10.pdf>.
- Pabón, J. y G. Torres (2006). Efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en la sabana de Bogotá. *Meteorología Colombiana*, 10(5), 86–99.
- Palencia, G., Mercado, T. y E. Combatt (2006). *Estudio Agroclimático del departamento de Córdoba*. Montería: Universidad de Córdoba.

- Pérez, M. (2014). Modelo metodológico para la identificación del calentamiento global a escala local: cuenca media y baja del río Sinú. Univeridad de Córdoba, esis de maestría en Ciencias Ambientales, Montería, Colombia.
- Pérez, M. y L. Gónima (2014). El contenido del vapor de agua de la atmósfera como indicador de calentamiento global en una zona del Caribe de Colombia. Cuadernos de Investigación Geográfica, 40(2), 477–495.
- Ponce, V. and R. Hawkins (1996). Runoff curve number: has it reached maturity? . Journal Hidrologyc Engineering, 1(1), 11–19.
- Posada, E. (2012). Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011. Bogotá D. C.: R. Hector & E. Norma.
- Poveda, G. y O. Mesa (1999). La Corriente de Chorro Superficial del Oeste (“ del CHOCÓ ”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia sobre: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. Revista Académica Colombiana de Ciencia, 23(89), 517 – 528.
- Quevauviller, P. (2017). Environmental Science & Policy Climate change policy and water resources in the EU and Spain . A closer look into the Water Framework Directive, 69, 1–12.
- Ruiz, J. (2010). Cambio climático en temperatura, precipitacion y humedad relativa para colombia usando modelos meteorológicos de alta resolucion (panorama 2011-2100). Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología.
- Ruíz, J. (2013). Informe sobre el Cambio Climático en Colombia. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología.
- Sitnov, S., Mokhov, I. and A. Lupo (2017). Ozone, water vapor, and temperature anomalies associated with atmospheric blocking events over Eastern Europe in spring - summer 2010. Atmospheric Environment, 164(86), 180–194.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.004>
- Specht, E., Redemann, T. and N. Lorenz (2016). Simplified mathematical model for calculating global warming through anthropogenic CO₂. International Journal of Thermal Sciences, 102(51), 1–8. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.10.039>
- Tao, F., Feng, Z., Tang, H., Chen, Y. and K. Kobayashi (2017). Effects of climate change , CO₂ and O₃ on wheat productivity in Eastern China , singly and in combination. Atmospheric Environment, 153(71), 182–193. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.032>
- Trenberth, K. E., John, T., Fasullo, J. T. and J. Kiehl (2009). Earth’s global energy budget. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(3), 311-324.

- United Nations. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. New York.
- UPB y CVS (2008). Plan de ordenamiento y manejo integral de la cuenca hidrográfica del río Canalete. POMI-RÍO CANALETE. Universidad Pontificia Bolivariana Montería – UPB ; Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge – CVS. Montería: Documento síntesis diagnóstica. UPB-CVS.
- US EPA (2016). EPA en español Términos C. New York.
- Wilks, D. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic Press, USA.
- WMO (2011). Guide to Climatological Practices WMO-No. 100 . Geneva: World Meteorological Organization.
- Zabaleta, A. (2017). Calentamiento global a escala local y disponibilidad hídrica en los municipios de Planeta Rica, Pueblo Nuevo, Sahagún y Chinú, Córdoba, Colombia. Montería, Colombia, Universidad de Córdoba.
- Zhan, X. and M. Huang (2004). ArcCN-Runoff: An ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. Environmental Modelling and Software, 19(10), 875–879.
- Zveryaev, I. and R. Allan (2005). Water vapor variability in the tropics and its links to dynamics and precipitation. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 110(21), 1–17.

ANEXO

Anexo 1. Estimación del número de Curva (CN)

A. Número de Curva (CN) para tierras agrícolas cultivadas

Cobertura		Condición Hidrológica	GRUPO HIDROLOGICO DE SUELO HGS			
			A	B	C	D
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica		CN			
Rastrojo	Hileras rectas	----	77	86	91	94
Cultivos en hileras	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hileras estrechas o forrajes en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Curvas de nivel y	Mala	63	73	80	83

Cobertura		Condición Hidrológica	GRUPO HIDROLOGICO DE SUELO HGS			
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica		A	B	C	D
			CN			
	terrazas	Buena	51	67	76	80
Pastos de pastoreo	Curvas de nivel	Mala	68	79	86	89
		Buena	49	69	79	84
		Mala	39	61	74	80
		Buena	47	67	81	88
		Mala	25	59	75	83
		Buena	6	35	60	79
Pastos de corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Buena	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Mala	25	55	70	77
Patios		----	59	74	82	86
Caminos de tierra		----	72	82	87	89
Pavimentos		----	74	84	90	92

Fuente: Monsalve, 2004.

B. Número de Curva (CN) para otras tierras agrícolas

Descripción de cobertura	Condición hidrológica	CN			
		A	B	C	D
Pastos, forraje para pastoreo	Mala	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80

Descripción de cobertura	Condición hidrológica	CN			
		A	B	C	D
Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segado para heno.		30	58	71	78
Maleza mezclada von pasto de semilla, con la maleza como principal elemento	Mala	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Buena	30	48	65	73
Combinación de bosques y pasto (huertas o granjas con árboles)	Mala	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques	Mala	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes		59	74	82	86

Fuente: Monsalve, 2004.

C. Equivalencias de Número de Curva (CN) en las diferentes condiciones de humedad antecedente (AMC)

AMC II	AMC I	AMC III	AMC II	AMC I	AMC III	AMC II	AMC I	AMC III
100	100	100	74	55	88	49	30	69
99	97	100	73	54	87	48	29	68
98	94	99	72	53	86	47	28	67
97	91	99	71	52	86	46	27	66
96	89	99	70	51	85	45	26	65

AMC II	AMC I	AMC III	AMC II	AMC I	AMC III	AMC II	AMC I	AMC III
95	87	98	69	50	84	44	25	64
94	85	98	68	48	84	43	25	63
93	83	98	67	47	83	42	24	62
92	81	97	66	46	82	41	23	61
91	80	97	65	45	82	40	22	60
90	78	96	64	44	81	39	21	59
89	76	96	63	43	80	38	21	58
88	75	95	62	42	79	37	20	57
87	73	95	61	41	78	36	19	56
86	72	94	60	40	78	35	18	55
85	70	94	59	39	77	34	18	54
84	68	93	58	38	76	33	17	53
83	67	93	57	37	75	32	16	52
82	66	92	56	36	75	31	16	51
81	64	92	55	35	74	30	15	50
80	63	91	54	34	73	25	12	43
79	62	91	53	33	72	20	9	37
78	60	90	52	32	71	15	6	30
77	59	89	51	31	70	10	4	22
76	58	89	50	31	70	5	2	13
75	58	88				0	0	0

Fuente: Monsalve, 2004.



Río Sinú, Montería, Córdoba.