UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estimación de la oferta hídrica para la planificación de cultivos en una cuenca hidrográfica de la Orinoquía colombiana

Oscar Javier Gallo Gordillo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá DC, Colombia

Año 2022

Estimación de la oferta hídrica para la planificación de cultivos en una cuenca hidrográfica de la Orinoquía colombiana

Oscar Javier Gallo Gordillo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en ciencias agrarias

Director:

Ph.D. Juan Carlos Loaiza Úsuga

Codirector:

Ph.D. Jaime Humberto Bernal Riobo

Línea de Investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá DC, Colombia

Año 2022

(Dedicatoria o lema)

A Dios, a mi familia y a esa persona que le sea útil esta información.

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

Mahatma Gandhi

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

_____

Nombre: Oscar Javier Gallo Gordillo

Fecha: 20/08/2022

Agradecimientos

A La Universidad Nacional de Colombia, Sedes Bogotá y Medellín, por su alta calidad educativa, en especial a los profesores que me permitieron ampliar el conocimiento en el área de suelos y aguas, Yolanda Rubiano Sanabria, Juan Carlos Loaiza Úsuga, Erasmo Alfredo Rodriguez Sandoval, Luis Joel Martínez Martínez y Eliecer David Diaz Almanza.

A La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, que me permitió dedicar un tiempo para recibir las clases y desarrollar la tesis en un proyecto de investigación, así mismo, al grupo de trabajo en el centro de investigación La Libertad, con los que revisamos, discutimos y ajustamos temas de esta investigación, especialmente al Dr. Jaime Humberto Bernal Riobo, Ing. Betty Jazmin Gutierrez Rodriguez e Ing. Edgar Javier Salcedo Albarracin. Al personal de campo y Asistentes de investigación Luz Eldire Tafur Quintero, Jaime Castiblanco Torres, Hugo Ernesto Gil Vargas. En general, gracias a todo el personal que desde director al operario de campo colaboraron en el avance de esta investigación.

Especial agradecimiento a mi familia, que permitieron que les robara tiempo de dedicación y me apoyaron en este propósito educativo, los amo profundamente.

Resumen

Estimación de la oferta hídrica para la planificación de cultivos en una cuenca hidrográfica de la Orinoquía colombiana

Las variaciones de rendimiento en los sistemas agrícolas para la región Orinoquia asociados a eventos extremos de precipitación, hacen necesario el estudio de la oferta hídrica para los cultivos. Para lo cual se instrumentó una cuenca hidrográfica con equipos para la medición de humedad de suelo, caudales, precipitación y evapotranspiración, e identifico propiedades fisicoquímicas del suelo que determinan de dinámica del agua. La cuenca se identifica como caño Quenane, ubicada en el piedemonte de la cordillera oriental colombiana. Adicionalmente se analizó las condiciones de variabilidad climática en la oferta hídrica. Con la información generada en la instrumentación se calibro el modelo hidrológico HBV.

Los resultados identifican poca cantidad de agua aprovechable dadas en el suelo, generando que la humedad del suelo se aproxime frecuentemente a valores de punto de marchitez permanente. Se evidencio un cambio en la distribución de las precipitaciones con una disminución del número de días lluviosos al año, especialmente en el segundo semestre, que junto con relieves bien drenados estaría favoreciendo condiciones de suelos secos, identificados como Usticos, indicando limitaciones agrícolas. El modelo hidrológico HBV, tuvo un desempeño no satisfactorio para estimar caudal, puesto que subestima los datos medidos en la temporada lluviosa y sobreestima en la temporada seca. Sin embargo, los contenidos de agua en el suelo simulados presentan una aproximación a los valores medidos en el horizonte superficial, lo que indica una alternativa de aplicación en el monitoreo de la oferta hídrica disponible para las plantas.

Palabras clave: humedad del suelo, precipitación, Orinoquia, usos del suelo**.**

Abstract

Estimation of water supply for crop planning in a hydrographic basin of the Colombian Orinoquía

Yield variations in agricultural systems for the Orinoquia region associated with extreme precipitation events make it necessary to study the water supply for crops. For which a hydrographic basin was instrumented with equipment for the measurement of soil humidity, flows, precipitation, and evapotranspiration, and identified physicochemical properties of the soil that determine water dynamics. The basin is identified as Caño Quenane, located in the foothills of the Colombian Eastern Cordillera. Additionally, the conditions of climatic variability in the water supply were analyzed. With the information generated in the instrumentation, the HBV hydrological model was calibrated.

The results identify little amount of usable water given in the soil, causing soil moisture to frequently approach permanent wilting point values. A change in the distribution of rainfall was evidenced with a decrease in the number of rainy days per year, especially in the second semester, which together with well-drained reliefs would be favoring dry soil conditions, identified as Ustic, indicating agricultural limitations. The HBV hydrological model had an unsatisfactory performance to estimate flow, since it underestimates the data measured in the rainy season and overestimates in the dry season. However, the simulated soil water contents present an approximation to the values measured in the Ap horizon, which indicates an alternative application in monitoring the available water supply for plants.

Keywords: soil moisture, precipitation, Orinoquia, land uses.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XV**

Introducción **1**

1. Marco teórico **5**
1.1 El ciclo hidrológico 5
1.2 Oferta hídrica 6
1.3 Variabilidad climática 9
1.4 Modelamiento hidrológico 11
1.5 Planificación de cultivos 13

2. Oferta hídrica disponible para cultivos en la cuenca del caño Quenane **15**
2.1 Introducción 15
2.2 Materiales y métodos 17
2.2.1 Área de estudio 17
2.2.2 Geomorfología y suelos 18
2.2.3 Coberturas 20
2.2.4 Puntos de monitoreo 21
2.2.5 Cuantificación de la oferta hídrica disponible para cultivos 25
2.3 Resultados 25
2.3.1 Caracterización de suelos de la cuenca caño Quenane 26
2.3.2 Dinámica de los contenidos de agua en el suelo 31
2.4 Conclusiones 42

3. Efecto de la variabilidad climática sobre la oferta hídrica para cultivos transitorios y pasturas en la cuenca del caño Quenane **45**
3.1 Introducción 45
3.2 Materiales y métodos 47
3.2.1 Área de estudio 47
3.2.2 Clima 47
3.2.3 Datos climáticos 48
3.2.4 Análisis de datos 49
3.3 Resultados y discusión 52
3.3.1 Variabilidad interanual de precipitación en la cuenca caño Quenane 52
3.3.2 Caracterización del patrón de lluvias e implicaciones para cultivos transitorios y pasturas 58

3.3.3 Dinámica de la oferta hídrica disponible para cultivos transitorios y pasturas en años marcados con extrema precipitación 63
3.3.4 Tendencias del acumulado de lluvias 67
3.4 Conclusiones 73

4. Estimación de la oferta hídrica mediante modelamiento hidrológico en la cuenca del caño Quenane 75
4.1 Introducción 75
4.2 Materiales y métodos 77
4.2.1 Área de estudio 77
4.2.2 Hidrografía 78
4.2.3 Instrumentación hidrológica 79
4.2.4 Modelo hidrológico HBV 81
4.3 Resultados 84
4.3.1 Estimación de caudal como oferta hídrica potencial a cultivos 84
4.3.2 Estimación de la oferta hídrica con el modelo HBV-light 87
4.4 Conclusiones 89

5. Conclusiones y recomendaciones 91
5.1 Conclusiones 91
5.2 Recomendaciones 93

A. Anexo: Suelos de la cuenca 95

Bibliografía 103

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1. Cuenca del caño Quenane 17
Figura 2-2. Mapa geomorfológico de la cuenca del caño Quenane 18
Figura 2-3. Mapa de unidades de suelos en la cuenca caño Quenane 19
Figura 2-4. Mapa de coberturas de la cuenca Caño Quenane 21
Figura 2-5. Mapa de puntos de monitoreo hidrológico 22
Figura 2-6. Instalación de sensores de humedad del suelo 23
Figura 2-7. Perfil de suelos en puntos de monitoreo de la cuenca del caño Quenane.... 26
Figura 2-8. Porosidad del suelo en los puntos de monitoreo..... 31
Figura 2-9. Gráfico Box-plot de contenidos de agua en el suelo..... 34
Figura 2-10: Oferta hídrica disponible para las plantas durante un año en punto de monitoreo PVAa-Pastura, **A**: 5 cm, **B**: 20 cm, **C**: 40 cm y **D**:70 cm. 35
Figura 2-11: Oferta hídrica disponible para las plantas durante un año en punto de monitoreo PVAa-Semestrales, **A**: 5 cm, **B**: 20 cm, **C**: 40 cm y **D**:70 cm..... 37
Figura 2-12: Oferta hídrica disponible para las plantas durante un año en punto de monitoreo PVBa-Pastura (A: 5 cm, B: 20 cm y C: 40 cm). 39
Figura 3-1. Estaciones climáticas en la cuenca del Caño Quenane 47
Figura 3-2. Diagrama de cajas de la precipitación anual en la cuenca Caño Quenane .. 54
Figura 3-3. Anomalías de precipitación anual e índices ENSO en la cuenca del Caño Quenane 56
Figura 3-4. Balance climático semanal y temporadas de precipitación..... 59
Figura 3-5. Precipitación anual, acumulada a escala semanal 60
Figura 3-6. Precipitación semanal en serie histórica 62
Figura 3-7. Balance agroclimático en relación con fenología de cultivos semestrales en rotación durante los años 2010 y 2020. 65
Figura 3-8. Correlograma de precipitación anual..... 67
Figura 3-9. Correlograma de número de días con lluvia anual..... 68
Figura 3-10. Pendiente de Sen de la serie “Número de días con lluvia al año” 69
Figura 3-11. Estimación de Sen de precipitación semanal. A: semana 15, B: semana 19, C: Semana 20 y D: Semana 45. (P: Valor de la pendiente de Sen, los puntos son los datos). 71
Figura 3-12. Estimación de Sen de número de días con lluvia semanal. A: semana 33, B: semana 35, C: Semana 38 y D: Semana 49. (P: Valor de la pendiente de Sen, los puntos son los datos)..... 73
Figura 4-1. Mapa de la cuenca alta del caño Quenane 77

Figura 4-2. Caudales mensuales estimados del caño Quenane 79
Figura 4-3. Instrumentación climática (A) y sensores para la medición de caudales (B). 80
Figura 4-4. Batimetría en punto de monitoreo y correntómetro 81
Figura 4-5. Calibraciones caudales en Caño Quenane 84
Figura 4-6. Precipitación y caudal en la cuenca del caño Quenane 85
Figura 4-7. Simulaciones de **A**. Agua en el suelo, **B**. Evapotranspiración y **C**. caudales simulados 88

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1. Temporada climática y fechas de muestreo 23
Tabla 2-2. Variables y metodologías de análisis físicos y químicos de suelos 24
Tabla 2-3. Química de suelos en puntos de monitoreo..... 28
Tabla 2-4. Física de suelos en puntos de monitoreo..... 29
Tabla 2-5. Características físicas des suelos para los puntos de monitoreo..... 32
Tabla 2-6. Ecuaciones de calibración de los sensores. 33
Tabla 2-7. Oferta hídrica mensual en lámina de agua (mm)..... 40
Tabla 2-8. Número de días secos al mes (con humedad de suelos inferior a PMP) 41
Tabla 3-1. Estaciones climáticas en la cuenca caño Quenane..... 48
Tabla 3-2. Días de duración de etapas del ciclo de vida..... 51
Tabla 3-3. Coeficiente del cultivo (Kc) en etapas del ciclo de vida 51
Tabla 3-4. Estadística descriptiva de precipitación anual en las estaciones de la cuenca 53
Tabla 3-5. Correlación de elementos climáticos con índices ENSO a escala mensual ... 57
Tabla 3-6. Días con déficit y excesos hídricos de cultivos durante los años 2010, 2016 y 2020 63
Tabla 3-7. Déficit y excesos de cultivos en ciclo productivo en milímetros 64
Tabla 3-8. Tendencias de precipitación anual y número de días con lluvia al año 68
Tabla 3-9. Precipitación semanal (MK Tradicional)..... 70
Tabla 3-10. Tendencias de Número de días con lluvia semanal. 71
Tabla 3-11. Prueba de MK modificado con preblanqueo. 72
Tabla 4-1. Características morfométricas de cuenca Caño Quenane 78
Tabla 4-2. Parámetros del modelo hidrológico HBV 83
Tabla 4-3. Parámetros calibrados en la cuenca del caño Quenane 87

Introducción

Colombia cuenta con abundantes recursos hídricos (FAO, 2015; MINAMBIENTE, 2010). Factores como los cambios demográficos y climáticos y los modelos de aprovechamiento de los recursos, generan presión sobre los recursos hídricos (IDEAM, 2018). De acuerdo con el IDEAM, la agricultura es el sector con mayor demanda hídrica con el 43% del agua, así mismo, estiman un incremento progresivo de entre el 10 y 20% al año 2030 (2019b). Aproximadamente el 90 % de la agricultura en Colombia esta soportada principalmente por el agua retenida en el suelo proveniente de la lluvia, llamada comúnmente agricultura de secano, y el 10% representa las áreas agrícolas con sistemas de riego que satisface las necesidades de los cultivos (IDEAM, 2019b). Lo anterior evidencia la importancia del agua retenida en el suelo y su disponibilidad para las plantas vía radicular (Allen et al., 1998). Además, la vulnerabilidad de la agricultura a eventos extremos de la precipitación, que de acuerdo con estudios recientes serán más frecuentes e intensos (IPCC, 2020).

En la Orinoquia colombiana se ha evidenciado una variabilidad de rendimiento en los sistemas agrícolas asociados a los eventos extremos de precipitación (CEPAL et al., 2012). De acuerdo con el “Plan Regional integral de cambio climático para la Orinoquía”, proyecta que las lluvias en la región disminuirán finalizando la temporada de lluvias (septiembre, octubre y noviembre), y podrían aumentar en los meses más lluviosos (mayo, junio y julio), asociados a eventos extremos de lluvia más frecuentes, impactando directamente la disponibilidad de agua en el suelo para los sistemas productivos de la región (CIAT and CORMACARENA, 2017). esta condición genera situaciones de alta incertidumbre en la disponibilidad de agua para los cultivos, dada por desconocimiento de los patrones del clima, retención de agua en el suelo y requerimientos hídricos de los cultivos. Generado pérdidas económicas, disminución de área sembrada y cambio de uso del suelo.

En gran parte de la Orinoquia colombiana es común la escases de información hidrológica basada en mediciones de campo, esto debido a la baja densidad de estaciones

agroclimáticas e hidrológicas en la región, así como a la interrupción en los registros, que evidencian la importancia de valorar el recurso hídrico desde su disponibilidad real, ya que algunos estudios hidrológicos calculan la disponibilidad de agua en el suelo en base a supuestos, producto de la aplicación de modelos empíricos e índices validados y calibrados bajo otras condiciones o en el mejor de los casos considerando la información de caudales medidos ocasionalmente y expresados a escala mensual, lo cual no permite conocer la dinámica real de la oferta hídrica en la cuenca. En el 2018 CORMACARENA y el consorcio POMCA Rio Negro estimaron mediante modelamiento hidrológico que la cuenca del caño Quenane cuenta con una oferta hídrica disponible de 248.481.325 m^3/año o 7,88 m^3/s, y una demanda total (incluye sectores agrícola, urbano e industrial) de 562.527.069 m^3/año o 17.84 m^3/s, donde la principal demanda es la agrícola (CORMACARENA, 2018). Con la anterior información definieron mediante el índice de uso de agua una muy alta presión en la demanda hídrica respecto a la oferta. Cabe resaltar que el estudio en mención no logró validar y calibración modelos hidrológicos, debido a la falta de información hidrológica en la cuenca, por lo que se basó en información estimada a partir de la precipitación, lo anterior resalta la alta incertidumbre de los resultados.

Ante la situación mencionada se requieren acciones de múltiples actores e instituciones que tienen presencia en el territorio, para aportar con la generación de información, análisis y propuestas apropiadas para el manejo del recurso hídrico en sistemas agrícolas de la Orinoquia colombiana, región con proyección a ampliar la frontera agrícola del país en los próximos años (Ramírez et al., 2021).

El estudio busco generar información para mejorar la estimación de la oferta hídrica requerida por los cultivos que apoyen la planificación de los sistemas de producción agropecuarios en una cuenca de la Orinoquía colombiana. Para este propósito se realizó una valoración de la oferta hídrica disponible con énfasis en los contenidos de agua en el suelo en las principales coberturas. La escala espacial de análisis fue la cuenca hidrográfica representada en una cuenca piloto ubicada en el piedemonte de la Orinoquia colombiana. La escala temporal estuvo dada en dos frecuencias, i) horaria durante un año generada a partir de la instrumentación en la cuenca piloto y ii) diaria multianual generada de la red de estaciones nacional (IDEAM, 2017b). A continuación, se describen los objetivos de la investigación, los cuales serán desarrollados en los capítulos del documento.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Estimar la oferta hídrica para la planificación de cultivos en la cuenca del caño Quenane.

Objetivos específicos:

- Cuantificar la oferta hídrica disponible para cultivos en la cuenca del caño Quenane.
- Analizar el efecto de la variabilidad climática en la oferta hídrica disponible para cultivos en la cuenca del caño Quenane.
- Estimar la oferta hídrica mediante modelamiento hidrológico en la cuenca del caño Quenane.

1. Marco teórico

1.1 El ciclo hidrológico

El agua es uno de recursos naturales más importante del planeta (FAO, 2018), y a pesar de que la cantidad de agua en el planeta es de aproximadamente 1.386 millones de km^3 (Shiklomanov, 2000; Shiklomanov and Rodda, 2004), gran parte de estas reservas de agua en el planeta se encuentra en los océanos en forma de agua salada (96,5%), tan solo 90.000 km^3 (0,26%) en ríos y lagos son las principales fuentes para abastecer las necesidades humanas de agua, la humedad del suelo es el 0.001% “esencial para la vida y la producción vegetal” (Meran et al., 2021; OMM, 2011)

El estudio de los fenómenos hidrológicos presenta cierta complejidad, por lo que difícilmente pueden ser completamente interpretado (Zounemat et al., 2021). A falta de una concepción perfecta, sus componentes se pueden representar de una manera simplificada mediante el concepto de sistema, siendo el único componente de entrada al ciclo hidrológico la precipitación (a menos que exista un transvase o riego), mientras que las salidas están representadas por la evaporación, la transpiración, la infiltración, la escorrentía y el flujo de salida de agua en el punto de cierre de la cuenca. Este movimiento permanente del agua se ha denominado ciclo del agua o ciclo hidrológico (OMM, 2011).

A medida que nos adentramos en el Antropoceno el ciclo del agua está experimentando cambios rápidos en el contexto del cambio climático global (F. Li et al., 2022), generando numerosos problemas relacionados con el uso del agua, planteado desafíos para la seguridad hídrica humana (Doeffinger and Hall, 2021). Por lo que obtener una mejor comprensión del ciclo hidrológico y los recursos hídricos se ha convertido en una preocupación clave para la investigación ambiental y de los recursos naturales en el mundo.

La investigación sobre el ciclo del agua se centra en el balance hídrico, donde aplicando los principios de conservación de masa y expresados matemáticamente en la ecuación de balance hídrico, permite analizar la entrada y salida de agua en un área determinada (Chow et al., 1994). La cuenca hidrográfica definida como: la superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar dado (MINAMBIENTE, 2014), es el esquema universal de monitoreo y gestión del recurso hídrico, donde usualmente se estudian procesos lluvia-escorrentía. Así mismo, esta ecuación alimenta modelos matemáticos que generan aproximaciones a la realidad para representar el sistema hidrológico de interés (Solomatine and Wagener, 2011)

1.2 Oferta hídrica

La cuantificación del agua aprovechable para uso antrópico ha sido enfocada en el rendimiento hídrico, e institucionalmente se ha formalizado el termino de “oferta hídrica”, la cual se refiere al volumen de agua continental, almacenada en los cuerpos de agua superficiales en un periodo determinado de tiempo, cuantificada a través de la escorrentía y caudales en l/s/km^2 (IDEAM, 2019b). Colombia cuenta con abundantes recursos hídricos, ubicándolo entre los países con mayor cantidad de este recurso (Shiklomanov and Rodda, 2004). El promedio de precipitación en Colombia es de 2.918 mm/año, y el de escorrentía es de 1.75 mm/año. Este valor de escorrentía corresponde a un volumen de 2.026 km^3/año, valor que, en términos de rendimiento promedio, es de 56,2 l/s/km^2, mientras que el promedio mundial es de apenas 10 l/s/km^2, y el promedio latinoamericano es de 21 l/s/km^2 (IDEAM, 2019b)

El suelo como parte del ambiente ofrece variados servicios ecosistémicos, entre ellos el de regulación hídrica (Choquet et al., 2021). Propiedades del suelo tales como textura, contenido de arcilla, porosidad, distribución del tamaño de los poros, y contenido de materia orgánica regulan los procesos de infiltración, percolación, retención de humedad y escorrentía (Lal and Shukla, 2005). Este enfoque hace parte del enfoque de la hidropedología, la cual estudia los procesos, propiedades del suelo e hidrología interactuando en la zona crítica de la tierra (Ma et al., 2017).

La oferta hídrica para cultivos tiene en cuenta la disponibilidad de agua para las plantas (Zhao et al., 2021). dada por la cantidad retenida en el suelo entre capacidad de campo (CC) y punto de Marchitez permanente (PMP), este rango de retención se conoce como “agua aprovechable por las plantas” (Hillel, 1998). La retención de agua en el suelo se determina simulando la fuerza de absorción de raíces, de este modo está definido que la fuerza 10 a 33 KPa determina CC y 1500 KPa para PMP. El agua retenida a una tensión de 1500 kPa o mayor no está disponible para la mayoría de las plantas mesófilas vivas. De acuerdo con la FAO, los contenidos de agua ideales para las plantas son cercanos a CC debido a que la mayoría de los cultivos requieren de un menor esfuerzo (Allen et al., 1998). Algunas plantas se han adaptado a ambientes extremos, con adaptaciones en su metabolismo fotosintético que le permite sobrevivir en suelos donde la humedad mantiene cercano a PMP (Tardieu et al., 2017).

La identificación taxonómica del suelo aplicado a estudios en Colombia (USDA, 2014), hace un acercamiento a lo que llamamos oferta hídrica disponible para cultivos, al identificar una característica diagnostico relacionada al comportamiento de agua en el suelo denominada “régimen de humedad del suelo”, la cual se refiere a la presencia o ausencia, de agua retenida a una tensión menor de 1500 kPa en la franja del suelo llamada “sección control”. De acuerdo con el departamento de agricultura de los Estados Unidos la sección de control se encuentra, aproximadamente entre 10 y 30 cm debajo de la superficie del suelo, si la clase de tamaño de partícula es francosa-fina, limosa-gruesa, limosa-fina o arcillosa; entre 20 y 60 cm, si la clase de tamaño de partícula es francosa-gruesa; y entre 30 a 90 cm, si la clase de tamaño de partícula es arenosa. Con el fin de facilitar la definición de los regímenes de humedad los estudios de suelos se basan en balances climáticos sin tener en cuenta la relación con el suelo, ni validar el régimen real. Esta condición llevo a que los suelos del piedemonte llanero se clasificaran con régimen Udico y los suelos más al oriente, se definieran de régimen Ustico (IGAC, 2004)

La manera de entender la importancia de la oferta hídrica es estimando las demandas hídricas de sectores en la cuenca. El sector agrícola es el sector de mayor demanda hídrica en cuencas rurales, La cual se estima calculando la evapotranspiración de las coberturas o cultivo Etc (Allen et al., 1998). La estimación de este valor se convierte en un desafío, debido a la complejidad natural de esta variable. Los lisímetros son una de las metodologías aplicadas para reducir la incertidumbre, sin embargo, se considera costosa

y demandante de supervisión. En 1987 Penman Monteith publicaron una fórmula para estimar la evapotranspiración en un cultivo de referencia (Eto) el cual se basó en un pasto en condiciones ambientales optimas. Esta metodología es aplicada y explicada por la FAO (Allen et al., 1998). Los coeficientes de cultivos Kc representa la variación de la necesidad de agua de acuerdo con la fenología del cultivo, relacionando el requerimiento de la planta respecto al cultivo de referencia.

La escala temporal de análisis de oferta y demanda hídrica se basa en el alcance que esta pueda tener. Los balances hídricos a escalas mensuales o anuales es información contextual de tipo regional, se aplica en modelos de zonificación agrícola y ordenamiento del territorio, en Colombia entidades del orden nacional como UPRA, IDEAM y CAR dan uso frecuente de esta escala de análisis. Las escalas semanales, diaria y horaria permiten tomar decisiones a escala predial, como fecha de siembra, riego, variedad, preparación, fertilización, aplicaciones sanitarias, esta información es requerida y aplicada por entidades gremiales, centros de investigación, academia, agricultores entre otros.

Los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas - POMCAS en Colombia incluyen estudios de oferta y demanda hídrica en cuencas hidrográficas (MINAMBIENTE, 2014). Se produce información general de las principales cuencas nacionales con escalas temporales de análisis que son aún muy gruesas para alcanzar los objetivos de planificación proyectados. En la Orinoquia los POMCAs están aportando información, que puede ser complementada por entidades locales para aplicación en territorio. La cuenca del Rio Negro en el Meta de reciente publicación, por ejemplo pone a disposición mapas de coberturas actualizadas, geomorfología, simulaciones de caudal, entre otros datos que podrán enriquecer nuevas investigaciones (CORMACARENA, 2018)

1.3 Variabilidad climática

El sistema climático planetario se le atribuyen dos características: dinámico y complejo (IDEAM, 2016). Por lo que estudiarlo como parte del ciclo hidrológico y único aporte directo de la oferta hídrica requiere aclarar términos de variabilidad y cambio climático, muy usuales en la actualidad. El concepto de variabilidad climática comprende las oscilaciones del clima alrededor de valores normales, tales fluctuaciones se originan, generalmente, por procesos en los distintos componentes del sistema climático (IDEAM and UNAL, 2018). Mientras el cambio climático se define como variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos (IPCC, 2018), el cual puede deberse a procesos internos naturales o antrópicos. La principal diferencia entre variabilidad y cambio climático se asocia a la temporalidad, la variabilidad climática considera períodos de tiempo entre meses y décadas, mientras el cambio climático se asocia a modificaciones de largo plazo, entre siglos y milenios (IDEAM and UNAL, 2018)

La variabilidad climática, puede incluir cambios de temperatura o patrones climáticos oscilantes, o incluso inundaciones y sequías, las cuales crean inconsistencias en el clima en comparación con el promedio (Von der Heydt et al., 2021). Resultados en cuencas instrumentadas evidencian que estos cambios modifican el patrón de precipitaciones afectado las propiedades hidrológicas del suelo y el ciclo hidrológico (Caplan et al., 2019; Sharifi et al., 2021). Estudios del panel intergubernamental de cambio climático IPCC, han demostrado que, bajo el calentamiento global, la variabilidad climática es más frecuente, espacialmente extensa y de mayor duración, convirtiéndose en una limitación significativa para las actividades agrícolas (IPCC, 2014). En este escenario se afecta la producción agrícola en términos de calidad y cantidad, obligando a los agricultores a incurrir en costos adicionales de producción; la adopción de nuevos sistemas de gestión eventualmente resulta en graves pérdidas económicas a nivel doméstico y nacional (IPCC, 2007). El impacto y la vulnerabilidad al cambio climáticos son más profundos en los países en desarrollo (Guo et al., 2021), debido a la alta dependencia a la agricultura de subsistencia en secano y su baja capacidad de adaptación.

Para la OMM, uno de los fenómenos de variabilidad climática más importantes en todo el mundo es El Niño-Oscilación del Sur, ENOS o ENSO (OMM, 2014), asociado con una variación irregular cuasi periódica sobre el Océano Pacífico oriental tropical, el cual afecta la circulación atmosférica global y la temperatura global medial (Kundzewicz et al., 2020). Las características principales del ENOS puede identificarse en las temperaturas de la superficie del mar (SST). Durante la fase cálida (El Niño) del ciclo ENOS el agua frente a la costa de América del Sur es más cálida de lo habitual. Durante una fase fría (La Niña), el agua caliente está más al oeste de la costa de América del Sur de lo habitual (C. Wang and Fiedler, 2006). Durante el desarrollo de estas fases se han visto eventos extremos de precipitación (X. Li et al., 2021; Lu et al., 2019; X. Sun et al., 2015). El componente atmosférico que lo acompaña, en conjunto con el cambio de temperatura del mar se llama Oscilación del Sur (C. Wang, 2018). Durante la fase de “El Niño” las presiones en la superficie del aire en el Pacífico occidental tropical son altas y bajas durante “La Niña”. Cada fase El Niño o La Niña por lo general ocurre cada 2 a 3 años y dura entre 5 y 10 meses, entre las distintas fases de ENOS, hay una fase neutra (Yeh et al., 2018)

Muchos índices han sido propuestos para pronosticar el ENSO (de la Casa et al., 2021). Algunos índices como el Índice Oceánico EL Niño (ONI) se basan en la temperatura superficial del mar (TSM), en la franja tropical del Pacifico, estableciendo cuatro regiones a saber: Occidental (región Niño 4), Central (región Niño 3), Centro occidental: (región Niño 3 - 4) y Oriental: (región Niño 1+2). En cada una de estas regiones se mide la temperatura de la superficie del mar en grados Celsius (ºC) y se determinan sus anomalías, por ejemplo, el índice ONI representa la TSM en la región 3-4. Otros, se basan en la presión atmosférica, como el Índice de Oscilación del Sur - SOI, el cual representa las fluctuaciones entre el Pacífico tropical occidental y oriental, se calcula sobre la base de las diferencias en la anomalía de la presión del aire entre Tahití y Darwin, Australia (Norel et al., 2021). Se han desarrollado algunos índices de carácter mixto que involucran tanto variables atmosféricas como oceánicas en su composición, uno de los más conocidos es el índice ENSO Multivariado (MEI) desarrollado por Wolker en 1987 para rastrear y comparar eventos del ENSO mediante la combinación de variables oceánicas y atmosféricas (Easterbrook, 2011, 2016). Estos índices han servido para anticiparse y tomar medidas preventivas a los efectos del fenómeno ENSO, ya que este afecta el clima en gran parte de los trópicos y subtrópicos, cambiando la probabilidad de ocurrencia de diversas anomalías climáticas en

muchas regiones del mundo. El efecto regional es variado, heterogéneo en la vegetación cuya respuesta es específica para cada especie (Barrios-Perez et al., 2021; Hao et al., 2020; Yan et al., 2021).

1.4 Modelamiento hidrológico

Entre el 2019 y 2020, una nueva enfermedad infecciosa, SARS-CoV-2 llamada COVID-19, se convirtió en pandemia, el mundo vio cómo se aplicaron modelos matemáticos como herramientas para predecir el comportamiento de la enfermedad, efecto de medidas y posibles decesos (Rahman et al., 2021). así mismo se utilizan los modelos en otros ámbitos, como en sectores ambientales, climáticos, económicos entre otros.

Un modelo es una “Abstracción de la realidad” en la que se establecen relaciones para entender el comportamiento de un fenómeno (IDEAM, 2018). La modelación hidrológica hace referencia a la representación de las componentes del ciclo hidrológico o de algunas de ellas, las ecuaciones básicas de continuidad de masa y energía describen la física del ciclo hidrológico (OMM, 2008). Los modelos hidrológicos se encuentran entre las herramientas disponibles que se utilizan para estimar los parámetros necesarios para la planificación y gestión de los recursos hídricos (Dutta and Sarma, 2021). Estos han permitido superar las limitaciones en las mediciones hidrológicas, especialmente en cuencas donde no se dispone de mediciones y para evaluar el impacto probable de un cambio hidrológico futuro (Sheikh Goodarzi et al., 2021). convirtiéndose en un medio para extrapolar a partir de medidas disponibles, llegando a ser útiles en la toma de decisiones (Beven, 2012). El modelamiento hidrológico cuenta con ciertas limitaciones (Blöschl et al., 2019), por lo que se considera un ejercicio de representación acercado a la realidad con cierto nivel de incertidumbre. Estimar el valor de incertidumbre es necesario para el modelo. En el ejercicio de modelamiento podemos encontrar tres categorías de incertidumbre (i) incertidumbre de observación o medición, ii) incertidumbre del modelo e (iii) incertidumbre de predicción (Tao et al., 2016; Wallach et al., 2016). Sin embargo, la mayoría de los estudios se centran en solo una o dos fuentes de incertidumbre (Chapagain et al., 2022)

Los modelos tienen múltiples opciones de clasificación, aleatoriedad, temporalidad, variación espacial, complejidad (Chow et al., 1994). En general, se pueden clasificar como modelos agregados o distribuidos. Los modelos agregados toman toda la cuenca como una sola unidad y se descarta la variabilidad espacial de las variables de entrada, los parámetros y las salidas (Breuer et al., 2009). Por otro lado, los modelos distribuidos pueden manejar cantidades distribuidas en el espacio al dividir la cuenca en subunidades, generalmente celdas cuadradas o redes triangulares irregulares., por lo que los parámetros, entradas y salidas pueden variar espacialmente (Milella et al., 2012). Se considera una buena práctica recurrir al modelo más simple posible, con menos parámetros (Devia et al., 2015), pero que suministre respuestas suficientemente precisas para satisfacer las necesidades. La literatura en modelamiento utiliza el término “Parsimonioso” para referirse a los modelos que explican los datos con la menor cantidad de parámetros posible (Sarkar et al., 2020), siendo una consideración muy recomendada por expertos. Otra opción es considerar el acople de modelos hidrológicos para permitir comprender cómo las dinámicas de la cuenca y reducir la incertidumbre (Munar et al., 2018)

El modelamiento requiere seguir unos pasos y procedimientos. En Colombia cuenta con un “protocolo de modelación hidrológica e hidráulica” (IDEAM, 2018) donde incluye conceptos, principios, reglas, métricas de validación y calibración y demás aspectos que son esenciales para el ejercicio de modelación. El uso de modelos es útil cuando se lleva a cabo un proceso riguroso, se analizan los resultados con expertos, y se determina el alcance (IDEAM, 2018).

El modelamiento hidrológico se ha desarrollado en su mayor parte en áreas de la Ingeniería con fines de adecuación y manejo del recurso hídrico en áreas urbanas e infraestructuras viales (vías, puentes, abastecimiento, navegación, recreación entre otras) y en menor medida en áreas ambiental y agrícola, dadas sus limitaciones de aplicación (Jia, 2011). Lo anterior requiere esfuerzos en fortalecer la formación de profesionales en el manejo del manejo recurso hídrico sostenible en el sector rural (Pla Sentis, 2016). Que permita mayor entendimiento de los sistemas biológicos ante los cambios de usos del suelo y escenarios cambiantes del clima.

1.5 Planificación de cultivos

La producción agrícola es una de las actividades más importantes en la estabilidad de la humanidad (Stephens et al., 2018). Ante el crecimiento poblacional, cambio climático natural e inducido por el hombre, es esencial disponer de herramientas y técnicas para garantizar la seguridad alimentaria continua. Programas de planificación agrícola han demostrado efectividad en brindar apoyo a la toma de decisiones (Meshesha and Khare, 2019; Randall et al., 2022)

La planificación de cultivos se refiere al diseño de cultivos en tiempo y espacio determinado, tiendo en cuenta etapas de producción, transporte y comercialización (Hajimirzajan et al., 2021), En la etapa productiva se considera recomendaciones en fechas de siembra, practicas o labores, variedades, ciclos, rotaciones entre otras. La planificación además considera evaluar los impactos al ambiente, por lo que es considerada como una de las herramientas de la gestión ambiental.

Las cuencas hidrográficas son las unidades de análisis de mayor jerarquía para la planificación en Colombia, estas proporcionan los determinantes ambientales del ordenamiento territorial a menores escalas, debido a que sus límites fisiográficos se mantienen en el tiempo y están constituidas por atributos biofísicos y socioeconómicos que permiten su estudio de forma integral, facilitando la comprensión de la dinámica más aproximada a la realidad del territorio.

Entidades de orden nacional asumen la tarea de dar directriz en planificación agrícola. Sin embargo, a pesar del interés planteado por las instituciones, se aborda de forma fragmentada, lo cual dificulta el entendimiento de las dinámicas y la complejidad del territorio. En esta dirección se requieren entidades de planificación agrícola a escala regional con enfoque territorial. Lo anterior encamina esfuerzos en generar información con el fin de reducir las incertidumbres en la toma de decisiones y la planificación agrícola

2. Oferta hídrica disponible para cultivos en la cuenca del caño Quenane

2.1 Introducción

Durante el ciclo hidrológico, la oferta hídrica se puede encontrar disponible en diferentes fuentes: la humedad del suelo, aguas subterráneas, corrientes superficiales o reservorios, sin embargo, para las plantas la principal fuente se basa en la humedad que se retiene en el suelo, en virtud de la atracción molecular (OMM, 2011). El agua disponible para las plantas se define como la cantidad de agua existente entre capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (33 y 1500 KPa respectivamente), ya que en este rango las fuerzas de succión de las células de las raíces son suficientes para extraer el agua retenida por el suelo (Allen et al., 1998). Esta disponibilidad de agua en el suelo para las plantas depende de muchos factores, las principales son la cantidad y distribución del agua precipitada, el ingreso al suelo mediante la infiltración, y la retención en sus horizontes. Valores de textura y materia orgánica, son determinantes en el movimiento y retención de suelos, ya que estos determinan la cantidad y proporción de poros, además de las fuerzas que definen el potencial hídrico y productivo.

En Colombia se han realizado diferentes estudios del recurso hídrico, sin embargo, el enfoque particular de estas investigaciones no permite un análisis integral de sistema, incluyendo propiedades del suelo, balance hídrico y dinámica del agua en el suelo en función de las coberturas (Thomas et al., 2015). Una buena alternativa para la adquisición de datos de humedad del suelo in situ es el uso de sensores que permiten estudiar la dinámica del agua a diferentes escalas espacio - temporales (Loaiza and Pauwels, 2008). La integración de datos climáticos, geomorfológicos, edafológicos en conjunto con información de flujos hidrológicos (escorrentía, percolación, humedad del suelo, etc.) son un insumo importante para conocer el comportamiento de contenidos de agua en el suelo para diversos tipos y usos del suelos, adicionalmente esta información permite la

implementación de modelos hidrológicos y climáticos, que permitan predecir de manera aproximada el comportamiento de la humedad del suelo frente a diferentes escenarios de cambios en el clima y coberturas usos del suelo (Loaiza et al., 2010). Permitiendo predecir diversos procesos asociados a la dinámica hidrológica, respuesta fenológica de cultivos, y posibles rendimientos (He et al., 2012).

La región natural de la Orinoquia colombiana se ha caracterizado por la alta oferta hídrica en el año y su deficiencia nutricional en el suelo (Amézquita et al., 2013). Esta última ha sido fuente de investigación y planes de mejoramiento de suelos con respuesta favorable en los sistemas agrícolas (Amézquita et al., 2007). Se ha generalizado que la cantidad de agua precipitada en la Orinoquia es suficiente para los sistemas agrícolas, desestimando la importancia de la distribución y disponibilidad de agua para los cultivos. De acuerdo con el Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del rio Negro, El caño Quenane tiene demanda hídrica de 562.527.069 m^3/año de los sectores agrícola, pecuario, domestico e industrial, el cual es muy superior a la oferta determinada en 248.481.325 m^3/año, resaltando la alta presión por el agua en la cuenca (CORMACARENA, 2018). Los estudios realizados por Lesk et al., Ray et al., y CORMACARENA and CIAT, coinciden en afirmar que las alteraciones climáticas generaran eventos extremos más frecuentes (2017, 2016, 2015), este panorama genera incertidumbre en una región donde se ha desarrollado la agricultura de secano dependiente de la precipitación.

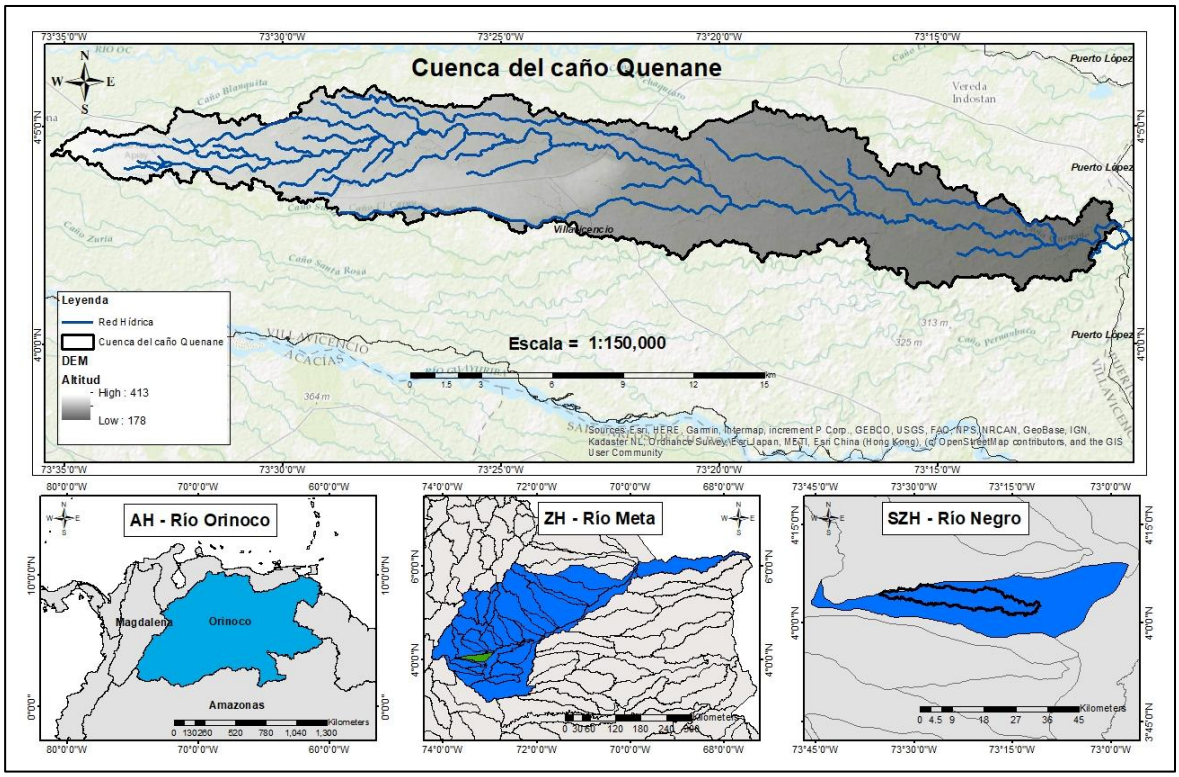
El objetivo en este capítulo se basó en cuantificar la oferta hídrica disponible en coberturas de cultivos semestrales y pasturas mediante la instrumentación y medición hidrológica (humedad del suelo y precipitación) durante un año en frecuencia horaria, e identificación de las propiedades hidropedológicas del suelo que regulan la disponibilidad de agua para las plantas en la cuenca del caño Quenane.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Área de estudio

Esta investigación se realizó en la cuenca del caño Quenane, municipio de Villavicencio, departamento del Meta (**Figura 2-1**). En Colombia es considerada como microcuenca del caño Quenane identificada con el código 3510-03 (CORMACARENA, 2018). Tributa a la Sub-Zona Hidrográfica del Rio Negro (3510), Zona hidrográfica del Rio Meta (35), Área Hidrográfica del Rio Orinoco (3). Se estima un Área de 180 km^2, con predominio de pendientes entre 0 y 3 %, en donde se ha desarrollado sistemas agropecuarios de pequeña y mediana escala.

Figura 2-1. Cuenca del caño Quenane

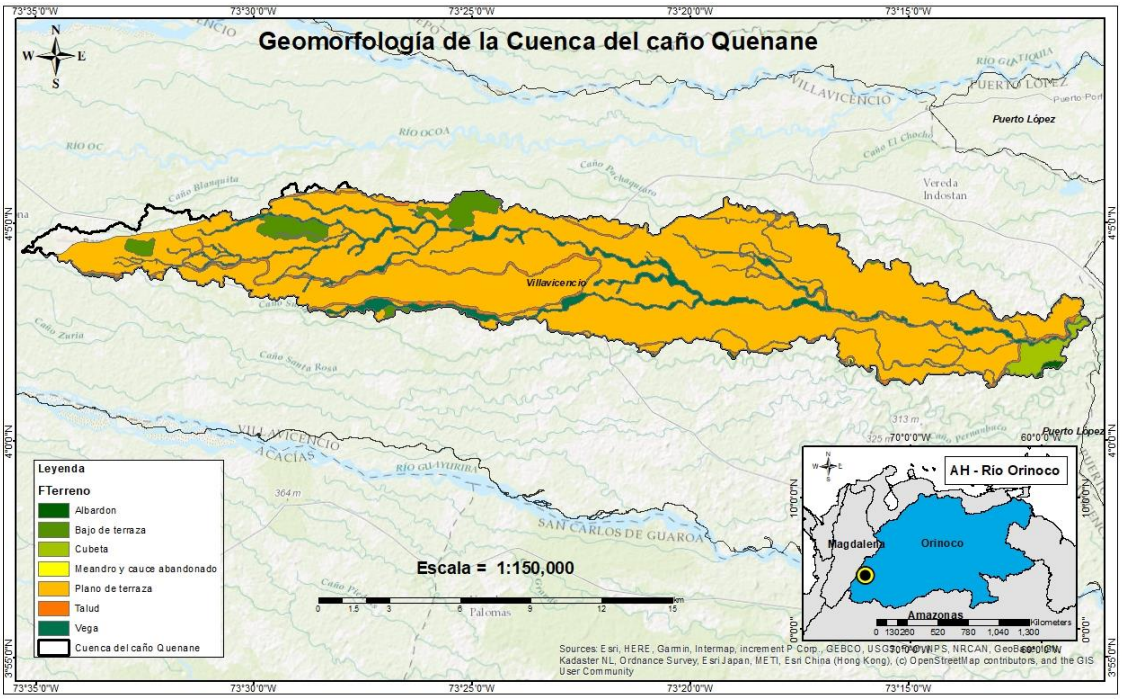


Fuente: Propia

2.2.2 Geomorfología y suelos

El área de estudio se ubica en la Geoestructura sinclinal de la Megacuenca de sedimentación de la Orinoquia, Al suroriente de la cordillera oriental, entre el paisaje de piedemonte y planicie aluvial, sobre un abanico subreciente (IGAC, 2018; Rial et al., 2016). Procesos morfodinámicos de escurrimiento difuso originaron los niveles de terraza alta y media con pendientes entre 1% y 3%, además de un talud de terraza originado por descenso del nivel erosional que divide las dos geoformas (**Figura 2-2**). A mayor detalle encontramos formas de terreno identificadas como planos de terrazas y vallecitos asociados a los drenajes de la cuenca, que se distribuyen de manera paralela, y en menor proporción formas de terreno cóncavas y convexas (CORMACARENA, 2018; IGAC, 1973)

Figura 2-2. Mapa geomorfológico de la cuenca del caño Quenane

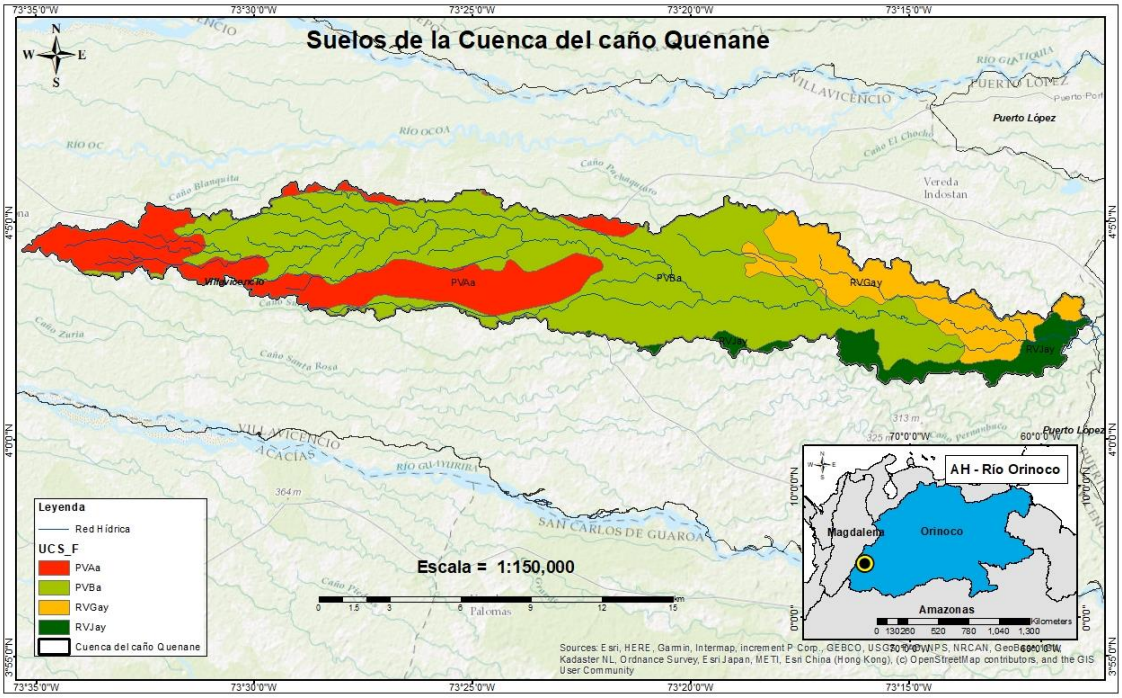


Fuente: POMCA Rio Negro (CORMACARENA, 2018)

En las terrazas altas es común la presencia de suelos profundos con un alto grado de meteorización, texturas moderadamente finas a finas y bien drenados; los suelos en las terrazas medias son medianamente profundos a superficiales con texturas medias a finas,

susceptible a encharcamiento, sitio de distribución de los drenajes. En la cuenca se encuentran cuatro unidades de suelos (**Figura 2-3**): consociasion Typic Hapludox (**PVAa**), asociación de Oxic Dystropepts y Plinthic Tropaquepts (**PVBa**), consociasion Oxic Dystropepts (**RVGay**) y asociación Fluvaquentic Eutropepts y Tropic Fluvaquents (**RVJay**) sobre paisajes de Piedemonte y Planicie Aluvial (IGAC, 2004); el piedemonte representa más del 80% del área de la cuenca. El suelo PVAa se refiere a un suelo de Piedemonte (P) de clima cálido húmedo (V) relieve de terraza alta (A) pendientes entre 1 y 3% (a), El suelo PVBa a diferencia del anterior es de relieve de terraza media-baja (B).

Figura 2-3. Mapa de unidades de suelos en la cuenca caño Quenane



Fuente: Adaptado de (IGAC, 2004)

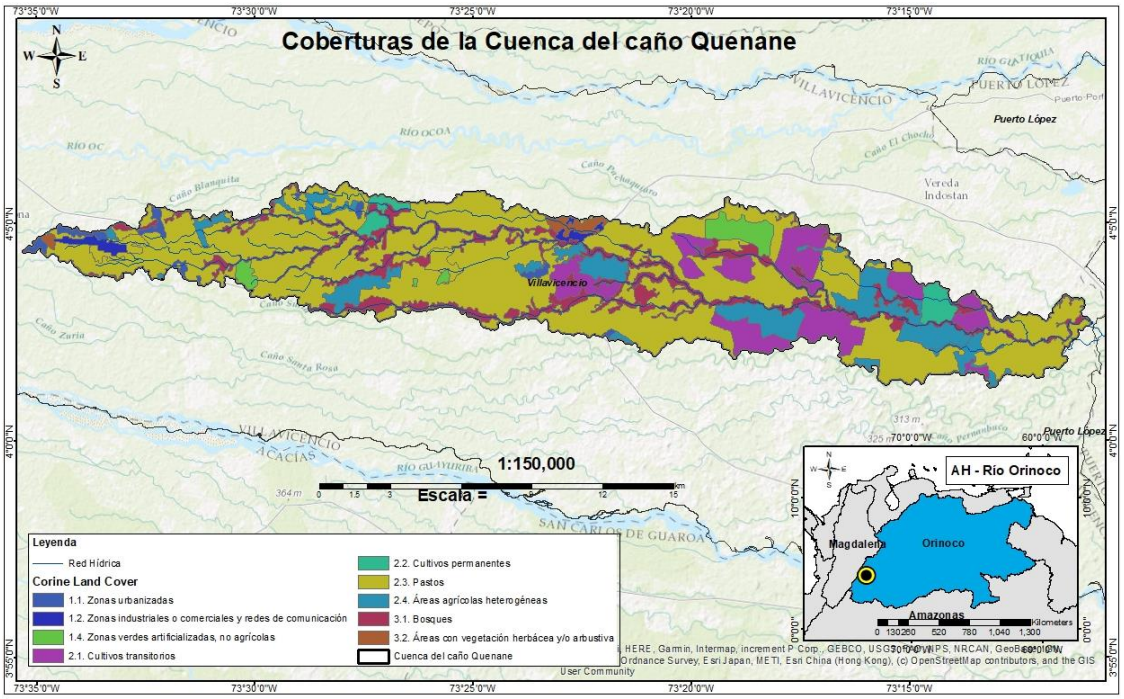
En general los suelos del área de estudio son el resultado de condiciones de clima cálido con excesos de precipitación el cual ha sido el factor determinante en la evolución de estos suelos, que permitieron activos procesos de pérdidas (lavado de bases), traslocaciones (migración de arcillas) y transformación (descomposición de MO), generando que se presenten suelos con pH fuertemente a extremadamente ácidos por la acumulación de óxidos de hierro y aluminio, baja a moderada fertilidad, debido a la continua pérdida de minerales esenciales por lixiviación, mineralogía dominada por arcillas caoliniticas de tipo

1:1 de escasa actividad, y baja capacidad de intercambio catiónico, arenas kuarsiticas finas, agregación débil con altas densidades aparentes y baja materia orgánica, con problemas de drenaje en zonas cóncavas y bajas de la cuenca (IGAC, 1973)

2.2.3 Coberturas

En la cuenca predominan pasturas introducidas de bajo porte del género Urochloa ó Brachiaria (Cook and Schultze-Kraft, 2015; Rincón et al., 2018) ocupando el 54% de la cuenca (**Figura 2-4**). Una proporción con alrededor del 20% de cultivos semestrales como: arroz (Oryza sativa), maíz (Zea mays), soya (Glycine max). Las áreas de conservación representan el 15% representado en bosque asociados a drenajes, morichales y humedales. Entre el 4 a 5% se encuentran cultivos permanentes de palma africana (Elaeis guineensis), y cítricos. Finalmente, los asentamientos, infraestructuras y minería representa el 3 a 4% (CORMACARENA, 2018; IDEAM, 2015). De acuerdo al estudio de cambio en las coberturas durante el periodo 2003-2018 evidencia un incremento de áreas urbanas, agrícolas y agroforestales, que han generado fragmentación de bosques (CORMACARENA, 2018).

Figura 2-4. Mapa de coberturas de la cuenca Caño Quenane

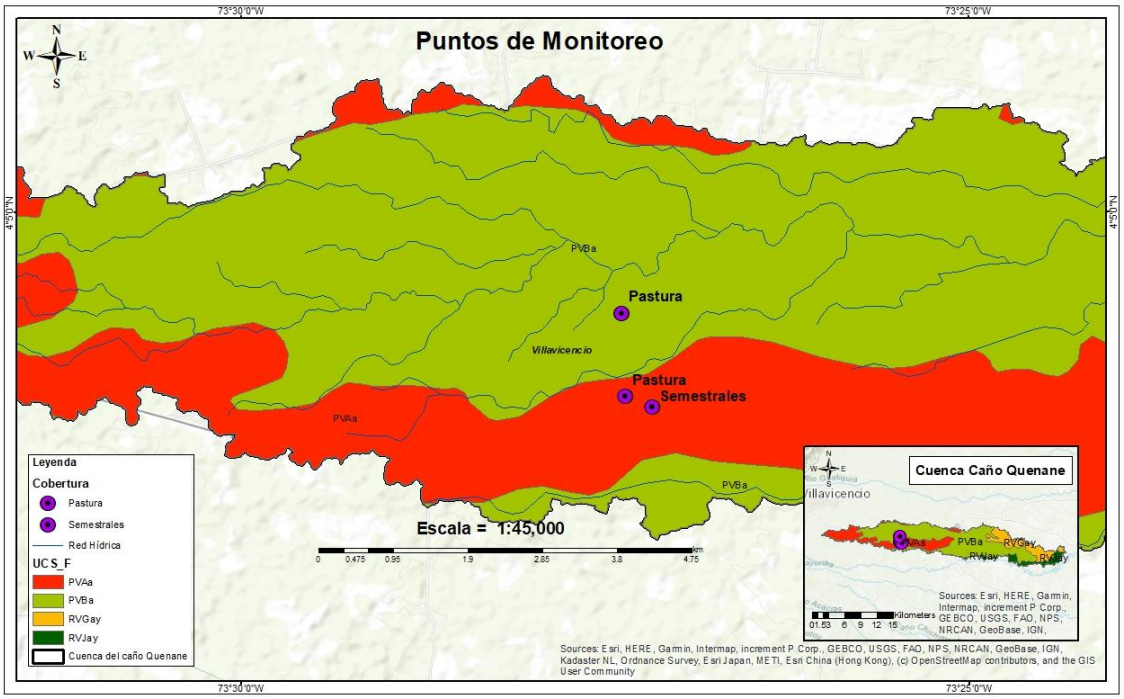


Fuente: POMCA Rio Negro (CORMACARENA, 2018)

2.2.4 Puntos de monitoreo

Identificados las principales unidades de suelos y coberturas en la cuenca del caño Quenane, se establecieron los puntos de monitoreo como se muestra en la **Figura 2-5**. En la terraza alta se ubicaron dos puntos 1) PVAa-Semestrales, donde se siembra cultivos transitorios en rotación, y durante el monitoreo se realizaron siembras de Maíz (Zea mayz L.) híbrido Impacto Agrisure de Syngenta. Cabe resaltar que por condiciones de restricción sanitaria (COVID-19) en el primer semestre del año 2020 no se sembró. 2) PVAa-Pastura establecido con pasturas de bajo porte del género Urochloa (Cook and Schultze-Kraft, 2015) en una combinación de U. decumbens. En la terraza baja se ubicó el punto 3) PVBa-Pastura establecido con el pasto U. humidicola.

Figura 2-5. Mapa de puntos de monitoreo hidrológico

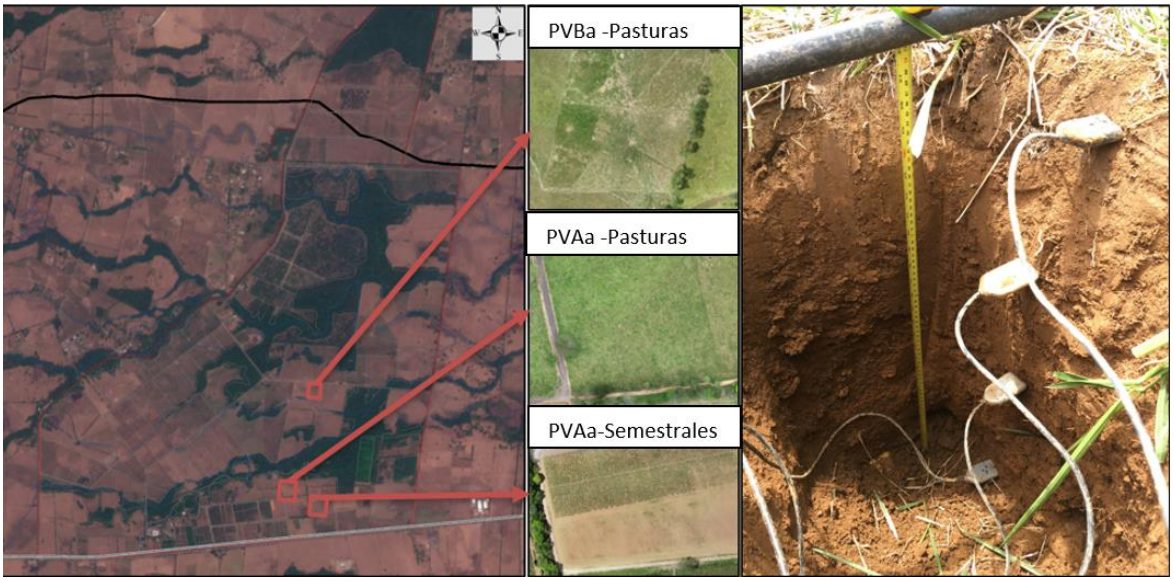


Fuente: Propia

- **Instrumentación hidrológica**

En cada punto de monitoreo se instalaron sondas de humedad tipo 5TM ECH2O METER Group®, los sensores se instalaron a razón de los horizontes del suelo y adicionalmente a 5 cm de profundidad; La información se almaceno a intervalos de una hora, mediante datalogger Em5 METER Group®, y se descargó periódicamente mediante el software ECH2O Utility METER Group®. En la Figura 3 3 se ilustra la instalación de sensores de humedad de suelo en profundidades definidas y localización en lotes establecidos.

Figura 2-6. Instalación de sensores de humedad del suelo



Fuente: Propia

La calibración de las sondas de humedad durante la temporada lluviosa y seca se realizó mediante muestreos de humedad gravimétrica en las fechas relacionadas en la **Tabla 2-1**. La toma de muestras en campo se realizó a una distancia no mayor de dos (2) metros alrededor de cada uno de los puntos en los cuales fueron instaladas las sondas, utilizando un barreno tipo holandés para toma de muestras disturbadas (Loaiza and Pauwels, 2008)

Tabla 2-1. Temporada climática y fechas de muestreo

ID	TEMPORADA	Fecha
1		20/11/2019
2		27/11/2019
3	Lluviosa	05/12/2019
4		11/12/2019
5		19/12/2019
6		02/01/2020
7		08/01/2020
8		16/01/2020
9	Seca	23/01/2020
10		29/01/2020
11		05/02/2020
12		12/02/2020

Se realizó un análisis estadístico para comprobar el nivel de correlación entre la humedad medida mediante ambos métodos, y el grado de ajuste para ambas series de datos, hallando los valores de R^2. Las ecuaciones para calibración de la recta son del tipo y = ax + b.

La información climática se registró en dos estaciones automáticas Davis Instruments ®, ubicadas en cercanías a los puntos de monitoreo. Estas estaciones registran precipitación (mm), temperatura (°C), humedad relativa (%), Velocidad y dirección del viento (m/s), radiación (W/m²) y estiman evapotranspiración (mm) mediante el método FAO Penman-Monteith (FAO, 2006). La información se registró y almaceno a intervalos de una hora, mediante datalogger Vantage Pro2 METER Group ®, descargándose semanalmente mediante el software WeatherLink 6.0

- **Caracterización de suelos**

En los puntos de monitoreo definidos en la **Figura 2-6**, se hicieron 4 calicatas para estudiar las propiedades físicas y químicas del perfil del suelo siguiendo la metodología del IGAC (2017), los cuales fueron clasificados con el key to soil taxonomy (USDA, 2014). Los análisis de las muestras tomadas en campo se realizaron en el laboratorio de AGROSAVIA, las variables analizadas y las metodologías utilizadas se enumeran en la **Tabla 2-2**

Tabla 2-2. Variables y metodologías de análisis físicos y químicos de suelos

Variable	Método
Textura por Bouyoucos	Hidrómetro
Densidad Aparente	Cilindro de volumen conocido (5 cm diámetro y 2.5 cm de altura)
Curva de retención de humedad	Ollas y platos de presión
Agua disponible	Cálculos a partir de retención de humedad: entre 0.1 y 15 bar

Conductividad hidráulica saturada (Ks)	Permeámetro de cabeza constante
Carbono total (g/100g)	Combustión seca por analizador elemental
Fosforo disponible P (mg/kg)	Bray II
Bases intercambiables Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}(cmol/kg)	Espectroscopia de absorción atómica
Acides intercambiable Al^{3+} and H^{+} (cmol/kg)	KCl 1M
pH	Potenciométrico 1:1 (Agua: Suelo)

2.2.5 Cuantificación de la oferta hídrica disponible para cultivos

La valoración de la oferta hídrica disponible se basó en las mediciones de agua en el suelo registradas en los sensores instalados en el suelo durante un año, entre octubre de 2019 y octubre de 2020, lo cual se considera como el tiempo mínimo adecuado para este objetivo. El monitoreo de humedad del suelo se llevó a cabo teniendo en cuenta el rango de agua aprovechable por las plantas considerado entre capacidad de campo (CC) y punto de marchites permanente (PMP). La cantidad de agua que fluctué en este rango es lo que llamamos “oferta hídrica disponible para cultivos”, para lo cual se medirán valores en volumen (mm) mensuales y al año para comparar con los requerimientos hídricos de las coberturas en el área de estudio.

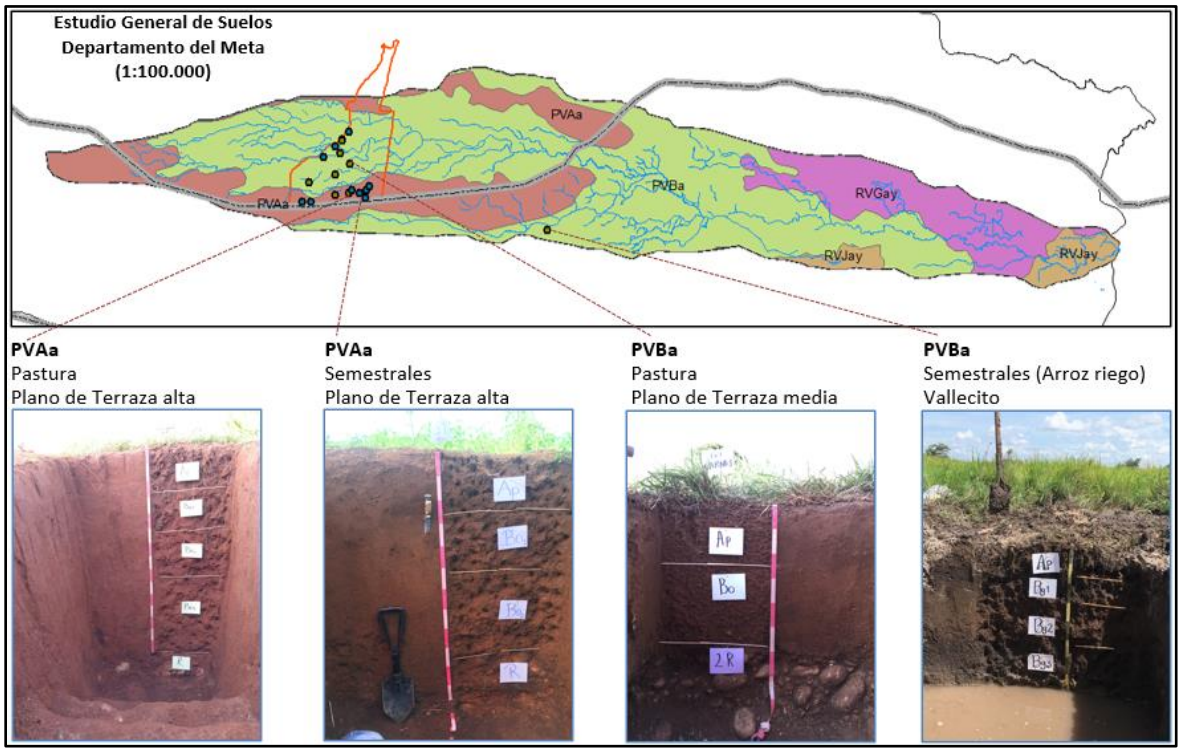
El Régimen de humedad de suelo se determinó en la sección de control recomendada por la taxonomía de suelos de Norteamérica para suelos de texturas finas: dada entre 10 y 30 cm debajo de la superficie del suelo, si la clase de tamaño de partícula es franco-fina, limosa-gruesa, limosa-fina o arcillosa (USDA, 2014)

2.3 Resultados

2.3.1 Caracterización de suelos de la cuenca caño Quenane

Los suelos de la cuenca del caño Quenane se caracterizan por tener pendientes entre 0 y 3% con baja saturación de bases intercambiables y texturas Francas a Arcillosas, originada por sedimentos aluviales finos a mixtos. Los suelos **PVAa** corresponde a suelos de terraza alta, profundos, bien drenados, y que han sido sometidos a diferentes usos de suelo, en uno se identificó una pastura del género Brachiaria y en el otro punto un historial de siembra de cultivos semestrales como arroz, maíz, soya y Sorgo. De acuerdo con el IGAC son oxisoles de régimen de humedad Udico (2004). El suelo **PVBa** ubicado sobre terraza media, medianamente profundo y bajo condiciones deficientes de drenaje corresponde a un Inceptisol de régimen de humedad Udico (IGAC, 2004). Adicionalmente se caracterizó el suelo **PVBa** en la geoforma cóncava de una terraza media conocida como vallecito en las líneas de drenaje, el cual se caracteriza por la fluctuación del nivel freático cerca de la superficie, condición favorable para el cultivo del arroz riego, la cual ha sido el sistema productivo desarrollada en esta área (**Figura 2-7**).

Figura 2-7. Perfil de suelos en puntos de monitoreo de la cuenca del caño Quenane



Fuente: Propia

El horizonte Ap, identificado por el cambio de coloración más oscuro que los subyacentes, dada por el aporte de material orgánico en superficie y mayor proporción de raíces que en el resto del perfil, la *p* indica la influencia antrópica dada por el cambio de cobertura natural, la cual pudo haber sido una sábana o Bosque, seguido de un horizonte Bo, Oxico, altamente meteorizado, con mezcla óxidos de aluminio y hierro, arcillas aumentando en profundidad. El suelo en vallecito tiene un horizonte Bg: que denota un horizonte débilmente desarrollado, con cambio o alternancia por movimiento físico o por reacciones químicas, aluviales. Además, se encontraron cantos rodados subyacente al horizonte B, lo que evidencia la sedimentación y alteración de rocas por transporte desde las montañas al piedemonte, así misma hipótesis de que probablemente aguas superficiales predominaron en algún momento en estos suelos. El horizonte Ap es el área de suelos donde se desarrolla las raíces y por ende se sustenta la agricultura en la zona de estudio, la profundidad de este horizonte es de aproximadamente 25 cm en los tres puntos de monitoreo, los resultados concuerdan con estudios similares (February and Higgins, 2010; Martineli et al., 2020). Sin embargo, se destaca presencia de raíces finas y medias en horizontes B en los puntos de monitoreo con cobertura de pastura (**Anexo A**), lo anterior puede explicarse debido a que el pasto tiene una mayor capacidad de penetración de raíces en busca de agua, evidenciado en un suelo de los llanos orientales (Ricaurte et al., 2007). Lo anterior podría explicar la capacidad de resistir más días cuando no hay precipitación, ya que, si las raíces se distribuyen a mayor profundidad, la oferta hídrica disponible para las plantas aumenta.

En la **Tabla 2-3** se identifica contenidos bajos de materia orgánica (<2%) debido a la meteorización de clima cálido, aunque es mayor en el horizonte superficial, y disminuye en profundidad, debido a que en este horizonte se da la circulación de material vegetal en forma de raíces, adicionalmente se da circulación de nutrientes generados en tallos y hojas. La materia orgánica del punto de monitoreo PVAa-semestrales fue notablemente menor comparado con las pasturas, lo anterior probablemente es a causa del uso de labranza frecuente en el suelo en el sistema de rotación de cultivos transitorios. A diferencia las pasturas rara vez implementan labranza, y las pasturas renuevan constantemente raíces al ser una cobertura permanente.

Tabla 2-3. Química de suelos en puntos de monitoreo

Perfil	Hzte	Prof.	pH	MO	P	CICE	Ca	Mg	K	Al
		cm	und	g/100g	mg/kg	cmol (+)/kg				
PVAa Pastura	Ap	0-26	4.88	2.50	<3.87	3.41	0.98	<0.20	<0.09	1.87
	Bo1	26-51	4.98	1.60	<3.87	2.97	<0.59	<0.20	<0.09	2.14
	Bo2	51-84	4.95	1.00	<3.87	2.29	<0.59	<0.20	<0.09	1.44
	Bo3	84-152	5.18	0.71	<3.87	1.36	<0.59	<0.20	<0.09	0.62
PVAa Semestral	Ap	0-26	4.71	1.44	7.24	2.82	<0.59	0.20	0.13	1.62
	Bo1	26-52	4.84	1.13	<3.87	2.73	<0.59	<0.20	<0.09	1.70
	Bo2	52-85	5.01	0.66	<3.87	2.28	<0.59	<0.20	<0.09	1.51
PVBa Pastura	Ap	0-25	4.8	1.76	<3.87	3.55	<0.59	<0.20	<0.09	2.53
	Bo	25-58	4.87	1.27	<3.87	3.29	<0.59	<0.20	<0.09	2.34
PVBa Semestral	Ap	0-16	4.71	4.38	17.27	4.49	<1.12	<0.20	0.13	2.80
	Bg1	16-30	4.63	3.29	<3.87	5.46	<1.12	<0.20	0.09	3.78
	Bg2	30-53	4.74	3.24	6.35	5.70	<1.12	<0.20	0.09	4.26
	Bg3	53-90	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Propia

El punto de monitoreo PVAa-Semestrales presenta un leve incremento de bases intercambiables y fosforo, lo anterior debido al aporte de fertilizantes edáficos aplicados anualmente sistema de rotación de cultivos transitorios, sin embargo, los niveles de acides y bases muestran la necesidad de incorporación de enmiendas para el óptimo desarrollo de cultivos transitorios, el cual requieren un ambiente edáfico con saturación de bases mayores al 50% los demás resultados muestran la baja cantidad de bases intercambiable, condición frecuentemente reportada en la región por diferentes autores (Huertas et al., 2018; Orozco Jamioy et al., 2015)

Las densidades aparentes fueron superiores a 1.2 gr cm^3, alcanzando valores de 1.7 gr cm^3 en el horizonte B, considerados valores restrictivos para el desarrollo de raíces (**Tabla 2-4**). Aunque la densidad del suelo en la zona de estudio es naturalmente alta debido a su origen sedimentario y tipo de material litológico, esta puede modificarse positivamente con sistema de labranza adecuados, aumento de raíces y materia orgánica, también puede verse afectado por uso inadecuado de labranza, sobre laboreo o sobrepastoreo (Amézquita et al., 2007). Debido a lo anterior se ha considerado como una de las variables para evaluar la calidad de suelos en la zona de estudio (Rodriguez et al., 2013).

Tabla 2-4. Física de suelos en puntos de monitoreo

Perfil	Hzte	Prof. cm	D.a. g/cm^3	CC % Hum. G.	PMP % Hum. G.	AA mm	Textura (%) A	Ar	L	Den.	Ks cm/hr
PVAa Pastura	Ap	0-26	1.35	24.8	22.3	8.8	45	28	27	F-Ar-A	0.16
	Bo1	26-51	1.29	26.0	22.7	10.6	43	40	17	F-Ar	1.59
	Bo2	51-84	1.39	29.2	25.2	18.3	37	44	19	Ar	1.87
	Bo3	84-152	1.41	27.5	25.5	19.2	35	48	17	Ar	0.05
PVAa Semestral	Ap	0-26	1.46	21.5	19.0	9.5	53	24	23	F-Ar-A	1.46
	Bo1	26-52	1.68	24.0	19.8	18.3	47	36	17	Ar-A	0.01
	Bo2	52-85	1.71	23.5	20.0	19.2	41	38	21	F-Ar	0.01
PVBa Pastura	Ap	0-25	1.47	24.3	20.1	15.4	41	31	28	F-Ar	0.03
	Bo	26-58	1.66	25.0	20.6	22.8	27	43	30	Ar	0.04
PVBa Semestral	Ap	0-16	1.16	44.8	41.9	5.4	31	34	34	F-Ar	-
	Bg1	16-30	1.35	35.7	34.3	2.6	29	42	28	Ar	-
	Bg2	30-53	1.09	49.5	45.1	11.0	33	48	18	Ar	-
	Bg3	53-90	-	-	-	-	-	-	-	-	-

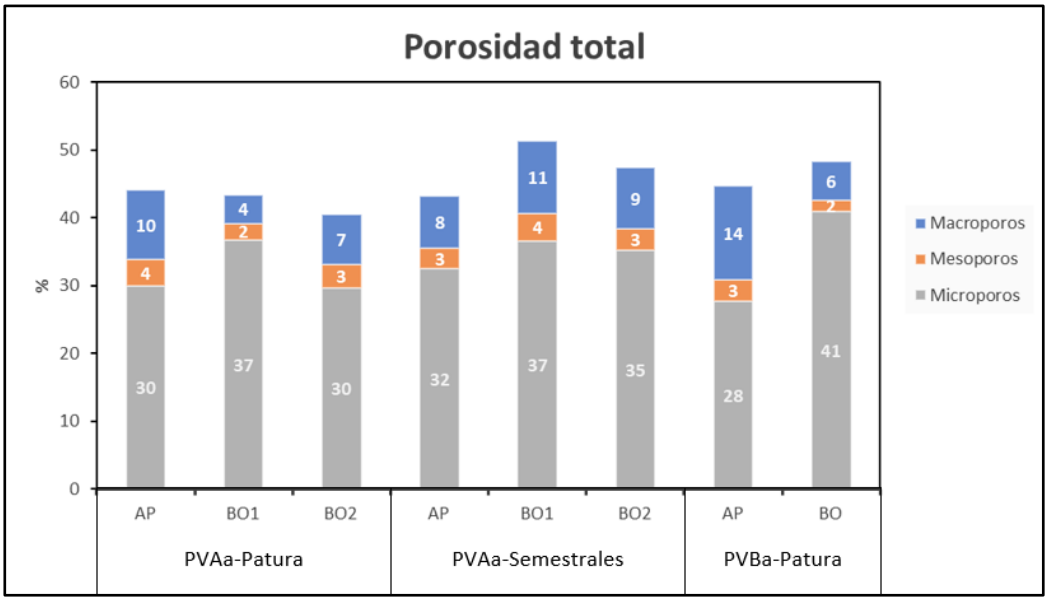
La retención de agua en los suelos evaluados es muy baja, si tenemos en cuenta la humedad entre CC y PMP, considerada como el agua aprovechable para las plantas, Los suelos de terraza alta PVAa retienen entre 8 y 10 mm de agua en el horizonte Ap, el cual suministra agua a las raíces de los cultivos. El suelo de terraza media en pastura PVBa, presento mayor retención de agua en el horizonte Ap, debido a una textura más fina que las anteriores. Los valores bajos de retención en el vallecito de la terraza media PVBa-semestral se pueden dar por la pérdida de estructura generada por la excesiva labranza en condiciones de saturación de suelos. La baja retención de agua en el suelo es la condición que genera vulnerabilidad ante sequias agrícolas, pues ante días secos continuos la planta transpira el agua retenida en el suelo y en 3 días el horizonte Ap podría llegar a humedad cercana de punto de marchitez (Almansa, 2006a), Las plantas presentan estrés hídrico por debajo del 50% de agua aprovechable, lo que en cultivos podría significar aborto floral, vaneamiento y bajos rendimientos. De acuerdo con Orduz y Ficher (2007) en un suelo de terraza alta determinaron que en los primeros 20 cm el agua aprovechable corresponde al 3,5%, por lo que estos suelos pueden abastecer menos de tres días los requerimientos hídricos del cultivo de cítricos, después de ese tiempo las raíces localizadas en los horizontes muestreados no pueden absorber agua y necesariamente deben detener

su crecimiento. necesitan un permanente abastecimiento de agua como precipitación o riego para suplir los requerimientos de humedad del cultivo. Almanza (2006b) reporta mejores condiciones en un suelo de textura franca de la altillanura colombiana en el departamento del Vichada con valores cercanos a 10% en los primeros 30 cm de profundidad

El incremento de arcillas en profundidad es coherente con lo encontrado en investigaciones anteriores (Amézquita et al., 2013), demostrando el estado maduro de estos suelos, que han traslocación de fracciones finas en el perfil del suelo, lo que condiciona el movimiento lento de agua en el suelo a mayor profundidad, como se observa en los datos de conductividad hidráulica en la **Tabla 2-4**. El comportamiento de baja infiltración en la superficie del suelo puede deberse a encostramiento de la superficie del suelo como lo han reportado en suelos de la altillanura plana donde la dispersión de las arcillas, la sedimentación y el espesor del sello en superficie pueden reducir considerablemente los poros de drenaje del suelo, que afectan la conductividad hidráulica y la infiltración del agua y aumentan la escorrentía y el arrastre de suelo (Galvis et al., 2007)

La porosidad total de los suelos evaluados en los puntos de monitoreo se da en valores entre 40 y 50 % (**Figura 2-8**), cabe resaltar que la proporción de microporos es mayor del 70% del total de poros, esta agua esta retenida fuertemente en el suelo a tensiones superiores a 15 Bares y por lo tanto, las raíces de los cultivos no pueden tomarla; Los mesoporos 2 y 4 % retienen el agua disponible para las plantas y como se ve en la figura es el valor más bajo de la proporción de poros; Los macroporos 4 a 14 % se observan hasta el horizonte B. Estos valores son similares a los reportados por Galvis et al. en un suelo Typic Haplustox Isohipertérmico Caolinítico de Sabana de la altillanura plana colombiana (2018) y coherente con publicaciones en suelos de la cuenca sedimentaria del Orinoco, ya que debido a su origen pedogenetico tienen una condición física particular, entre ellas una pobre distribución de poros, con alta proporción de microporos (Amézquita, 1999). El Dr. Amézquita encontró que en las sábanas de la Orinoquia los suelos pueden presentar un comportamiento seco aún durante la temporada de lluvias, debido a esta condición.

Figura 2-8. Porosidad del suelo en los puntos de monitoreo



Fuente: Propia

Los suelos PVAa están clasificados de Clase VI s-1 de acuerdo a la capacidad de uso (IGAC, 2004) junto con suelos de la altiplanicie o llamados también como altillanura plana, estos suelos presentan limitaciones severas como saturación de aluminio mayor de 60%, baja fertilidad, estas unidades de suelos representan 898.914 ha en el departamento del Meta. El suelo PVBa son clase IV sh-1 junto con suelos de planicie y valle con limitaciones por encharcamientos de corta duración (IGAC, 2004). Aunque las condiciones del suelo evaluado presenta ciertas limitaciones físicas, químicas y biológicas, estudios han reportado que estrategias de adecuación de la “capa arable” o “mejoramiento de la capacidad productiva del suelo”, basados en técnicas de conservación ,incorporación de enmiendas con labranza profunda, y posterior labranza reducida y mínima, así como rotación de gramíneas y leguminosas han permitido mejorar indicadores de calidad del suelo (Amézquita et al., 2007; Gallo et al., 2013).

2.3.2 Dinámica de los contenidos de agua en el suelo

La humedad del suelo en el rango de agua aprovechable por las plantas es lo que llamamos “oferta hídrica disponible para cultivos”, para lo cual se muestran los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchites permanente (PMP) en unidades de porcentaje volumétrico (**Tabla 2-5**), con el cual se correlacionara el comportamiento de la

humedad del suelo en un periodo de un año. En la tabla encontramos información a 5 y 20 cm adicional en el horizonte Ap, debido a que en este horizonte es donde se encuentra la mayor proporción de raíces (Gallo et al., 2013)

Tabla 2-5. Características físicas des suelos para los puntos de monitoreo

Punto de monitoreo	Profundidad	Da (g/cm^3)	Sat	CC	PMP	AA	Ks cm/h
			(% de Humedad Volumétrica)				
PVAa Pastura	**Ap** (5 cm)	1.3	44	32	27	5	0.17
	Ap (20 cm)	1.2	41	30	26	4	0.16
	Bo1 (40 cm)	1.3	40	33	28	5	1.59
	Bo2 (70 cm)	1.3	43	37	32	5	1.87
PVAa Semestrales	**Ap** (5 cm)	1.4	37	29	25	4	12.43
	Ap (20 cm)	1.4	31	30	26	4	1.46
	Bo1 (40 cm)	1.6	27	38	32	6	0.00
	Bo2 (70 cm)	1.7	26	39	34	5	0.00
PVBa Pastura	**Ap** (5 cm)	1.4	51	42	38	4	2.53
	Ap (20 cm)	1.5	44	36	30	6	0.03
	Bo (40 cm)	1.6	48	40	34	6	0.04

Da: Densidad aparente, **AA**: Agua aprovechable por las plantas, **Ks:** Conductividad hidráulica saturada.

Hay distintos factores que influyen en la variación de la humedad del suelo a escala de cuenca, incluidas las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación / cobertura del suelo / uso del suelo y el clima (Crow et al., 2012). Manfreda y Rodríguez-Iturbe (2006) encontraron que las propiedades del suelo afectan la distribución de la humedad del suelo al ordenar la infiltración de humedad. Autores también mencionan que la conductividad hidráulica del suelo y la porosidad influyen conjuntamente en la variabilidad del contenido de humedad superficial del suelo. Sin embargo, hasta la fecha, existen pocos estudios que tengan en cuenta las variaciones espaciales en las propiedades del suelo.

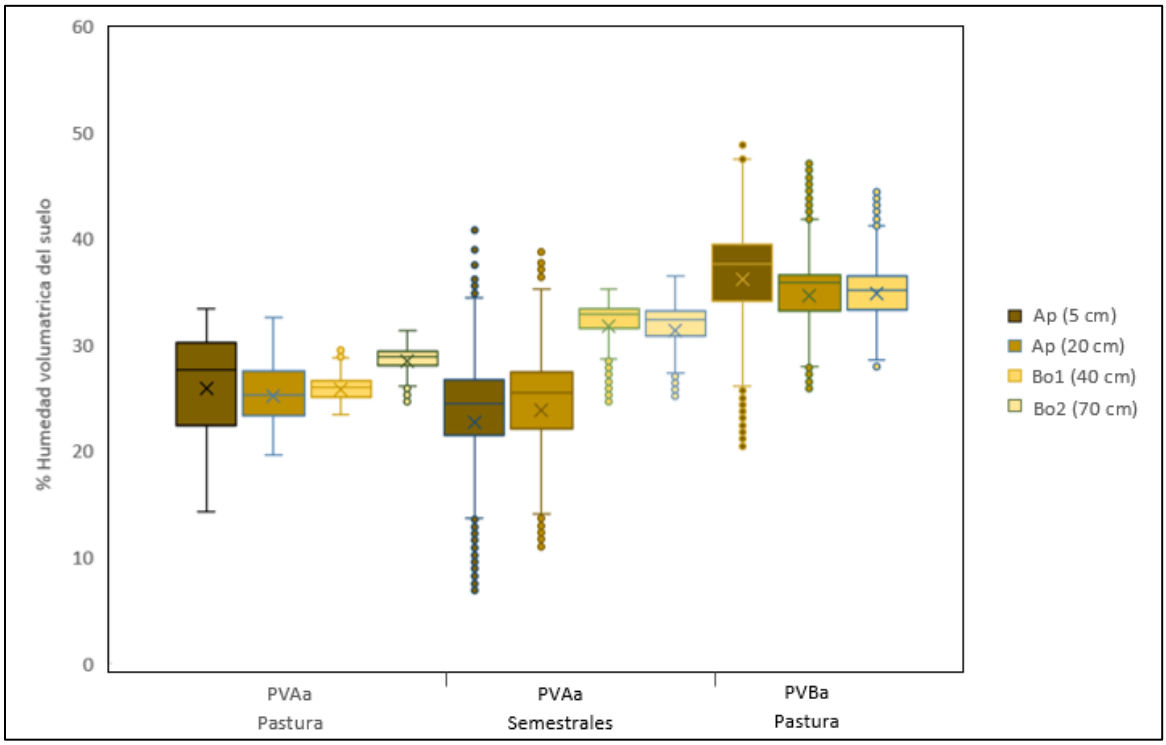
Los resultados para calibración de los sensores de humedad muestran que los sensores tienden a subestimar los valores de humedad de suelo entre un 5 y 20% respecto a los valores encontrados para humedad volumétrica (muestra de campo seca en horno), la **Tabla 2-6** muestra los valores de correlación para R^2 muestran una fluctuación entre 0.4 y 0.8

Tabla 2-6. Ecuaciones de calibración de los sensores.

Punto de monitoreo	Profundidad	a	b	R2
PVAa Pastura	**Ap** (5 cm)	0.7735	3.7625	0.78
	Ap (20 cm)	0.8103	3.6079	0.80
	Bo1 (40 cm)	0.8851	4.4455	0.69
	Bo2 (70 cm)	0.2915	14.874	0.51
PVAa Semestrales	**Ap** (5 cm)	0.3939	5.1772	0.88
	Ap (20 cm)	0.6712	0.5383	0.81
	Bo1 (40 cm)	0.7083	3.6024	0.87
	Bo2 (70 cm)	0.7771	0.0872	0.82
PVBa Pastura	**Ap** (5 cm)	0.6113	2.1264	0.86
	Ap (20 cm)	0.3631	8.1316	0.67
	Bo (40 cm)	0.4065	5.7939	0.46

En la **Figura 2-9** se observa la relación entre la posición geomorfológica y su influencia sobre los contenidos de agua en el suelo. Para las humedades H9, H10 y H11 ubicados en terraza media en condiciones de pendiente de 0 a 3 %, se registran valores de humedad entre 20 y 50%. las medidas de tendencia central están cercanas al 40%, a diferencia los puntos de monitoreo Doble propósito y AGP en donde los valores de tendencia central en su mayoría se ubican por debajo de 30% de humedad, a excepción de H4 H7 y H8, que se ubica en profundidades mayor de 40 cm. Se destaca el rango de información que es más amplio en los horizontes superficiales en la terraza alta, a diferencia de la terraza media donde esta variabilidad se da en las tres profundidades medidas. Este rango evidencia el consumo de agua de las coberturas y el alcance de las raíces en profundidad. Esta información coincide con la profundidad de raíces medida en un suelo Oxisol de la Altillanura plana de Puerto Lopez, donde encontraron que la mayor proporción de raíces se encuentra en los primeros 10 cm y de acuerdo con la profundidad del sistema de labranza lograron raíces hasta 30 cm de profundidad (Gallo et al., 2013)

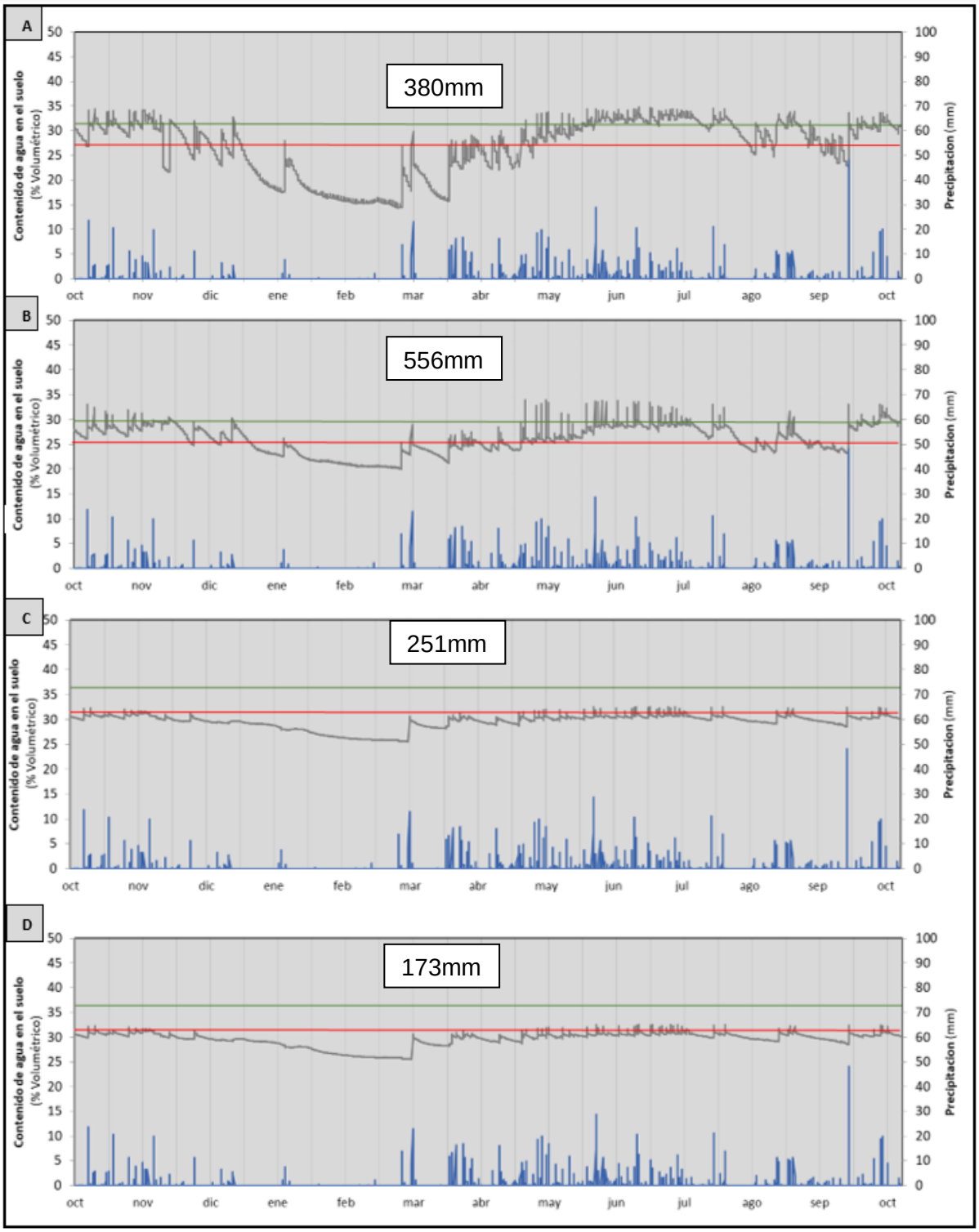
Figura 2-9. Gráfico Box-plot de contenidos de agua en el suelo



Fuente: Propia

Considerando que la precipitación es el elemento del meteorológico dominante de la humedad del suelo (Seneviratne et al., 2010), **Figura 2-10Figura 2-11Figura 2-12** evidencian la relación directa entre los eventos de precipitación y la humedad del suelo, especialmente en el horizonte superficial del suelo. En la **Figura 2-10** se observa que los contenidos de agua en el suelo de abril a agosto suficiente para el desarrollo de cultivos, como el pasto en este punto de monitoreo, Aunque entre agosto y septiembre se presenta una reducción de la precipitación y caída de los niveles de agua en el suelo, en la profundidad 5 cm se mantienen los valores en el rango de agua aprovechable. La cobertura del suelo juega un papel importante en la determinación de la humedad del suelo mediante la modificación de la infiltración y la evapotranspiración. Si comparamos las coberturas de Maíz y pasto en la terraza alta podemos ver la diferencia en los horizontes superficiales, donde el punto PVAa-semestrales podría verse más afectado debido a la menor cobertura del suelo y menor retención de humedad del suelo **Figura 2-11**.

Figura 2-10: Oferta hídrica disponible para las plantas durante un año en punto de monitoreo PVAa-Pastura, **A**: 5 cm, **B**: 20 cm, **C**: 40 cm y **D**:70 cm.

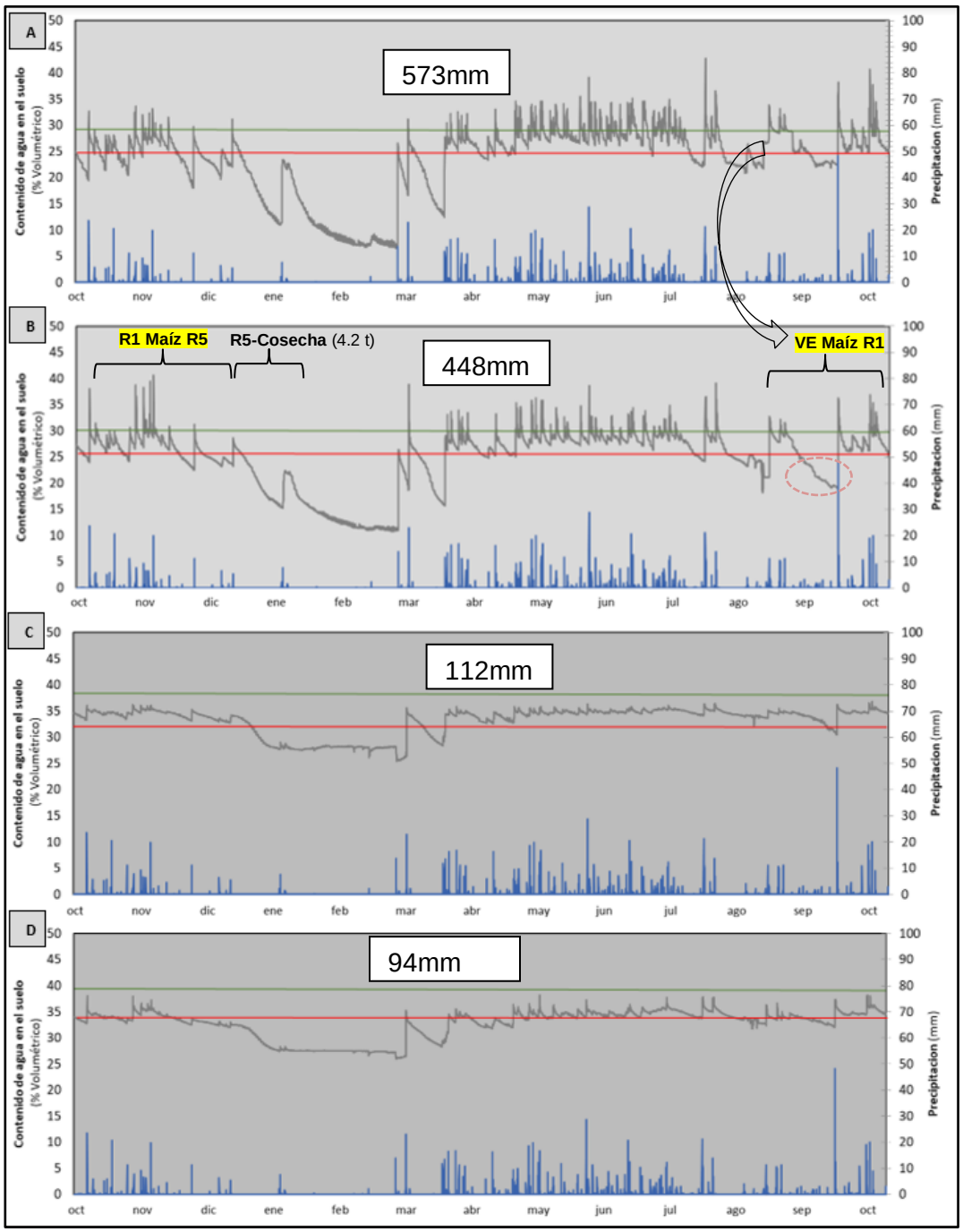


Fuente: Propia

De acuerdo con el informe del proyecto “Mejoramiento de la capacidad productiva del suelo para contribuir al incremento de la competitividad y sostenibilidad de los cultivos transitorios en la Altillanura Plana y Piedemonte Llanero, bajo escenarios de cambio climático.”, El maíz establecido durante el 2019 en el lote PVAa-Semestrales, estuvo afectado por falta de agua; una semana antes de floración (**R1**) se presentó un periodo seco de 6 días, seguido por periodos secos durante el llenado de grano (**R2-R5**) como se puede observar en la **Figura 2-11**. Este periodo de días secos se presentó durante el periodo crítico de requerimiento de agua por el cultivo (Pringle, 2017) ocasionando reducciones en la tasa de llenado de grano y el rendimiento potencial del híbrido Impacto Agrisure TH. El rendimiento promedio en el lote fue de 4.2 t, muy por debajo, comparado con el rendimiento potencial del material que puede llegar a 10 t en la región. Lo anterior coincide con lo que reporta el CIMMYT donde expresa que alrededor de la floración (desde unas dos semanas antes de la emisión de estigmas hasta dos semanas después de ésta), el maíz es muy sensible al estrés hídrico, y el rendimiento de grano puede ser seriamente afectado si se produce sequía durante ese período. Durante el llenado de granos, el principal efecto de la sequía es reducir el tamaño de éstos(Lafitte, 1994)

En el año 2020 se estableció el Maíz el 25 de agosto, posterior a emergencia las precipitaciones fueron muy bajas. La sequía durante la etapa de establecimiento del cultivo puede matar las plantas jóvenes y reducir la densidad de población (Lafitte, 1994). Así mismo se presentó días secos posteriores a la fertilización en estado fenológico **V5-V6**, estas condiciones de suelo seco previo a la fertilización con urea (fuente de N) probablemente impacto de forma negativa la eficiencia del nitrógeno dado que en condiciones de suelo seco el nitrógeno tiende a perderse en forma de amoniaco. El principal efecto de la sequía en el período vegetativo es reducir el crecimiento de las hojas, de tal modo que el cultivo intercepta menos radiación solar (Lafitte, 1994). La segunda fertilización se realizó cuando el cultivo de maíz se encontraba en el estado fenológico **V9-V10** A los 2 días después de la fertilización ocurrieron tres eventos que sumaron más de 100 mm de precipitación, lo cual pudo haber movilizado una parte del nitrógeno por escorrentía. El rendimiento final fue de 4.6t, bajo igualmente al registrado en 2019. Por situaciones como las mencionadas el CIMMYT considera el agua como el factor que comúnmente limita la producción de maíz en las zonas tropicales (Lafitte, 1994).

Figura 2-11: Oferta hídrica disponible para las plantas durante un año en punto de monitoreo PVAa-Semestrales, **A**: 5 cm, **B**: 20 cm, **C**: 40 cm y **D**:70 cm.

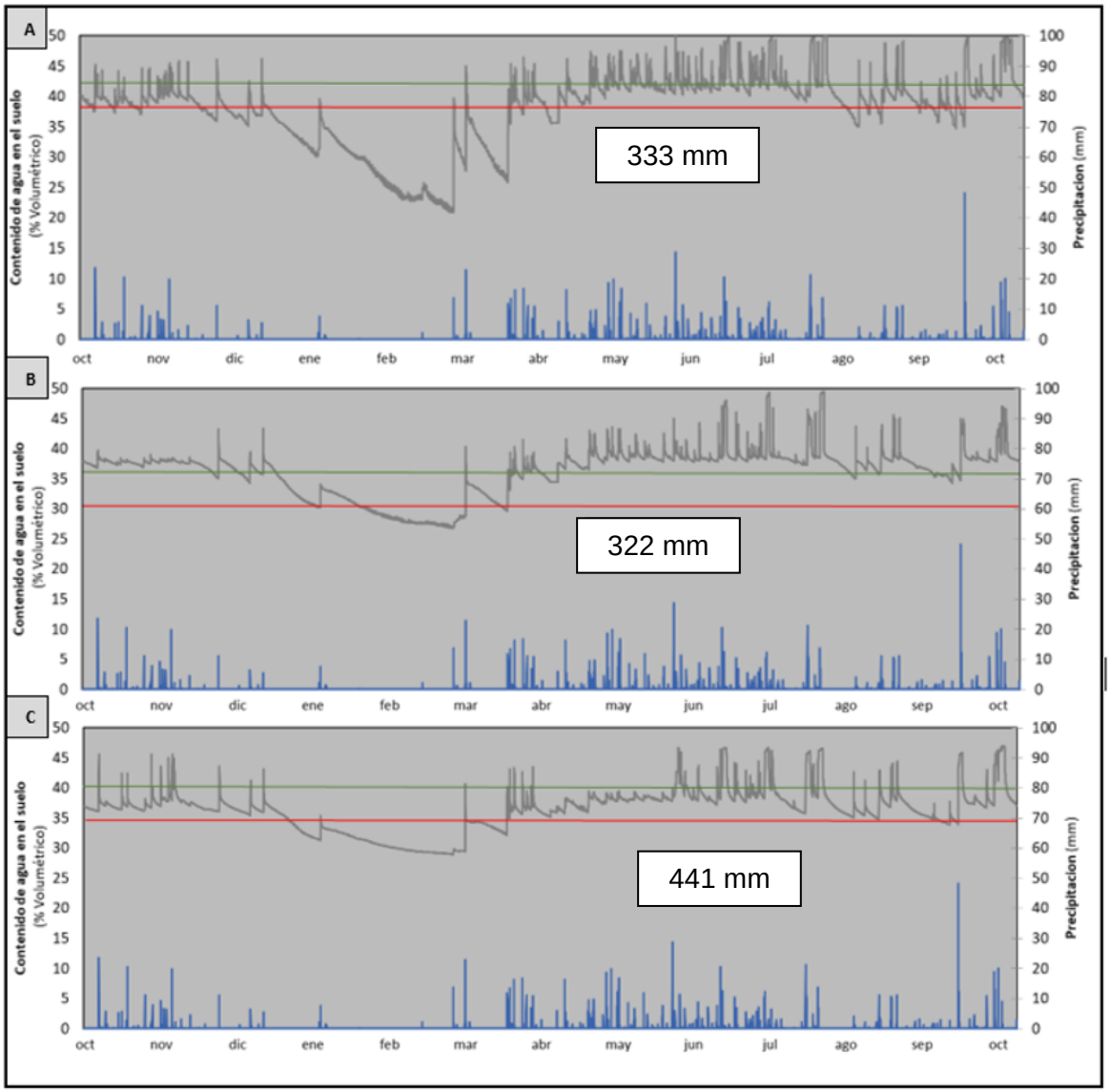


Fuente: Propia

Los datos evidencias que en los meses de Agosto y Septiembre se presentó una sequía agrícola, definida como “déficit de humedad del suelo durante la temporada de crecimiento de las plantas” (Van Loon, 2015). Trnka et al., (2022) reportaron que aumentando el agua disponible en el suelo disminuiría la frecuencia y probablemente también el impacto de futuras sequías agrícolas en republica checa. La cual puede darse en dos direcciones, i) aumento de contenidos de materia orgánica y ii) aumentando el horizonte de exploración y profundidad de raíces.

Durante la temporada lluviosa los contenidos de agua en el suelo alcanzaron los valores máximos por encima de capacidad de campo en el horizonte Ap **Figura 2-12**, estas condiciones de anegamiento se presentaron con mayor frecuencia en el primer semestre agrícola (abril-Julio) y en condiciones de la terraza media PVBa de la cuenca, esto debido al drenaje lento geoformas planas y cóncavas. Estas condiciones de alta saturación disminuyen la nodulación y simbiosis en soya, afectando la nutrición del cultivo (Van Nguyen et al., 2017). En general los cultivos requieren aireación en el espacio poroso para su optimo desarrollo (Limami et al., 2014), aunque especies gramíneas se adaptan a condiciones de saturación de agua en ciertos periodos, el más destacado es el cultivo del arroz, que evoluciono en ambientes de alta saturación, es de aclarar que existen genotipos de tipo japónica tropical que no toleran encharcamiento, y desarrollados en la región adaptación a suelos ácidos (Tapiero et al., 2012). Pastos humícolas típicas coberturas en terrazas medias y bajas, debido a la tolerancia de medios con saturación de agua (Perez, 1992), sin embargo, se ha encontrado que la continua situación de saturación de agua disminuye producción de biomasa, aumenta la presencia de plagas como el mion de los pastos, repercutiendo en la productividad ganadera de la región.

Figura 2-12: Oferta hídrica disponible para las plantas durante un año en punto de monitoreo PVBa-Pastura (A: 5 cm, B: 20 cm y C: 40 cm).



Fuente: Propia

La oferta hídrica edáfica es mayor en la capa Ap cuando revisamos la terraza alta en la unidad de suelos PVAa (**Figura 2-10** y **Figura 2-11**), y se reduce en las profundidades de 40 y 70 cm debido a la baja disponibilidad, ya que esta retenida a una presión por debajo de punto de marchitez permanente.

La Oferta hídrica disponible para cultivos acumulada durante un año fue de 1.360 mm en el punto de monitoreo PVAa-Pasturas, 1.227 mm en PVAa-Semestrales y 1096 mm en el punto PVBa-Pasturas (**Tabla 2-7**), si consideramos la precipitación como única entrada al sistema, el balance hídrico nos permite concluir que del 100% de las precipitaciones se infiltra al suelo entre un 40 y 50%, donde el restante se pierde principalmente por escorrentía superficial.

Tabla 2-7. Oferta hídrica mensual en lámina de agua (mm)

P.monitoreo	Hzte	Prof	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
PVAa Pastura	Ap	5	3	0	12	37	79	38	32	30	42	35	44	28
		20	2	0	12	29	147	107	74	32	28	58	42	25
	Bo1	40	4	0	15	21	42	51	39	6	11	32	18	12
	Bo2	70	4	1	28	23	48	11	11	2	39	5	0	2
PVAa Semestrales	Ap	5	0	0	17	48	120	104	95	22	29	63	61	13
		20	0	0	26	41	95	59	56	16	16	50	76	13
	Bo1	40	0	0	6	12	21	11	9	8	9	10	10	14
	Bo2	70	0	0	1	4	21	15	13	6	6	13	13	0
PVBa Pasturas	Ap	5	0	0	10	20	15	63	60	32	9	51	65	14
		20	0	0	4	14	55	70	75	40	13	34	8	10
	Bo	40	2	0	22	38	26	64	64	42	22	42	47	32

Si consideramos los semestres agrícolas tradicionales en el área de estudio, valorando las cantidades de agua en el suelo del horizonte Ap, en la terraza alta se podría contar con valores entre 500 y 600 mm para el semestre A (abril-julio), a diferencia del semestre B (agosto-noviembre) donde se cuantifico valores de 311 y 333 mm. Las condiciones de humedad de suelo en el semestre A permite abastecer los requerimientos hídricos del maíz, de acuerdo con Sun et al. (2010) es aproximadamente 450 mm/año, Aunque debe considerarse una buena distribución que evite el déficit en el suelo. Para AbdAllah et al. (2021) en cualquier etapa de crecimiento del maíz el déficit hídrico conduce a disminución en el rendimiento. El estrés por sequía en las etapas de espiga y llenado disminuye los rendimientos entre un 40,6% y un 14,0%, respectivamente. Estudios demuestran que el riego complementario puede aliviar los efectos adversos del estrés hídrico en el suelo, particularmente en las etapas de floración y el llenado de granos (Dogan, 2019; Paoletti and Shortridge, 2020). Para la región de la Orinoquia, Almansa Manrique (2006b) estableció un rango para requerimientos hídricos entre 350 a 550 mm para soya

dependiendo del genotipo empleado, condiciones ambientales, duración del ciclo de cultivo y manejo del cultivo.

Considerando los días secos o con humedad inferior a PMP, acumulados durante el año de medición (**Tabla 2-8**), fue posible definir el régimen de humedad de suelo, donde valores superiores de 90 días secos anuales es considerado como régimen Ustico, e inferiores a 90 días secos se define en régimen Udico.

Tabla 2-8. Número de días secos al mes (con humedad de suelos inferior a PMP)

P.monitoreo	Hzte	Prof	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PVAa Pastura	**Ap**	**5**	31	29	31	27	2	0	0	3	8	0	2	14	147
		20	30	29	31	30	3	17	0	17	19	0	0	6	182
	Bo1	**40**	31	29	31	30	30	22	18	31	24	16	11	19	292
	Bo2	**70**	31	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	366
PVAa Semestrales	**Ap**	**5**	31	29	27	6	0	0	7	19	13	8	6	26	172
		20	31	29	26	7	0	0	5	19	18	5	3	24	167
	Bo1	**40**	27	29	22	0	0	0	0	0	4	0	0	0	82
	Bo2	**70**	31	29	31	23	2	0	0	12	12	4	6	31	181
PVBa Pasturas	**Ap**	**5**	31	29	29	6	0	0	0	6	5	1	1	19	127
		20	0	24	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37
	Bo	**40**	25	29	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73

Lo anterior sugiere una revisión en la clasificación del régimen de humedad de suelos en el área de estudio y áreas en condiciones similares. Considerando que los regímenes de temperatura y humedad del suelo se están incorporando actualmente en la planificación y gestión de los recursos naturales. Bradford et al., (2019) sugieren emplear el régimen de humedad de suelo como indicador de evaluación de resiliencia y resistencia ante los cambio impulsados por el clima.

Cabe resaltar que existe una alta incertidumbre del comportamiento de los equipos establecidos en campo con el ambiente tropical, puesto que se presentan numerosas afectaciones bióticas y abióticas que sugiere una revisión acerca de protección de instrumentos en ambientes extremos. Se debe considerar la alta humedad ambiental, cambios de temperatura extrema, avispas, abejas, hormigas, alteración de animales nativos (venados) o introducidos (ganado vacuno). Por lo tanto, la instrumentación de la humedad del suelo basada en mediciones in situ (es decir, puntuales) es un desafío y requiere la consideración de múltiples factores.

2.4 Conclusiones

El reconocimiento de suelos permitió identificar las características fisicoquímicas de oxisoles e inceptisoles en la cuenca del caño Quenane, donde se evidencio la escaza saturación de bases intercambiables y acides (Al y Fe) que limita los requerimientos nutricionales de los cultivos, aunque se destaca niveles de fosforo adecuados en el horizonte Ap de los puntos de monitoreo establecidos con semestrales, los niveles de Ca+ y Mg+ muestra que recientemente no se han incorporación enmiendas, como es recomendado para la zona de estudio.

Las condiciones físicas del suelo muestran el adensamiento natural típico de suelos de origen sedimentarios, con texturas Franco a finas con mayor proporción de arcillas en profundidad que demuestra el alto grado de meteorización y madures de suelo. Los puntos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente permitieron evidenciar la poca cantidad de agua aprovechable que puede retener este tipo de suelos, lo que implica que en pocos días (2 a 4 días) de no recibir suministro de agua por precipitación o riego, las plantas presenten condiciones de estrés hídrico y afectación a variables de rendimiento. La conductividad hidráulica saturada muestra los bajos niveles de infiltración de agua en el suelo, condición que propicia mayores volúmenes de escorrentía ante eventos intensos de precipitación comparados con lo que podría representar los contenidos de agua en el suelo.

Aunque la porosidad total del suelo se encuentra en un rango adecuado, la clasificación de tamaño de poros muestra que la mayor proporción de poros se encuentra en los poros de menor tamaño (microporos) en donde el agua se retiene a fuerzas mayores de 1500 Kpa, las cuales las plantas no pueden absorber. La baja proporción de poros medios (mesoporos) y grandes (macroporos) se correlaciona con la baja retención de agua aprovechable por las plantas y baja infiltración del suelo.

La calibración de instrumentos para la medición hidrológica, como los sensores de humedad del suelo, permite generar información de mayor confianza que puede ser tenida en cuenta por tomadores de decisión, dada la menor incertidumbre generada.

La humedad del suelo en los horizontes superficiales de la terraza alta presenta mayor respuesta a los eventos extremos de precipitación, comparado con la terraza media, que se comporta de manera más estable. Lo anterior, está relacionado a la velocidad de drenaje condicionada a la geomorfología, ya que la terraza alta tiene mayor drenaje externo que permite mayor velocidad de drenaje. De igual manera permite que la perdida de agua por escorrentía sea más lenta en condiciones de bajas precipitaciones, basado en que los valores mínimos en la terraza media son muy superiores a los valores mínimos de la terraza alta.

La cobertura del suelo juega un papel importante en la determinación de la humedad del suelo, teniendo en cuenta la especie y el porcentaje de cobertura del suelo, los pastos en terraza alta ante eventos de poca precipitación en la temporada lluviosa mantienen humedades a 5 cm de profundidad en el rango de AAP, comparado con el Maíz en el punto de monitoreo semestrales donde el agua disminuye cerca de PMP en todo el horizonte Ap ante la baja frecuencia de precipitaciones. Ese déficit hídrico en el suelo puede ocasionar afectaciones al maíz en estados fenológicos demandantes de agua (V16-R5), que pudieron haber ocasionado los bajos rendimientos del cultivo (menor de 5 t)

El monitoreo continuo de la humedad del suelo durante un año, permitió estimar la cantidad de agua en el rango disponible para las plantas en una amplia escala temporal (horaria, diaria, mensual y anual) lo que permitió definir que: la cantidad de agua anual y mensual puede ser suficiente para satisfacer los requerimientos hídricos de múltiples cultivos, sin embargo, la fluctuación diaria y horaria podría generar condiciones de estrés hídrico en estados fenológicos de alta demanda hídrica en las plantas, afectando rendimiento de los cultivos.

La cantidad de días acumulados en el año con humedad de suelo inferiores a PMP, permitió definir los regímenes de humedad de los suelos monitoreados, de esta manera se clasificó los suelos de terraza alta como régimen Ustico y los suelos de terraza media como Udicos, lo anterior es considerado un porte significativo en la planificación del territorio, ya

que actualmente no se han registrado suelos Usticos en el piedemonte llanero colombiano donde predomina el régimen de humedad Udico.

3. Efecto de la variabilidad climática sobre la oferta hídrica para cultivos transitorios y pasturas en la cuenca del caño Quenane

3.1 Introducción

En las últimas décadas pese a la complejidad del sistema climático terrestre, los científicos han desarrollado metodologías y herramientas para detectar con detalle y certidumbre, eventos y fenómenos atmosféricos (Krinitskiy et al., 2021). En la actualidad, el reto es identificar a escala local y con anticipación las alteraciones climáticas que ponen en riesgo los medios de subsistencia, la biodiversidad, la salud humana y la de los ecosistemas, la infraestructura y los sistemas alimentarios (IPCC, 2020). En este contexto, el sector agrícola está en la obligación de producir más alimentos con un bajo impacto ambiental, adaptándose a las alteraciones climáticas generadas por eventos a diferentes escalas que modulan el clima y generan variaciones significativas, transitorias (variabilidad) y permanentes (cambio) en los elementos meteorológicos (Cui, 2020; Egerer et al., 2021; Ibrahim and Johansson, 2021).

En el contexto de cambio climático el desafío de la Orinoquia colombiana está relacionado con un crecimiento sostenible en el área productiva con bajas emisiones de gases de efecto invernadero y adaptada a los eventos meteorológicos adversos, cada vez más frecuentes (CIAT and CORMACARENA, 2017). La Orinoquia se caracteriza por su alta oferta hídrica caracterizada por un régimen monomodal de lluvias con más de 2.000 mm por año (Bustamante, 2019); que permite dos ciclos de cultivos semestrales y una considerable oferta forrajera (Amézquita et al., 2013; Fontanilla-Díaz et al., 2021), lo cual no garantiza que se suplan las necesidades hídricas de los cultivos todos los años(Galvis Quintero et al., 2018). A pesar del alto volumen de agua que cae por unidad de área, en la región, alteraciones en el patrón medio de distribución de lluvias a través del año, así como

reducciones e incrementos de la precipitación acumulada anual determinan la probabilidad de éxito de los cultivos, los cuales tradicionalmente se han establecidos en sistemas de secano favorecidos dependiente de las precipitaciones. De acuerdo con Pardo et al. (2020) para arroz de secano cambios en la precipitación a través del ciclo de cultivo afectan el rendimiento de este sistema productivo en la Orinoquia. La precipitación es una variable importante en estudios sobre el efecto del cambio del clima en la productividad de especies cultivadas (Feng et al., 2021). Para la región de la Orinoquia Hoyos et al. (2013) e ICA (2011), reportan vaneamiento de la espiga en el cultivo de arroz (desorden ocasionado por patógenos) debido al incremento inusual de la temperatura y humedad del aire, y altas precipitaciones generadas por la fase positiva del ENSO (La Niña). León et al. (2018) y Espinel et al. (2020), reportan daños sobre la sabana nativa y pastos mejorados asociados al aumentos de las poblacionales de Prosapia simulans (Salivazo de los pastos) y Rhammatocerus schistocercoides (Langosta Llanera), bajo condiciones extremas de radiación solar, humedad relativa y precipitación. Durante la época seca es común la incidencia de incendios en sabanas (Hébert-Dufresne et al., 2018), estos fenómenos son altamente sensible al cambio climático como al uso de la tierra (de Oliveira-Júnior et al., 2021), los cuales pueden volverse más frecuentes, severos y extensos, transformando las áreas de bosque en sabanas (Armenteras et al., 2021).

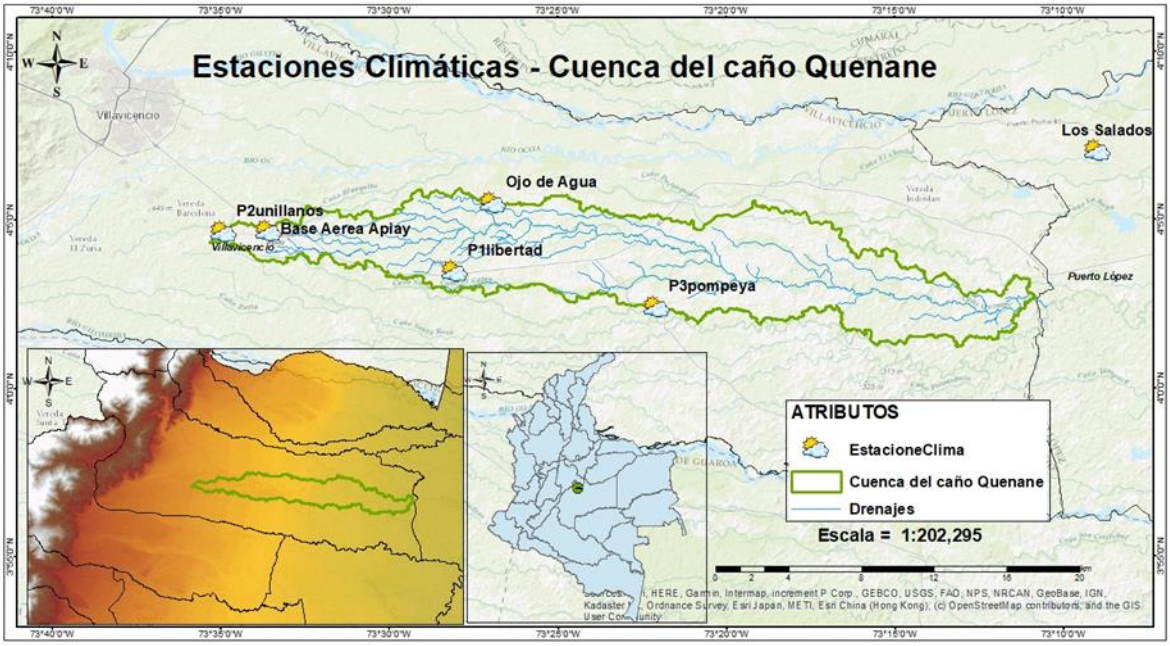
Aunque ha habido avances nacionales de entendimiento de los cambios del clima y su relación en la agricultura, aún son muy escasos los estudios en la Orinoquia, quizá por la limitada información climáticas en comparación con el resto del país y a la escasa inversión en investigación agropecuaria regional. En este apartado se analizan datos históricos del clima a escala de cuenca, y las implicaciones de las alteraciones climáticas en cultivos semestrales y pasturas para una cuenca de piedemonte en la Orinoquia colombiana.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Área de estudio

La investigación se realizó en la cuenca del caño Quenane, ubicada en el Piedemonte de la Orinoquia colombiana (Llanos orientales colombianos), municipio de Villavicencio, departamento del Meta (**Figura 3-1**). La cuenca se caracteriza por una pendiente entre 0 y 3 %, típica de zonas planas en los llanos orientales colombianos (Lozano, 2014). Alturas que varían entre 199 y 375 msnm, con una longitud de 54 Km, siendo el área total de la cuenca 185 Km^2 (CORMACARENA, 2018)

Figura 3-1. Estaciones climáticas en la cuenca del Caño Quenane



Fuente: Propia

3.2.2 Clima

El área de estudio tiene una precipitación monomodal con un promedio de 2.917 mm/ año, el periodo seco corresponde al periodo entre diciembre y marzo, con una temporada lluviosa desde marzo hasta noviembre, caracterizada por lluvias generalizadas con alto

volumen e intensidad especialmente en el trimestre mayo-junio-julio, y un descenso en agosto. La Temperatura media anual es de 25.8°C, la temperatura media mínima 21.7°C, y la media máxima es de 30.8°C. El Brillo solar promedio anual es de 5.1 horas/día, asociado a las nubes que convergen durante el paso de la ZCIT, los máximos en la época seca 6.6 h/día y los mínimos en época lluviosa 3.9 h/día. La Humedad relativa oscila entre 68.5% en la temporada seca y 85% en la temporada lluviosa, con velocidad del viento menor de 2 m/s (Amézquita et al., 2013; IDEAM, 2017a; Orduz and Fischer, 2007). Es una zona de bosque tropical lluvioso (monzónico) de acuerdo con la clasificación de Koeppen, cálido húmedo en la clasificación Caldas-Lang y Perhúmedo según el índice hídrico de Thorthwaite (IDEAM, 2017a)

3.2.3 Datos climáticos

Las estaciones climáticas hacen parte de la red climatológica nacional (IDEAM, 2005), que se encontraban en la cuenca o cercanas a ella, de tecnología convencional (**Tabla 3-1**)

Tabla 3-1. Estaciones climáticas en la cuenca caño Quenane

Estación	Código	Tipo	Periodo datos
UNILLANOS	35035070	Climática principal	1983-2020
BASE AEREA APIAY*	35035010	Sinóptica Secundaria	1968-2016
LA LIBERTAD	35025020	Climática principal	1972-2020
OJO DE AGUA**	35030050	Pluviométrica	1978-2019
POMPEYA	35020060	Pluviométrica	1978-2020
LOS SALADOS*	35020070	Pluviométrica	1968-1994

*Suspendida, **Afectada por pandemia durante el 2020.

Los valores diarios de precipitación (mm), temperatura (ºC) y humedad relativa del aire (%), velocidad del viento (m/s) y brillo solar (h/día) se descargaron en formato CSV del portal Sistema de Información para la Gestión de Datos de Hidrología y Meteorología (DHIME) del IDEAM (IDEAM, 2019a). El periodo de información utilizado va desde 1969 hasta el 31 de diciembre del 2020. Se realizó control de calidad de la información, identificando datos faltantes e inconsistentes. Los valores inconsistentes se identificaron a

través de análisis estadísticos descriptivos (promedio y desviación estándar) de los datos diarios, por estación y por mes (Mesri et al., 2013). Después de retirar los valores inconsistentes, la serie de tiempo se completó llenando las posiciones faltantes dentro de la serie mediante simulación, utilizando SueMulador de acuerdo con la metodología de Chica Ramírez et al. (2014).

La información disponible para la estación La Libertad localizada en la zona media de la cuenca (**Figura 3-1**), permitió estimar la evapotranspiración diaria mediante Penman-Monteith, aplicando el software de uso libre ETo calculator versión 3.1. Este software permite calcular la evapotranspiración de referencia (ETo) a partir de los datos de temperatura máxima y mínima, brillo solar, humedad relativa y velocidad del viento (Allen et al., 1998).

3.2.4 Análisis de datos

- **Variabilidad interanual**

El análisis de la variabilidad espaciotemporal de la precipitación en la cuenca se basó en el análisis de los acumulados anuales, y exploratorio de las series climáticas mediante gráficas de series de tiempo, diagrama de cajas, histogramas, gráfica de normalidad y estadística descriptiva. El análisis mensual (temporalidad establecida para el ENSO) de variación del patrón interanual de lluvias y anomalías, inicialmente se realizó una comparación visual de anomalías anuales con los índices ONI, MEI, SOI y TSM1+2 de acuerdo con Peña et al. (2011) se aplicó una regresión lineal simple a los valores mensuales de los índices y los valores mensuales de precipitación acumulada, días con lluvia, brillo solar medio, temperatura media, temperatura máxima media y temperatura mínima media siguiendo la metodología de Ramírez C. et al. (2018) a medida que los valores se acercan a uno (1) existe mayor correlación. Mediante una prueba de causalidad se determinó si una serie de tiempo es útil para pronosticar otra, donde la significancia es válida cuando el valor de P_ probabilidad es menor de 0.5 (Attanasio et al., 2013).

- **Variabilidad intranual**

La caracterización de las lluvias se llevó a cabo a escala semanal, ya que son los periodos temporales de uso común en la agricultura (Alan et al., 2014). Mediante gráficos de mapas de calor (Praveen et al., 2020) con la cantidad de precipitación semanal y acumulados durante el periodo 1972 al 2020 se realizó la caracterización de la distribución de las lluvias. Se graficó los valores de precipitación y evapotranspiración de referencia, con mayor detalle para un año seco, promedio y húmedo, estos fueron seleccionados del registro histórico de precipitación a partir de los cuantiles 25, 50 y 75% (López et al., 2019)

- **Balance hídrico agrícola**

Se utilizó el balance hídrico agrícola para determinar el contenido de agua en el suelo disponible para el cultivo a escala diaria. En este caso, dadas las condiciones del lote experimental, se utilizó una simplificación del balance propuesto por Allen et al. (1998) (ecuación 1).

$$CH_i = CH_{i-1} + PE_i - ETa_i \qquad \text{(ecuación 1)}$$

Donde, CH_i es el contenido de humedad del suelo del día actual (hoy), CH_{i-1} es el contenido de humedad del suelo del día anterior (ayer), P_i es la precipitación efectiva actual (hoy) y ETa_i es la evapotranspiración real actual (hoy). La precipitación efectiva (PE), o fracción de lluvia que alcanza la zona de raíces, se calculó a partir de una aproximación que tiene en cuenta la lluvia neta reportada por Velásquez y Jaramillo (2009) y la capacidad media del agua precipitada en un evento lluvioso para alcanzar capas profundas en el suelo, como reporta USDA-SCS (Dastane, 1978). Es importante mencionar que *CHi* adquiere valores que oscilan entre 0 y la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CAAS), empleando datos de Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), y profundidad del suelo para la localidad de evaluación (Velasco et al., 2000). La información edáfica se tomó del suelo PVAa-transitorios (**Tabla 2-4**) del capítulo anterior.

Los cultivos transitorios considerados fueron **Arroz** (Oryza sativa L.) variedad FL-Fedearroz 68, **Maíz** (Zea mays L.) Hibrido IMPACTO AGRISURE TH de Syngenta y **Soya** (Glycine max L.) variedad Corpoica Iraka 10 de AGROSAVIA (Caicedo and Tibocha, 2020). El establecimiento del cultivo en primer semestre fue el 15 abril y en segundo semestre el

15 agosto. La pastura consistió en cobertura permanente de **Brachiaria decumbens** (syn. Urochloa decumbens) en un sistema de pastoreo rotacional de 30 días.

La duración en días de las etapas de desarrollo del cultivo se muestra en la **Tabla 3-2**, donde la etapa inicial abarco desde la siembra hasta el momento en que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo, la etapa de desarrollo va del 10% de cobertura del suelo hasta la floración (R1), la etapa media de floración (R1) a madurez fisiológica (R6) y etapa final de madurez fisiológica (R6) a cosecha (R8), estas etapas fenológicas corresponde a cada especie; para el caso de la pastura tiene hasta un periodo medio, debido a que no llega a estados de maduración.

Tabla 3-2. Días de duración de etapas del ciclo de vida

Cultivo (ciclo)	**Etapa Inicial** (días)	**Etapa Desarrollo** (días)	**Etapa Media** (días)	**Etapa Final** (días)
Arroz (120 días)	20	60	25	15
Maíz (130 días)	15	41	54	20
Soya (110 días)	20	22	43	25
Pastura (30 días)	NA	15	15	NA

El cálculo de la Evapotranspiración real (ETa) se basó en los datos de evapotranspiración de referencia (ETo) y los coeficientes de cultivo (Kc) reportados por la FAO (Allen et al., 1998), además de estudios de las especies mencionadas (Almansa, 2006b; da Silva et al., 2019; Kamble et al., 2010). El coeficiente del cultivo (Kc) en cada etapa de desarrollo se muestra en la **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3. Coeficiente del cultivo (Kc) en etapas del ciclo de vida

Cultivo	**Kc Inicial**	**Kc Desarrollo**	**Kc Media**	**Kc Final**
Arroz	0.40	1.05	1.20	0.60
Maíz	0.40	0.80	1.20	0.40
Soya	0.35	0.75	1.15	0.60
Pastura	NA	0.40	1.05	NA

Con base en el balance, se clasificó cada uno de los días del ciclo de cultivo como:

a. días con humedad suficiente para el desarrollo del cultivo ($0 \leq CH_i \leq CAA$)
b. días con exceso de humedad ($CHi \geq CAA$)
c. días con déficit de humedad ($CAA = 0$)

Así mismo se determinó la cantidad de agua (mm) del exceso o déficit si se presentó.

- **Análisis de tendencias**

El análisis de tendencias del acumulado de las lluvias depende de la estacionariedad (media y variabilidad se mantienen constantes a lo largo del tiempo) o autocorrelación de la serie, para esto se generaron correlogramas, los cuales contienen bandas con un intervalo de confianza del 95% (Gao et al., 2020); permitiendo definir si existe algún nivel de autocorrelación en determinado Lag (retardo). Si la serie no presenta autocorrelación o estacionariedad se procede a determinar si presenta tendencia, mediante la prueba no paramétrica de Mann-Kendall tradicional (Hamed, 2008), Esta prueba es ampliamente utilizada para determinar tendencia de variables climáticas de manera significativa, además, es recomendada por la organización meteorológica mundial (OMM) para analizar diversas variables hidrológicas y meteorológicas (Bera et al., 2021). Si se identifica autocorrelación en la serie, se continua con la prueba Mann-Kendall modificada con el método de preblanqueamiento (Yue and Wang, 2002). Para definir la tendencia se utilizaron dos niveles, muy significativo (nivel significancia 5%) y significativo (nivel significancia 10%) de acuerdo con Gao et al. (2020). Para analizar la magnitud de la tendencia en caso de presentarse, se estimó la pendiente de Sen donde los valores positivos de “Z” indican tendencias crecientes, mientras que los valores negativos de “Z” muestran tendencias decrecientes (Sen, 1968).

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Variabilidad interanual de precipitación en la cuenca caño Quenane

La precipitación promedio anual en la cuenca caño Quenane es de 2.901 mm/año (promedio de todas las estaciones), en la **Tabla 3-4** se observa la variabilidad espacial de acuerdo con la media estadística para las seis estaciones en la cuenca fluctúa entre 2472 a 3477 mm/año, esta variabilidad concuerda con lo reportado por IDEAM (2017b) donde menciona que en el piedemonte de la cordillera Oriental, se originan los mayores volúmenes de la región, entre 4.000 y 6.000 mm anuales y hacia el centro de la región, las cantidades de precipitación oscilan entre 2.500 y 3.000 mm por año, ocasionadas mayormente por fuerte convección diurna. La variabilidad anual de las lluvias desde la desviación estándar representa las anomalías interanuales en la cuenca, que en promedio es de 500 mm/año. Estos valores de variabilidad pueden interpretarse en función del rendimiento de los cultivos, de acuerdo con Delerce et al. (2016), factores climáticos explican del 6 al 46% de la variabilidad espaciotemporal en el rendimiento según las combinaciones de región y cultivo, llegando hasta valores del 60% para cultivos de arroz en áreas de Meta y Tolima.

Tabla 3-4. Estadística descriptiva de precipitación anual en las estaciones de la cuenca

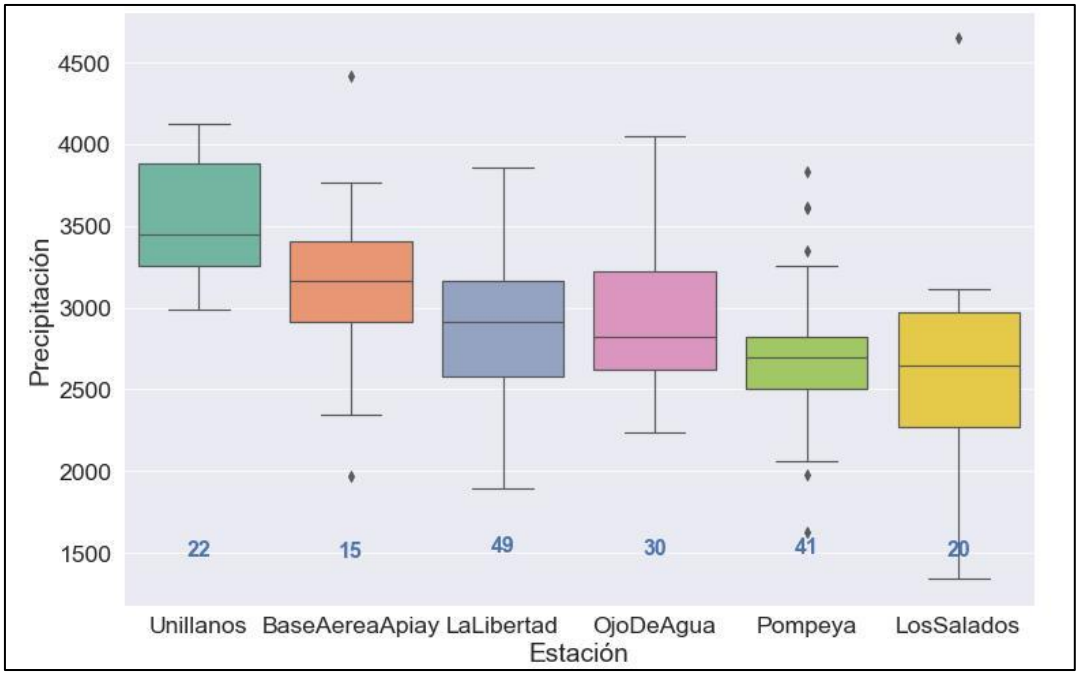
Estación	Unillanos	Base Aérea Apiay	La Libertad	Ojo de Agua	Pompeya	Los Salados
N° Años (≥80%)	27	24	49	38	42	24
Media	3,477	2,963	2,911	2,911	2,674	2,472
SD	388	576	431	461	437	711
Varianza	150,165	331,854	185,540	212,486	190,636	505,752
CV (%)	11	19	15	16	16	29
Mínimo	2,639	1,668	1,891	1,954	1,627	1,344
Q1	3209	2603	2578	2617	2456	1751
Mediana	3428	2938	2911	2848	2687	2435
Q3	3763	3221	3162	3151	2812	2843
Máximo	4,126	4,421	3,855	4,047	3,830	4,648
IQR	554	482	585	534	356	934
Coeficiente simetría	0.05	0.14	0.12	0.66	0.47	0.92

SD: Desviación estándar, CV: Coeficiente de variación, Q1: Cuartil 25%, Q2: Cuartil 50% o mediana, Q3: Cuartil 75%, IQR: Rango intercuartílico.

La variabilidad espacial de precipitación en la cuenca responde más a la longitud que la latitud, esto se evidencia en una mayor cantidad de precipitación hacia el este (**Figura 3-2**). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Bernal et al. (2013) indicando un

descenso en las precipitaciones anuales en el transepto Villavicencio – Puerto Lopez. La estación Unillanos ubicada en la parte alta y oeste de la cuenca presenta el mayor valor para la media estadística; siendo la estación Los Salados ubicada al este, la que registra el menor valor de precipitación. La diferencia entre estas dos estaciones es mayor de 1000 mm/ año, este comportamiento está relacionado con la dirección de los vientos, para Poveda et al. (2020) el movimiento de las nubes cargadas de humedad en ascenso hacia la Montaña son las responsables de una mayor precipitación en la parte alta de la cuenca. Estudios en el piedemonte llanero cerca de Villavicencio, encontraron que los periodos de viento en calma oscilan entre 55.7% - 75.7% del año, no existe una dirección dominante del viento, presentándose una frecuencia para vientos del este (IDEAM, 2013). Este comportamiento del viento explica la dirección de lluvias convectivas.

Figura 3-2. Diagrama de cajas de la precipitación anual en la cuenca Caño Quenane

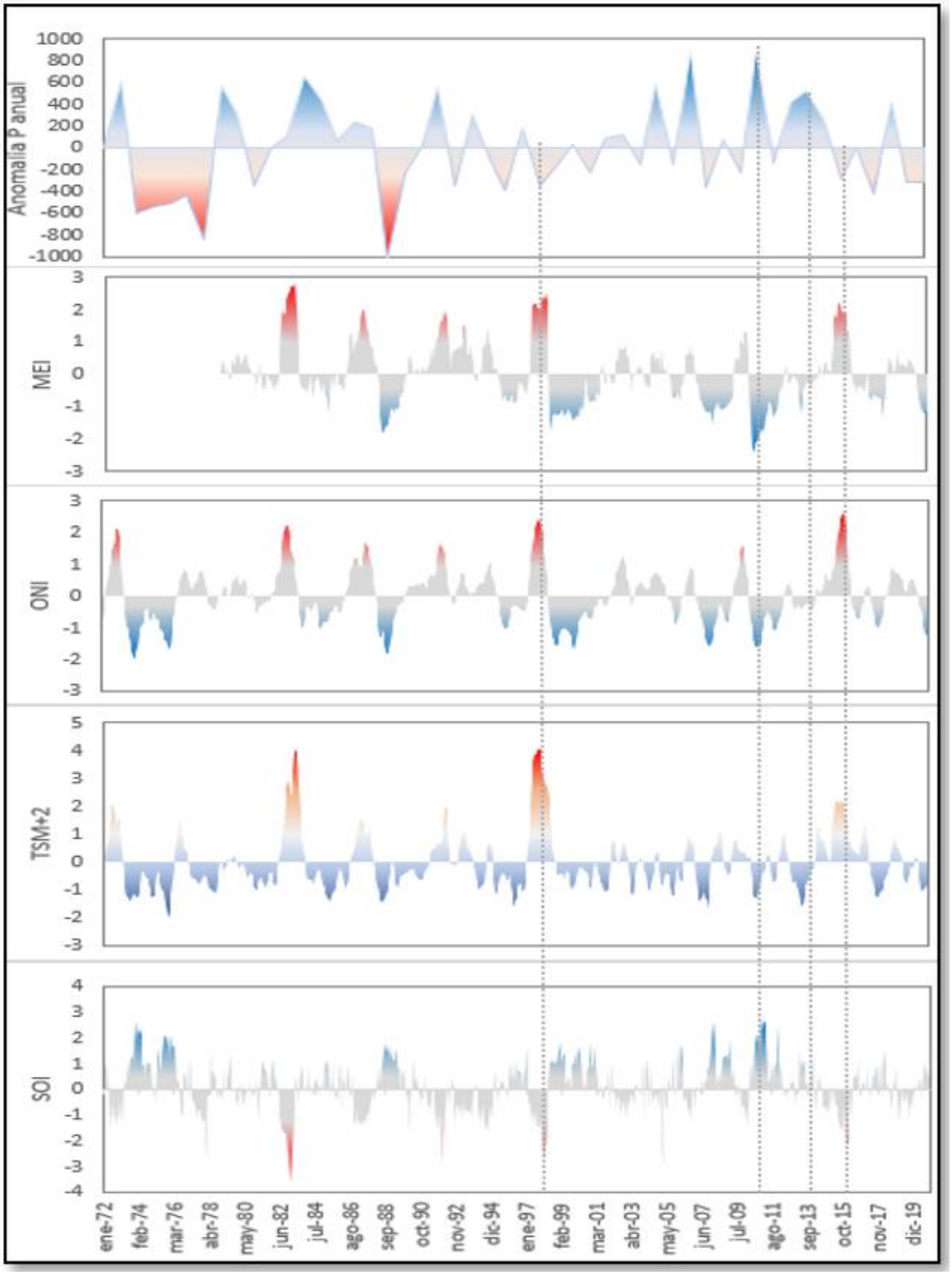


Fuente: Propia

En la **Figura 3-3** es posible observar una baja relación de los índices ENSO con las anomalías de precipitación en la cuenca, se encontraron cuatro momentos de coincidencia entre ellos, dos años asociados a la fase el niño y dos a la fase la niña, gran parte de estas coincidencias se presentaron entre el 2010 y 2015, lo anterior representa un 4% en el

periodo 1972 al 2020. Estudios de Arango et al. (2015) reportan que el fenómeno ENSO no es una herramienta confiable en la predicción del patrón de precipitación para la región Orinoquia.

Figura 3-3. Anomalías de precipitación anual e índices ENSO en la cuenca del Caño Quenane



Fuente: Propia

Durante los años 2010 y 2011 se registraron las precipitaciones anuales máximas para la serie histórica 1972-2020, coincidiendo con los índices y la expresión del fenómeno ENSO en fase La Niña (Cepal, 2012). Entre el 2012 y 2013 se presentaron anomalías positivas de precipitación, en esta ocasión el índice que indicaba esta anomalía fue la TSM 1+2, ver **Figura 3-3**. Las anomalías negativas de 1998 y 2015 coincidieron con los reportes de fase El Niño de los índices analizados. De acuerdo con la **Figura 3-3** pocas veces coincide los índices ENSO con las anomalías de precipitación, por el contrario, pueden llegar a ser opuestas, como lo sucedido entre los años 2016 a 2020.

El análisis de correlación mensual entre índices ENSO y algunos elementos del clima (**Tabla 3-5**), coincide con lo observado en la **Figura 3-3**. Ambos muestran anomalías de precipitación anual e índices ENSO respaldados por valores no significativos en dicha correlación. Así mismo, la prueba de causalidad (Gupta and Jain, 2021; McGraw and Barnes, 2018) aplicada entre los índices ENSO y los elementos del clima identificados en la **Tabla 3-5**, indican que el clima no responde a los fenómenos que caracterizan dichos índices, esta respuesta se evidencia por el valor de P mayor a 0.1

Tabla 3-5. Correlación de elementos climáticos con índices ENSO a escala mensual

Elementos del clima	**ONI**	**MEI**	**SOI**	**TSM1+2**
Precipitación (mm)	0.04	0.03	-0.04	0.06
N° días precipitación	-0.01	0.00	0.00	0.02
Temperatura máxima	0.10	0.09	-0.06	0.08
Temperatura media	0.12	0.11	-0.08	0.11
Brillo solar	0.02	0.01	-0.01	-0.01

La información analizada confirma que los índices evaluados para el ENSO no definen el comportamiento de las lluvias en la zona de estudio, las cuales no siempre coinciden con la concepción de años El Niño muy secos y La Niña muy lluviosa, condición acertada en otras regiones del país como en la Andina y Pacífica. En el 2015 un análisis similar a escala nacional realizado por Arango et al. (2015), arrojo resultados similares a los encontrados en el presente estudio para la región Orinoquia. La condición orográfica de Colombia es el factor de mayor determinación climática en las regiones (Poveda et al., 2011). Para el caso de la Orinoquia y Amazonia, donde la cordillera de los Andes funciona como una barrera

al efecto de Oscilaciones climáticas en el Pacífico, de la misma manera el efecto orográfico tiene fuerte efecto en la generación de precipitaciones de origen regional (Poveda et al., 2020)

En la Orinoquia y Amazonia los índices representativos del ciclo ENSO y los registros de precipitación tienen una baja correlación, producto de la baja relación con la señal derivada del fenómeno ENSO, no presentando correlaciones significativas en cuanto los índices de precipitación a nivel trimestral, lo cual refleja la falta de causalidad entre las variables analizadas (Arango et al., 2015)

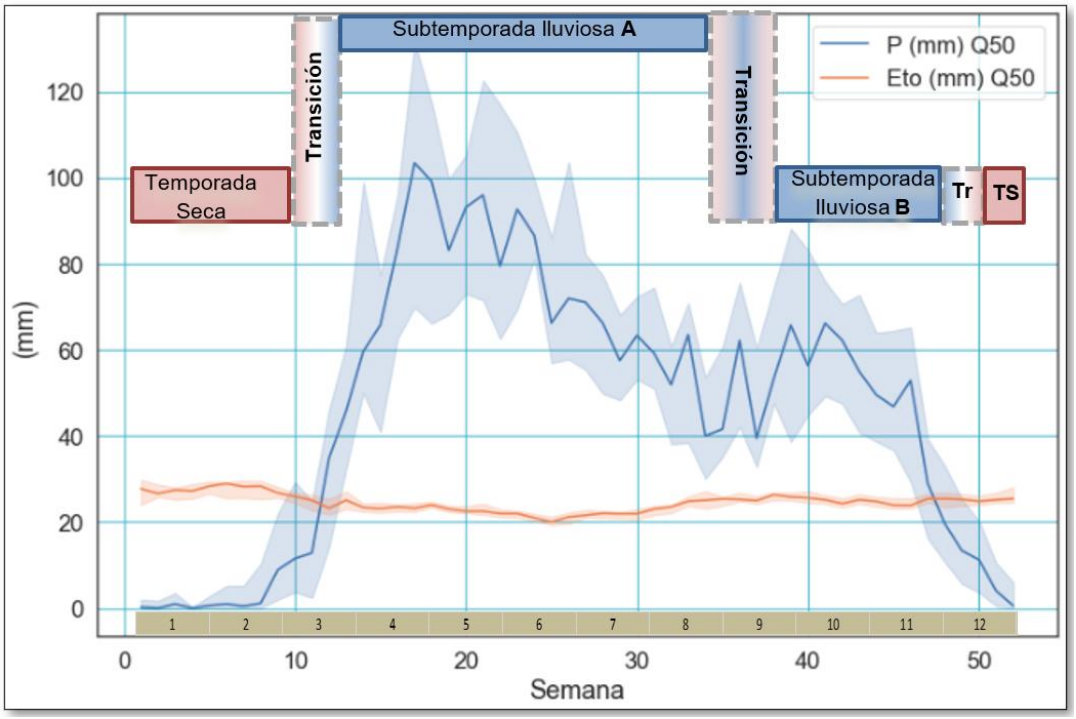
El análisis de variabilidad interanual de precipitación permite inferir que existen otros fenómenos que podrían estar aportando a la variabilidad (Córdoba-Machado et al., 2015). Es importante resaltar las diferentes escalas en el sistema climático asociadas a la génesis y desarrollo de los fenómenos (Von der Heydt et al., 2021). Estudios han encontrado baja predictibilidad hacia la región de los Llanos Orientales (departamento de Casanare) empleando índices tradicionales, sugiriendo continuar con investigaciones de este tipo y considerando mejoras en la calidad y densidad de la red de estaciones meteorológicas en (Esquivel et al., 2018)

3.3.2 Caracterización del patrón de lluvias e implicaciones para cultivos transitorios y pasturas

La **Figura 3-4** muestra la distribución de la precipitación y evapotranspiración de referencia a escala semanal, así como los excesos de agua en la temporada lluviosa, esta última corresponde a aproximadamente 36 semanas. La temporada de lluvia comienza en la semana 13 hasta la semana 48; se diferencia claramente dos subtemporadas lluviosas. la primera subtemporada más lluviosa entre la semana 13 a la 33, con valores máximos entre las semanas 17 y 26, esta subtemporada está asociada por el paso de ZCIT hacia el norte. La segunda subtemporada es un periodo menos lluvioso (semanas 34 hasta 48), con valores máximos entre las semanas 38 a 46 asociado al paso de la ZCIT hacia el sur. La Orinoquia está catalogada por un régimen de lluvias monomodal (IDEAM, 2017a), estudios

recientes proponen un régimen intermedio “Mixto”, lo cual es una definición más cercana a la realidad de la Orinoquia (Urrea et al., 2019)

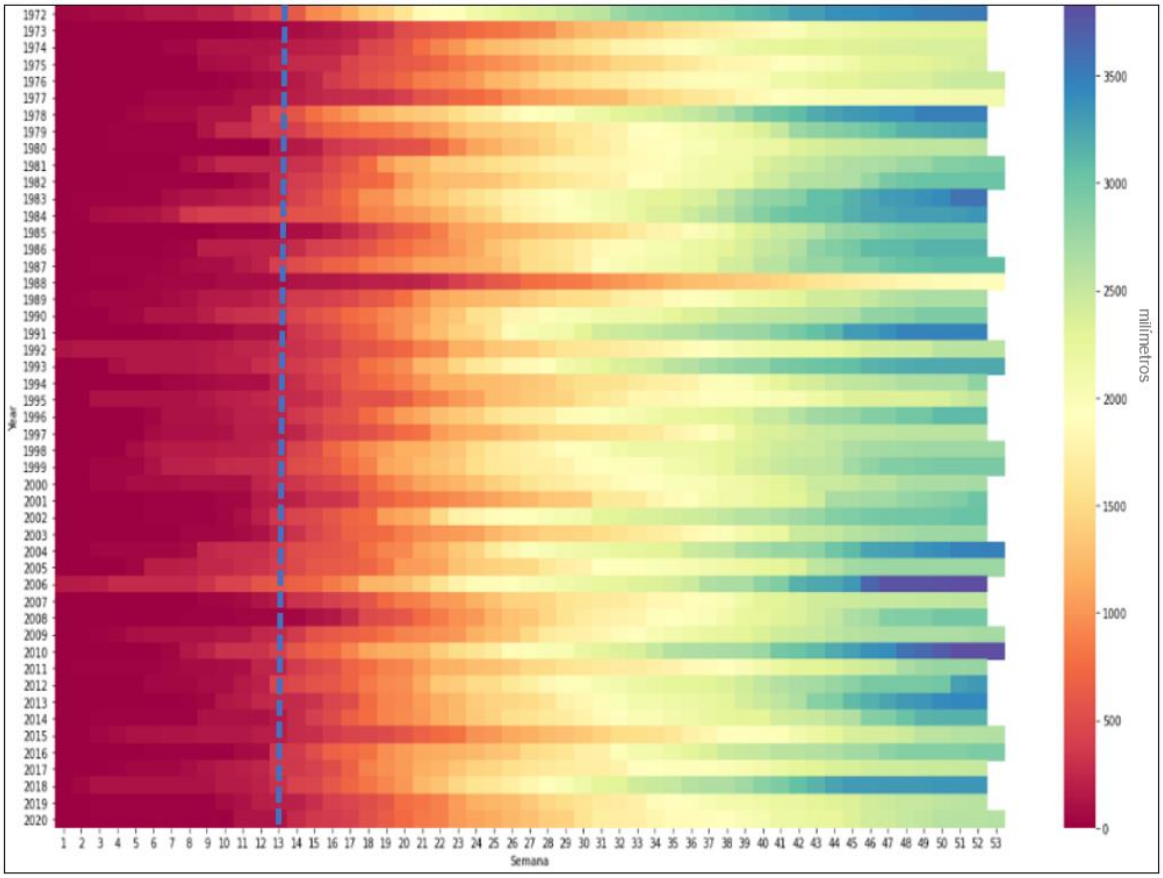
Figura 3-4. Balance climático semanal y temporadas de precipitación



En la **Figura 3-4** puede observarse periodos de transición entre temporada y subtemporadas; la primera transición se presenta entre la semana 9 y la semana 13 asociado al acercamiento de la ZCIT proveniente de latitudes Sur, marcando el inicio de la temporada lluviosa. Un segundo periodo de transición se da entre subtemporadas lluviosas, semanas 34 y 38, dado por el desplazamiento de la ZCIT hacia latitudes norte del país y posterior regreso hacia latitudes sur. De acuerdo con Sánchez Ortega (2021), este periodo tiene fuerte influencia de los vientos alisios provenientes del sureste (veranillo de agosto o de cometas), transportando nubes de la cuenca amazónica hacia la Orinoquia. El tercer periodo de transición se da alrededor de la semana 46 y 50 con el desplazamiento de la ZCIT a latitudes sur del país. Este análisis permite definir el patrón de lluvias en zonas ecuatoriales, el cual es aplicable para el ordenamiento territorial basados en la oferta de precipitación y la demanda por parte de los cultivos de acuerdo con su ciclo productivo y fenología (Chica Ramirez et al., 2021)

De acuerdo con la serie histórica analizada la semana 13 representa el inicio de temporada lluviosa, dada por la condición de cuando la precipitación es mayor a la evapotranspiración (**Figura 3-4**), Aunque en ocasiones esta puede anticiparse como ocurrió en los años 2004, 2006, 2010, o retrasarse como en el 2001, 2008, y 2015 (**Figura 3-5**). Esto puede generar impactos en diferentes sectores de la sociedad entre ellos la agricultura, ya que tradicionalmente los agricultores de ciclo corto en la Orinoquia colombiana planifican labores agrícolas con base al calendario o esquema recomendado para el sistema de rotación de cultivos transitorios, esto con el fin de realizar dos siembras al año favoreciéndose de las precipitaciones. (Caicedo et al., 2012)

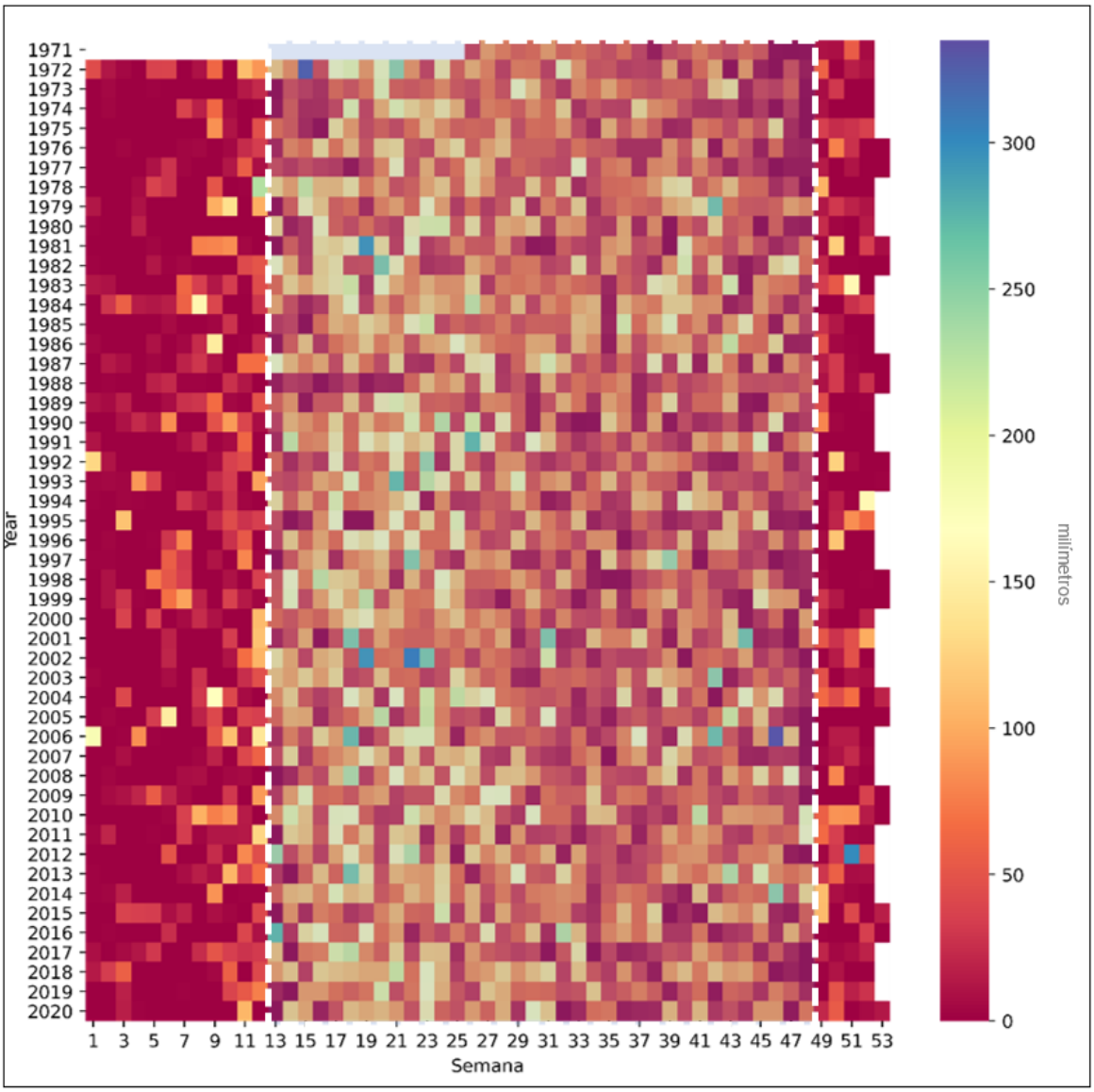
Figura 3-5. Precipitación anual, acumulada a escala semanal



Fuente: Propia

En la subtemporada lluviosa B Semanas en donde la se presentan semanas con precipitación son menores a 20 mm durante la (época lluviosa) con mayor frecuencia, se presentan con mayor frecuencia en la subtemporada lluviosa B, entre las semanas 34 a la 48 (**Figura 3-6**), durante estas semanas la evapotranspiración es mayor a la precipitación, estas condiciones generando disminución de agua en del suelo, alcanzando valores de humedad entre cercanas a PMP, generando situaciones de estrés hídrico; Estas semanas pueden coincidir con estados fenológicos de cultivos vulnerables al déficit hídrico como lo son (germinación, floración y llenado de fruto), Impactando negativamente el rendimiento de los cultivos. y por ende la economía del sector agrícola en la región. La baja capacidad de retención de agua en los suelos de la Orinoquia la cual se encuentra en valores de 3 hasta 8% (**Tabla 2-4**), agrava la situación hídrica de cultivos, disminuye la disponibilidad de agua para los cultivos. En el caso del cultivo de la soya en la Orinoquia ya que estudios anteriores indican que después de cuatro días sin precipitaciones las plantas de soya presentan estrés hídrico (Almansa, 2006b). Momentos donde se hace necesario utilizar el riego como complemento a las lluvias para mantener una alta producción y óptima calidad, lo mismo que para evitar fuertes pérdidas por deficiencia de humedad.

Figura 3-6. Precipitación semanal en serie histórica



Las cantidades de precipitación anual son diferentes con una variabilidad aproximada del 15%. La distribución de la precipitación semanal no coincide con medidas de tendencia central. El uso de datos de precipitación para proyección agrícola requiere de un análisis del comportamiento año por año, para entender los escenarios que pueden presentarse.

3.3.3 Dinámica de la oferta hídrica disponible para cultivos transitorios y pasturas en años marcados con extrema precipitación

El primer semestre muestra una favorabilidad para la siembra de cultivos transitorios bajo condiciones de secano. El agua que se precipita durante esta época del año (abril a Julio) propicia una condición óptima de humedad de suelo, en ocasiones se presentan días con déficit hídrico (**Tabla 3-6**). Aunque los excesos hídricos suelen irse por escorrentía superficial, la acumulación de estos días podría llegar a ser desfavorable en áreas con mal drenaje y especies susceptibles al encharcamiento. El segundo semestre (agosto a diciembre) presenta mayor dificultad para los sistemas productivos evaluados, en cultivos transitorios se presentaron entre 5 y 30 días con déficit hídrico, un rango amplio que genera incertidumbre en este reglón económico. Aunque la pastura alcanzo valores de 36 días con déficit que puede reducir la producción de biomasa, las plantas de U. decumbens tienen adaptación a sequias prolongadas y se recuperan muy bien con las precipitaciones.

Tabla 3-6. Días con déficit y excesos hídricos de cultivos durante los años 2010, 2016 y 2020

Año	Cultivo*	Semestre A		Semestre B	
		Déficit (días)	**Exceso** (días)	**Déficit** (días)	**Exceso** (días)
2010	Arroz (120 días)	12	53	15	34
	Soya (110dias)	0	52	5	38
	Maíz (130dias)	6	57	10	43
	Pasto (150 días)	17	66	20	49
2016	Arroz (120 días)	9	48	28	28
	Soya (110dias)	4	45	19	30
	Maíz (130dias)	2	54	21	28
	Pasto (150 días)	23	53	36	43
2020	Arroz (120 días)	12	42	30	25
	Soya (110dias)	4	48	15	25
	Maíz (130dias)	16	48	27	30
	Pasto (150 días)	29	61	36	31

*Número de días por ciclo semestral

De acuerdo con el cálculo de la evapotranspiración real del cultivo, los requerimientos hídricos por ciclo semestral se ubican entre 265 y 400 mm, los valores más altos se

presentan en las gramíneas Pasto, Maíz y Arroz en segundo semestre (**Tabla 3-7**). El primer semestre sobresale por el exceso de agua que puede darse entre 781 y 1361 mm, esta proporción de agua genera escorrentía superficial y encharcamiento en suelos con baja capacidad de infiltración como la Orinoquia colombiana (Amézquita et al., 2013). Los excesos de agua en el suelo pueden generar problemas en los cultivos. El cultivo de soya se afecta ante la saturación de agua en el suelo durante varios días consecutivos. Esto se debe a que bajo condiciones de alta humedad las bacterias fijadoras de nitrógeno, que se encuentran en las raíces, pierden efectividad. Bajo tales condiciones se deben hacer aplicaciones adicionales de Nitrógeno.

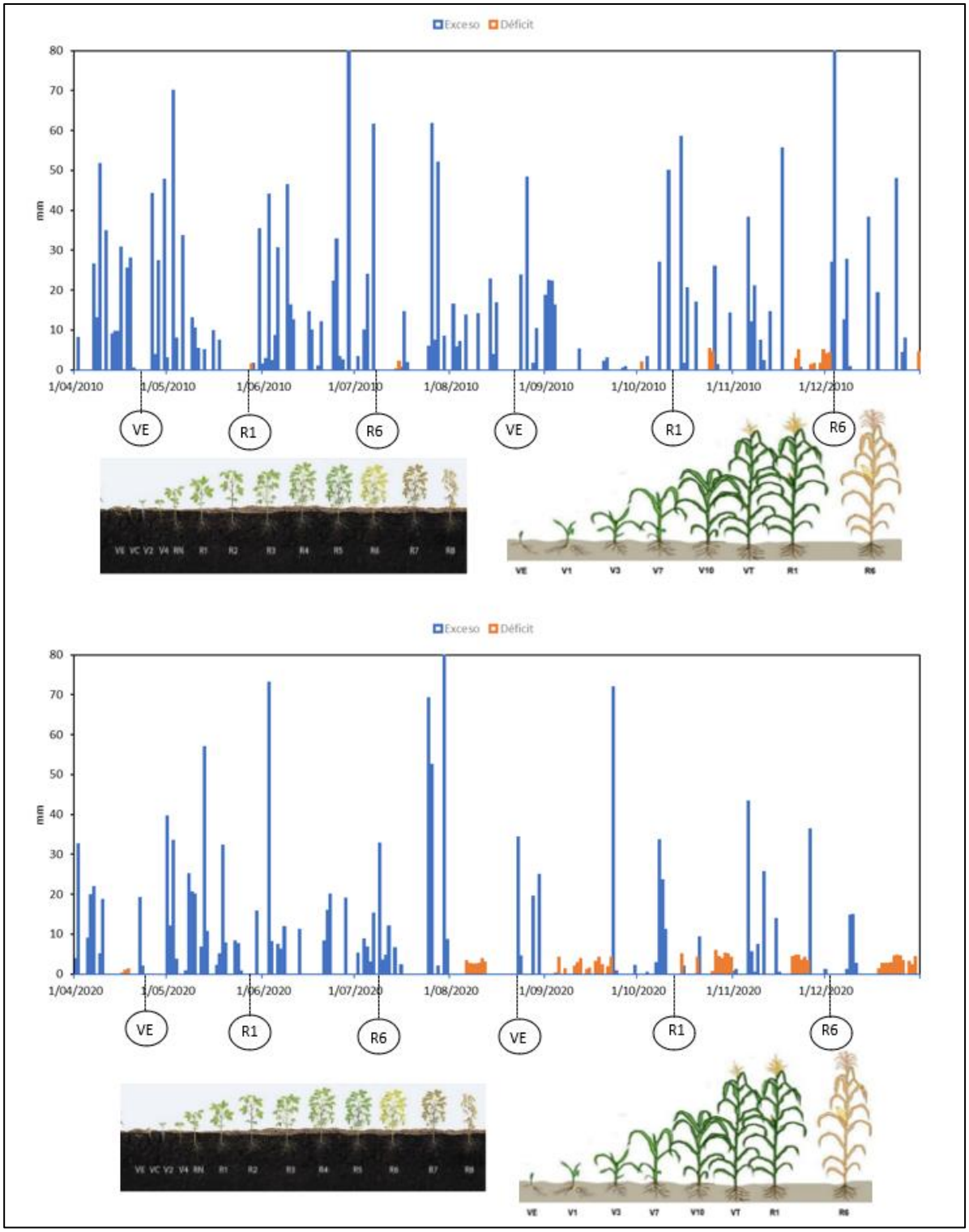
Tabla 3-7. Déficit y excesos de cultivos en ciclo productivo en milímetros

Año	Requerimiento Hídrico del Cultivo*	Semestre A		Semestre B	
		Déficit (mm)	Exceso (mm)	Déficit (mm)	Exceso (mm)
2010	Arroz (342-374 mm)	27	1037	37	726
	Soya (275-301 mm)	0	1039	17	605
	Maíz (354-381 mm)	18	1092	34	803
	Pasto (372-383 mm)	47	1361	45	976
2016	Arroz (337-408 mm)	21	899	94	439
	Soya (265-328 mm)	13	808	73	485
	Maíz (345-383 mm)	3	909	85	451
	Pasto (360-421 mm)	47	1047	116	654
2020	Arroz (340-384 mm)	21	781	97	399
	Soya (275-308 mm)	4	833	43	393
	Maíz (354-395 mm)	24	806	78	410
	Pasto (364-399 mm)	82	1076	123	448

*Requerimiento hídrico de semestre A y B

La **Figura 3-7** permite entender la dinámica diaria de la oferta hídrica con relación a los estados fenológicos de cultivos transitorios en rotación semestral, en dos años caracterizados por extremos de precipitación anual. El Año 2010 destacado por ser el año con mayor precipitación anual de la serie histórica, a nivel nacional se reportaron desastres por inundaciones, viralizando el termino de “Ola invernal”, lo anterior causado por la fase positiva del ENSO (CEPAL et al., 2012). Durante este año en el área de estudio hubo un cambio en el patrón de distribución anual de la precipitación que permitió un adecuado desarrollo de dos cultivos transitorios durante el año, con pocos días déficit hídrico.

Figura 3-7. Balance agroclimático en relación con fenología de cultivos semestrales en rotación durante los años 2010 y 2020.



El año 2020 donde se hablaba de condiciones en fase Niña del ENSO en el país, en la zona de estudio se presentaron condiciones desfavorables para los cultivos en el semestre B. series continuas de bajas precipitaciones y déficit hídrico en el suelo. En la **Figura 3-7** se identifica nueve días con déficit durante la etapa vegetativa del cultivo de Maíz, dada entre emergencia (VE) y floración (R1), así mismo se presentan dos temporadas con déficit hídrico entre floración (R1) y madurez fisiológica (R6), grave por la formación de grano que representa el rendimiento.

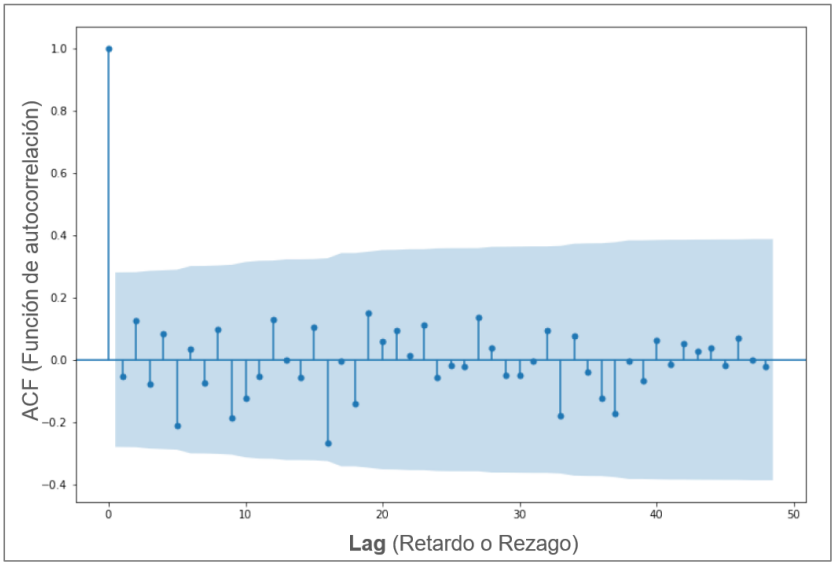
Tian et al. (2022) definen estas temporadas presentadas durante el año 2020 como sequia agrícola, refiriéndose a una baja anormal de las lluvias durante el período apto de crecimiento del cultivo. Estas condiciones han sido analizadas de forma general por el IDEAM (2012) identificándola como una problemática mayor en el sector. Los resultados en este estudio evidencia la presencia de sequias agrícolas durante la temporada lluviosa, especialmente en los meses de agosto a diciembre correspondientes al segundo semestre de cultivos en la Orinoquia (Caicedo et al., 2012). Almansa Manrique (2006a) estima un consumo de agua de 4.5 mm/dia para el cultivo de soya en la región, agotando las reservas de agua en el suelo en 4 días. En base a lo anterior se presentaría un total de 8 periodos en el año donde sería necesario la aplicación de agua de riego, ver **Figura 3-7**. Almansa Manrique (2006a) recomienda el uso de sistemas de riego para mantener una adecuada humedad y obtener altos rendimientos, los resultados obtenidos evidencian un total de alrededor de 20 días en condiciones de sequía y la adición de agua de riego durante 8 semanas críticas en las cuales existe un mayor riesgo de déficit hídrico.

En referencia al cultivo de pasturas se puede presentar más problemas por excesos de agua que por déficit, ya que la mayor proporción de esta cobertura se ubican en terrazas medias a bajas de la cuenca, por ende, se han establecido materiales tolerantes a encharcamiento (Perez, 1992), sin embargo, excesos de manera continúan reducen significativamente la oferta de forraje. Por el contrario, comportamientos como el presentado durante el año 2010 son muy favorables para aumentar la oferta forrajera, dado que si se amplía la temporada lluviosa las pasturas continúan su ciclo productivo de corte y recuperación (**Figura 3-7**).

3.3.4 Tendencias del acumulado de lluvias

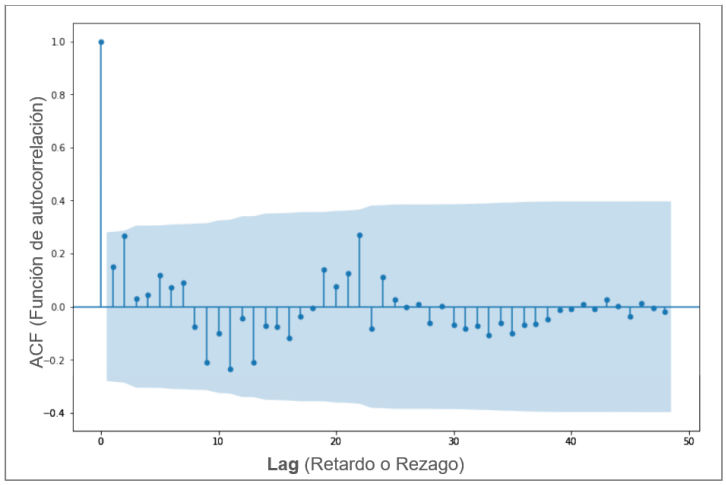
La estación La Libertad (AGROSAVIA) tiene la serie temporal más completa, lo cual permitió disponer de una mayor cantidad de información para el análisis de tendencias anuales, semanales y número de días lluviosos. En el diagrama de autocorrelación de la serie de precipitación anual (ver **Figura 3-8**), se identifica la no significancia, por lo que se define como una serie no autocorrelacionada o no estacionaria, con una franja con alternancia de valores positivos y negativos para periodos anuales o bianuales, dicha alternancia se asocia a oscilaciones con dicha frecuencia (IDEAM and UNAL, 2018)

Figura 3-8. Correlograma de precipitación anual



El correlograma de la serie “Número de días con lluvia al año” al igual que la “Precipitación anual”, tampoco identifica autocorrelación (**Figura 3-9**); observando una variación de una temporalidad de alrededor de 10 años, esta variación de acuerdo con Chen and Grasby (2009) podría estar influenciado con las oscilaciones decadales.

Figura 3-9. Correlograma de número de días con lluvia anual



La prueba de Mann Kendall no identifico significancia en la tendencia de la variable "Precipitación anual" (**Tabla 3-8**), contrario a los resultados de Felipe & Montoya (2016), que reportan un leve incremento de precipitación en la Orinoquia. En la serie "Número de días con lluvia al año" se dieron resultados muy significativos, con tendencia decreciente, ver **Tabla 3-8**

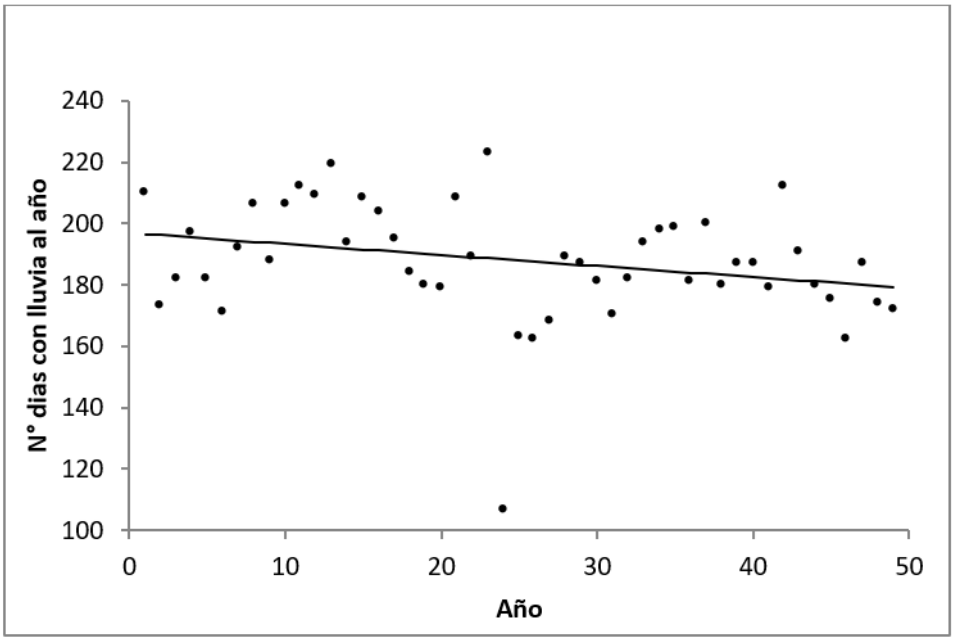
Tabla 3-8. Tendencias de precipitación anual y número de días con lluvia al año

Prueba MK	P	Z	Pendiente	Tendencia
Precipitación Anual	**0.50**	0.6637	3.03	No
Días con lluvia Anual	0.01	-2.5103	0.40	Decreciente

*Muy Significativa, NS: No significativa.

La pendiente estimada de Sen permitió identificar la magnitud de la tendencia en la serie "número de días con lluvia al año" con un valor de 0.40. La tendencia es decreciente y equivalente a una disminución de 17 días con lluvia para un periodo de 48 años (**Figura 3-10**). Lo anterior evidencia un cambio en el patrón de las precipitaciones, confirmando los estudios regionales de cambio climático realizados por el CIAT (2017) y el IPCC (2020) donde evidencian el efecto del cambio climático en el régimen hidrológico debido a excesos de humedad y sequías extremas.

Figura 3-10. Pendiente de Sen de la serie “Número de días con lluvia al año”



Los valores de precipitación anual se mantienen, y el número de días con lluvia al año presenta una tendiente decreciente (**Tabla 3-8**) para el periodo 1972-2020, este comportamiento se asocia con una concentración de la precipitación y aumento en la intensidad de los eventos. Considerando la precipitación de la estación La Libertad donde fluctúa valores entre 2.500 (Q1) y 3.100 mm (Q3) al año (ver **Tabla 3-4**), la intensidad promedio de los eventos de precipitación pasa de 14.8 a 16.2 mm/día en un periodo de 48 años. Para Y. Wang et al. (2018), el cambio en la distribución de las precipitaciones genera mayor escorrentía, menor retención de humedad en el suelo, erosión, y estrés hídrico en cultivos. En el comportamiento anual del número de días con lluvia (ver **Figura 3-10**), se identifica que valores extremos tienden a repetirse con una frecuencia de 20 años, los valores mínimos con una frecuencia de alrededor de los años 6, 26 y 46, y los valores máximos alrededor de los años 13 y 35.

Al igual que la precipitación anual, la precipitación semanal no presento autocorrelación (ver **Tabla 3-9**), la prueba Mann Kendall muestra tendencias significativas en 5 de las 52 semanas del año

Tabla 3-9. Precipitación semanal (MK Tradicional).

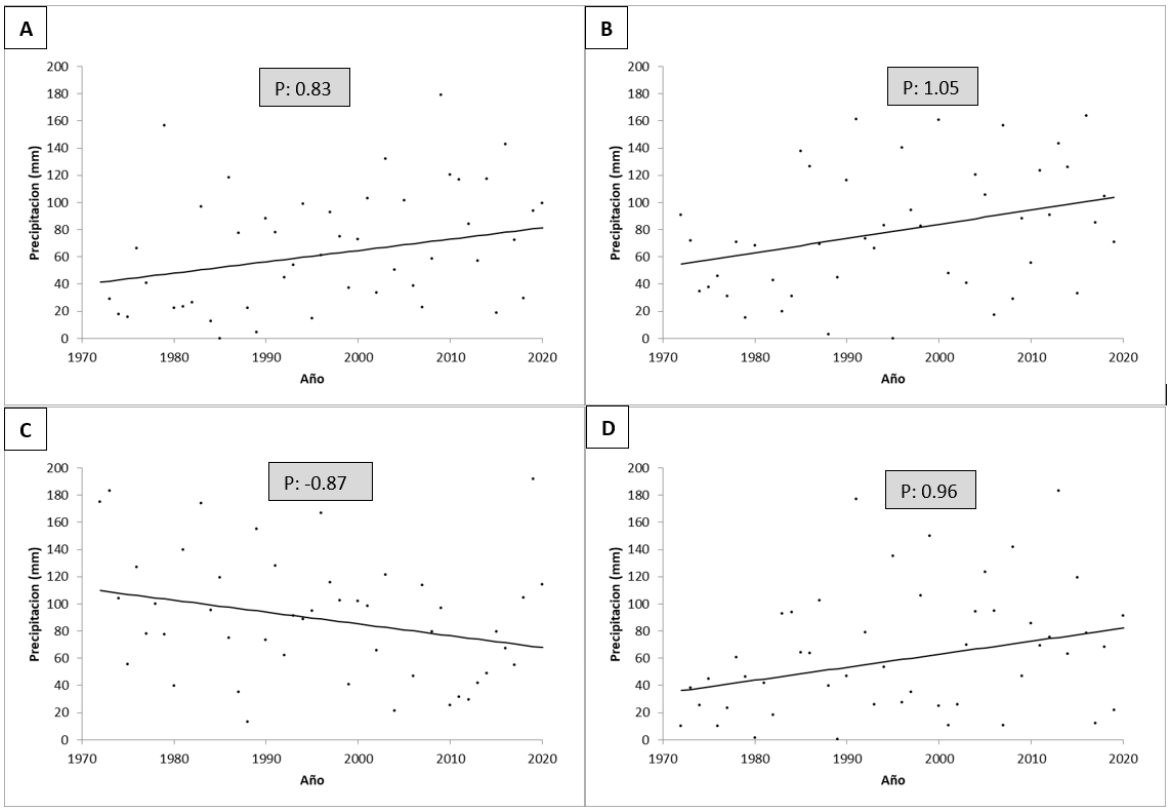
Semana	Autocorrelación	Tendencia	Valor P	Valor Z
3	NO	Creciente	0.07**	1.80
15	NO	Creciente	0.10**	1.66
19	NO	Creciente	0.05*	1.92
20	NO	Decreciente	0.09**	-1.70
45	NO	Creciente	0.02*	2.32
Demás semanas		NO	**NS** (>0.1)	

*Muy Significativa, ** Significativa, NS: No significativa.

Se identifican tres épocas del año donde las semanas presentan tendencias significativas (ver **Tabla 3-9**) La primera es en la temporada seca, en la semana 3 del mes de enero, la segunda es en el inicio de la temporada lluviosa en las semanas 15, 19 y 20, para el mes de abril, y finalmente la tercera época finalizando la temporada lluviosa en la semana 45, hacia el mes de noviembre (ver **Figura 3-11**); para un periodo de 48 años de observaciones. Cuatro de las semanas indican una tendencia creciente, solo la semana 20 indica tendencia decreciente, posiblemente como una forma de equilibrio a escala semanal, si comparamos con la no significancia de la escala anual (**Tabla 3-8**) Lo encontrado coincide con los pronósticos del plan regional integral de cambio climático para la Orinoquía (CIAT and CORMACARENA, 2017), quienes reportan aumentos de precipitación en la temporada seca (diciembre-enero) y aumentos ligeros para los meses más lluviosos (mayo - agosto).

Las implicaciones que estas tendencias podrían generar efectos variables, dependiendo de la época que se analice; La tendencia creciente de la semana 3 tiene efectos positivos en los sistemas pecuarios asociados a un aprovechamiento del agua en la temporada seca que le permite incrementar la oferta forrajera. El incremento en la época lluviosa podría impactar negativamente los cultivos transitorios y pasturas, debido a la mayor frecuencia de suelos saturados lo cual afecta el desarrollo radicular y productivo de las plantas, además de generar mayores volúmenes de escorrentía y erosión de suelos.

Figura 3-11. Estimación de Sen de precipitación semanal. A: semana 15, B: semana 19, C: Semana 20 y D: Semana 45. (P: Valor de la pendiente de Sen, los puntos son los datos).



La tendencia del número de días con lluvia a escala semanal presenta significancia en nueve de las cincuenta y dos semanas, solo cinco semanas presentan autocorrelación (ver **Tabla 3-10**),

Tabla 3-10. Tendencias de Número de días con lluvia semanal.

Semana	Autocorrelación	Tendencia	Valor P	Valor Z	Pendiente
3	NO	Creciente	0.08**	1.72	0.00
27	NO	Decreciente	0.03*	-2.11	0.00
33	NO	Decreciente	0.02*	-2.36	-0.02
35	SI	Decreciente	0.00*	-3.92	-0.04
38	NO	Decreciente	0.01*	-2.65	-0.04
40	SI	Decreciente	0.03*	-2.18	-0.02
41	SI	Creciente	0.08**	1.75	0.00
47	SI	Decreciente	0.07**	-1.81	0.00
49	SI	Decreciente	0.01*	-2.54	-0.04
Demás semanas		NO	**NS** (>0.1)		

La mayoría de las semanas (en su mayoría ente julio y diciembre) presentan tendencia decreciente (ver **Tabla 3-10**), la tendencia decreciente observada en la serie anual de número de días con lluvia se debe a la disminución del número de días con lluvia (17 dias) en las semanas del segundo semestre del año. De acuerdo con este comportamiento los cultivos podrían continuar presentando problemas de oferta hídrica disponible en el segundo semestre del año.

La prueba MK modificada con preblanqueo confirma la significancia de tendencias en las semanas 35, 41, 47 y 49, identificando no significancia para la semana 40 (ver **Tabla 3-11**).

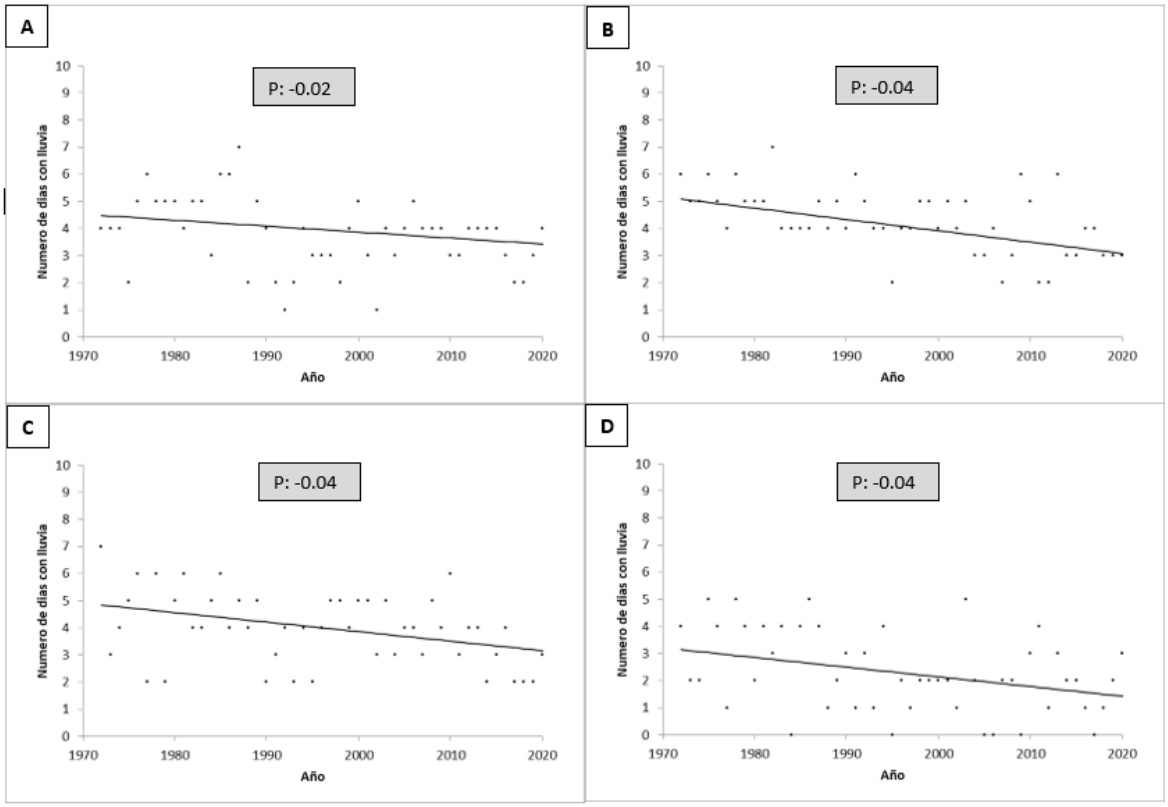
Tabla 3-11. Prueba de MK modificado con preblanqueo.

Semana	Tendencia	Valor_P	Valor_Z	Pendiente
35	Decreciente	0.00*	-2.875	-0.04
40	NO	**0.15**	-1.44	-0.02
41	Creciente	0.06**	1.854	0.05
47	Decreciente	0.02*	-2.270	0.00
49	Decreciente	0.07**	-1.826	-0.04

*Significancia de 0.05, ** Significancia del 0.1, NS: No significativa

Las tendencias decrecientes de días con lluvia de las semanas 33, 35, 38 y 49 (segundo semestre del año), impactan negativamente los cultivos transitorios (ver **Figura 3-12**). Al disminuir el número de días con lluvia disminuye la retención de agua en el suelo, y la disponibilidad de agua para las plantas, generando estrés hídrico y bajos rendimientos en grano. Para CIAT y CORMACARENA (2017) esta situación es una de las razones para la disminución del área sembrada en segundo semestre del año en la región de la Orinoquia. Ante un cambio en el patrón de las precipitaciones es probable que veamos cambios en el rango de humedad del suelo, con consecuencias para los procesos mediados por el suelo, como la respiración del suelo, la productividad primaria neta y el ciclo biogeoquímico (Robinson et al., 2016).

Figura 3-12. Estimación de Sen de número de días con lluvia semanal. A: semana 33, B: semana 35, C: Semana 38 y D: Semana 49. (P: Valor de la pendiente de Sen, los puntos son los datos)



3.4 Conclusiones

El análisis de precipitación a escala de cuenca permite evidenciar la variabilidad espacial que puede presentarse en la lluvia, destacando la longitud como un factor importante en la medición de la variabilidad de la precipitación, más importante que el factor latitudinal. Este tipo de análisis permite generar información para la planificación agrícola, permitiendo visualizar la oferta real de agua de acuerdo con la posición geográfica de la cuenca. Además, es un criterio a tener en cuenta para la implementación de una red de estaciones meteorológica para el estudio del clima en la región de la Orinoquia.

Las fases del ENSO no siempre tienen una incidencia sobre la precipitación en la zona de estudio, solo en ocasiones donde el fenómeno se expresa de manera fuerte como en los años 2010 y 2015 donde se percibió una repuesta en precipitación. Por lo tanto, aun no se

define los predictores o drivers que modulan el clima en la Orinoquia colombiana, que pueda ser aplicado como herramienta a la planificación agrícola.

Se identificaron periodos de sequía agrícola especialmente en el segundo semestre del año, que podrían coincidir con estados fenológicos de mayor demanda hídrica de cultivos semestrales, lo cual sería el factor determinante de la variabilidad de rendimiento en la zona a de estudio. De acuerdo con el balance agroclimático se requiere agua adicional al aportado por las precipitaciones para satisfacer las necesidades hídricas de cultivos en el área de estudio.

Los periodos de transición de temporadas pueden darse en el rango de hasta 4 semanas, generando incertidumbre en la toma de decisiones asociadas a las labores agrícolas, pérdidas económicas asociadas a la baja germinación, vaneamiento y/o afectaciones en periodos de cosecha.

El análisis de tendencias evidencio un cambio en el patrón de distribución de las precipitaciones basados en la disminución del número de días lluviosos especialmente en el segundo semestre del año. Generando aumento en la intensidad de las precipitaciones y frecuencia de eventos extremos que modifican la oferte hídrica disponible a los cultivos.

4. Estimación de la oferta hídrica mediante modelamiento hidrológico en la cuenca del caño Quenane

4.1 Introducción

Herramientas de modelamiento hidrológico toman fuerza ante la ausencia de datos y la necesidad de información en cuencas no instrumentadas. El proceso hidrológico se representa matemáticamente en base a principios científicos conocidos de flujos de agua y energía (Refsgaard and Knudsen, 1996), e intentan determinar las cifras del balance hídrico en diversos entornos físicos dentro de cuencas hidrográficas (Yang et al., 2020), aunque se concentran en la respuesta de escorrentía ante eventos de precipitación (Beven, 2012). Algunos modelos responden de manera diferente y definen mejor unas salidas , por lo que se requiere acotar al modelo que permita representar el objeto de estudio (Cornelissen et al., 2013).

El modelo hidrológico HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) es un modelo que además de estimar la escorrentía total en el punto de desagüe de la cuenca, incluye simulación de humedad del suelo, evapotranspiración y agua subterránea, lo que le permite ser usado con múltiples objetivos (Bergstrom et al., 1997). Se ha aplicado en cuencas de diferentes lugares del mundo con resultados satisfactorios. Una de las versiones más empleadas en investigación es la llamada HBV light (Seibert and Vis, 2012)

Aunque los modelos hidrológicos permiten generar información aproximada a la realidad, requieren un previo trabajo de calibración con datos producto del monitoreo del recurso hídrico en la cuenca, que permita disminuir la incertidumbre de los resultados y un uso practico a tomadores de decisión local. Estudios emiten simulaciones sin datos reales basados en la precipitación, sin tener en cuenta la dinámica con el suelo y las coberturas

presentes en la cuenca, debido a esto la instrumentación de cuencas pilotos en regiones con baja información hidrológica se convierte en una guía de trabajo a seguir

A pesar de los avances recientes en el desarrollo de modelos hidrológicos., el nivel actual de conocimiento de los procesos físicos del sistema hidrológico y los avances computacionales de los últimos años limita su uso y acondiciona que los resultados de los modelos hidrológicos estén sujetos a incertidumbres derivadas de diferentes fuentes de errores

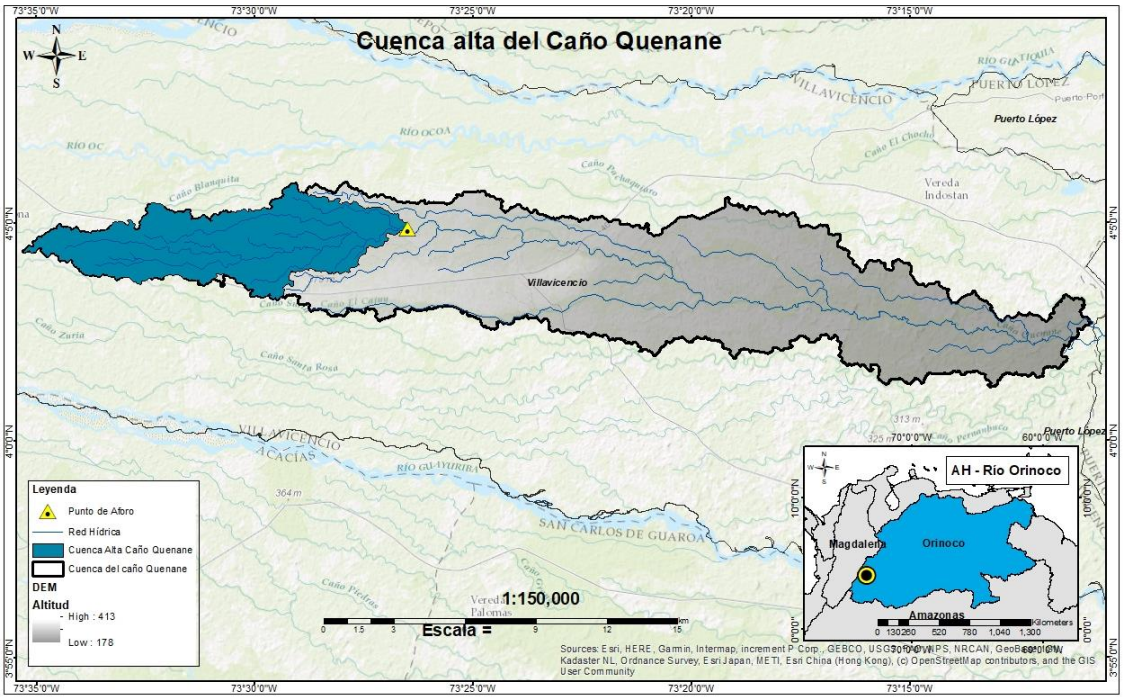
En el presente trabajo se pretende calibrar el modelo hidrológico HBV-light de manera agregada, con la información generada en la instrumentación de la cuenca del caño Quenane a escala horaria para estimar las salidas de caudal y humedad de suelo, contrastadas posteriormente con los datos observados en campo durante un año. Esto permitirá un acercamiento al modelamiento de cuencas tropicales en condiciones de la Orinoquia colombiana.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Área de estudio

El Caño Quenane se encuentra localizado en el municipio de Villavicencio; recibe aportes de una serie de caños que viajan en diferentes direcciones, donde predominan las corrientes de agua que drenan de occidente a oriente; en la cuenca se encuentran cuerpos lenticos identificadas con 93 lagunas y 45 pantanos (CORMACARENA, 2018). La longitud total de Caño Quenane es de aproximadamente 55 Km y área total de la cuenca de Caño Quenane es de aproximadamente 180 Km^2. El punto de monitoreo de caudal se instaló en la parte alta de la cuenca, en rango de alturas de 330 a 413 msnm, abarca un área de 37 km^2 (**Figura 4-1**)

Figura 4-1. Mapa de la cuenca alta del caño Quenane



Fuente: Propia

4.2.2 Hidrografía

La cuenca Caño Quenane se identifica con el código 3510-03 indicando que hace parte del área hidrográfica Rio Orinoco (3), Zona hidrográfica Rio Meta (5), Subzona hidrográfica Rio Negro (10) y corresponde al nivel de Subcuenca o microcuenca (03) (CORMACARENA, 2018; IDEAM, 2013). Su morfometría es de una cuenca plana, alargada y madura de orden 4 (Horton), con un patrón de drenaje paralelo, un patrón de alineamiento rectilíneo de baja sinuosidad (Ks<2), ligeramente inclinada y con baja pendiente de cauce (<1%). Según el índice de compacidad es una cuenca rectangular muy lobulada indicando la baja probabilidad de que se presenten crecientes fuertes, y el índice de alargamiento la define como muy alargada; el tiempo de concentración de acuerdo con la ecuación de estimación se encuentra entre 8 y 13 horas (ver **Tabla 4-1**)

Tabla 4-1. Características morfométricas de cuenca Caño Quenane

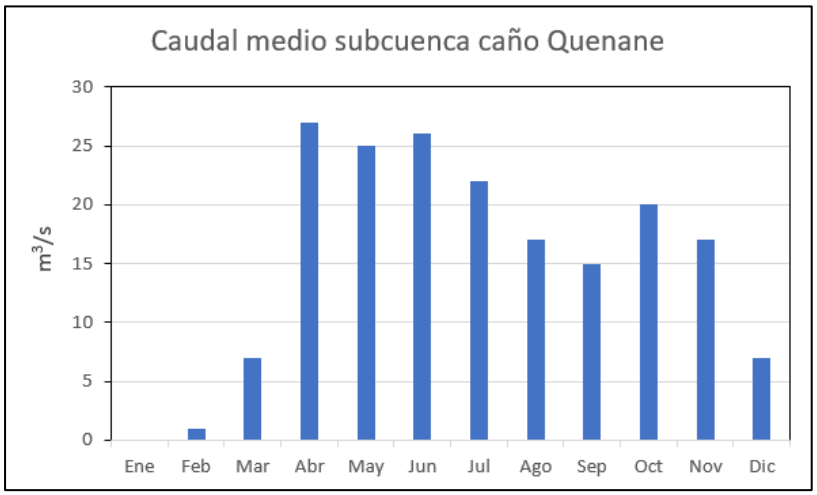
Caracteristica	Valor
Area (km^2)	185
Longitud (km)	54
Ancho medio (km)	3.4
Longitud axial (km)	43
Coeficiente de Sinuosidad (Ks)	1.27
Orden	4
Altura media (msnm)	289
Pendiente media (%)	4.61
Pendiente del cauce principal (%)	0.33
Factor de forma	0.06
Coeficiente de compacidad	1.9
Indice de alargamiento	16.06
Tiempo de concentracion (horas)	11.08
coeficiente de torrencialidad	0.98

Fuente: POMCA Rio Negro (CORMACARENA, 2018)

De acuerdo con el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica - POMCA Rio Negro, la entidad ambiental CORMACARENA, ha concedido dos licencias de extracción de agua al caudal del caño, una desde el 2013 de 170 L/s para riego del cultivo de arroz, y otra desde el 2015 para uso industrial con un caudal de 6 L/s (CORMACARENA, 2018). En la **Figura 4-2**. se muestra el comportamiento del caudal medio mensual estimado mediante un modelo lluvia - escorrentía a partir de precipitación diaria de las estaciones

climáticas La Libertad y Pompeya, ilustrando los caudales mínimos en la época seca y máximos para el primer semestre del año que alcanza valores de 46.1 m^3/s, con un valor medio anual de 18.44 m^3/s (CORMACARENA, 2018).

Figura 4-2. Caudales mensuales estimados del caño Quenane

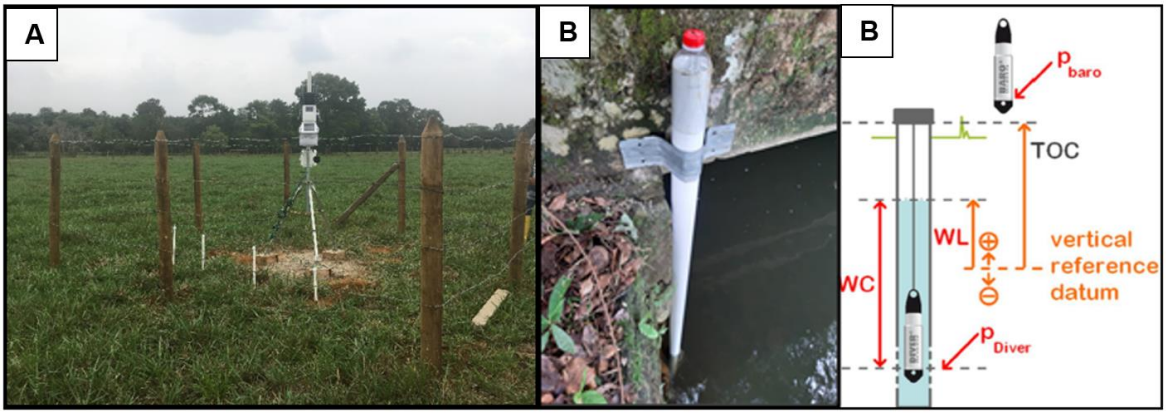


Fuente: POMCA Rio Negro (CORMACARENA, 2018)

4.2.3 Instrumentación hidrológica

La medición de caudales en la cuenca se llevó a cabo mediante sondas de presión VanEssen Instruments ®, utilizando dos tipos de sonda una sonda Baro – Diver, la cual mide la presión atmosférica y la sonda TD Diver, mide la presión atmosférica más la presión que la columna de agua ejerce sobre la sonda (ver **Figura 4-3**). La información se registró y almaceno con intervalo de una hora en la memoria interna de la sonda, descargándose semanalmente de forma manual mediante el software Diver- Office (VanEssen Instruments ®). La información climática se registró en dos estaciones automáticas Davis Instruments ®, ubicadas en en la parte alta de la cuenca (ver **Figura 4-3**). Estas estaciones registran precipitación (mm), temperatura (°C), humedad relativa (%), Velocidad y dirección del viento (m/s), radiación (W/m^2) y estiman evapotranspiración (mm) mediante el método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998). La información se registró y almaceno a intervalos de una hora, mediante datalogger Vantage Pro2 METER Group ®, descargándose semanalmente mediante el software WeatherLink 6.0

Figura 4-3. Instrumentación climática (A) y sensores para la medición de caudales (B).



Fuente: A. Propia y B. Tomada de manual VanEssen Instruments

Mediante la **Ecuación 2** se calcula la columna de agua a partir de las presiones registradas en la instrumentación del punto de monitoreo.

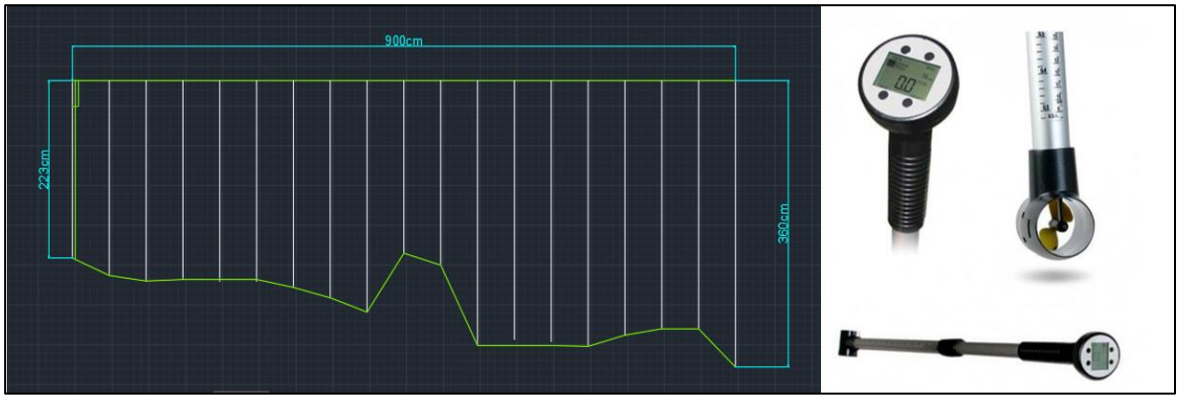
$$WC = 9806.65 \frac{pDiver - pBaro}{\rho \cdot g}$$ **Ecuación 2**

Donde:

WC: Columna de agua
p: es la presión en cmH2O,
ρ: Densidad del agua (1000 kg/m3).
g: Aceleración debida a la gravedad (9,80665 m/s2)

La determinación de los caudales se realizó a partir de 27 Aforos incluyendo la Batimetría y mediciones de velocidad del agua con el correntómetro FP111 (Global Water ®) (ver **Figura 4-4**), siguiendo la metodología desarrolladas por la OMM (2011), en la cual se desarrolla una ecuación de calibración que permite a partir de la columna de agua medida por los sensores de presión convertir dichos valores a caudal.

Figura 4-4. Batimetría en punto de monitoreo y correntómetro



Fuente: A. Propia y B. Tomada de manual Global Water Instruments

El caudal ambiental se identificó mediante el cuantil 0.25 (Q_1) que representa el 25% de la distribución de caudales durante el periodo Abril-Diciembre, (IDEAM, 2018)

4.2.4 Modelo hidrológico HBV

El modelo hidrológico HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) es un modelo semidistribuido o agregado, conceptual y continuo. De tipo precipitación escorrentía, empleado para atender crecientes hidrológicos y en estudios de balance hídrico. Fue originariamente desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) en 1970 (Bergstrom et al., 1997). El modelo consta de 15 parámetros distribuidos en cuatro módulos o rutinas principales (ver

	PARÁMETRO		Und.	Valor Mínimo	Valor Máximo
RUTINA DE PRECIPITACION					
1	**TT**	Umbral de Temperatura	°C		
2	**CFMAX**	Factor grado-Δt	mm/Δt °C		
3	**SP**	Variabilidad estacional en el factor grado-Δt	-		
4	**SFCF**	Factor de corrección de nevadas	-		
5	**CFR**	Coeficiente de recongelación	-		
6	**CWH**	Capacidad de retención de agua	-		
RUTINA DE HUMEDAD DE SUELO					
7	**FC**	Máximo almacenamiento de agua en el suelo	mm	25	600
8	**LP**	Valor de humedad del suelo por encima del cual ETa alcanza el ETP	-	0.3	1
9	**BETA**	Determina la contribución relativa a la escorrentía.	-	0.1	10
RUTINA DE AGUA SUBTERRÁNEA					
10	**PERC**	Percolación máxima a la zona inferior del suelo	mm/Δt	0.01	500
11	**UZL**	Parámetro de umbral	mm	0	1000
12	**K0**	Coeficiente de almacenamiento o recesión	Δt^{-1}	0	1
13	**K1**	Coeficiente de almacenamiento o recesión	Δt^{-1}	0	1
14	**K2**	Coeficiente de almacenamiento o recesión	Δt^{-1}	0	1
RUTINA DE ESCORRENTIA					
15	**MAXBAS**	Longitud de la función de ponderación triangular	días	1	10

Tabla 4-2: un módulo de precipitación, un módulo de humedad del suelo, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escorrentía. El modelo puede ejecutarse a escala temporal horaria, diaria o mensual. Los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación, caudal, temperatura y evapotranspiración. La salida principal del modelo es la escorrentía total en el punto de desagüe de la cuenca, además incluye simulación de humedad del suelo, evapotranspiración y agua subterránea.

Tabla 4-2. Parámetros del modelo hidrológico HBV

	PARÁMETRO		Und.	Valor Mínimo	Valor Máximo
RUTINA DE PRECIPITACION					
1	**TT**	Umbral de Temperatura	°C		
2	**CFMAX**	Factor grado-Δt	mm/Δt °C		
3	**SP**	Variabilidad estacional en el factor grado-Δt	-		
4	**SFCF**	Factor de corrección de nevadas	-		
5	**CFR**	Coeficiente de recongelación	-		
6	**CWH**	Capacidad de retención de agua	-		
RUTINA DE HUMEDAD DE SUELO					
7	**FC**	Máximo almacenamiento de agua en el suelo	mm	25	600
8	**LP**	Valor de humedad del suelo por encima del cual ETa alcanza el ETP	-	0.3	1
9	**BETA**	Determina la contribución relativa a la escorrentía.	-	0.1	10
RUTINA DE AGUA SUBTERRÁNEA					
10	**PERC**	Percolación máxima a la zona inferior del suelo	mm/Δt	0.01	500
11	**UZL**	Parámetro de umbral	mm	0	1000
12	**K0**	Coeficiente de almacenamiento o recesión	Δt^{-1}	0	1
13	**K1**	Coeficiente de almacenamiento o recesión	Δt^{-1}	0	1
14	**K2**	Coeficiente de almacenamiento o recesión	Δt^{-1}	0	1
RUTINA DE ESCORRENTIA					
15	**MAXBAS**	Longitud de la función de ponderación triangular	días	1	10

El modelo hidrológico HBV se seleccionó debido a que nos permite simular el caudal y humedad de suelo a escala horaria y de manera conjunta (Bergstrom et al., 1997). Las simulaciones se realizaron con el software HBV light GUI versión 4.0.0.23 del departamento de geografía de la universidad de Zúrich en Suiza, software académico libre (Seibert and Vis, 2012)

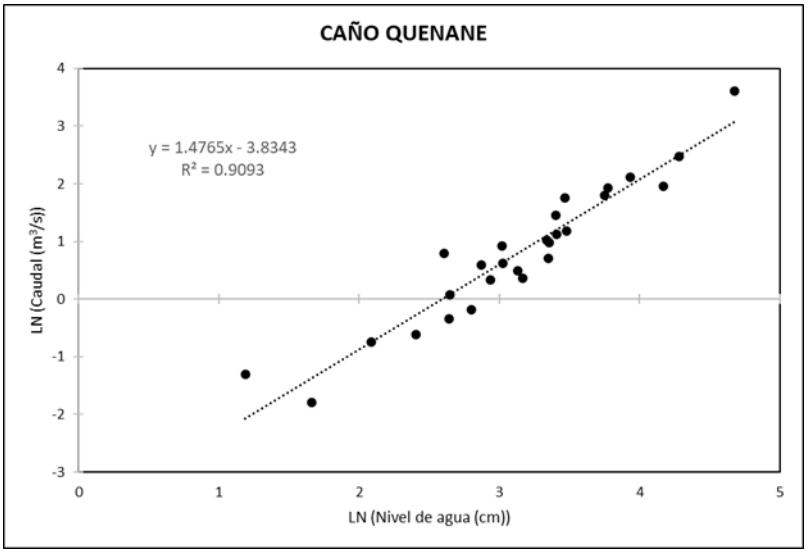
Los datos de entrada se basan en la información generada de la instrumentación en la cuenca (ver **Figura 4-3**). Un archivo de texto (TXT) con la información de fecha y hora, precipitación, temperatura y caudal a escala horaria, este archivo se identifica como “PTQ”; adicionalmente se requiere un archivo de texto con la información de evapotranspiración identificado como “E”, este último no requiere la fecha, puesto que se relaciona con el archivo PTQ. Las salidas del modelo las grafica en la interfaz gráfica, además de almacenar archivos en “cvc”. El periodo de calibración fue considerando un año de monitoreo, entre octubre de 2019 y octubre de 2020, se emplearon 4 meses para calentamiento del modelo, tomado de junio a septiembre de 2020.

4.3 Resultados

4.3.1 Estimación de caudal como oferta hídrica potencial a cultivos

Los aforos durante el periodo de caudal en el punto de monitoreo permitieron establecer la ecuación de calibración para convertir de niveles de agua a caudales como se muestra en la **Figura 4-5**: Calibración caudales en Caño Quenane. Los valores negativos representan el agua estancada en las zonas cóncavas del cauce o en algunos casos un caudal mínimo imperceptibles en la instrumentación. La mayor cantidad de puntos se concentran en la zona media del gráfico ya que los valores extremos se dificultan su medición.

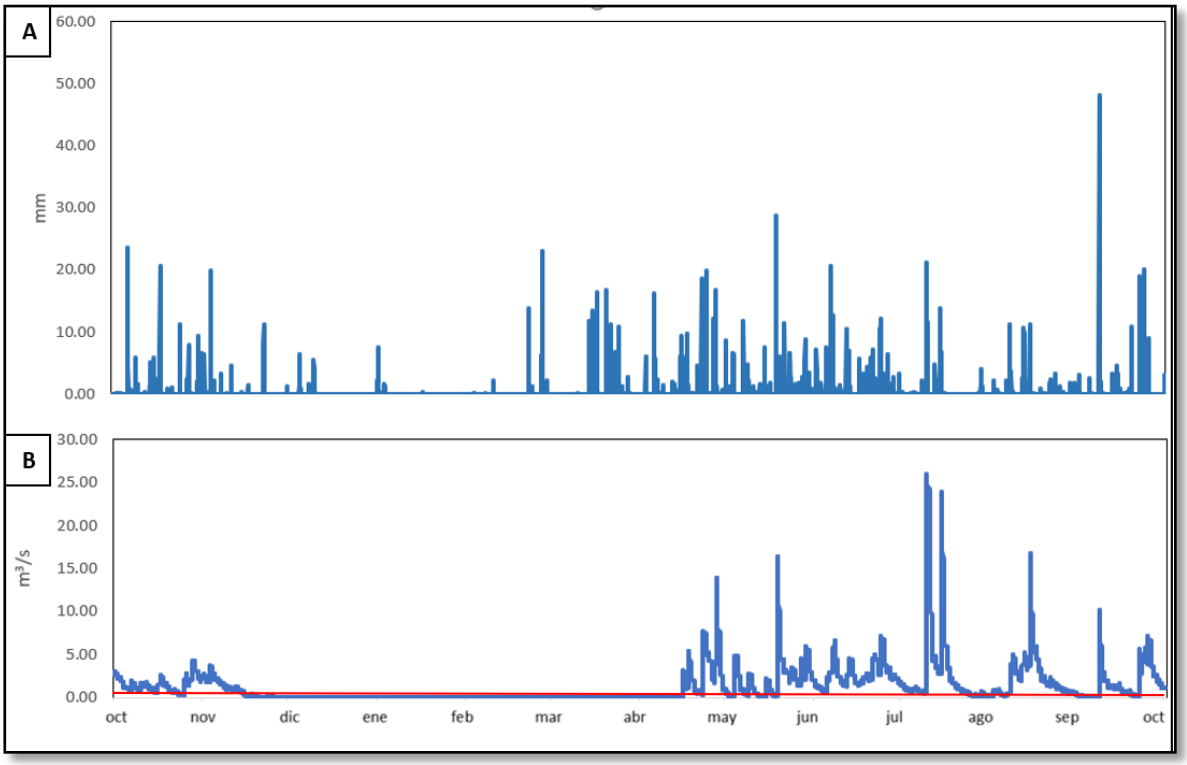
Figura 4-5. Calibraciones caudales en Caño Quenane



La **Figura 4-6** muestra el comportamiento del caudal en la parte alta del caño Quenane, lo cual es notable el descenso de caudales a inicios de diciembre y durante aproximadamente cinco meses no genera caudal en este punto de monitoreo, el agua queda acumulada en

las zonas cóncavas del cauce hasta secarse y posteriormente el comienzo de la temporada lluviosa se toma casi un mes para comenzar a generar caudal, asumimos que es el tiempo que tarda en saturar el perfil del suelo y llena de nuevo esas áreas de acumulación en las líneas de drenaje. Posteriormente durante aproximadamente siete meses permanece con caudal, el cual varía entre 0.01 y 26 m^3/s, un valor promedio en el periodo de mayo a diciembre, de 2.27 m^3/s

Figura 4-6. Precipitación y caudal en la cuenca del caño Quenane



Fuente: Propia

Durante el periodo de registro de caudal (abril a diciembre) se registra un caudal constante el cual fluctúa entre 0.01 y 26 m^3/s, con un valor promedio de 2.27 m^3/s, este comportamiento coincide con precipitaciones de hasta 50 mm/h, un 60% de episodios de lluvia con un volumen medio de 34 mm, y una intensidad promedio de 12 mm/h. Los valores de caudal máximos 23 y 24 m^3/s se presentaron entre los meses de Julio y agosto, estos valores coinciden con los volúmenes continuos de precipitación. No existe una correlación directa entre los valores máximos de precipitación y los valores máximos de caudal, para este periodo (**Figura 4-6**) la respuesta del caudal a los fenómenos de precipitación se da

en respuesta a eventos continuos como se ha observado en cuencas instrumentadas (Dunkerley, 2010),

Desde las semanas 3 y 4 de diciembre hasta la semana 4 del mes de abril (cinco meses) no se genera caudal en el punto de monitoreo, debido a que el agua precipitada se retiene en el suelo o queda acumulada en las zonas cóncavas del cauce hasta secarse, durante esta temporada la precipitación es de 332 mm (30 % del total anual), durante este periodo se impacta en los contenidos de agua en el suelo, como se vio en el capítulo 2 de este trabajo (ver **Figura 2-10,11 y 12**) El comienzo de la temporada lluviosa entre los meses de marzo y abril pese a registrarse nueve episodios de lluvia superiores a 10 mm para un total de 290 mm, solo se comienza a observar una respuesta en los caudales pasados 30 días de frecuentes eventos de precipitación durante el mes de abril, representando el tiempo de recarga de agua en el suelo hasta el punto de saturación, el cual comienza a generar excedentes de agua convertidos en escorrentía superficial y caudales en las líneas de drenaje. De acuerdo con la caracterización de suelos del área de estudio (ver **Tabla 2-4**) la baja infiltración del suelo favorece la generación de escorrentía (Guzman et al., 2019), puesto en evidencia cuando se presentan altos y continuos volúmenes de agua precipitadas, lo que explica los picos de caudal durante la temporada lluviosa del año, dada por la intensidad y frecuencia de las precipitaciones (Dunkerley, 2015; Liu et al., 2022). Condición que podría generar problemas de erosión del suelo, degradación y baja productividad (Panagos et al., 2018)

El Caudal ambiental para el sitio de monitoreo es de 0.7 m^3/s (Q 25 en la época de caudal), para un periodo de 257 dias, donde se genera un excedente de 1.052.569 m^3/año de agua para su aprovechamiento, esta cantidad de agua es visible en los picos de caudal, por lo que sugiere enfocarse en estudios de aprovechamiento de excedentes de agua con fines agrícolas.

4.3.2 Estimación de la oferta hídrica con el modelo HBV-light

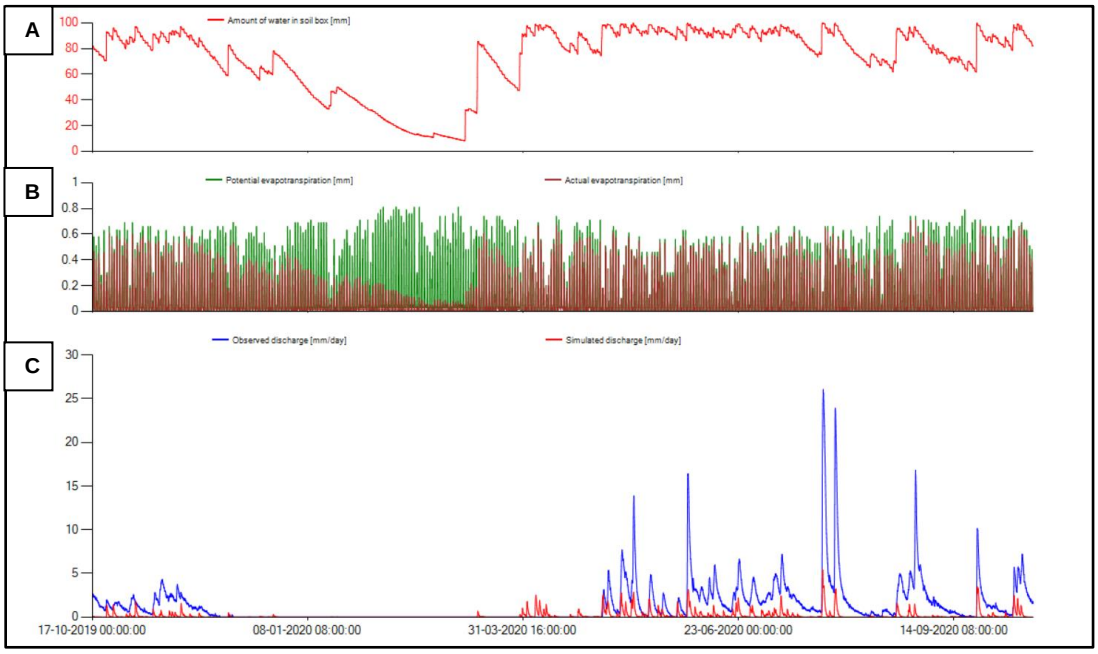
El modelo HBV-light permitió la calibración de parámetros con la información de entrada tomada en cuenca del caño Quenane, La **Tabla 4-3** muestra los valores de la mejor combinación de parámetros, luego de 5000 corridas mediante algoritmo genético.

Tabla 4-3. Parámetros calibrados en la cuenca del caño Quenane

	Parámetro	Unidad	Valor
1	**TT**	°C	-1.62
2	**CFMAX**	mm/Δt °C	3.649
3	**SP**	-	1
4	**SFCF**	-	0.76
5	**CFR**	-	0.05
6	**CWH**	-	0.1
7	**FC**	mm	100
8	**LP**	-	0.999
9	**BETA**	-	4.999
10	**PERC**	mm/Δt	3.999
11	**UZL**	mm	38.681
12	**K0**	Δt^{-1}	0.143
13	**K1**	Δt^{-1}	0.010
14	**K2**	Δt^{-1}	0.097
15	**MAXBAS**	días	2.499

Los resultados no son satisfactorios para estimar caudal, puesto que subestima los datos medidos en la temporada lluviosa y sobreestima en la temporada seca (ver **Figura 4-7**). En relación con los caudales medidos, el modelo tiende a simular los valores inferiores, lo que podría indicar que podría llegar a ser útiles en representar caudales mínimos de la cuenca. Los picos de caudal son coherentes con los caudales medidos, sin llegar a mejorar la precisión, esta respuesta podría asociarse a que la precipitación medida no necesariamente representa el área de la cuenca, ya que se mide a escala de punto y el caudal refleja el área total escurrida en la cuenca, con la inherente variabilidad de precipitación; por lo que sería útil aplicar el modelo de tipo semidistribuido con el fin de mejorar la respuesta.

Figura 4-7. Simulaciones de **A**. Agua en el suelo, **B**. Evapotranspiración y **C**. caudales simulados



Fuente: HBV-light

Los contenidos de agua en el suelo presentan cierta similitud de comportamiento a los medidos en los puntos de monitoreo (ver **Figura 2-10, 11 y 12**), con mayor acercamiento a la dinámica presentada en el horizonte Ap, lo que indica una alternativa de aplicación en el monitoreo de la oferta hídrica disponible para las plantas. La evapotranspiración potencial indica el alcance en producción primaria neta de las plantas en condiciones de agua disponible (**Figura 4-7**)

El uso del modelo HBV-light significa un acercamiento al uso de modelos hidrológicos como alternativa a la generación de información en cuencas de la Orinoquia colombiana, y aunque el modelo no fue generado para cuencas tropicales, permite generar salidas en humedad de suelo que pueden llegar a ser útiles en herramientas de alertas a eventos extremos del clima.

4.4 Conclusiones

La cuenca caño Quenane es una cuenca de corriente intermitente cuyo caudal se presenta, en respuesta a la temporada de lluvias, aunque tarda aproximadamente 30 días para generar escorrentía. De la misma manera, el caudal disminuye progresivamente ante la ausencia de precipitaciones, el cual puede llegar a valores de cero en la época seca (meses enero a marzo).

La intensidad y frecuencia de las precipitaciones en la temporada lluviosa genera picos de caudal que llegan a valores de 24 m^3/s, los cuales podrían ser considerados para el aprovechamiento en la producción agrícola de la cuenca, con el objeto de abastecer las necesidades hídricas de cultivos cuando se presentan periodos con ausencia de precipitaciones. Situación demostrada en los capítulos 2 y 3.

El monitoreo continuo del caudal evidencio que durante la temporada lluviosa se presenta múltiples periodos donde el caudal alcanzo valores de caudal ambiental, el cual tiene limitaciones para su aprovechamiento e impide su aplicación en la producción agrícola de la cuenca del caño Quenane.

El modelo hidrológico HBV pudo ser aplicado y calibrado con información horaria durante un año, donde tuvo un desempeño bajo a la salida de caudal simulado, lo que podría mejorarse mediante la aplicación del modelo de manera semidistribuida.

Los contenidos de agua en el suelo presentan cierta similitud de comportamiento a los medidos en los puntos de monitoreo (ver **Figura 2 10, 11 y 12**), con mayor acercamiento a la dinámica presentada en el horizonte Ap, lo que indica una alternativa de aplicación en el monitoreo de la oferta hídrica disponible para las plantas.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El reconocimiento de suelos detallando características físicas y químicas en los horizontes del perfil, permitió entender y explicar la dinámica de agua en las principales geoformas (terrazas) y coberturas (pasturas y semestrales) de la cuenca del caño Quenane, además evidencio la necesidad de implementar prácticas que puedan aumentar la cantidad de agua aprovechable para las plantas y la fertilidad del suelo, que a su vez genere una respuesta favorable en los sistemas agrícolas de la cuenca.

Se logro cuantificar la oferta hídrica disponible para cultivos en la cuenca, mediante la medición de humedad en los horizontes del suelo durante un año, lo cual demostró que, durante la temporada lluviosa, la humedad del suelo se acerca a valores de *punto de marchitez permanente* e incluso inferiores, especialmente en los meses de agosto, septiembre, noviembre y diciembre. Razón por la cual podría estar determinando la variabilidad de rendimiento en los cultivos. Esta situación es evidente en escalas horarias, diarias y hasta semanales, e imperceptible en información a escala semestral o anual.

Se identifico que la terraza alta tiene un comportamiento de régimen de humedad de suelo de tipo Ustico, a diferencia de la terraza media que se agrupa en régimen Udico. Lo anterior resalta la influencia que ejerce la geomorfología en la dinámica de los contenidos de agua en el suelo y las limitaciones para su aprovechamiento en sistemas agrícolas.

El análisis espaciotemporal de la precipitación como único aporte de la humedad del suelo (Oferta hídrica para cultivos), señala que los cultivos podrían estar afectados por la mala distribución de las precipitaciones en la temporada lluviosa, especialmente en los periodos de transición de temporadas y subtemporadas.

La disminución de días lluviosos al año durante los últimos 48 años indica que se están dando cambios en la periodicidad y la intensidad de las precipitaciones, aumentando la probabilidad de fenómenos meteorológicos extremos y la variabilidad de rendimientos agrícolas. Información que puede llegar a tener alcance en planes de adaptación y mitigación.

Se determino que aún no se tiene un predictor (Driver) que defina el comportamiento del clima en el piedemonte llanero, considerando que los índices ENSO no se correlacionaron con los registros históricos de precipitación. Sin embargo, se identificó una fluctuación decadal en el número de días lluviosos al año que podría estar determinada por fenómenos de dicha frecuencia en el atlántico.

La medición continua de caudales permitió identificar valores que llegan a 24 m^3/s, los cuales podrían ser considerados para el aprovechamiento en la producción agrícola de la cuenca, con el objeto de abastecer las necesidades hídricas de cultivos cuando se presentan periodos con ausencia de precipitaciones. Puesto que en la condición mencionada el caudal se reduce a niveles de caudal ambiental, indicando que no es aprovechable para captación de uso agrícola.

La información generada a escala horaria de clima y caudales permitió calibrar los parámetros del modelo hidrológico HBV, mostrando resultados no satisfactorios para estimar caudal, puesto que subestima los datos medidos en la temporada lluviosa y sobreestima en la temporada seca. Si embargo Los contenidos de agua en el suelo presentan cierta similitud de comportamiento a los medidos, con mayor acercamiento a la dinámica presentada en el horizonte Ap, lo que indica una alternativa de aplicación en el monitoreo de la oferta hídrica disponible para las plantas.

El estudio genera nuevo conocimiento respecto a la oferta hídrica disponible para cultivos que permite una mejor comprensión de la dinámica hídrica en la cuenca del caño Quenane, el cual podrá ser aplicado en planificación del territorio y medidas de gestión sostenible del recurso hídrico.

5.2 Recomendaciones

Se sugiere continuar con la generación de información de cuencas pilotos y de ser posible ampliar a paisajes de planicie y altiplanicie, que permitan aportar a la planificación de la región Orinoquia, teniendo en cuenta, que el estudio evidencio la alta influencia de la geomorfología en la dinámica del agua en el suelo.

A partir de la caracterización fisicoquímica de suelos en la cuenca, se sugiere fomentar los avances de investigación desarrollados en la región (Capa arable, Mejoramiento de la capacidad productiva del suelo, Agricultura de conservación y precisión), que permita ampliar el agua aprovechable por las plantas, a partir del aumento de materia orgánica del suelo y la profundidad efectiva de raíces (Amézquita et al., 2007; Gallo et al., 2013; Pla Sentis, 2016).

Implementar estudios que logren avanzar en generar el punto de marchitez permanente en especies de importancia agrícola en la región, aportando a la adaptación en condiciones de oferta climática cambiante.

Hacer una revisión a la clasificación de regímenes humedad del suelo, en lo posible con datos medidos, o a partir de balances agroclimáticos que tenga en cuenta la retención de agua en las unidades cartográficas de suelo identificadas en los estudios generales del IGAC.

Fortalecer la red de estaciones hidrológicas regional (humedad del suelo, caudal, clima) e implementar un programa de alertas tempranas a eventos extremos del clima, que permita tomar decisiones a escala de predio. Lo anterior considerando las tendencias de cambio en el patrón de las precipitaciones y la poca influencia del fenómeno ENSO en la Orinoquia colombiana.

Continuar con estudios en la búsqueda de fenómenos que modulan el clima en la región, considerando fenómenos a escala decadal, donde se encontró una respuesta en el número de días con lluvia

Realizar estudios de gestión sostenible del recurso hídrico para la agricultura a escala de cuenca, que incluya opciones de riego y drenaje, explorando opciones de cosecha de aguas, uso de aguas subterráneas, captación de caudales, retenedores de agua en el suelo entre otras, que pueda ser aplicado a corto y mediano plazo por los agricultores del área de estudio.

Implementar seguros de cosecha ante eventos extremos del clima que impacta los rendimientos agrícolas, considerando las tendencias de disminución de días con lluvia y los periodos intermitentes de sequias agrícolas identificadas.

Considerar el balance climático histórico semanal en la planificación agrícola, para la selección de fechas de siembra, especies y variedades, época y tipo de labranza, periodo de labores, entre otras.

Implementar y generar modelos para cuencas tropicales que permita incorporar información edafoclimática, en particular la temperatura y humedad del suelo (Robinson et al., 2016), o acople de modelos hidrológicos y de crecimiento de cultivos para predecir el rendimiento de los cultivos con tecnologías de análisis espacial (Jia, 2011).

A. Anexo: Suelos de la cuenca

Perfil A. PVAa-Pastura

Unidad: PVAa (IGAC, 2004) o LBa4 (IGAC, 1973)

Unidad taxonómica USDA: Typic Hapludox.

Horizonte diagnóstico: Epipedón: ócrico; Endopedón: oxico

Localización: AGROSAVIA CI La Libertad, 04°03’ 44” N y 73°27’ 21” W

Altitud: 330 msnm.

Posición geomorfológica: Plano de terraza alta del piedemonte.

Topografía: Pendiente del 1-3%.

Material parental: sedimentos aluviales finos.

Uso actual: Ganadería doble propósito con pastos del género Urochola.

Régimen de humedad del suelo: Údico.

Régimen de temperatura del suelo: Isohipertérmico.

Profundidad efectiva: Muy profundo >150cm.

Condición de drenaje: Bien drenado, externo medio, interno lento.

Descripción de horizontes:

Ap. 0 a 26 cm de profundidad, color en húmedo pardo rojizo oscuro (5YR3/4); textura franco arcillo arenosa, estructura granular, blocosa subangular, clase gruesa, media y fina, grado moderada; consistencia en húmedo muy friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros finos y medios, de forma vesicular, continuos, imped y exped; frecuentes raíces finas y medias, vivas, distribución normal en horizontes; frecuente actividad de macroorganismos; limite difuso, plana; pH 4.88

Bo1. 27 a 51cm, Color en húmedo pardo rojizo (5YR4/4); textura franco-arcillosa; estructura granular, blocosa subangular, clase gruesa, grado moderado; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plastica; muchos poros finos y medios, de forma vesicular y tubular, continuos, imped y exped; frecuentes raíces finas, vivas, distribución normal en horizontes; poca actividad de macroorganismos; limite difuso, plana; pH 4.98

Bo2. 54 a 84cm, Color en húmedo rojo (2.5YR4/8); textura arcillosa; estructura blocosa subangular, gruesa media y fina, grado moderado; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; pocos poros finos y medios, de forma vesicular y tubular, imped y exped; frecuentes raíces finas, vivas, distribución normal en horizontes; poca actividad de macroorganismos; limite difuso, plana; pH 4.95

Bo3. 85 a 152cm, Color en húmedo rojo (2.5YR4/8); textura arcillosa; estructura blocosa subangular, gruesa media y fina, grado moderado; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; pocos poros finos y medios, de forma vesicular y tubular, imped y exped; pocas raíces finas, vivas, distribución normal en horizontes; no hay actividad de macroorganismos; limite difuso, plana; pH 5.18

R. 152 a 180x cm, Cantos Rodados.

Perfil B: PVAa-Semestrales

Unidad: PVAa (IGAC, 2004) o LBa4 (IGAC, 1973)
Unidad taxonómica USDA: Typic Hapludox.
Horizonte diagnóstico: Epipedón: ócrico; Endopedón: oxico
Localización: AGROSAVIA CI La Libertad, 04°03’ 39” N y 73°27’ 12” W
Altitud: 329 msnm.
Posición geomorfológica: Plano de terraza alta del piedemonte.
Topografía: Pendiente del 1-3%.
Material parental: sedimentos aluviales finos.

Uso actual: Rotación de cultivos transitorios, temporalmente en barbecho.

Régimen de humedad del suelo: Údico.

Régimen de temperatura del suelo: Isohipertérmico.

Profundidad efectiva: Muy profundo.

Condición de drenaje: Bien drenado, externo medio, interno lento.

10

Descripción de horizontes:

Ap. 0 a 26cm de profundidad, color en húmedo pardo rojizo oscuro (2.5YR5/8); textura franco arcillo arenosa, estructura blocosa subangular, clase gruesa y media, grado moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa

y ligeramente plástica; muchos poros finos y medios, de forma vesicular, continuos, imped y exped; frecuentes raíces finas y medias, vivas, distribución normal en horizontes; frecuente actividad de macroorganismos; limite difuso, plana; pH 4.71

Bo1. 27 a 52cm, Color en húmedo pardo rojizo (7.5YR4/3); textura arcillo arenosa; estructura blocosa subangular, clase media y gruesa, grado moderado; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plastica; muchos poros finos y medios, de forma vesicular, continuos, imped y exped; pocas raíces finas y medias, vivas, distribución normal en horizontes; poca actividad de macroorganismos; limite difuso, plana; pH 4.84

Bo2. 53 a 96cm, Color en húmedo rojo (10YR5/3-5YR4/6); textura arcillosa; estructura blocosa subangular, gruesa y media, grado moderada; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; muchos poros finos y muy finos, de forma vesicular, continuos, imped y exped; pocas raíces finas y medias, vivas, distribución normal en horizontes; no hay actividad de macroorganismos; limite gradual, plana; pH 5.01

R. 97 a 119xcm, Cantos Rodados

Perfil C. Carne-Pastura

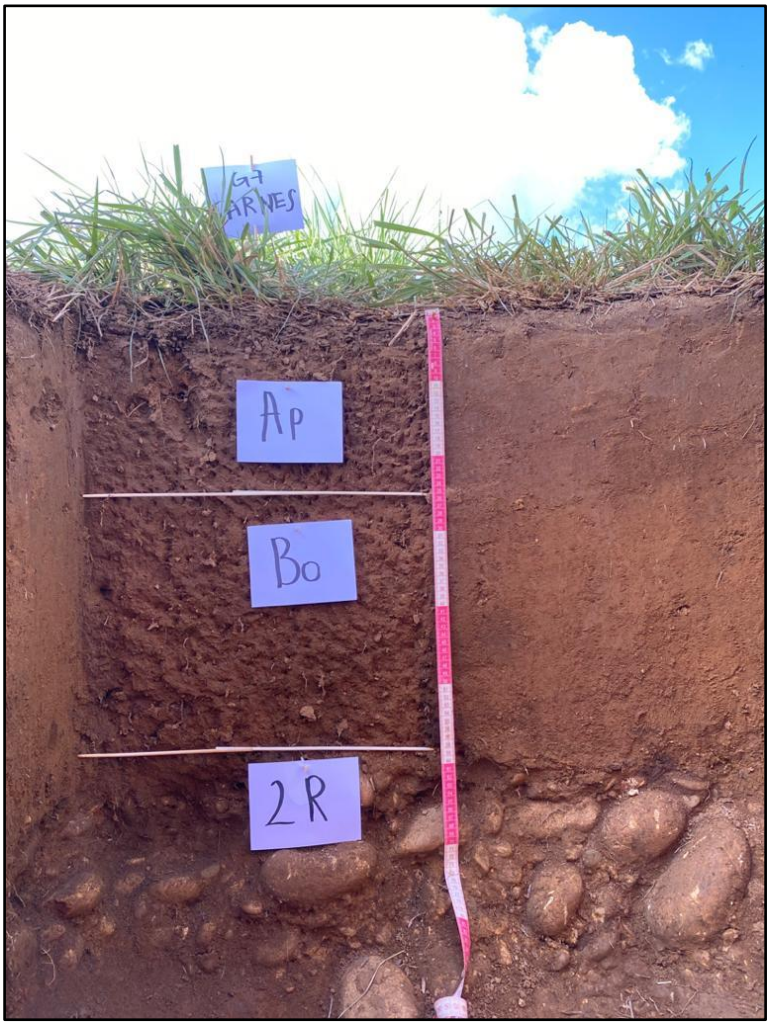
Unidad: PVBa (IGAC, 2004) o RTa3 (IGAC, 1973)
Unidad taxonómica: Oxic Dystrudepts.
Horizonte diagnóstico: Epipedón: ócrico; Endopedón: cámbico
Localización: CI La Libertad, 04°04’ 18” N y 73°27’ 23” W
Altitud: 314 msnm.
Posición geomorfológica: Plano de terraza media del piedemonte.
Topografía: Pendiente del 1-3%.
Material parental: sedimentos aluviales finos.
Uso actual: Ganadería de ceba con pasto dulce (Brachiaria humidicola).

Régimen de humedad del suelo: Údico.

Régimen de temperatura del suelo: Isohipertérmico.

Profundidad efectiva: Muy profundo.

Condición de drenaje: Moderadamente bien drenado, externo lento, interno lento.



Descripción de horizontes:

- Ap. 0 a 25cm de profundidad, color en húmedo pardo rojizo oscuro (5YR3/4); textura franco arcillosa, estructura blocosa subangular, clase media y fina, grado moderada; consistencia en húmedo muy friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros finos y medios, de forma vesicular, continuos, imped y

exped; frecuentes raíces finas y medias, vivas, distribución normal en horizontes; frecuente actividad de macroorganismos; limite difuso, plana; pH 4.88

- Bo1. 26 a 58cm, Color en húmedo pardo rojizo (5YR4/4); textura arcillosa; estructura blocosa subangular, clase media y fina, grado moderado; consistencia en húmedo friable, en mojado pegajosa y plástica; muchos poros finos y medios, de forma vesicular y tubular, continuos, imped y exped; frecuentes raíces finas, vivas, distribución normal en horizontes; poca actividad de macroorganismos; limite abrupto, plana; pH 4.98

- 2R. 59 a 80x cm, Cantos rodados.

Bibliografía

AbdAllah, A. M., Mashaheet, A. M. and Burkey, K. O. (2021). Super absorbent polymers mitigate drought stress in corn (Zea mays L.) grown under rainfed conditions. *Agricultural Water Management*, *254*(December 2020), 106946. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106946

Alan, A. T. M., Rahman, M. S. and Sadaat, A. H. M. (2014). Markov Chain Analysis of Weekly Rainfall Data for Predicting Agricultural Drought. In *Computational Intelligence Techniques in Earth and Environmental Sciences* (pp. 109–128).

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations*, *56*.

Almansa, E. F. (2006a). Manejo del recurso hídrico para el cultivo de la soya en la Orinoquia Colombiana. In *Soya (Glycine max (L.) Merril) Alternativa para los sistemas de produccion para los sistemas de produccion de la Orinoquia colombiana.* (p. 224).

Almansa, E. F. (2006b). *Requerimientos hídricos del cultivo de soya en la Altillanura* (p. 2). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13777

Amézquita, E. (1999). Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. *PALMAS*, *20*(1), 145–174. http://hdl.handle.net/20.500.12324/15962

Amézquita, E., Indupalapati, R. I. M., Hoyos, P., Diego, M., Luis Fernando, C. and Jaime, B. (2007). *Development of an arable layer: A key concept for better management of infertile tropical savanna soils*.

Amézquita, E., Rao, I. M., Rivera, M., Corrales, I. I. and Jaime H. Bernal. (2013). *Sistemas Agropastoriles: Un Enfoque Integrado para el Manejo Sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia*.

Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D. and Ruíz, J. (2015). Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo el niño, la niña – oscilación del sur

(ENSO) [Archivo PDF]. In *IDEAM* (pp. 103–111). http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Variabilidad+Climatica+Trimestral+Precipitacion+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango%2C+Dorado%29.pdf/eec9752d-05ac-43f5-913c-4a3c7adc7860

Armenteras, D., Meza, M. C., González, T. M., Oliveras, I., Balch, J. K. and Retana, J. (2021). Fire threatens the diversity and structure of tropical gallery forests. *Ecosphere*, *12*(1). https://doi.org/10.1002/ecs2.3347

Attanasio, A., Pasini, A. and Triacca, U. (2013). Granger Causality Analyses for Climatic Attribution. *Atmospheric and Climate Sciences*, *03*(04), 515–522. https://doi.org/10.4236/acs.2013.34054

Barrios-Perez, C., Okada, K., Varón, G. G., Ramirez-Villegas, J., Rebolledo, M. C. and Prager, S. D. (2021). How does El Niño Southern Oscillation affect rice-producing environments in central Colombia? *Agricultural and Forest Meteorology*, *306*(April). https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108443

Bera, B., Shit, P. K., Sengupta, N., Saha, S. and Bhattacharjee, S. (2021). Trends and variability of drought in the extended part of Chhota Nagpur plateau (Singbhum Protocontinent), India applying SPI and SPEI indices. *Environmental Challenges*, *5*(September), 100310. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100310

Bergstrom, S., Lindstrom, G., Johansson, B., Persson, M. and Gardelin, M. (1997). hydrological model. *Journal of Hydrology*, *201*, 272–288.

Beven, K. (2012). Rainfall-runoff modelling. In *Fluid Mechanics, Hydraulics, Hydrology and Water Resources for Civil Engineers*. https://doi.org/10.1201/9780429423116-33

Blöschl, G., Bierkens, M. F. P., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J. W., McDonnell, J. J., Savenije, H. H. G., Sivapalan, M., Stumpp, C., Toth, E., Volpi, E., Carr, G., Lupton, C., Salinas, J., Széles, B., Viglione, A., Aksoy, H., … Zhang, Y. (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)–a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, *64*(10), 1141–1158. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507

Bradford, J. B., Schlaepfer, D. R., Lauenroth, W. K., Palmquist, K. A., Chambers, J. C., Maestas, J. D. and Campbell, S. B. (2019). Climate-driven shifts in soil temperature and moisture regimes suggest opportunities to enhance assessments of dryland resilience and resistance. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *7*(SEP), 1–16. https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00358

Breuer, L., Huisman, J. A., Willems, P., Bormann, H., Bronstert, A., Croke, B. F. W., Frede, H. G., Gräff, T., Hubrechts, L., Jakeman, A. J., Kite, G., Lanini, J., Leavesley, G., Lettenmaier, D. P., Lindström, G., Seibert, J., Sivapalan, M. and Viney, N. R. (2009). Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM). I: Model intercomparison with current land use. *Advances in Water Resources*, *32*(2), 129–146. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.10.003

Bustamante, C. (2019). *Gran Libro de la Orinoquia Colombiana*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/35408

Caicedo, S., Campuzano, L. F., Hernández, A. C., Alfonso, H., Olarte, T. P., Pulido, S. X. and Jaramillo, C. A. (2012). Modelo productivo para el cultivo de maíz y soya en la Altillanura colombiana (Paquete Tecnológico). *Siembra*, 1–37. http://www.siembra.gov.co/siembra/GestionInnovacion2.aspx

Caicedo, S. and Tibocha, Y. (2020). Corpoica Iraca 10: variedad de soya para suelos mejorados de altillanura plana, y vegas y vegones del piedemonte llanero. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). In *Editorial AGROSAVIA* (p. 20 paginas).

Caplan, J. S., Giménez, D., Hirmas, D. R., Brunsell, N. A., Blair, J. M. and Knapp, A. K. (2019). Decadal-scale shifts in soil hydraulic properties as induced by altered precipitation. *Science Advances*, *5*(9), 1–10. https://doi.org/10.1126/sciadv.aau6635

CEPAL, DNP and BID. (2012). *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010-2011. [Archivo PDF]* (p. 240). http://hdl.handle.net/11362/37958

Chapagain, R., Remenyi, T. A., Harris, R. M. B., Mohammed, C. L., Huth, N., Wallach, D., Rezaei, E. E. and Ojeda, J. J. (2022). Decomposing crop model uncertainty: A systematic review. *Field Crops Research*, *279*(November 2021), 108448. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108448

Chen, Z. and Grasby, S. E. (2009). Impact of decadal and century-scale oscillations on hydroclimate trend analyses. *Journal of Hydrology*, *365*(1–2), 122–133. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.031

Chica, H., Peña Quiñones, A. J., Giraldo Jiménez, J. F., Obando Bonilla, D. and Riaño Herrera, N. M. (2014). SueMulador: Herramienta para la Simulación de Datos Faltantes en Series Climáticas Diarias de Zonas Ecuatoriales. *Revista Facultad*

Nacional de Agronomía Medellín, *67*(2), 7365–7373. https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n2.44179

Chica Ramirez, H. A., Gómez Gil, L. F., Bravo Bastidas, J. J., Carbonell González, J. A. and Peña Quiñones, A. J. (2021). Site-specific intra-annual rainfall patterns: a tool for agricultural planning in the Colombian sugarcane production zone. *Theoretical and Applied Climatology*, *146*(1–2), 543–554. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03755-1

Choquet, P., Gabrielle, B., Chalhoub, M., Michelin, J., Sauzet, O., Scammacca, O., Garnier, P., Baveye, P. C. and Montagne, D. (2021). Comparison of empirical and process-based modelling to quantify soil-supported ecosystem services on the Saclay plateau (France). *Ecosystem Services*, *50*(June). https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101332

Chow, V., Maidment, D. and Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. In *Hidrologia aplicada* (p. 575 pp). http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=158911&indexSearch=ID%5Cnhttp://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BINAI.xis&method=post&formato=2&cantidad=

CIAT and CORMACARENA. (2017). Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía. *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.*, *No. 438*.

CIAT, CORMACARENA, Corporinoquia and Ecopetrol. (2027). Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía - Resumen ejecutivo Cartilla. In *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)* (Vol. 53, Issue 9). https://www.cambridge.org/core/product/identifier/CBO9781107415324A009/type/book_part

Cook, B. G. and Schultze-Kraft, R. (2015). Botanical name changes - Nuisance or a quest for precision? *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, *3*(1), 34–40. https://doi.org/10.17138/TGFT(3)34-40

Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y. and Esteban-Parra, M. J. (2015). Assessing the impact of El Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. *Global and Planetary Change*, *124*, 41–61. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.003

CORMACARENA. (2018). Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrografica Rio

Negro. In *Corporación Para El Desarrollo Sostenible del Área Manejo Especial la Macarena. Consorcio POMCA Río Negro 2018* (Vol. 10, Issue 1, pp. 279–288). http://dx.doi.org/10.1053/j.gastro.2014.05.023%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.gie.2018.04.013%0Ahttp://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29451164%0Ahttp://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC5838726%250Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.gie.2013.07.022

Cornelissen, T., Diekkrüger, B. and Giertz, S. (2013). A comparison of hydrological models for assessing the impact of land use and climate change on discharge in a tropical catchment. *Journal of Hydrology*, *498*, 221–236. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.016

Crow, W. T., Berg, A. A., Cosh, M. H., Loew, A., Mohanty, B. P., Panciera, R., De Rosnay, P., Ryu, D. and Walker, J. P. (2012). Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products. *Reviews of Geophysics*, *50*(2), 1–20. https://doi.org/10.1029/2011RG000372

Cui, X. (2020). Climate change and adaptation in agriculture: Evidence from US cropping patterns. *Journal of Environmental Economics and Management*, *101*, 102306. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102306

da Silva, E. H. F. M., Gonçalves, A. O., Pereira, R. A., Fattori Júnior, I. M., Sobenko, L. R. and Marin, F. R. (2019). Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. *Agricultural Water Management*, *218*(October 2018), 1–7. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.003

Dastane, N. G. (1978). Effective rainfall in irrigated agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Engineering*, *4*(1), 25.

de la Casa, A. C., Ovando, G. G. and Díaz, G. J. (2021). ENSO influence on corn and soybean yields as a base of an early warning system for agriculture in Córdoba, Argentina. *European Journal of Agronomy*, *129*(June). https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126340

de Oliveira-Júnior, J. F., Mendes, D., Washington Luiz, F. C. F., da Silva Junior, C. A., de Gois, G., da Rosa Ferraz Jardim, A. M., Vinícius da Silva, M., Bastos Lyra, G., Teodoro, P. E., Gomes Pimentel, L. C., Lima, M., de Barros Sant, D. and Pereira Rogelio, J. (2021). Fire foci in South America: Impact and causes, fire hazard and future scenarios José. *Journal of South American Earth Sciences*, *1446*(89), 2669.

https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103623

Delerce, S., Dorado, H., Grillon, A., Rebolledo, M. C., Prager, S. D., Patiño, V. H., Varón, G. G. and Jiménez, D. (2016). Assessing weather-yield relationships in rice at local scale using data mining approaches. *PLoS ONE*, *11*(8). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161620

Devia, G. K., Ganasri, B. P. and Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, *4*(Icwrcoe), 1001–1007. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126

Doeffinger, T. and Hall, J. W. (2021). Assessing water security across scales: A case study of the United States. *Applied Geography*, *134*(June), 102500. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102500

Dogan, E. (2019). Effect of supplemental irrigation on vetch yield components. *Agricultural Water Management*, *213*(August 2018), 978–982. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.013

Dunkerley, D. (2010). Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia. *Okt 2005 Abrufbar Uber Httpwww Tldp OrgLDPabsabsguide Pdf Zugriff 1112 2005*, *2274*(November 2008), 2267–2274. https://doi.org/10.1002/hyp

Dunkerley, D. (2015). Intra-event intermittency of rainfall: an analysis of the metrics of rain and no-rain periods. *Hydrological Processes*, *29*(15), 3294–3305. https://doi.org/10.1002/hyp.10454

Dutta, P. and Sarma, A. K. (2021). Hydrological modeling as a tool for water resources management of the data-scarce brahmaputra basin. *Journal of Water and Climate Change*, *12*(1), 152–165. https://doi.org/10.2166/wcc.2020.186

Easterbrook, D. J. (2011). Evidence-Based Climate Science. In *New York*.

Easterbrook, D. J. (2016). Evidence-Based Climate Science: Data Opposing CO2 Emissions as the Primary Source of Global Warming: Second Edition. In *Evidence-Based Climate Science: Data Opposing CO2 Emissions as the Primary Source of Global Warming: Second Edition*.

Egerer, S., Cotera, R. V., Celliers, L. and Costa, M. M. (2021). A leverage points analysis of a qualitative system dynamics model for climate change adaptation in agriculture. *Agricultural Systems*, *189*(February 2020). https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103052

Espinel, C., Rios, H., Palacino, J. and Arevalo, E. (2020). INFORME LANGOSTA LLANERA (Rhammatocerus schistocercoides) EN EL Contexto En Colombia se reporta la langosta llanera Rhammatocerus schistocercoides (Rehn , 1906) es " autóctona de la Orinoquía colombo-venezolana . Desde junio estados no voladores (nin. *ICA*.

Esquivel, A., Llanos-Herrera, L., Agudelo, D., Prager, S. D., Fernandes, K., Rojas, A., Valencia, J. J. and Ramirez-Villegas, J. (2018). Predictability of seasonal precipitation across major crop growing areas in Colombia. *Climate Services*, *12*(September), 36–47. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.09.001

FAO. (2015). *AQUASTAT - Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura*. https://www.fao.org/aquastat/statistics/query/results.html%0A

FAO. (2018). *Progresos en el nivel de estrés hídrico: valores de referencia mundiales para el indicador 6.4.2 de los ODS. Roma. FAO y ONU-Agua. 58 pp. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.*

February, E. C. and Higgins, S. I. (2010). The distribution of tree and grass roots in savannas in relation to soil nitrogen and water. *South African Journal of Botany*, *76*(3), 517–523. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.04.001

Felipe, A. and Montoya, H. (2016). Cambio Climático Y Variabilidad Espacio – Temporal De La Precipitación En Colombia Climate Change and Space-Time Variability of the Precipitation in Colombia As Alterações Climáticas E a Variabilidade Espaço – Temporal Da Chuva Tempo Na Colômbia. *Revista EIA*, *12*(574), 131–150.

Feng, S., Hao, Z., Zhang, X. and Hao, F. (2021). Changes in climate-crop yield relationships affect risks of crop yield reduction. *Agricultural and Forest Meteorology*, *304–305*(19), 108401. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108401

Fontanilla-Díaz, C. A., Preckel, P. V., Lowenberg-DeBoer, J., Sanders, J. and Peña-Lévano, L. M. (2021). Identifying profitable activities on the frontier: The Altillanura of Colombia. *Agricultural Systems*, *192*(May). https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103199

Gallo, O., Bernal, J., Baquero, J., Botero, R. and Gómez, J. (2013). Effect of Three Systems of Incorporation of Dolomite Limestone in the Colombian Flat Plains. *Suelos Ecuatoriales Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo*, *43*(1), 24–28.

Galvis, J. H., Amézquita Collazos, E. and Madero M., E. (2007). Evaluación del efecto de la intensidad de labranza en la formación de costra superficial de un oxisol de

sabana en los Llanos Orientales de Colombia : II. Caracterización física en superficie = Evaluation of harrowing intensity on surface crusting on an o. *Acta Agronómica (Colombia)*, *57*(2008), 56(4):191-194. http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/viewFile/1030/1504

Galvis Quintero, J. H., Anaya, O. C., Bernal Riobo, J. H. and Baquero, J. E. (2018). Evaluación de la estabilidad estructural y espacio poroso en un Oxisol de sabana de los Llanos Orientales de Colombia. *Journal of Physical Therapy Science*, *9*(1), 1–11. http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.07.010%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2014.07.001%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.humov.2018.08.006%0Ahttp://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24582474%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.12.007%0Ahttps:

Gao, F., Wang, Y., Chen, X. and Yang, W. (2020). Trend analysis of rainfall time series in Shanxi province, Northern China (1957-2019). *Water (Switzerland)*, *12*(9), 1–22. https://doi.org/10.3390/W12092335

Guo, D., Thomas, J., Lazaro, A. B., Matwewe, F. and Johnson, F. (2021). Modelling the influence of short-term climate variability on drinking water quality in tropical developing countries: A case study in Tanzania. *Science of the Total Environment*, *763*, 142932. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142932

Gupta, V. and Jain, M. K. (2021). Unravelling the teleconnections between ENSO and dry/wet conditions over India using nonlinear Granger causality. *Atmospheric Research*, *247*(July 2020), 105168. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105168

Guzman, C. D., Hoyos-Villada, F., Da Silva, M., Zimale, F. A., Chirinda, N., Botero, C., Morales Vargas, A., Rivera, B., Moreno, P. and Steenhuis, T. S. (2019). Variability of soil surface characteristics in a mountainous watershed in Valle del Cauca, Colombia: Implications for runoff, erosion, and conservation. *Journal of Hydrology*, *576*(June), 273–286. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.002

Hajimirzajan, A., Vahdat, M., Sadegheih, A., Shadkam, E. and Bilali, H. El. (2021). An integrated strategic framework for large-scale crop planning: sustainable climate-smart crop planning and agri-food supply chain management. *Sustainable Production and Consumption*, *26*, 709–732. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.016

Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test

under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, *349*(3–4), 350–363. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009

Hao, Y., Hao, Z., Feng, S., Zhang, X. and Hao, F. (2020). Response of vegetation to El Niño-Southern Oscillation (ENSO) via compound dry and hot events in southern Africa. *Global and Planetary Change*, *195*(19), 103358. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103358

He, Z., Zhao, W., Liu, H. and Chang, X. (2012). The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: A case study in northwestern China's Qilian Mountains. *Journal of Hydrology*, *420–421*, 183–190. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.056

Hébert-Dufresne, L., Pellegrini, A. F. A., Bhat, U., Redner, S., Pacala, S. W. and Berdahl, A. M. (2018). Edge fires drive the shape and stability of tropical forests. *Ecology Letters*, *21*(6), 794–803. https://doi.org/10.1111/ele.12942

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations. Academic Press, Waltham.*

Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M. and Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, *39*(September 2011), 16–25. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.018

Huertas, H. D., Rangel, J. A. and Parra, A. S. (2018). Chemical characterization of soil fertility in production systems of a flat High Plateau, Meta, Colombia. *Revista Luna Azul*, *46*(46), 54–69. https://doi.org/10.17151/luaz.2018.46.5

Ibrahim, M. A. and Johansson, M. (2021). Attitudes to climate change adaptation in agriculture – A case study of Öland, Sweden. *Journal of Rural Studies*, *86*(March), 1–15. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.05.024

ICA. (2011). *Resolucion 2705.pdf* (p. 2). https://www.ica.gov.co/getattachment/513310fc-449e-4330-a0bc-5e226eb1e9a1/Cultivo-del-Arroz.aspx

IDEAM. (2005). Atlas Climatológico de Colombia. *Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales - Ideam*, 78.

IDEAM. (2012). *Sequía meteorológica y sequía agícola en Colombia: incidencia y tendencias.* 49. http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Sequias+Incidencias+y+Tendencias.pdf/3e72c86c-cf4a-42f9-95f1-07e7cf88861a

IDEAM. (2013). Zonificación y codificación de uniades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. *Publicación Aprobada Por El Comité de Comunicaciones y Publicaciones Del IDEAM*, 47. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf

IDEAM. (2015). *Mapa de Coberturas de la Tierra Metodología Corine Land Cover Adaptada para Colombia Escala 1:100.000 (Período 2010 - 2012)* (p. 117). http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023236/IEARN_segunda_parte_ecosistemas_2014.pdf

IDEAM. (2016). Conocer: El primer paso para adaptarse. Guía básica de conceptos sobre el cambio climático. In *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023631/ABC.pdf

IDEAM. (2017a). Atlas climatologico de Colombia [PDF]. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.* http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023777/CLIMA.pdf

IDEAM. (2017b). *Diseñode la Red Hidrometeorológica Nacional*. 1–16. http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/561097/M-GDI-H-G001+GUÍA+DISEÑO+DE+LA+RED+HIDROMETEOROLÓGICA+NACIONAL.pdf/9da0e118-58cc-43eb-87e0-8c6316dc691c?version=1.0#:~:text=El IDEAM opera una red,satelital o vía celular%2C GPRS.

IDEAM. (2018). Protocolo de Modelacion Hidrológica e Hidráulica. In *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdfc

IDEAM. (2019a). DHIME - Manual de Usuario Consulta y Descarga de datos hidrometeorológicos - IDEAM. *Manual*, 53.

IDEAM. (2019b). *Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: Ideam: 452 pp.* http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf

IDEAM and UNAL. (2018). Variabilidad climática y el cambio climático en Colombia [Archivo PDF]. In *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM Universidad Nacional de Colombia – UNAL* (p. 28). http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf

IGAC. (1973). *Reconocimiento semidetallado de suelos del C.I La Libertad*

(Departamento del Meta) Intituto Geografico Agustin Codazzi.

IGAC. (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Meta. *Instituto Geografico Agustin Codazzi*, 9067.

IGAC. (2017). *Instructivo: Etapa de campo para leventamiento de suelos, Grupo interno de trabajo de levantamiento de suelos y aplicaciones agrologicas [PDF]*. http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/DOCUMENTOS SGI 2021/GAG/PC-GAG-05/IN-GAG-PC05-09 Etapa de campo para levantamientos de suelos.pdf

IGAC. (2018). *Sistema de clasificacion geomorfologica aplicado a los levantamientos de suelos, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología*.

IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. In *Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON*. https://doi.org/10.1109/MELCON.2008.4618473

IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. In *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

IPCC. (2018). *Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 ºC con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las em*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf

IPCC. (2020). El cambio climático y la tierra. In *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf

Jia, Y. (2011). Coupling crop growth and hydrologic models to predict crop yield with spatial analysis technologies. *Journal of Applied Remote Sensing*, *5*(1), 053537. https://doi.org/10.1117/1.3609844

Kamble, P. S., Maniyar, V. G. and Jadhav, J. D. (2010). Crop coefficients (Kc) of soybean [Glycine max (L.) Merrill]. *Asian Journal of Environmental Science*, *5*(2), 131–135.

Krinitskiy, M., Grashchenkov, K., Tilinina, N. and Gulev, S. (2021). Tracking of atmospheric phenomena with artificial neural networks: A supervised approach. *Procedia Computer Science*, *186*, 403–410. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.209

Kundzewicz, Z. W., Huang, J., Pinskwar, I., Su, B., Szwed, M. and Jiang, T. (2020). Climate variability and floods in China - A review. *Earth-Science Reviews*, *211*(February), 103434. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103434

Lafitte, H. R. (1994). Guia de campo: Identificación de problemas en la producción de maíz tropical [PDF]. *CIMMYT*, 122. https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/727/43157.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lal, R. and Shukla, M. K. (2005). Principles of soil physics, The Ohio State University Columbus, Ohio, U.S.A. In *Mercel Dekker, INC. New York, Basel* (Vol. 4, Issue March). https://dewagumay.files.wordpress.com/2011/12/principles-of-soil-physics.pdf

Leon, G., Arcila, A., Pulido, L. A. and Kondo, T. (2018). Capítulo 25 Contenido Cambio climático y control biológico de insectos : visión y perspectiva de la situación Chapter 25 Climate change and biological control of insects : current situation and perspectives. In *Control biológico de fitopatógenos, insectos y ácaros* (Issue October, p. 572).

Lesk, C., Rowhani, P. and Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, *529*(7584), 84–87. https://doi.org/10.1038/nature16467

Li, F., Li, W., Li, F., Long, Y., Guo, S., Li, X., Lin, C. and Li, J. (2022). Global projections of future wilderness decline under multiple IPCC Special Report on Emissions Scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, *177*(June 2021), 105983. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105983

Li, X., Zhang, K., Gu, P., Feng, H., Yin, Y., Chen, W. and Cheng, B. (2021). Changes in precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960–2019 and the association with global warming, ENSO, and local effects. *Science of the Total Environment*, *760*, 144244. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144244

Limami, A. M., Diab, H. and Lothier, J. (2014). Nitrogen metabolism in plants under low oxygen stress. *Planta*, *239*(3), 531–541. https://doi.org/10.1007/s00425-013-2015-9

Liu, J., Liang, Y., Gao, G., Dunkerley, D. and Fu, B. (2022). Quantifying the effects of rainfall intensity fluctuation on runoff and soil loss: From indicators to models. *Journal of Hydrology*, *607*(February 2021), 127494. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127494

Loaiza, J. and Pauwels, V. (2008). Utilizacion de sensores de humedad para la determinacion del contenido de humedad del suelo (Ecuaciones de Calibración). *Suelos Ecuatoriales Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo*, *38*(1), 24–33.

Loaiza, J., Poch, R. and Pauwels, V. (2010). Evaluation of soil water moisture regime prediction methods in the mountain region of Catalan Pre-Pyrenees. *Suelos Ecuatoriales Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo*, *40*(1), 38–50.

López, J. J., Goñi, M., San Martín, I. and Erro, J. (2019). Análisis regional de frecuencias de las precipitaciones diarias extremas en Navarra. Elaboración de los mapas de cuantiles. *Ingeniería Del Agua*, *23*(1), 33. https://doi.org/10.4995/ia.2019.10058

Lozano, E. (2014). Compilación de la cuenca de los Llanos Orientales. *Servicio Geológico Colombiano*, *1*(Diciembre), 5–9.

Lu, B., Li, H., Wu, J., Zhang, T., Liu, J., Liu, B., Chen, Y. and Baishan, J. (2019). Impact of El Niño and Southern Oscillation on the summer precipitation over Northwest China. *Atmospheric Science Letters*, *20*(8), 1–8. https://doi.org/10.1002/asl.928

Ma, Y. jun, Li, X. yan, Guo, L. and Lin, H. (2017). Hydropedology: Interactions between pedologic and hydrologic processes across spatiotemporal scales. *Earth-Science Reviews*, *171*(19), 181–195. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.014

Manfreda, S. and Rodríguez-Iturbe, I. (2006). On the spatial and temporal sampling of soil moisture fields. *Water Resources Research*, *42*(5), 2757–2760. https://doi.org/10.1029/2005WR004548

Martineli, A., Leonel, P., Fabíola, N. and Giarola, B. (2020). Rhizosphere Evaluation of the soil aggregation induced by the plant roots in an Oxisol by turbidimetry and water percolation. *Rhizosphere*, *16*(October), 100265. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100265

McGraw, M. C. and Barnes, E. A. (2018). Memory matters: A case for granger causality in climate variability studies. *Journal of Climate*, *31*(8), 3289–3300. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0334.1

Meran, G., Siehlow, M. and Hirschhausen, C. von. (2021). The Economics of War. In *New Perspectives Quarterly* (Vol. 18, Issue 4, pp. 48–50). https://doi.org/10.1111/0893-

7850.00441

Meshesha, T. W. and Khare, D. (2019). Towards integrated water resources management considering hydro-climatological scenarios: an option for sustainable development. *Environmental Systems Research*, *8*(1). https://doi.org/10.1186/s40068-019-0134-4

Mesri, M., Ghilane, A. and Bachari, N. E. I. (2013). An approach to spatio-temporal analysis for climatic data. *Revue Des Energies Renouvelables*, *16*, 413–424.

Milella, P., Bisantino, T., Gentile, F., Iacobellis, V. and Trisorio Liuzzi, G. (2012). Diagnostic analysis of distributed input and parameter datasets in Mediterranean basin streamflow modeling. *Journal of Hydrology*, *472–473*, 262–276. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.039

MINAMBIENTE. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C.: Colombia [PDF]. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, 124. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf

MINAMBIENTE. (2014). Guía Técnica para la formulación de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrograficas POMCAS [PDF]. *Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 104. https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/22585/1-Guia_Tecnica_pomcas-MinAmbiente-2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Munar, A. M., Cavalcanti, J. R., Bravo, J. M., Fan, F. M., Motta-Marques, D. da and Fragoso, C. R. (2018). Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes. *Journal of Hydrology*, *564*(March), 424–441. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.045

Norel, M., Kałczyński, M., Pińskwar, I., Krawiec, K. and Kundzewicz, Z. W. (2021). Climate variability indices—a guided tour. *Geosciences (Switzerland)*, *11*(3), 1–27. https://doi.org/10.3390/geosciences11030128

OMM. (2008). *Guía de prácticas hidrológicas. Volumen II. Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=9404#.X10SsWgzbDc

OMM. (2011). Guía de Prácticas Hidrológicas Volumen I. In *World Meteorological Organization, No. 168*.

http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/guide/spanish/168_Vol_I_es.pdf

OMM. (2014). El Niño/Oscilación del Sur. *Organización Meteorológica Mundial Tiempo-Clima-Agua*, *N°1145*, 12. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7889

Orduz, J. and Fischer, G. (2007). Balance hídrico e influencia del estrés hídrico en la inducción y desarrollo floral de la mandarina 'Arrayana' en el piedemonte llanero de Colombia. *Agronomía Colombiana*, *25*(2), 255–263.

Orozco Jamioy, D. D., Menjivar Flores, J. C. and Rubiano Sanabria, Y. (2015). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de. *Acta Agronomica*, *64*, 302–307.

Panagos, P., Standardi, G., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L. and Bosello, F. (2018). Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. *Land Degradation and Development*, *29*(3), 471–484. https://doi.org/10.1002/ldr.2879

Paoletti, J. M. and Shortridge, J. E. (2020). Improved representation of uncertainty in farm-level financial cost-benefit analyses of supplemental irrigation in humid regions. *Agricultural Water Management*, *239*(June 2019), 106245. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106245

Pardo, O., Torres, H., Trujillo, G. and Trujillo, J. (2020). Impactos del cambio climatico sobre los rendiemientos del Arroz (Oryza sativa L) en la zona llanos, Colombia [PDF]. *AGLALA ISSN 2215-7360*, *11*(2), 94–106. https://revistas.curn.edu.co/index.php/aglala/article/view/1698

Peña, A., Jaramillo R, Á. and Paternina Q, M. J. (2011). Detecting low frequency cycles in rainfall series from Colombian coffee-growing area by using descriptive methods. *Earth Sciences Research Journal*, *15*(2), 109–114.

Perez, R. A. (1992). Pasto Humidicola. *Bolétin Técnico*, *181*, 14. http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/ICA_000041C.2_Pasto_humidicola_Brachiaria_humidicola_Rendle_Schweickt.pdf

Pla Sentis, I. (2016). Nuevos enfoques para el manejo y conservacion de suelos y agua en sistemas agricolas y medio ambientales. *Suelos Ecuatoriales Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo*, *46*(1 y 2), 101–111.

Poveda, G., Álvarez, D. M. and Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their

impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, *36*(11–12), 2233–2249. https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y

Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R. and van Oevelen, P. J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, *8*(May), 1–32. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162

Praveen, B., Talukdar, S., Shahfahad, Mahato, S., Mondal, J., Sharma, P., Islam, A. R. M. T. and Rahman, A. (2020). Analyzing trend and forecasting of rainfall changes in India using non-parametrical and machine learning approaches. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–21. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67228-7

Pringle, G. (2017). *Maize production: Managing critical plant growth stages*. https://www.farmersweekly.co.za/crops/field-crops/maize-production-managing-critical-plant-growth-stages/

Rahman, A., Kuddus, M. A., Ip, R. H. L. and Bewong, M. (2021). A review of covid-19 modelling strategies in three countries to develop a research framework for regional areas. *Viruses*, *13*(11), 1–23. https://doi.org/10.3390/v13112185

Ramirez C., C., Vélez U., J. J. and Peña Q., A. J. (2018). Analizando índices climáticos para predecir la lluvia mensual en una región agrícola de los andes del norte (Caldas, Colombia). *Investigaciones Geográficas*, *55*, 111. https://doi.org/10.5354/0719-5370.2018.48460

Ramírez, N. E., Munar, D., van der Hilst, F., Espinosa, J. C., Ocampo-Duran, Á., Ruíz-Delgado, J., Molina-López, D. L., Wicke, B., Garcia-Nunez, J. A. and Faaij, A. P. C. (2021). Ghg balance of agricultural intensification & bioenergy production in the orinoquia region, colombia. *Land*, *10*(3), 1–30. https://doi.org/10.3390/land10030289

Randall, M., Montgomery, J. and Lewis, A. (2022). Robust temporal optimisation for a crop planning problem under climate change uncertainty. *Operations Research Perspectives*, *9*(October 2021), 100219. https://doi.org/10.1016/j.orp.2021.100219

Ray, D. K., Gerber, J. S., Macdonald, G. K. and West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, *6*, 1–9. https://doi.org/10.1038/ncomms6989

Refsgaard, J. C. and Knudsen, J. (1996). Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, *32*(7), 2189–2202. https://doi.org/10.1029/96WR00896

Rial, A., Lasso, C. A. and Colonnello, G. (2016). Clasificación de los paisajes de la

Orinoquia. Colombia y Venezuela. *XI. Humedales de La Orinoquia (Colombia-Venezuela). Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia*, *January 2014*, 35–49.

Ricaurte, J., Idupalapati, R. and Menjivar, J. C. (2007). Estrategias de enraizamiento de genotipos Brachiaria en suelos acidos y de baja fertilidad en Colombia. *Acta Agronomica*, *56(3)*, 107–115.

Rincón, Á., Flórez, H., Ballesteros, H. and León, L. M. (2018). Effects of fertilization of Brachiaria humidicola cv. Llanero on pasture productivity in the foothills region of the Llanos Orientales, Colombia. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, *6*(3), 158–168. https://doi.org/10.17138/TGFT(6)158-168

Robinson, D. A., Jones, S. B., Lebron, I., Reinsch, S., Domínguez, M. T., Smith, A. R., Jones, D. L., Marshall, M. R. and Emmett, B. A. (2016). Experimental evidence for drought induced alternative stable states of soil moisture. *Scientific Reports*, *6*(September 2015), 1–6. https://doi.org/10.1038/srep20018

Rodriguez, N. S., Lavelle, P., Pulido, S. X., Gutierrez, A., Bernal, J. H., Arguello, O., Botero, C., Gomez, Y., Hurtado, M. del P., Loaiza, S. P. and Rodriguez, E. (2013). Construcción de indicadores de ecoeficiencia para la altillanura plana en los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán, departamento del Meta. Villavicencio (Colombia). *CORPOICA*, 40.

Sánchez Ortega, J. M. (2021). Evaluación del transporte de humedad atmosférica desde el océano Atlántico hacia las cuencas del Orinoco y el norte del Amazonas durante el año 2010 mediante el modelo WRF-Tracers [Tesis de Ingenieria Ambiental]. In *Universidad de Antioquia*. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/19697/1/SanchezJuan_2021_EvalucionTransporteHumedad.pdf

Sarkar, S., Zhu, X., Melnykov, V. and Ingrassia, S. (2020). On parsimonious models for modeling matrix data. *Computational Statistics and Data Analysis*, *142*, 106822. https://doi.org/10.1016/j.csda.2019.106822

Seibert, J. and Vis, M. J. P. (2012). *Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package*. 3315–3325. https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324), 1379–1389.

https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B. and Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, *99*(3–4), 125–161. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004

Sharifi, A., Mirabbasi, R., Ali Nasr-Esfahani, M., Torabi Haghighi, A. and Fatahi Nafchi, R. (2021). Quantify the impacts of anthropogenic changes and climate variability on runoff changes in central plateau of Iran using nine methods. *Journal of Hydrology*, *603*(PC), 127045. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127045

Sheikh Goodarzi, M., Jabbarian Amiri, B., Azarnivand, H. and Waltner, I. (2021). Watershed hydrological modelling in data scarce regions; integrating ecohydrology and regionalization for the southern Caspian Sea basin, Iran. *Heliyon*, *7*(4), e06833. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06833

Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and Assessment of world water resources. *Water International*, *25*(1), 11–32. https://doi.org/10.1080/02508060008686794

Shiklomanov, I. A. and Rodda, J. C. (2004). World water resources at the beginning of the twenty-first century. *Choice Reviews Online*, *41*(07), 41-4063-41–4063. https://doi.org/10.5860/choice.41-4063

Solomatine, D. P. and Wagener, T. (2011). Hydrological Modeling. *Treatise on Water Science*, *2*, 435–457. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00044-0

Stephens, E. C., Jones, A. D. and Parsons, D. (2018). Agricultural systems research and global food security in the 21st century: An overview and roadmap for future opportunities. *Agricultural Systems*, *163*, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.011

Sun, H., Shen, Y., Yu, Q., Flerchinger, G. N., Zhang, Y., Liu, C. and Zhang, X. (2010). Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, *97*(8), 1139–1145. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.004

Sun, X., Renard, B., Thyer, M., Westra, S. and Lang, M. (2015). A global analysis of the asymmetric effect of ENSO on extreme precipitation. *Journal of Hydrology*, *530*, 51–65. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.016

Tao, F., Rötterb, R., Palosuo, T., Díaz, C. G. H., -Ambrona, C, Mínguez, M. I., C, Mikhail, Semenov, A., D, Kersebaum, K. C., E, Nendel, C., E, Specka, X., E, Hoffmann, H.,

F, … A, J. (2016). Contribution of crop model structure, parameters and climate projections to uncertaint y in climate change impact assessments. In *International Journal of Laboratory Hematology* (Vol. 38, Issue 1). https://doi.org/10.1111/ijlh.12426

Tapiero, A., Caicedo, S., Baquero, J., Ospina, Y., Guimaraes, E. and Chatel, M. (2012). *Arroz Corpoica Llanura 11*.

Tardieu, F., Draye, X. and Javaux, M. (2017). Root Water Uptake and Ideotypes of the Root System: Whole-Plant Controls Matter. *Vadose Zone Journal*, *16*(9), vzj2017.05.0107. https://doi.org/10.2136/vzj2017.05.0107

Thomas, W., Angarita, H. and Delgado, J. (2015). Hacia una gestión integral de la Cuenca y planicies inundables del Magdalena-Cauca. *Foro Público: Para Dónde va El Río Magdalena -Foro Nacional Ambiental*, 22.

Tian, Q., Lu, J. and Chen, X. (2022). A novel comprehensive agricultural drought index reflecting time lag of soil moisture to meteorology: A case study in the Yangtze River basin, China. *Catena*, *209*(P1), 105804. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105804

Trnka, M., Vizina, A., Hanel, M., Balek, J., Fischer, M., St, P., Hlavinka, P., Semer, D., Zahradní, P., Skal, P., Monika, B., Eitzinger, J., Dubrovský, M. and Petr, M. (2022). *Increasing available water capacity as a factor for increasing drought resilience or potential conflict over water resources under present and future climate conditions*. *264*(August 2020).

Urrea, V., Ochoa, A. and Mesa, O. (2019). Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, *55*(5), 4149–4162. https://doi.org/10.1029/2018WR023316

USDA. (2014). Keys to soil taxonomy. *United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service*, *12*, 410. http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf

Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, *2*(4), 359–392. https://doi.org/10.1002/wat2.1085

Van Nguyen, L., Takahashi, R., Githiri, S. M., Rodriguez, T. O., Tsutsumi, N., Kajihara, S., Sayama, T., Ishimoto, M., Harada, K., Suematsu, K., Abiko, T. and Mochizuki, T. (2017). Mapping quantitative trait loci for root development under hypoxia conditions in soybean (Glycine max L. Merr.). *Theoretical and Applied Genetics*, *130*(4), 743–755. https://doi.org/10.1007/s00122-016-2847-3

Velasco, H., Silva, A., Veenhuizen, R., Pérez, S., Prieto, M., Anaya, M., León, B., Cabas, N., Porto, E. and Morales, R. (2000). Manual de captacion y aprobechamiento de agua lluvia experiencias en America Latina serie: Zonas Áridas y Semiáridas. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura y La Alimentación FAO*, *Nº13*, 194.

Velásquez F, S. and Jaramillo R, A. (2009). Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé*, *60*(2), 148–160. http://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(02)148-160.pdf

Von der Heydt, A. S., Ashwin, P., Camp, C. D., Crucifix, M., Dijkstra, H. A., Ditlevsen, P. and Lenton, T. M. (2021). Quantification and interpretation of the climate variability record. *Global and Planetary Change*, *197*(May 2020), 103399. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103399

Wallach, D., Thorburn, P., Asseng, S., Challinor, A. J., Ewert, F., Jones, J. W., Rotter, R. and Ruane, A. (2016). Estimating model prediction error: Should you treat predictions as fixed or random? *Environmental Modelling and Software*, *84*, 529–539. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.010

Wang, C. (2018). A review of ENSO theories. *National Science Review*, *5*(6), 813–825. https://doi.org/10.1093/nsr/nwy104

Wang, C. and Fiedler, P. C. (2006). ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, *69*(2–4), 239–266. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.004

Wang, Y., You, W., Fan, J., Jin, M., Wei, X. and Wang, Q. (2018). Effects of subsequent rainfall events with different intensities on runoff and erosion in a coarse soil. *Catena*, *170*(June), 100–107. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.008

Yan, Y., Mao, K., Shen, X., Cao, M., Xu, T., Guo, Z. and Bao, Q. (2021). Evaluation of the influence of ENSO on tropical vegetation in long time series using a new indicator. *Ecological Indicators*, *129*, 107872. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107872

Yang, X., Magnusson, J., Huang, S., Beldring, S. and Xu, C. Y. (2020). Dependence of regionalization methods on the complexity of hydrological models in multiple climatic regions. *Journal of Hydrology*, *582*, 124357. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124357

Yeh, S. W., Cai, W., Min, S. K., McPhaden, M. J., Dommenget, D., Dewitte, B., Collins, M., Ashok, K., An, S. Il, Yim, B. Y. and Kug, J. S. (2018). ENSO Atmospheric

Teleconnections and Their Response to Greenhouse Gas Forcing. *Reviews of Geophysics*, *56*(1), 185–206. https://doi.org/10.1002/2017RG000568

Yue, S. and Wang, C. Y. (2002). Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, *38*(6), 4-1-4–7. https://doi.org/10.1029/2001wr000861

Zhao, C., Jia, X., Shao, M. and Zhu, Y. (2021). Regional variations in plant-available soil water storage and related driving factors in the middle reaches of the Yellow River Basin, China. *Agricultural Water Management*, *257*(June), 107131. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107131

Zounemat, M., Batelaan, O., Fadaee, M. and Hinkelmann, R. (2021). Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, *598*(March), 126266. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126266