



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente
En Zonas Áridas

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA DETERMINAR ÁREAS SUSCEPTIBLES DE
IMPACTO FÍSICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHARTE CASANARE, COLOMBIA.**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS
ÁRIDAS**

PRESENTA

NASLY DAYANA PARRA RODRIGUEZ

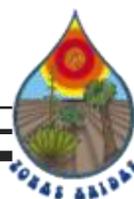
DIRECTOR: DR. IGNACIO SANCHEZ COHEN



APROBADA



Bermejillo, Dgo. México, junio 2023



inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Tesis realizada por **NASLY DAYANA PARRA RODRÍGUEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

DIRECTOR:


Dr. IGNACIO SANCHEZ COHEN

CO-DIRECTOR:


Dr. AURELIO PEDROZA SANDOVAL

ASESOR:


Dr. RICARDO TREJO CALZADA

ASESOR:


Dr. EDUARDO CASTILLO CASTAÑEDA

ASESOR:


Dr. ILDEFONSO NARVÁEZ ORTÍZ

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I	12
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	12
1.2. OBJETIVOS.....	15
1.2.1. Objetivo General	15
1.2.2. Objetivo Especifico.....	15
1.3. HIPOTESIS.....	16
1.4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
1.4.1. Cuenca hidrográfica y sus características.....	16
1.4.2. Problemáticas de las cuencas.....	17
1.4.3. Modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones.	18
1.5. LITERATURA CITADA	26
CAPITULO II	31
Simulación hidrológica aplicando el modelo SWAT a la cuenca del Río Charte Casanare-Colombia	31
2.1. RESUMEN.....	31
2.2. INTRODUCCIÓN.....	32
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
2.3.1. Ubicación geográfica del área de estudio.....	34
2.3.2. Caracterización topográfica.....	35
2.3.3. Caracterización hidrológica y climática.....	35
2.3.4. Caracterización de Suelo y Cobertura.....	39
2.3.5. Parámetros hidrológicos.....	42
2.3.6. Aplicación del modelo hidrológico	43
2.3.7. Calibración y Validación.	45
2.3.8. Evaluación del modelo	46
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47

2.4.1. Resultados de la calibración y validación	47
2.4.2. Métodos estadísticos evaluados.....	48
2.4.3. Ajuste de datos atípicos	51
2.4.4. Proyección de escenarios para el parámetro de escurrimiento y sedimentación en la cuenca del río Charte.	54
2.4.5. Propuestas de prevención.....	58
2.5. CONCLUSIONES	59
2.6. REVISIÓN DE LITERATURA	60
CAPITULO III	65
Variaciones hidrológicas a partir de impactos físicos en la cobertura vegetal en la Cuenca del Río Charte.....	65
3.1. RESUMEN.....	65
3.2. INTRODUCCIÓN.....	66
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	68
3.3.1. Descripción del área de estudio	68
3.3.2. Índice de vegetación normalizado (NDVI)	70
3.3.3. Análisis de ajuste entre las variables de escurrimiento y la cobertura vegetal predominante en la zona.	71
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
3.4.1. Análisis de coberturas	71
3.4.2. Análisis de escurrimiento.....	76
3.4.3. Evaluación del método estadístico	77
3.5. CONCLUSIONES	82
3.6. LITERATURA CITADA	83

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores de ajuste para el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE).....	25
Cuadro 2. Clasificación de pendientes en la cuenca del río Charte.	35
Cuadro 3. Estaciones climáticas, pluviométricas e hidrométrica ubicadas en la	

cuenca del río Charte.....	36
Cuadro 4. Tipos de suelos que predominan en la cuenca.	39
Cuadro 5. Nomenclatura de suelo usada por el modelo SWAT	40
Cuadro 7. Insumos utilizados para alimentar el modelo SWAT	43
Cuadro 7. Parámetros que intervienen en el escurrimiento superficial	46
Cuadro 8. Resultados iniciales obtenidos durante el proceso de calibración y validación del modelo SWAT para la cuenca del río Charte.	48
Cuadro 9. Valores resultantes después del ajuste de datos atípicos en los valores de caudal observado para el río Charte.	51
Cuadro 10. Tipos de cobertura que predominan en la cuenca.....	69
Cuadro 11. Rangos de clasificación para las coberturas de la tierra en relación al valor de NDVI.....	72
Cuadro 12. Descripción de datos de las imágenes satelitales utilizadas.	74

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del río Charte en Colombia. Elaboración propia.	34
Figura 2. Promedio mensual de precipitación de cada estación ubicada en la cuenca del río Charte.....	37
Figura 3. Promedio mensual de temperatura máxima de las estaciones ubicadas en cercanía a la cuenca del río Charte.	38
Figura 4. Promedio mensual de temperatura mínima de las estaciones ubicadas en cercanía a la cuenca del río Charte.	38
Figura 5. Cobertura vegetal presente en la cuenca del río Charte. Elaboración propia.	42
Figura 6. Esquema metodológico a implementar en la cuenca del río Charte. Elaboración propia.	45
Figura 7. Calibración del periodo de 2009-2013.	49
Figura 8. Validación del periodo de 2014—2019	49
Figura 9. Calibración del periodo 2009-2013 con promedios ajustados.....	52
Figura 10. Validación del periodo 2014-2019 con promedios ajustados.	52
Figura 11. Distribución de los datos simulados y observados, analizados por el parámetro estadístico de R^2 . La línea punteada corresponde a la tendencia de los datos y la línea continua de tonalidad naranja representa la relación 1:1. ...	53

Figura 12. Comportamiento promedio mensual del escurrimiento en la cuenca del río Charte. Elaboración propia.	55
Figura 13. Comportamiento promedio mensual de la sedimentación en la cuenca del río Charte. Elaboración propia.	57
Figura 14. Mapa de ubicación de la cuenca del río Charte Casanare en Colombia. Elaboración propia.	
Figura 15. Comportamiento de NDVI en la temporada de verano y de lluvia en la cuenca. Elaboración propia.	73
Figura 16. Valores de NDVI por cada año que se encuentra en análisis. Elaboración propia.	76
Figura 17. Relación de NDVI y escurrimiento para el octubre de 2013.	77
Figura 18. Relación de NDVI y escurrimiento para enero de 2014.	78
Figura 19. Relación de NDVI y escurrimiento para enero del 2016.	79
Figura 20. Relación de NDVI y escurrimiento para el mes de octubre del 2017.	80
Figura 21. Relación de NDVI y escurrimiento para el mes de febrero de 2018.	80
Figura 22. Relación de NDVI y escurrimiento para el mes de agosto 2019.	81

AGRADECIMIENTOS

A mi director de Tesis Dr. Ignacio Sánchez Cohen, a mi Codirector Dr. Aurelio Pedroza, y demás asesores: Dr. Ricardo Trejo Calzada, Dr. Eduardo Castillo Castañeda y Dr. Ildefonso Narváez Ortiz, por su grandiosa orientación y el gran apoyo que me brindaron para poder concluir este trabajo de investigación. Al Doctor Fabian García por brindarme su ayuda siempre que mi situación lo requirió y a Mary por su tiempo y paciencia.

A la Universidad Autónoma Chapingo, muy especialmente a la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA) por haberme brindado la oportunidad de ampliar mi conocimiento y por el apoyo que recibí para poder estudiar en su posgrado, gracias a toda su planta educativa por transmitir su conocimiento a cada estudiante.

De igual manera al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme brindado una beca muy útil para cumplir con mis estudios de posgrado.

DEDICATORIA

A Dios por la maravillosa oportunidad de vida, mi gratitud infinita con él por la compañía que me ha dado durante estos años lejos de mi hogar y mi país.

A mis padres Luis y Nubia, a mis hermanos Andrea, Jeisson y Jadiel, a mi sobrino Emmanuel de quien he aprendido el don infinito de la paciencia y el amor. Gracias a ustedes por brindarme su apoyo incondicional, por haber creído y confiado en mí siempre.

A mi amiga Karen Cáceres, quien ha sido uno de los mayores apoyos para iniciar este camino.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre: Nasly Dayana Parra Rodríguez

Fecha de nacimiento: 18 de septiembre de 1994

Lugar de nacimiento: Aguazul, Casanare, Colombia

CURP: PARN940918MNERDS00

Profesión: Ingeniero Agroforestal



Desarrollo académico

Bachillerato: Institución Educativa San Agustín

Pregrado: Fundación Universitaria Internacional del Trópico Americano Unitrópico.

Desarrollo profesional

Coordinador de proyectos de compensación, Asociación ALCEBA, Hatonuevo-La Guajira, Colombia

Profesional de apoyo, Fundación CATARUBEN, Yopal-Casanare, Colombia.

RESUMÉN GENERAL

El estudio se realizó en la cuenca del río Charte Casanare, Colombia, la cual se encuentra en un constante cambio debido a las intervenciones de tipo agrícola, pecuario y minero. El objetivo fue analizar el comportamiento de la escorrentía superficial y su impacto en la erosión del suelo utilizando el modelo hidrológico SWAT como base para la toma de decisiones. El primer paso fue la calibración y validación del modelo, existe una tendencia de respuesta entre las cantidades de escorrentía observadas y calculadas, como lo indican correlaciones de Pearson (r), de 0.89 en calibración y 0.75 en validación. El coeficiente de Nash Suttcliffe (NSE) alcanzó valores de 0.64 para el periodo de calibración, mientras que para el periodo de validación alcanzó un valor de 0.45; en cuanto al coeficiente de determinación R^2 , los valores de calibración y validación se encontraron en 0.78 y 0.56. Posteriormente se realizó la evaluación del comportamiento de la escorrentía y la sedimentación para una proyección futura desde 2020 a 2050. Para el periodo 1989 a 2019 los valores de escurrimiento desde los 0 a los 113.74 mm como promedio mensual, mientras que en la proyección varía de 48.92 a 135.03 mm. En el caso de la sedimentación los valores mínimos se encontraron en las 0 t ha⁻¹ para los dos periodos, el valor máximo simulado es de 166.62 t ha⁻¹, aumentando a 173.68 t ha⁻¹. La segunda fase correspondió a la determinación de las variaciones hidrológicas en la escorrentía superficial para poder definir si existe una relación de esta variable con la cobertura vegetal que predomina en la cuenca. Se usaron los datos provenientes de la modelación y mediante la herramienta de SWAT OUTPUT se realizó un análisis de escurrimiento durante un periodo de 2013 a 2019. Se correlacionó el Índice Normalizado de Vegetación de la cuenca (NDVI) proveniente de imágenes satelitales Landsat 8, las correlaciones entre estas dos variables fueron: 0.54, 0.66, 0.61, 0.60, 0.55 y 0.76 para los años 2013, 2014, 2016, 2017, 2018 y 2019, respectivamente, lo que significa que no existe una buena relación entre los datos de escorrentía y los índices de vegetación.

Palabras claves: cuenca hidrológica, escurrimiento superficial, sedimentación, modelación hidrológica, toma de decisiones

Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Nasly Dayana Parra Rodríguez.

Director de Tesis: Ignacio Sánchez Cohen

GENERAL ABSTRACT

The study was carried out in the Charate de Casanare river watershed, Colombia, which is constantly changing due to agricultural, livestock and mining interventions. The objective was to analyze the behavior of surface runoff and its impact on soil erosion using the SWAT hydrological model as a base towards decision making. The first step was the calibration and validation of the model. Good agreement existed between observed and computed runoff amounts as indicated by Pearson (r) correlations of 0.89 the calibration and 0.75 the validation. The Nash Suttcliffe coefficient (NSE) reached a value of 0.64 for the calibration period, while for the validation period, it reached a value of 0.45; regarding the coefficient of determination R^2 , the calibration and validation values were of 0.78 and 0.56, respectively. Projections of runoff and sedimentation was computed from 2020 to 2050. The initial simulation results range from 1989 to 2019 and runoff values from 0 to 113.74 mm per month, while for the projection it variate from 48.92 to 135.03 mm. In the case of sedimentation, the minimum values are found at 0 t ha^{-1} for the two periods, the simulated maximum value was 166.62 t ha^{-1} , increasing to 173.68 t ha^{-1} . The second step was to determine the hydrological variations in surface runoff and to find if there is a relationship of this variable with the prevailing soil cover of the watershed. SWAT OUTPUT hydrological model was used for performing a runoff analysis for the period 2013 to 2019. We correlated the Normalized Vegetation Index from Landsat 8 satellite images, the correlation coefficienten between these two variables were: 0.54, 0.66, 0.61, 0.60, 0.55 and 0.76 for the years 2013, 2014, 2016, 2017, 2018 and 2019, respectively, which indicate that there is not a good relationship between runoff data and vegetation indices.

Keywords: hydrological watershed, surface runoff, sedimentation, hydrological modeling, decision making.

Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Nasly Dayana Parra Rodríguez.

Director de Tesis: Ignacio Sánchez Cohen

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En la actualidad el planeta tierra enfrenta una acelerada transformación y degradación de sus ecosistemas, razón por la cual, a nivel mundial se diseñaron acuerdos políticos como el protocolo de Kioto, que surge como una alternativa a cada país para limitar y reducir las emisiones de gases efecto invernadero (UNFCCC, 2020). Otro acuerdo importante se firma en París y tiene por objetivo mantener un aumento de la temperatura debajo de los 2°C para este siglo (UNFCCC, 2012). Adicionalmente, se instauran los diecisiete objetivos de desarrollo sostenible que buscan exponer alternativas globales para solucionar problemas como la desigualdad, la pobreza, la degradación ambiental, los cambios en el clima entre otros (ONU, 2020).

Algunos de los objetivos mencionados corresponden al trece y quince “Acción por el clima” y “Vida de ecosistemas terrestres”, los cuales buscan brindar un manejo sostenible a las condiciones en los bosques, el suelo y sobre la biodiversidad para mejorar las prácticas de explotación de los recursos naturales, de esta manera se contribuye a la mitigación del cambio climático (PNUD, 2016). Para cumplir los objetivos anteriormente mencionados, se tiene dependencia de factores como la capacidad, el nivel de desarrollo y las políticas definidas para cada país (ONU, 2020) En el caso puntual de Colombia se tiene una política nacional de cambio climático (PNCC) encargada de promover acciones para mitigar los riesgos de este fenómeno sobre el entorno (Minambiente, 2021). Aunque Colombia ha mejorado algunos procesos normativos, sigue existiendo una gran presión sobre los recursos ambientales por razones antropogénicas.

Las actividades humanas tienen influencia directa o indirecta sobre la composición de la atmósfera y actúan sobre la variabilidad del clima (IPCC,

2007). Algunas de esas actividades son la quema de combustibles fósiles como (petróleo, gas, carbón) y la pérdida de cobertura boscosa (WWF, 2020). A esta última actividad de remoción de bosques, se le atribuyen aportes generados por la minería, la tala ilegal y en una proporción importante la agricultura y la ganadería (Sierra-Praeli, 2019).

En el caso de las intervenciones de tipo minero generalmente se realizan en función de la ganancia económica y no de la capacidad sostenible del entorno (Villar-Argaiz, 2014). Una de las actividades mineras que se desarrollan en una cuenca es la explotación de materiales de arrastre (Yépez-Heredia, 2015). Dichos materiales hacen parte del caudal sólido como gravas y arenas que se encuentran en el cauce, en las orillas, en las vegas o llanuras de inundación (ANM, 2021). En Colombia la explotación de material de arrastre predomina en áreas planas, donde se tienen sistemas de drenajes maduros, caso típico de los departamentos de Meta, Arauca, Vichada, Guainía, Amazonas y Casanare (ANM, 2021).

A nivel global se considera que la extracción de materiales se encuentra entre los 47 y 59 millones de toneladas (Steinberger et al., 2010), además con el informe de arena y sostenibilidad, se indica que el consumo anual de materiales de arrastre equivale al doble de la cantidad anual que producen los ríos (ANM, 2021). En el caso de Colombia y según datos reportados por la Agencia Nacional Minera se tienen 2.780 títulos para la extracción de materiales útiles para la construcción, de los cuales el 44% son explotaciones en canteras, el 37% a materiales de arrastre y el 19% a materiales de arrastre y canteras (ANM, 2021). De igual manera, se estima que en el departamento de Casanare se tienen reportes de 181 títulos mineros otorgados para la extracción de materiales de construcción, principalmente en los municipios de Aguazul, Yopal, Paz de Aripuro, Monterrey, Tauramena y Hato Corozal. Esta actividad genera el 88,64% de las regalías directas que se dan en el departamento de Casanare (ANM, 2017). En el caso de la cuenca del río Charte, que se encuentra ubicada en el

departamento de Casanare-Colombia, se adelantan procesos de extracción de material de arrastre, reportados por la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Yopal (EAAAY, 2010), donde predomina la extracción de materiales como gravas y arenas, que se consideran de buena estabilidad y excelente soporte para la construcción (UPME & UPTC, 2015). Adicionalmente en la cuenca se reporta un proceso de transición desde las coberturas naturales a coberturas impuestas por los pobladores: como cultivos, cereales y pastos. (ANLA, 2007).

Actualmente en la explotación de materiales se ha dado como respuesta al requerimiento de infraestructura que han tenido los municipios de Aguazul y Yopal en los últimos años. Lo que indica que el hombre modifica su entorno para adaptarlo constantemente en función de sus necesidades, haciendo uso de los recursos naturales disponibles (Minminas & UPTC, 2013). Es posible entender que existen transformaciones en las condiciones físicas y ambientales de la cuenca, razón por la cual se hace necesario el empleo de modelos hidrológicos que permitan realizar un análisis detallado de las condiciones del río, además son propicios para el manejo de hipótesis y la toma de decisiones en aspectos ambientales y sociales (IDEAM, 2018). Estos modelos evalúan aspectos físicos y químicos como la prevención y control de la erosión del suelo, además enfatizan en parámetros de contaminación hídrica y ayudan a entender la dinámica del cambio climático en la actualidad (Verenice, 2019).

Generalmente los modelos hidrológicos trabajan en asociación con los sistemas de información geográfica (SIG), ya que son una herramienta que ayuda a clasificar las características bióticas y físicas que consolidan el comportamiento de la cuenca (Sánchez-Cohen et al., 2015). Asimismo, se puede interpretar e ilustrar los efectos que tiene el uso de suelo y la variabilidad climática sobre las características de la superficie de la cuenca. Uno de los modelos que se usa en la actualidad, dada su gran aplicabilidad y precisión es la herramienta hidrológica SWAT, el cual es un instrumento para la evaluación del suelo y agua (Soil and

Water Assessment Tool), simula la calidad y cantidad de agua superficial o subterránea que se encuentra en interacción en la cuenca, asimismo permite predecir el impacto ambiental que ejercen las actividades antrópicas sobre un conjunto hidrográfico (Neitsch et al., 2010).

Para el funcionamiento de dicho modelo, se requieren insumos de entrada como: un modelo de elevación digital (DEM) para reconocer las características topográficas de la cuenca. También se requieren datos que describen las coberturas vegetales, el tipo de suelo que predomina y se necesita un conjunto de datos climáticos que describan el comportamiento de las variables de precipitación y temperatura entre otras (Neitsch et al., 2010). En general el modelo hidrológico SWAT es capaz de valorar y cuantificar los impactos generados por las actividades, cambios o perturbaciones humanas, de igual manera permite ejemplificar las variaciones climáticas en función de la escala global. Con esta metodología se busca apoyar la investigación en la cuenca del río Charte, con la finalidad de entender cuáles son los efectos que tienen las actividades de extracción de material de río, sobre el deterioro de la capacidad de resiliencia de la cuenca. Además, se proyecta para conocer los parámetros que influyen en la determinación de impacto físico que podría atravesar el río con el pasar de los años. Finalmente es una excelente herramienta para la toma de decisiones alrededor de la estabilidad de la cuenca.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Evaluar el impacto físico en la cuenca del río Charte, mediante el uso del modelo hidrológico SWAT.

1.2.2. Objetivo Especifico

- Calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT para evaluar el comportamiento de la escorrentía superficial en la remoción y deposición de sedimentos en la cuenca del río Charte.
- Determinar las variaciones hidrológicas en la escorrentía superficial y su relación con la cobertura vegetal de la cuenca del río Charte.

1.3. HIPOTESIS

Ha: La explotación de material del Río Charte incrementa de manera significativa el impacto físico en términos de arrastre y deposición de sedimentos.

1.4. REVISIÓN DE LITERATURA

1.4.1. Cuenca hidrográfica y sus características.

Las cuencas son consideradas las unidades mínimas de preservación y conservación que mantienen el desarrollo sostenible de los ecosistemas naturales, y tienen por objetivo de alcanzar el equilibrio ambiental y social (Ordóñez, 2011). Desde una perspectiva geomorfológica, las cuencas son áreas donde se escurre o concentra el agua desde las partes altas hacia un mismo punto de salida (IMTA, 2019). Además, las cuencas aportan en grandes procesos como el abastecimiento y cantidad de agua dulce, la regulación climática, con el proceso de evapotranspiración que ocurre en la cuenca, se apoya el balance hídrico (Ordóñez, 2011). Las cuencas pueden dividirse en parte alta, media y baja, en la zona alta se encuentra el área montañosa o cabecera que delimitan el inicio de la cuenca, en la zona media se concentra la mayor proporción de agua reuniéndose en un mismo cauce. Finalmente, en la cuenca baja es posible encontrar que el agua tiende a ubicarse en pequeños depósitos ya que el caudal tiene menor velocidad y se deposita en otras fuentes (Ordóñez, 2011)

Se puede considerar que las cuencas son áreas en las que existe una interacción

y dependencia con los distintos sistemas físicos y biológicos. Se entiende que cualquier cambio abrupto o modificación que surge en las zonas altas tiene una consecuencia directa en la cuenca baja. Por esta razón las actividades de manejo en las cuencas deben ocupar un renglón de importancia a la hora de la toma de decisiones, ya que involucran a las comunidades que habitan la zona y sirven como apoyo para la generación de políticas ambientales que se mantienen en función de los avances gubernamentales y los esquemas nacionales que se han trazado para cada región.

1.4.2. Problemáticas de las cuencas.

Como se mencionaba anteriormente las cuencas son espacios en los que ocurren distintos procesos de tipo ambiental, económico y social que influyen en la estabilidad de una cuenca. Al evaluar las intervenciones que ocurren en el componente ambiental, es posible observar que existen actividades como la deforestación, que ocasiona remoción o pérdida de la cobertura vegetal nativa. Estos cambios de vocación del suelo son originados por acciones como la tala especies arbóreas para la venta de madera, la implementación de sistemas de explotación y producción de recursos naturales, la ampliación de la frontera agrícola, para cumplir con la gran demanda de productos, la siguiente actividad que se encuentra contribuyendo al fenómeno de deforestación es la ganadería, ya que requiere grandes áreas para alcanzar su producción. Según cifras proporcionadas por (IDEAM & Minambiente, 2021 como se citó en Lizarazo, 2022) la tasa de deforestación en Colombia aumentó 1,5% perdieron más de 174.000 hectáreas de bosques.

La actividad económica tiene efectos importantes en el medio ambiente, ya que para ejecutarse requiere cumplir con algunos patrones de producción que dependen exclusivamente del aprovechamiento de los recursos naturales y energéticos (Martinez & Roca, 2001 como se citó en Monroy-Ortiz, 2013). Otro de los componentes que se ve afectado de manera significativa es el social, es posible identificar que gran parte de las poblaciones se concentran en zonas de

alto riesgo o dentro de las márgenes de protección de la cuenca, que a su vez estos asentamientos impactan de manera significativa en parámetros de calidad y cantidad de recurso hídrico. Este fenómeno ocurre porque las comunidades desconocen el funcionamiento del sistema hidrológico ni de su balance hídrico. Gran parte de todas estas actividades han desencadenado la sobreutilización de los suelos e incurre en la deficiencia de prácticas ambientales. Esto desencadena inconvenientes relacionados con las emisiones de gases efecto invernadero y en general se lleva a cabo por las transformaciones que se dan en la cubierta terrestre, de esta manera se apoya el cambio climático (IPCC, 2007 como se citó en Monroy-Ortiz, 2013)

1.4.3. Modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones.

En la actualidad se conoce a los modelos de simulación como una alternativa que permite considerar el estado inicial de un sistema, que posteriormente se brindará una evaluación del estado ambiental y ecológico al que estará expuesto dicho sistema.

Modelos de simulación

Se considera que un modelo es la representación simple de un sistema, en el que se tienen en cuenta variables dependientes e independientes que tienen una misma característica de interés. Los modelos pueden ser descriptivos cuando solo permiten identificar los componentes que conforman el sistema, o pueden ser de simulación cuando se copia el proceder del sistema, para generar una serie de datos que permiten generar predicciones (Martínez et al., 2011). Cuando se habla de un modelo de simulación se entiende como un conjunto de aplicaciones matemáticas que se rigen por distintas ecuaciones y a su vez representan una serie de procesos o variables que tienen una relación para explicar la ocurrencia de fenómenos del mundo real. Estos datos finalmente proporcionan indicios para entender el comportamiento de las variables que se

encuentran en análisis (Perez-Maqueo et al., 2005).

Este tipo de modelos son muy útiles en la búsqueda de un manejo de los recursos naturales o de una producción agrícola eficiente y sustentable. Además, los modelos apoyan la toma de decisiones ya que permiten entender la ocurrencia de los fenómenos y enfatizan sobre las soluciones a las que se podría enfrentar para mejorar la situación actual.

Tipos de modelos

Existen tipos de modelos como el estático, el dinámico, determinístico y el estocástico estos se encuentran determinados por las capacidades, la dinámica y la interacción de los componentes (Martínez et al., 2011; Quinteros et al., 2006). El modelo estático comprende un sistema en el que no se involucra al tiempo, normalmente se usan para describir sistemas estacionarios o en estado de equilibrio, donde la salida no cambia siempre y cuando la entrada sea permanente (Fritzon, 2015). A diferencia del modelo estático el dinámico si incluye el tiempo, lo que indica que las variables que se encuentran en análisis mantienen una relación directa o indirecta en función del tiempo, este tipo de modelos son muy útiles a la hora de encontrar soluciones a las problemáticas de tipo biológico (Fritzon, 2015). Seguidamente se tienen modelos del tipo determinísticos, estos se rigen de una manera probabilística, en el que los datos de entrada son especificados inicialmente y no se tiene influencia en el azar (Martínez et al., 2011), este tipo de modelo es muy usado en procesos industriales. Finalmente se consideran los modelos de tipo estocástico, estos tienen en cuenta que al menos una de las variables que se encuentra en estudio tiene un comportamiento aleatorio y que el resultado esperado mantiene algo de variabilidad respecto al tiempo (Martínez et al., 2011).

Modelo hidrológico

Un modelo hidrológico se puede definir como una representación simplificada de una condición del mundo real, que permite generar una idea de lo que ocurre en la naturaleza, es una herramienta primordial en la gestión sostenible de cuencas, para ello se discretiza la información en unidades de respuesta hidrológica (HRU) que son pequeñas áreas de la cuenca que comparten una misma información de tipo de coberturas, tipo de suelo y que por esta información se origina una respuesta hidrológica que se traduce en volumen de escurrimiento y sedimentación (Pascual Aguilar & Díaz Martín, 2016). De esta manera es posible considerar que la modelación hidrológica es fundamental para lograr la gestión sostenible de las cuencas y el mejor manejo del recurso hídrico que se encuentra disponible (Ocampo & Upegui, 2014). Como se mencionó anteriormente estos modelos requieren una entrada de datos, que ayuden a parametrizar la composición y ubicación de las distintas coberturas y su relación con los tipos de suelos. A su vez dichas áreas tienen una influencia directa por parte de los cambios meteorológicos, como la precipitación, temperatura, que influyen directamente para la generación de las salidas del modelo (IDEAM, 2018)

Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

El modelo SWAT está facultado para realizar una evaluación del suelo y agua para una cuenca hidrográfica. El modelo fue desarrollado a inicios de los 90 por el Servicio de Investigación en Agricultura (ARS) para el departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA y contó con el apoyo de la Universidad de Texas (Neitsch et al., 2010). Es un modelo semidistribuido de dominio público, diseñado para predecir el impacto de diversas prácticas de manejo del suelo sobre la hidrología, los sedimentos y el transporte de contaminantes agrícolas en cuencas grandes y complejas (Zambrano-Bigiarini, 2015)

Para su ejecución requiere información acerca de parámetros cartográficos como un modelo de elevación digital, tipos de suelos, tipo de vegetación o cobertura predominante en el área de estudio, información climática de temperatura y precipitación, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento (Neitsch et

al., 2010). Estos datos son los archivos de entrada para comprender el proceso de simulación de una cuenca. El modelo contempla los siguientes elementos: hidrología de la cuenca teniendo en cuenta producción de sedimentos y calidad del agua, también simula el transporte y el destino de los nutrientes y pesticidas, simula el proceso de erosión de suelos en las corrientes de agua y permite entender la influencia de las actividades agrícolas e industriales en las cuencas (Arroyo et al., 2010). El modelo SWAT se basa en un balance hídrico que permite determinar la entrada, la salida y el almacenamiento de agua en la cuenca; este proceso se lleva a cabo por unidades de respuesta hidrológica (HRU) que se obtienen de la relación existente entre los diferentes tipos de suelo y la cobertura predominante (Hidrochep, 2008)

Antecedentes y aplicaciones del modelo SWAT

El SWAT es un modelo que se usa para simular la hidrología y entender el comportamiento del parámetro de calidad de agua de una cuenca (Uribe et al., 2013).

El anterior concepto se evidencia en investigaciones como la realizada por Hurtado-Pidal & Yáñez-Borja, (2015), donde se usó el modelo SWAT a la cuenca del río las Juntas ubicado en Ecuador. Esta investigación tiene el objetivo determinar la cantidad de escurrimiento superficial que se estaría generando en la cuenca, también conocer las áreas con prioridad para regenerar ecosistemas, apoyar el manejo de las cuencas y minimizar los problemas de sedimentación. Oñate & Aguilar, (2017) implementaron el modelo SWAT a la cuenca del río Catamayo ubicado entre Ecuador y Perú. Buscaba estimar los caudales y sedimentos que se estarían generando en la cuenca alta cuando se tienen diferentes coberturas, ya que su presencia o ausencia repercute sobre la producción de caudal y sedimento. Valverde-Gamboa, (2018) nuevamente considera la relación de la cobertura vegetal sobre el escurrimiento de agua y sedimentos, en este caso se planteó la simulación bajo dos escenarios, uno con un suelo desnudo y el segundo donde si existe algún tipo cobertura. En el caso

del parámetro de escurrimiento tuvo un aumento de 1,30 % al escenario uno, mientras al escenario dos el valor alcanzó un 0,69%. Para el parámetro de sedimentación el primer escenario se tuvo un aumento de 2,80% mientras que el escenario 2 en 1,95%.

Otra de las aplicaciones que tiene bastante relevancia para el modelo SWAT se refleja en trabajos como el realizado por Osorio Cardenas & Cerquera Matinez, (2020) donde concluyeron que el modelo SWAT presenta muchas ventajas para simular el transporte de pesticidas en las cuencas hídricas, sin embargo el modelo no contempla otras maneras de aspersion, limitándose para la resolución de grandes problemas. Bautista-Ávalos et al., (2014) nuevamente implementa el modelo para evaluar la proporción de contaminantes o residuos de fertilizantes, plaguicidas y herbicidas que se desplazan en el agua. Concluyendo que las concentraciones son mayores en los escenarios donde se llevan a cabo más aplicaciones, siendo un indicativo del uso excesivo e ineficiente de este tipo de productos.

De igual manera Narváez et al., (2019) evaluó el comportamiento del nitrógeno y fósforo en la cuenca del río Coca ubicada en Ecuador, bajo tres escenarios de diferentes coberturas, encontrando que la implementación de sistemas silvopastoriles y áreas de restauración contribuyen a mejorar la calidad del agua. Otro trabajo fue realizado por Gelos, (2020) quien planteó la evaluación del destino de los plaguicidas como glifosato y clorpirifos, bajo diferentes escenarios de aplicación y reducción. Otra investigación que demuestra la gran importancia que tiene el modelo para apoyar la resolución de problemas complejos es adelantada por Shinde et al., (2017) donde se analizó el comportamiento hídrico cuando se tienen procesos de minería a cielo abierto, donde se entiende que este tipo de actividad aumenta el transporte de sedimentos, nutrientes y minerales a otros cuerpos de agua que resultan contaminados. Desde una perspectiva social, el modelo ha sido implementado para apoyar la planificación del uso del agua a nivel de cuencas, ya que permite ayudar en la toma de decisiones mejorando el

proceso de gestión. Este modelo se implementó en la cuenca Santa Lucía en Uruguay, como parte de un proyecto piloto para mejorar los procesos de gestión hídrica (Alonso, 2019). Estas son algunas de las investigaciones que ha implementado el SWAT como un modelo importante en la resolución de problemáticas relacionadas con la pérdida de cobertura boscosa y su influencia en el aumento del escurrimiento. Además, trabaja para encontrar los fenómenos de contaminación a los que se encuentran expuestas muchas cuencas. Dichas actividades corresponden a un indicativo en el que el humano mantiene la responsabilidad directa sobre la disposición que se le da a los recursos naturales.

Calibración y validación

Una vez generado el proceso de alimentación de toda la información cartográfica que requiere el modelo, se debe cumplir con una fase de calibración y validación. El primer proceso consiste en realizar un ajuste en determinadas variables: Evapotranspiración actual y potencial, escurrimiento superficial, tiempo de concentración, disponibilidad de agua en el suelo, agua subterránea, flujo lateral, erosión de sedimentos, ciclos de nutrientes y contaminantes en el agua (Neitsch et al., 2010). A su vez estos grandes grupos se encuentran conformados por bastantes parámetros, que pueden tener variaciones en función de las características climáticas, edafológicas y paisajísticas que tiene cada cuenca, además poseen una relación directa con el problema que se presenta en la cuenca de estudio. Los parámetros evalúan la efectividad que tiene el modelo para representar la condición actual en la cuenca (Ochoa et al., 2017). También es posible detectar que en el proceso de calibración se tienen parámetros que se valoran con una sensibilidad alta, media y baja, dependiendo de la magnitud del cambio que generan en la salida del modelo. Como se había mencionado, la sensibilidad depende de cada cuenca.

Algunos estudios reportan que parámetros como la curva numérica, el factor de la base del caudal, el periodo de retardo de las aguas subterráneas, el umbral de

profundidad del agua en el acuífero y la capacidad disponible del agua en el suelo, son parámetros que presentan mayor sensibilidad a cada una de las interacciones o combinaciones que se realizan (Jodar-Abellan et al., 2018, Ochoa et al., 2017). Esto permite dar a conocer que el análisis de sensibilidad y los parámetros que se encuentran en observación, son independientes a cada cuenca y aún más del problema que se esté analizando. Entonces no existe una lista cerrada de parámetros que funcione en todos los casos.

Posteriormente, para cumplir con el proceso de validación se procede a identificar la precisión que tiene el modelo para ajustarse a la realidad de la cuenca. En este espacio, se realiza una comparación de variables que tienen datos de observaciones reales, por ejemplo: estimaciones de caudales, estimación de sedimentos, entre algunas otras. Estos datos son evaluados con algunas técnicas estadísticas que permiten determinar la precisión del modelo al enfrentarse con datos observados. Entre las técnicas estadísticas más utilizadas en la hidrología, se tiene en cuenta parámetros como coeficiente Pearson (r), coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación (R²) (Moriasi et al., 2007).

Nash-Sutcliffe (NSE)

Este coeficiente mide la variabilidad de las observaciones consiste en evaluar el poder del modelo hidrológico, teniendo en cuenta en la comparación del caudal simulado con la variación de los datos del caudal observado (Murcia-Coy, 2017), (Ecuación 1).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{observacion} - Q_{simulacion})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{observacion} - Q_{promedio})^2} \quad (1)$$

Al medir la variabilidad de las observaciones, se debe tener en cuenta los siguientes valores:

Cuadro 1. Valores de ajuste para el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE).

NSE	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Coeficiente de determinación (R²)

El coeficiente de determinación corresponde a la determinación de la varianza total de la variable que explica la regresión, (Ecuación 2). El coeficiente oscila entre 0 y 1, entre más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que se trata de explicar. Mientras que, entre más cerca de cero se encuentre el coeficiente, el modelo presenta menos ajuste (Carranza, 2018)

$$R^2 = \frac{\Sigma[(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 * (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2]}{\Sigma(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 * \Sigma(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (2)$$

Coeficiente de Pearson

Es un coeficiente numérico muy usado para medir la correlación entre dos variables. Dicho coeficiente se mide en una escala de 0 a 1, en tanto dirección positiva como negativa. Un valor de 0 significa que no existe una relación lineal entre las variables, si se obtiene el valor de 1 se indica una correlación positiva o negativa perfecta entre las dos variables, se expresa en la Ecuación (3), (Abbaspour, 2015; Arnold et al., 2012; Moriasi et al., 2007; como se citó en Cruz-Gonzalez, 2020)

$$r = \frac{[\Sigma(Q_{obs} - Q_{obs,m})^2 * (Q_{sim} - Q_{sim,m})^2]}{[\Sigma(Q_{obs} - Q_{obs,m})^2] * [\Sigma(Q_{sim} - Q_{sim,m})^2]} \quad (3)$$

Donde Q_{obs} corresponde al flujo observado ($m^3.s^{-1}$), Q_{sim} es el flujo simulado ($m^3.s^{-1}$), $Q_{obs,m}$ es la medida de flujo observado ($m^3.s^{-1}$) y $Q_{sim,m}$ es la medida del flujo simulado ($m^3.s^{-1}$)

1.5. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs*. https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf
- ANM (Agencia Nacional Minería) 2017. *Caracterización de la actividad minera departamental*.
- Alonso, J. (2019). *Experiencia del grupo interdisciplinario de SWAT en Uruguay: Proyecto piloto para el apoyo de la gestión de los recursos hídricos en la subcuenca del río Santa Lucía*. https://www.saltogrande.org/jece/presentaciones/05-Alonso_2019-11-28-SWAT-JornadaSaltoGrande_v3.pdf
- ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales). 2007. *Reporte sobre la cuenca del río Charte*. http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/biblioteca_web_anla_pdf/reporte_sobre_la_cuenca_del_rio_charte.pdf
- ANM (Agencia Nacional Minería) 2021. *Guía de buenas prácticas para la Exploración y estimación de recursos y reservas de materiales de arrastre*. <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/guia-materiales-de-arrastre.pdf>
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). *Soil & Water Assessment Tool*.
- Arroyo, L., Heidinger, H., & Araya, E. (2010). *Modelo Hidrológico SWAT como herramienta para procesos de toma de decisión. Documento Técnico N14. Área Evaluación de Tierras*. 31. <http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/08/00398-folletomodelohidrologicoswat.pdf>
- Bautista-Ávalos, D., Cruz-Cárdenas, G., Moncayo-Estrada, R., Silva García, J. T., & Estrada-Godoy, F. (2014). Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(3), 263–274. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n3/v30n3a3.pdf>
- Carranza, J. (2018). *Modelación Hidrológica Semi-distribuida en la cuenca alta del río Tercero (Río Ctalamochita, Córdoba) Mediante el modelo SWAT*. https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/11359/Práctica_Supervisada-Josefina_Carranza.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cruz-González, A., Sánchez-Cohen, I., Macías-Corral, M. A., Velásquez-Valle, M. A., & Trejo-Calzada, T. R. (2021). Hydrologic modeling to measure the impact of climate change in the Yaqui River basin. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(1), 77–94. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.02.040>
- EAAAY. (Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Yopal) 2010. *Fuentes*

Abastecedoras.

- Fritzson, P. (2015). Introducción al Modelado y Simulación de Sistemas Técnicos y Físicos con Modelica. In 09-14. <http://liu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A853769&dswid=-1517>
- Gelos, M. (2020). *Modelación SWAT Evaluación del destino ambiental de plaguicidas.* https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/SWAT_FINAL_Informe sobre la modelacion de plaguicidas en la Subcuenca 60 del Arroyo Santa Lucía con SWAT.pdf
- Hidrochep. (2008). *Caja de herramientas de Hidrología para POMCAS.* <https://sites.google.com/site/hydrotoolbox/herramientas/borrador-herramientas/swat>
- Hurtado-Pidal, J., & Yáñez-Borja, D. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del Río Las Juntas. *Revista Geoespacial*, 12(November), 106–122. <https://bit.ly/3kmttll>
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2018. *Modelación Hidrológica.* <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica#:~:text=En la actualidad%2C con el,torno a los ríos o>
- IMTA. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2019. *¿Que es una cuenca?* <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- IPCC. (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007. *Cambio climático 2007: impacto, adaptación y vulnerabilidad.* <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-sp.pdf>
- Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240–253. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>
- Lizarazo, P. (2022). *La deforestación en Colombia sigue aumentando. ¿Qué errores se están repitiendo?* <https://www.elespectador.com/ambiente/amazonas/la-deforestacion-en-colombia-sigue-aumentando-que-errores-se-estan-repitiendo/>
- Martínez, B. C., Rosado, O. R., López, F. G., Hernández, P. P., Becerra, Á. M., & Villamil, L. V. (2011). Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), 999–1010.
- Minambiente. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). 2021. *Hoy Colombia está más preparada frente a la lucha contra el cambio climático.* <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/3805-hoy-colombia-esta-mas-preparada-frente-a-lucha-contra-el-cambio-climatico>
- MINEM. (Ministerio de Minas y Energía) & UPTC. (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia). 2013. Explotación de materiales de construcción: Canteras y material de arrastre. *Ministerio de Minas y Energía*, 56. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/169095/EXPLORACION+DE+MATERIALES.pdf/fc129902-1523-4764-9a05-755e3bb7896e>
- Monroy-Ortiz, R. (2013). *Los sistemas urbanos de cuenca en México .*

- Transitando a estrategias integrales de gestión hídrica. xiii.*
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-84212013000100006
- Moriasi, D. ., Arnold, J. ., Van Liew, M. ., Bingner, R. ., Harmel, R. ., & Veith, T. . (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
<https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf>
- Moriasi, D., Arnold, J., & Liew, M. W. Van. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. May 2014. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Murcia-Coy, L. C. (2017). AJUSTE Y VALIDACIÓN DEL MODELO PRECIPITACIÓN – ESCORRENTÍA GR2M APLICADO A LA SUBCUENCA NEVADO. *Revista Ingenio Magno*.
- Narváez, M., López, C., Reinoso, I., & Minaya, V. (2019). Modelación de nutrientes y evaluación de uso de suelo usando la herramienta de agua y suelo (SWAT), Caso de estudio: Cuenca del Río Coca. *Revista Hidrolatinoamericana de Jovenes Investigadores y Profesionales.*, 3. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/348/3481847004/3481847004.pdf>
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., & Williams, J. . (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resources Institute*, 1–647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2010). (*Soil and Water Assessment Tool*) *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*. <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Ocampo, O. L., & Upegui, J. J. V. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña : caso del Río Chinchiná Comparative analysis of continuous simulation hydrological models in high-mountain watersheds: Chinchiná River case. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, 14(36), 119. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-018-1104-8>
- Ochoa, C. G., Cazenave, G., Amábile, G. V., & Collazos, G. (2017). *Empleo del modelo hidrológico SWAT en regiones de llanuras . Aplicación en una cuenca rural , arroyo Santa Catalina , Prov . de Buenos Aires*. 1–10.
- Oñate, F., & Aguilar, G. (2017). *Aplicación Del Modelo Swat Para La Estimación De Caudales Y Sedimentos En La Cuenca Alta Del Rio ...* May, 11. https://www.researchgate.net/publication/237734865_APLICACION_DEL_MODELO_SWAT_PARA_LA_ESTIMACION_DE_CAUDALES_Y_SEDIMENTOS_EN_LA_CUENCA_ALTA_DEL_RIO_CATAMAYO
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2020. *Objetivos y Metas del Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Ordóñez, J. (2011). ¿ Qué Es Cuenca Hidrológica ? In *Sociedada Geológica de Lima* (Vol. 1). http://www.gwp.org/Global/GWP-SAM_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf
- Osorio Cardenas, K. R., & Cerquera Matinez, N. (2020). Modelo SWAT para

- simular el transporte de agroquímicos en cuencas hidrográficas [Universidad de Antioquia Facultad de ingeniería, Escuela ambiental, Especialización en manejo y gestión del agua]. In *Universidad de Antioquia*. http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14985/10/CerqueraNataly_2020_ModeloTransporteAgroquimicos.pdf
- Pascual Aguilar, J. A., & Díaz Martín, M. (2016). Guía Práctica sobre la Modelización Hidrológica y el Modelo HEC-HMS. In *Información tecnológica* (Vol. 29, Issue 4, pp. 143–156). https://www.agua.imdea.org/sites/default/files/pdf/news/20161215/Cuadernos de Geomática 4_b.pdf
- Perez-Maqueo, O., Delfín, C., Fregoso, A., Cotler, H., & Equihua, M. (2005). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Smart Structures and Materials 1999: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 3674, 329–340. <https://doi.org/10.1117/12.351569>
- PNUD. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2016. *Objetivos de Desarrollo Sostenible/ Antecedentes*. <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/background/>
- Quinteros, M., Alonso, A., Escudero, L., Guignard, M., & Weintraub, A. (2006). Una aplicación de programación estocástica en un problema de gestión forestal. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 20, 67–95. http://www.dii.cl/~ris/RISXX/MQuinteros_RIS.pdf
- Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., Esquivel-Arriaga, G., Bueno-Hurtado, P., & Pedroza-Sandoval, A. (2015). Minimum hydrologic characterization for research in experimental watersheds with limited availability of information in arid lands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XIV(2), 185–208. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2015.07.007>
- Shinde, V. T., Tiwari, K. N., Nandgude, S. B., & Singh, M. (2017). Water Quality Assessment and Application of SWAT Model for Hydrologic Simulations in a Mined Watershed. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 5(2), 111. <https://doi.org/10.5958/2320-642x.2017.00012.6>
- Sierra-Praeli, Y. (2019). “La primera causa de deforestación es la expansión agrícola y ganadera” | Entrevista a Hivy Ortiz. <https://es.mongabay.com/2019/10/hivy-ortiz-bosques-fao/>
- Steinberger, J. K., Krausmann, F., & Eisenmenger, N. (2010). Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. *Ecological Economics*, 69(5), 1148–1158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.12.009>
- UNFCCC. United Nations climate changes. (2020). *Acuerdo histórico sobre el cambio climático en París*. <https://unfccc.int/es/news/final-cop21>
- UPME. (Unidad de Planeación Minero Energética) & UPTC (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia). 2015. *INFORME RÍO CHARTE, DEPARTAMENTO DE CASANARE* (Issue 6).
- Uribe, N., Quintero, M., & Valencia, J. (2013). *Aplicación Del Modelo Hidrológico Swat (Soil and Water Assessment Tool) a La Cuenca Del Río Cañete (Swat*

-). [https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/107463/Segundo Informe_SWAT 2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/107463/Segundo_Informe_SWAT_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Valverde-Gamboa, E. (2018). *Producción De Agua Y Sedimento Actual Y Futuro a Partir De Cambios De Cobertura Forestal, Sector Prusia , Parque Nacional* [Instituto Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10335/modelacion_hidrologica_cuantificar_produccion_agua_sedimento_actual_futuro_a_partir_cambios_cobertura_forestal_sector_prusia_parque_nacional_volvan_irazu.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Verenice, E.-R. (2019). *IMPLICACIONES Y APLICACIONES DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN CUENCAS (I)*. <https://remexcu.org/index.php/blog/188-implicaciones-y-aplicaciones-de-la-modelacion-hidrologica-en-cuencas-i>
- Villar-Argaiz, D. (2014). La minería como “locomotora” de la economía colombiana y su costo ambiental. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 3, 27. <http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v27n3/v27n3a1.pdf>
- WWF. (World Wildlife Fund INC). 2020. *Cambio climático y energía*.
- Yépez-Heredia, M. (2015). *LOS RECURSOS NATURALES Y EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRAFICAS*. [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8749/LOS RECURSOS NATURALES Y EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/8749/LOS_RECURSOS_NATURALES_Y_EL_MANEJO_DE_CUENCAS_HIDROGRAFICAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Zambrano-Bigiarini, M. (2015). *MODELO SWAT 2012: Descripción, aplicaciones y un ejemplo en Chile*. 1–47.

CAPITULO II

Simulación hidrológica aplicando el modelo SWAT a la cuenca del Río Charte Casanare-Colombia

2.1. RESUMEN

La mayoría de las cuencas hidrográficas, presentan intervenciones por actividades antropogénicas como la ganadería y agricultura. En la cuenca del Río Charte de Casanare en Colombia, se tienen reportes de cultivos como la palma africana y el arroz que son predominantes; además de actividad extractiva minera. Este estudio se realizó en Colombia, exactamente en la cuenca del río Charte en el departamento de Casanare. El principal objetivo de este estudio es evaluar la escorrentía superficial y su impacto en la erosión del suelo utilizando el modelo hidrológico SWAT. La evaluación se realizó en dos periodos uno retrospectivo durante 1989-2019 y otro prospectivo simulado durante el periodo de 2020-2070. Para el primer periodo de evaluación los escurrimientos oscilaron entre 0 a 113.74 mm, mientras que en el segundo periodo se obtuvieron valores mínimos de escurrimiento de 48.92 a 135.03 mm. Para la erosión del suelo se obtuvieron valores mínimos 0 t ha⁻¹ para los dos periodos, mientras que el valor máximo oscilo entre 166.62 y 173.86 t ha⁻¹. Estos datos se cartografiaron, lo cual permitió identificar las zonas de alto riesgo y la necesidad de diseñar estrategias de mitigación por el impacto ambiental en el área de estudio.

Palabras clave: cuenca, escurrimiento superficial, sedimentación, modelación hidrológica, toma de decisiones.

ABSTRACT

Most of the hydrographic watersheds present interventions by anthropogenic activities such as livestock and agriculture. In the Charte of Casanare River Watershed in Colombia, there are reports of crops such as African palm and rice, which are predominant; in addition to extractive mining activity. The objective of this study was to assess surface runoff and its impact on soil erosion SWAT hydrological model. The evaluation was carried out in two periods, one of a retrospective type during 1989-2019 and another of a simulated prospective type during the period of 2020-2070. For the first evaluation period, runoff amounts ranged from 0 to 113.74 mm, whereas in the second period minimum runoff values of 48.92 to 135.03 mm were obtained. For soil erosion, minimum values of 0 t ha⁻¹ were obtained for the two periods, while the maximum value ranged from 166.62 to 173.86 t ha⁻¹. These data were mapped, which made it possible to

identify high-risk areas and the need to design mitigation strategies for preventing environmental impacts in the study area.

Keywords: basin, surface runoff, sedimentation, hydrological modeling, decision making.

2.2. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para alcanzar el desarrollo ambiental y socioeconómico en una sociedad. Los seres humanos hacen uso constante de este recurso, para apoyar actividades importantes como la generación de energía, la producción de alimentos y la supervivencia de ecosistemas (ONU, 2021), que son la base para la sostenibilidad de otras especies de flora y fauna. Las cuencas hidrográficas son la principal fuente del recurso agua en los ecosistemas. La alteración de su condición de superficie, altera los procesos hidrológicos con impacto en la calidad y cantidad de agua. Estos territorios son considerados elementos trascendentes en la naturaleza, en la sociedad y la economía, ya que concentran gran parte de la oferta hídrica disponible (CEPAL, 2017). Además, las cuencas hidrológicas tienen un papel importante en el desarrollo económico, ya que ofrecen bienes significativos como el agua potable y la explotación de diversos minerales geológicos (Corpoboyaca, 2015), los cuales son importantes en el aprovechamiento industrial. Actualmente las cuencas están sujetas a cambios que repercuten en la degradación de sus características biofísicas, como la cobertura vegetal y el suelo, que se agravan cuando se toma en cuenta las variaciones que han surgido en los parámetros climáticos. Se tiene conocimiento que los cambios en la temperatura y precipitación tienen un impacto importante en la disponibilidad del recurso hídrico (Martínez & Patiño, 2012). Por tal razón, se generan variaciones en la intensidad, la distribución y frecuencia en que se desarrolla un fenómeno climático, que pueden ser conocidos como el niño y la niña, son fuentes de causalidad en las variaciones en el flujo superficial (Rochdane et al., 2012). La cobertura vegetal es un factor que cobra importancia para la cuantificación del flujo superficial en

una cuenca. La ausencia de cobertura disminuye la capacidad de infiltración del suelo, lo que permite aumentar los niveles de escurrimiento. El registro de un gran volumen de escorrentía, se generan cambios en el consolidado del suelo, dando origen a problemas de erosión, sedimentación y potencialmente la ocurrencia de fenómenos de inundación (Garcia-Aguirre, 2008). La pérdida de cobertura vegetal genera cambios en características del suelo que, aunado a la actividad antrópica se incrementa la presión sobre los recursos naturales y esto acelera el deterioro ambiental en la cuenca. Con base en lo anterior, es necesario generar alternativas tecnológicas que permitan mitigar el impacto ambiental, el cual se ha incrementado por efecto del cambio climático. El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es una herramienta que permite evaluar el riesgo de impacto del uso y manejo del suelo por eventos de tipo hidrológico. Existen numerosos estudios como los reportados por Barrios Alex & Urribarri Lisbeth (2010); Bautista-Ávalos et al. (2014); Oñate & Aguilar (2017); Torres et al. (2004) y; Weber & Baigorri Ocampo, (2019), donde el modelo fue calibrado y validado para determinar el escurrimiento superficial y los sedimentos que se pueden encontrar disueltos en el agua. En investigaciones realizadas por Francisco-Nicolás et al., (2010); Velasquez-Valle et al., (2017) se identificó el uso de la curva numérica para predecir el escurrimiento superficial en la cuenca. A su vez Diaz Carvajal & Mercado Fernández, (2017); Pacheco Moya et al., (2018) toman en cuenta la importancia de la curva numérica y enfatizan en la representación de esta con los sistemas de información (SIG) como una herramienta en la que se puede identificar las zonas propensas a escenarios de escorrentía y sedimentación. El objetivo de este estudio fue hacer un análisis histórico con datos observados y prospectivo con datos simulados, mediante el uso de modelo SWAT, que permita identificar escenarios pasados y futuros de escorrentía superficial y su impacto en la erosión del suelo para el diseño de estrategias de mitigación en la Cuenca del Río Charte en Casanare Colombia.

2.3.2. Caracterización topográfica

En el caso de la cuenca del río Charte se usó un modelo de elevación digital, disponible en la plataforma de la NASA, (2021), con una resolución de píxel de 30 m. La información indica que la cuenca tiene una altitud máxima de 3,245 msnm y una altitud mínima 147 msnm. Adicionalmente se realizó una caracterización de pendientes según lo indicado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014a)

Cuadro 2. Clasificación de pendientes en la cuenca del río Charte.

Tipo	Pendiente (%)	Área (Ha)	Relieve Y Localización
Escarpada	>50	9.80	Zona de montaña, ubica en la zona alta de la cuenca.
Quebrada	19 a 50	15,776	Zona de montaña, ubica en la zona alta y media de la cuenca.
Inclinada	8 a 18	15,841	Zona de piedemonte, es una zona de transición entre la parte alta y la zona de planicie.
Plana	0 a 7	58,894	Zona de llanura, corresponde a la zona baja, generalmente son áreas de sabanas inundables de llanuras extensas.

2.3.3. Caracterización hidrológica y climática

El departamento de Casanare cuenta con una extensa red hidrográfica. La cuenca del río Charte, se ubica en el área hidrográfica de la Orinoquia (3), en la zona hidrográfica del Meta (35), sobre la subzona hidrográfica del río Cusiana (3519) (IDEAM, 2013b). El río Charte tiene una extensión total de 163 km desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Cusiana (UPME & UPTC, 2015). Para la caracterización climática se tomaron en cuenta datos de temperatura y precipitación desde el año 1989 al 2019, para un conglomerado total de 30 años de cinco estaciones meteorológicas que se encuentran ubicadas en áreas cercanas no mayores a los 15 km tomados desde la divisoria de aguas de la cuenca. De estas cinco estaciones, dos de ellas son de tipo pluviométrico y las

tres restantes de tipo climático. Además, se tuvo presente una estación hidrométrica que proporcionó la información de caudal estimado para el río Charte.

Cuadro 3. Estaciones climáticas, pluviométricas e hidrométrica ubicadas en la cuenca del río Charte.

N°	Nombre Estación	Latitud (Y)	Longitud (X)	Elevación (msnm)
1	Corinto	5.407	-72.717	1.550
2	Pajarito	5.303	-72.702	842
3	Aguazul	5.177	-72.547	380
4	Aeropuerto	5.32	-72.388	325
5	Morro	5.453	-72.456	656
6	Puente Charte	5.256	-72.485	291

La siguiente figura, permite conocer el comportamiento promedio de la precipitación de 30 años, en las cinco estaciones que se encuentran dentro del área de la cuenca del río Charte. La temporada de lluvias se define durante los meses de mayo a septiembre, sin embargo, los niveles de precipitación para estaciones como Aeropuerto, Aguazul reportan menor precipitación que oscila entre los 10 mm hasta los 150 mm mensuales. En el caso de las estaciones del morro, pajarito y corinto el régimen de precipitación va desde los 350 mm hasta los 530 mm mensuales.

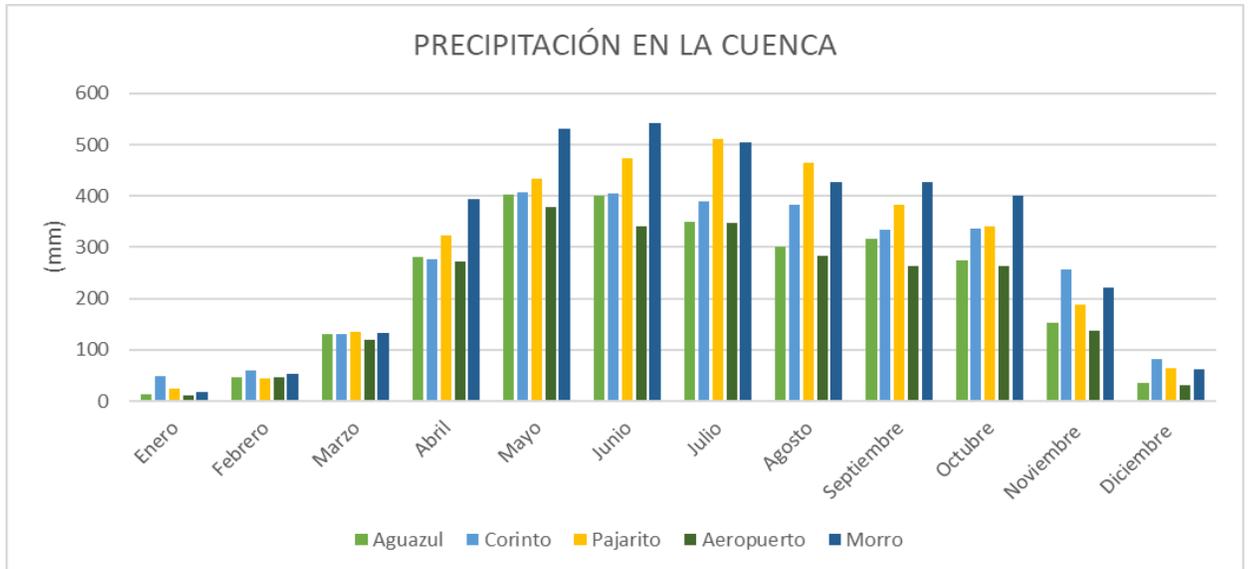


Figura 2. Promedio mensual de precipitación de cada estación ubicada en la cuenca del río Charte.

En el caso de la temperatura solo se obtuvieron datos de tres estaciones: aguazul, corinto y aeropuerto. La temperatura máxima se presentó en las estaciones de aeropuerto y aguazul, alcanzando valores máximos entre los 30°C a 35°C para los meses de enero, febrero, marzo, octubre, noviembre, diciembre, mientras que en la estación de corinto la temperatura máxima alcanza valores máximos entre 21°C a 26°C. La temperatura mínima se registró en las mismas estaciones, los valores mínimos se distribuyen de manera más uniforme. En el caso de la estación de corinto la temperatura mínima no supera los 16°C; para la estación Aguazul la temperatura oscila entre 21°C a 23°C, mientras que la estación aeropuerto oscila entre 23°C y 26°C

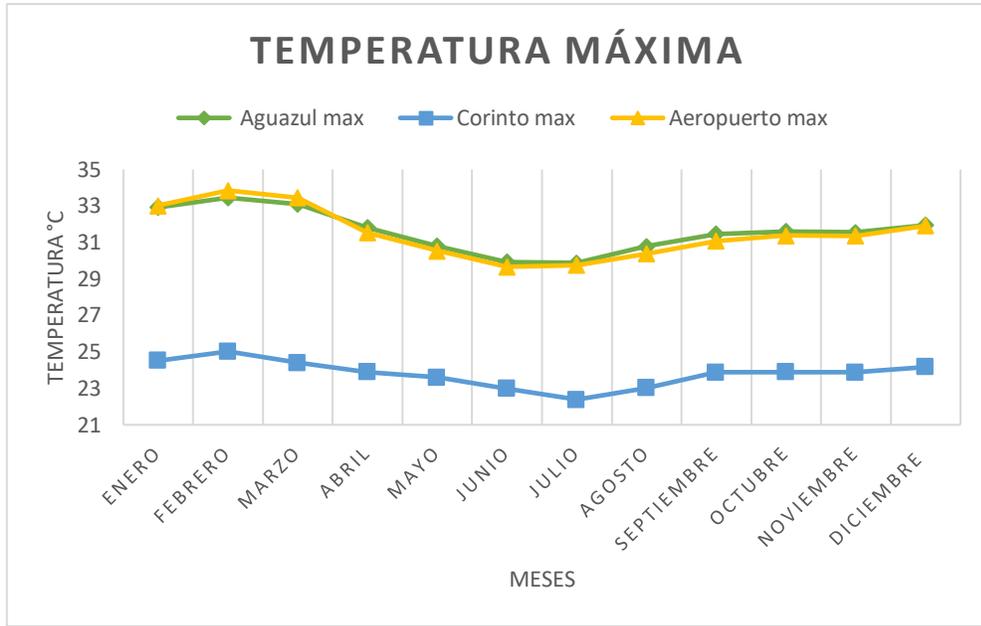


Figura 3. Promedio mensual de temperatura máxima de las estaciones ubicadas en cercanía a la cuenca del río Charte.

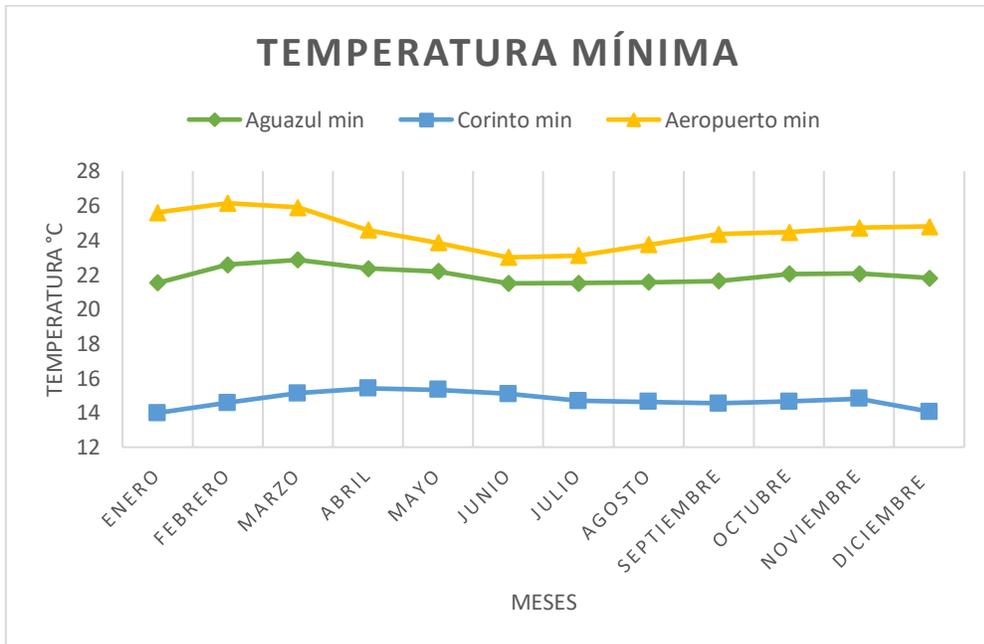


Figura 4. Promedio mensual de temperatura mínima de las estaciones ubicadas en cercanía a la cuenca del río Charte.

2.3.4. Caracterización de Suelo y Cobertura

Para lograr la caracterización del suelo se decidió trabajar con el estudio de suelo de la FAO/UNESCO a una escala de 1: 5000000. Para el ingreso de esta información al modelo se usó la base de suelos global de la FAO, con lo cual fue más sencillo la homologación de los datos. Otra de las características del suelo que tiene gran relevancia es el grupo hidrológico permite identificar el potencial de permeabilidad que tiene cada suelo: el grupo A tiene menor potencial de escorrentía, ya que predominan las áreas y gravas, un grupo B tiene un moderado potencial de escorrentía, mientras que el grupo C y D, tienen presentan mayor potencial de escorrentía ya que son suelos que tienen un alto contenido de arcillas (Ibáñez Asensio et al., 2011)

Cuadro 4. Tipos de suelos que predominan en la cuenca.

Grupo Hidrológico	Suelo Dominante	Símbolo	Descripción
C	Dystric Cambisols	Bd7-3d	Son suelos jóvenes, donde no se diferencian los horizontes; mantienen un bajo contenido de arcillas, y materia orgánica. Son ampliamente utilizados para la agricultura y el pastoreo.
C	Dystric Cambisols	Bd9-3c	Son suelos jóvenes, con depósitos aluviales, tienen una buena fertilidad ya que lo constituyen las vegas de inundación. Por esta razón son muy utilizados como áreas de cultivos.
C	Dystric Fluvisols	Jd13-3a	Son suelos jóvenes tiene composición rocosa y materiales no consolidados, predominan en zonas con terrenos elevados y con fuerte pendiente. Se

encuentran en zonas climáticas secas cálidas o frías, tienen disposición para la erosión.

C	Plinthic Acrisols	Ap12-3a	Suelos ácidos con baja saturación de bases, de topografía ondulada, predominan en zonas de clima húmedo tropical o templado, generalmente en zonas de sabana. Tienen un buen contenido de arcilla, son suelos cultivables bajo buenos planes de fertilización.
---	-------------------	---------	--

Para la caracterización de cobertura en la cuenca se adquirió información cartográfica proveniente de la plataforma del IDEAM a escala 1:100.000, esta información se maneja bajo la metodología Corin Land Cover adaptada a Colombia (IDEAM, 2010). En esta metodología se identifican 21 ítems considerados en cuatro categorías 1) territorios artificializados, 2) territorios agrícolas, 3) Bosques y áreas seminaturales, 4) Superficie con agua. Para el ingreso de estos datos al modelo SWAT se tuvo que realizar una reclasificación bajo una nomenclatura que considera el modelo y se define en la siguiente tabla.

Cuadro 5. Nomenclatura de suelo usada por el modelo SWAT

Simbología	Cobertura	Descripción del área
RNGE	Pastizales	Son áreas que se encuentran en constante transformación y su principal propósito es la producción ganadera.
URHD	Zonas Urbanizadas	Se encuentra definida por áreas de construcciones urbanas o industriales.
SWRN	Zonas cobertura sin	Son zonas que no cuentan con ninguna cobertura vegetal.

WATR	Zonas con agua	Son espacios ocupados por espejos de agua como: ríos, lagunas o lagos.
FRST	Bosques mixtos	Son zonas que mantienen una cobertura arbórea de un mayor estrato.
WETF	Bosque húmedo	Son áreas de bosques de galería con inundaciones secuenciales.
AGRL	Agricultura	Son zonas que se han destinado a la producción de cultivos temporales o de riego.

De manera general en la cuenca alta se concentra la mayor área de bosque, a su vez se alterna con la cobertura de tipo pastizal; en algunas áreas se identifican zonas de cultivos (Figura 5).

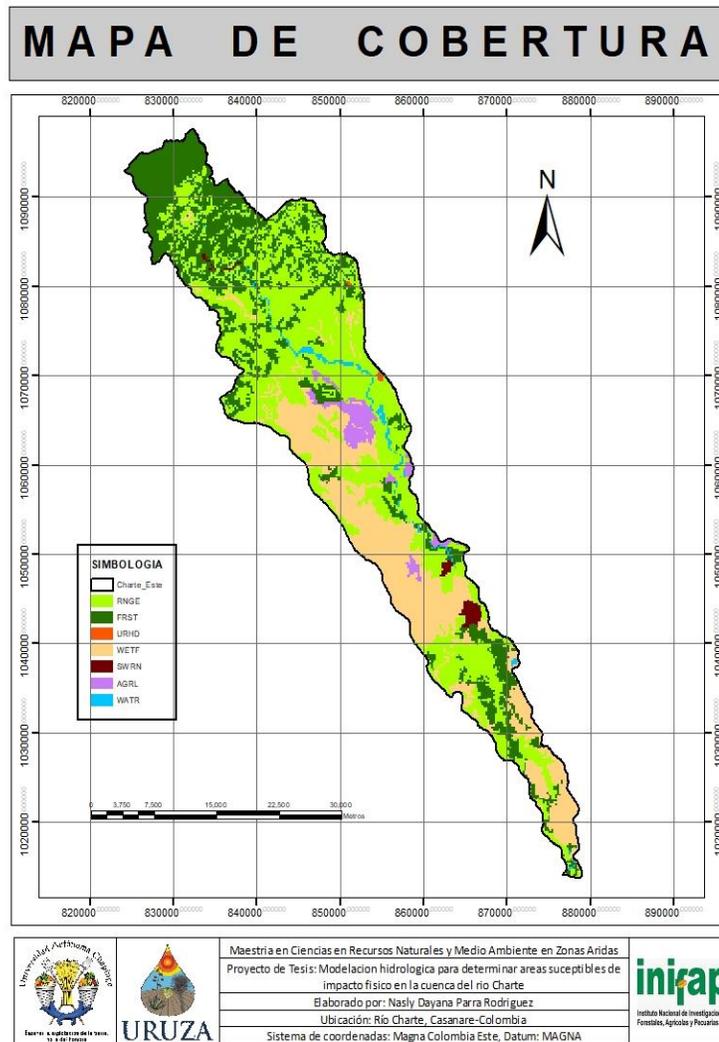


Figura 5. Cobertura vegetal presente en la cuenca del río Charte. Elaboración propia.

2.3.5. Parámetros hidrológicos

Uno de los parámetros que se tuvo en cuenta, es la curva numérica, la cual tiene un valor de 0 a 100, según corresponda el potencial de escorrentía. Este parámetro tiene una relación directa con factores como grupo hidrológico del suelo, uso de la tierra, la condición y el antecedente de humedad (Ibáñez Asensio et al., 2011). Si, el valor de curva numérica se aproxima a 0 se pueden identificar como zonas de condiciones de permeabilidad muy alta; cuando el valor se

aproxima a 100 es un indicativo de una condición de impermeabilidad (Ibáñez Asensio et al., 2011). Este parámetro tiene gran sensibilidad, ya que tiene relación con tres características importantes: uso del suelo, condición de humedad previa y tipo hidrológico del suelo (Espinales et al., 2021). En investigaciones como las reportadas por Jodar-Abellan et al. (2018) y Ochoa et al. (2017) usaron el parámetro de curva numérica y fue considerado como un valor de sensibilidad alta, ya que al presentarse un cambio drástico en la cobertura vegetal, también se reflejan grandes variaciones en el escurrimiento que se presenta en la zona. El siguiente parámetro corresponde a la conductividad hidráulica, el cual tiene en cuenta el estado físico del suelo, en éste es posible distinguir el movimiento de agua en la capa subsuperficial o subterránea (Barbecho & Calle, 2012; Polo et al., 2003). Este parámetro indica la capacidad de escorrentía y el potencial de infiltración de la zona objeto de estudio.

2.3.6. Aplicación del modelo hidrológico

El modelo hidrológico SWAT, es aplicado en esta investigación para entender el comportamiento hidrológico de la cuenca, donde la variable de interés, en este caso, corresponde al escurrimiento superficial que fue estimado a escala mensual. Se utilizó la interfaz del software QSWAT 3.1.1.1 anclado en el programa de manejo libre QGIS 3.18. En el caso de los insumos o valores de entrada, se procesaron a partir de un polígono oficial que describe el límite de la cuenca, este fue proporcionado por la oficina de planeación del Municipio de Aguazul, exactamente del Plan de ordenamiento y manejo de cuencas (POMCA) del río Charte. A esta cartografía se le asigna el sistema de coordenadas Datum Magna-Sirgas con proyección Colombia Este Zona Central.

Cuadro 6. Insumos utilizados para alimentar el modelo SWAT

Insumos	Localización	Información	Fuente
Modelo de elevación digital	Río Charte	2010	NASA

Edafología	Río Charte	2004 -2010	FAO
Uso de suelo y vegetación	Río Charte	2005 – 2009	IDEAM
Datos climáticos	Proximidad con el Río Charte	1989 -2019	IDEAM
Datos escurrimiento	Río Charte	1989 - 2019	IDEAM

Estos insumos cartográficos permiten determinar la red de drenaje principal y secundaria, definiendo las subcuencas que componen el río Charte. Se destaca que en la zona se tienen cinco estaciones climáticas o pluviométricas y una estación hidrométrica, donde se obtuvieron los datos de caudal. Este último aforo delimita las unidades de respuesta hidrológica (HRU) para cada subcuenca. Dichas HRU son áreas que mantienen una misma característica de homogeneidad dados sus parámetros de (tipo de suelo, vegetación y topografía) que intervienen directamente en el proceso de modelación (Cabrera, 2018). Se utilizaron datos meteorológicos de 30 años para el periodo (1989-2019). Todos estos datos se utilizaron en una escala diaria, el periodo de calibración se evaluó desde (2009-2013), finalmente el periodo de validación se realiza con la información de (2014-2019). En la Figura 6, se puede identificar todo el proceso o fases que se requirieron para el desarrollo del modelo.

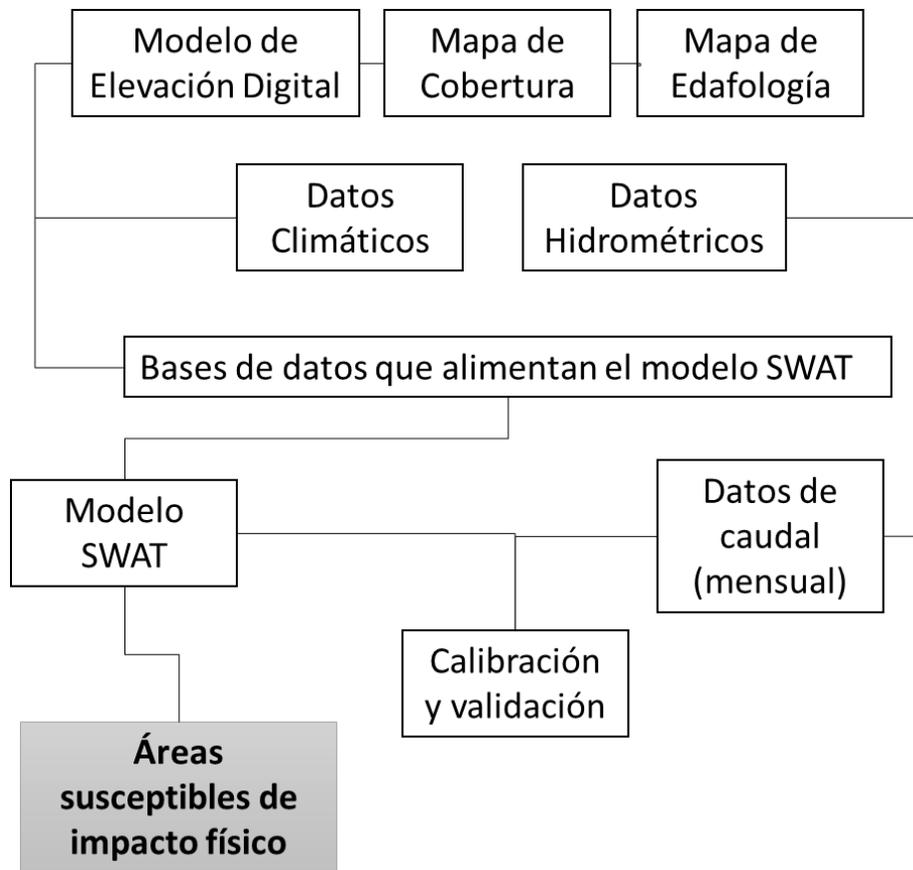


Figura 6. Esquema metodológico a implementar en la cuenca del río Charte. Elaboración propia.

2.3.7. Calibración y Validación.

La calibración permite estimar los parámetros del modelo hidrológico y comparar los datos simulados contra los observados como se indica en otras investigaciones Barrios Alex & Urribarri Lisbeth (2010); Cruz-Gonzalez (2020) y Salas-Martínez et al. (2014); la calibración se realiza bajo los objetivos que demanda la investigación. Para alcanzar este propósito, se utilizó el programa SWAT-CUP 2019, que tiene como finalidad apoyar la calibración, validación y el análisis de sensibilidad o de incertidumbre que puede expresar la cuenca. Este programa tiene vinculados algoritmos como SUFI2, GLUE, MCMC y PSO. En el caso de esta investigación se usó el algoritmo SUFI2, que permite alcanzar la evaluación y el posterior ajuste de parámetros sensibles en el modelo hidrológico (Khalid et al., 2016). De esta manera se puede identificar qué parámetros

presentan mayor sensibilidad en la cuenca, para usarlos con cuidado y precisión durante todo el proceso de calibración (Cuadro 7). Para ello se siguió el protocolo de calibración automatizada recomendado por (Abbaspour, 2015) que propone, el proceso que se debe realizar para obtener resultados óptimos durante la calibración y del análisis de sensibilidad. En el caso del río Charte, se ejecutaron 500 simulaciones, que se dividieron en dos periodos de iteraciones. Para el caso del ajuste a los parámetros en el modelo se realizó de forma manual después de cada iteración. Los parámetros que se tomaron en cuenta e influyen sobre el escurrimiento superficial y en el proceso de sedimentación se resume en la Tabla 6 y concuerdan con las apreciaciones de otras investigaciones como Cruz-González et al. (2021); Escobar-Escobar (2019); López, (2012); Torres et al., (2004) y Neitsch et al., (2011).

Cuadro 7. Parámetros que intervienen en el escurrimiento superficial

Parámetro	Descripción del parámetro	Parámetro de modifica
CN2	Curva numérica	Escurrecimiento superficial
CH_K2	Conductividad hidráulica	Producción de Sedimentos

2.3.8. Evaluación del modelo

Para evaluar el modelo hidrológico se usaron varios métodos estadísticos que son muy utilizados en los problemas de tipo hidrológico. Uno de ellos y quizás el que presenta mayor uso dada su facilidad en la interpretación, es el coeficiente de determinación (R^2) (Ecuación 1), con este coeficiente se describe la proporción de la varianza de los datos observados y los datos simulados. El valor que contempla este coeficiente oscila entre 0 a 1, son considerados aceptables cuando los valores son mayores a 0.5 (Moriasi et al., 2007, Salas-Martínez et al., 2014; Sánchez Galindo et al., 2017).

$$R^2 = \frac{\Sigma[(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 * (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2]}{\Sigma(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 * \Sigma(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (1)$$

El siguiente coeficiente que se consideró es el coeficiente de Pearson (r) (Ecuación 2), el valor de este coeficiente puede estar en el rango de 0 a 1, donde el valor más bajo indica que no existe ninguna correlación, mientras que el valor más próximo a 1 es un indicativo de una correlación buena o casi perfecta (D. . Moriasi et al., 2007).

$$r = \frac{[\sum(Q_{obs}-Q_{obs,m})^2 * (Q_{sim}-Q_{sim,m})]}{[\sum(Q_{obs}-Q_{obs,m})^2] * [\sum(Q_{sim}-Q_{sim,m})^2]} \quad (2)$$

El modelo se evaluó con el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (Ecuación 3), donde el valor de eficiencia se contempla desde $-\infty$ a 1. La clasificación de NSE se expresa de la siguiente manera: <0.2 insuficiente, 0.2-0.4 satisfactorio, 0.4-0.6 bueno, 0.6-0.8 muy bueno y >0.8 excelente (D. . Moriasi et al., 2007; Sánchez Galindo et al., 2017). Una vez considerada toda la información cartográfica y climática dentro del modelo hidrológico, se relacionó el comportamiento de la variable de escurrimiento simulado y el observado, se modificaron los valores de la curva numérica y la conductividad hidráulica.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{observacion} - Q_{simulacion})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{observacion} - Q_{promedio})^2} \quad (3)$$

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1. Resultados de la calibración y validación

Los resultados que se obtuvieron en la simulación inicial, donde se compararon los datos de caudal observado contra el caudal simulado, indicaron que se necesitaba mejorar el valor estadístico de R^2 , Nash-Sutcliffe y Pearson ya que presentaban indicadores muy bajos; esto se puede atribuir a la ocurrencia de fenómenos atípicos de niña que se presentan en la zona de estudio, además el régimen de lluvias es monomodal y la cuenca se ubica en una zona tropical, donde los valores de lluvia son mayores. Considerando estas particularidades, se tuvo en cuenta la modificación del parámetro de curva numérica, que tiene

una relación directa con el tipo de cobertura vegetal de la cuenca, el modelo simulado detectó que para la zona de pastizal la curva numérica se encontraba en 79 y fue modificada a 90. Por otro lado, en la zona de bosque y durante el periodo de simulación, se encontró una curva de 73 que posteriormente se modificó a 60.

Este cambio se realizó teniendo en cuenta las características de cobertura vegetal, práctica agrícola, condición hidrológica, humedad antecedente y tipo de suelo presente en la cuenca, Chipana-Vasquez (2012); Lopez-Rivera (1993); Paredes & España (2010) tomaron en cuenta la tabla de referencia proporcionada por el departamento de agricultura (USDA) y se reclasificaron según las condiciones edafológicas y físicas de la cuenca objetivo de estudio. El siguiente parámetro que se modificó fue la conductividad hidráulica. Para esto, se tuvo en cuenta la base de datos de suelo que se proyecta en la matriz interna de SWAT; este parámetro relaciona características del suelo como la textura, la densidad aparente, el factor de erosionabilidad.

2.4.2. Métodos estadísticos evaluados

Una vez modificados los parámetros se procedió a evaluar el modelo. Para ello se tomó en cuenta un periodo de 10 años que comprende el 2009 al 2019, este lapso de tiempo fue seleccionado por su representatividad de las condiciones actuales y homogeneidad de datos de caudal observados. Dicha base de datos se dividió cada 5 años, período en el que se evalúa la calibración y validación. En el cuadro 8, se describen tres parámetros estadísticos iniciales que relacionan la calibración y validación.

Cuadro 8. Resultados iniciales obtenidos durante el proceso de calibración y validación del modelo SWAT para la cuenca del río Charte.

	R²	Pearson	Nash Suttcliffe
Calibración	0.72	0.85	0.64

Validación

0.43

0.66

0.36

El coeficiente de determinación R^2 , durante el periodo de calibración alcanzó un valor de 0.72, indicativo de un ajuste bueno. En la validación la R^2 alcanzo un 0.43, dato que se encuentra por debajo del promedio aceptable. En el caso del coeficiente de Pearson los valores de calibración y validación reportaron un ajuste muy bueno. El coeficiente de Nash Suttcliffe muestra un buen ajuste para la calibración, mientras que en la validación el resultado fue satisfactorio.

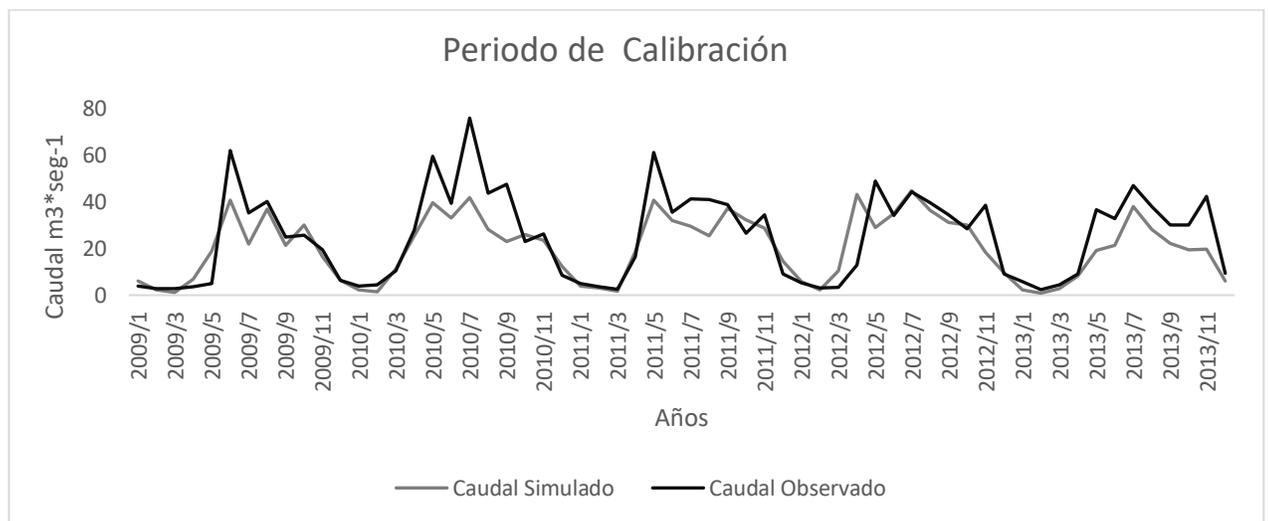


Figura 7. Calibración del periodo de 2009-2013.



Figura 8. Validación del periodo de 2014—2019

En las Figuras 7 y 8, se observa el comportamiento que tiene el escurrimiento simulado y observado en la cuenca del río Charte, durante dos periodos de evaluación de 5 años. Los datos simulados y observados tienen un comportamiento similar y mantienen una correspondencia ante impulsos, así, cuando aumenta el caudal simulado también se tiene un aumento en el observado, aunque siguen existiendo variaciones en la cantidad o volumen que se considera. Se observa que, con un volumen de caudal mayor, se dificulta el ajuste de los datos.

Por esta razón se buscó conocer el origen de los datos atípicos, ya que están interviniendo negativamente en el ajuste y que ubican al modelo con una sobreestimación. Se encontró que existen anomalías durante el periodo del 2009 al 2014, con mayor ocurrencia en el segundo semestre del año y concuerda con la época lluviosa que atraviesa Colombia y el departamento de Casanare. Este departamento se ubica dentro de una zona lluviosa, en esta zona la precipitación no supera los 4000 mm al año, manteniendo un régimen monomodal que ocurre desde marzo a octubre (IDEAM & UNAL, 2018). En esta zona es común la ocurrencia de fenómenos climáticos como el “Niño” y la “Niña”. Según el IDEAM en la región de la Orinoquia han ocurrido eventos de lluvias, con variaciones desde un 30% a un 70% por encima de la precipitación normal (IDEAM, 2010). En el año 2009 se evidenció la ocurrencia del fenómeno de la niña, iniciando en el marzo a julio, causo precipitaciones por encima del 80% del régimen normal. Para el año 2010 se dio el fenómeno de la niña, el cual inició en el mes de marzo y se prolongó hasta diciembre causando afectaciones por encima del 80% de precipitaciones, para el segundo semestre del año el régimen de precipitación tuvo un aumento del 75% (IDEAM, 2010). Durante el año 2011, se reportaron incrementos hasta del 80% en las precipitaciones para el primer semestre del año (IDEAM, 2011). Para el año 2012 se tuvo la presencia del niño y niña, que afectaron los últimos meses del año 2012 y principios de 2013, adicionalmente, se originaron crecientes súbitas de afluentes como el río Charte, que se reflejaron en los datos de caudal del río Meta (IDEAM, 2012). En el año 2013 y 2014 se

reportaron precipitaciones por encima del promedio general que se tiene en el departamento (IDEAM 2013a, 2015).

2.4.3. Ajuste de datos atípicos

Una vez detectado el origen de los datos atípicos que se representan en la serie de caudal observado, se procedió a realizar un ajuste en el promedio de precipitación enunciado para los meses de ocurrencia del evento. El ajuste se realizó, en el caso de encontrarse un dato atípico, no se procedió a la eliminación, al contrario, se realizó un reemplazo con un valor proveniente del cálculo promedio del volumen del caudal de los 30 años para el mes que se encontraba en análisis. Posteriormente, se realizó un nuevo análisis con cada uno de los parámetros estadísticos en los periodos de calibración y validación, obteniendo los datos que se muestran a continuación.

Cuadro 9. Valores resultantes después del ajuste de datos atípicos en los valores de caudal observado para el río Charte.

	R²	Pearson	Nash Suttcliffe
Calibración	0.78	0.89	0.64
Validación	0.56	0.75	0.45

Una vez culminado el anterior proceso, los coeficientes mejoraron el resultado e indicaron un mejor ajuste en cada una de las etapas. El coeficiente de Pearson (r) mostró una muy buena correlación, para el coeficiente de Nash Suttcliffe (NSE) el resultado de calibración se mantuvo en 0.64, mientras que la validación mejoró a un 0.45. El coeficiente de R² tuvo un cambio importante alcanzó una R² de 0.78 y 0.56 para la calibración y validación, respectivamente, lo que indica una mejora en el ajuste entre los datos simulados y observados (Figura 9 y 10)

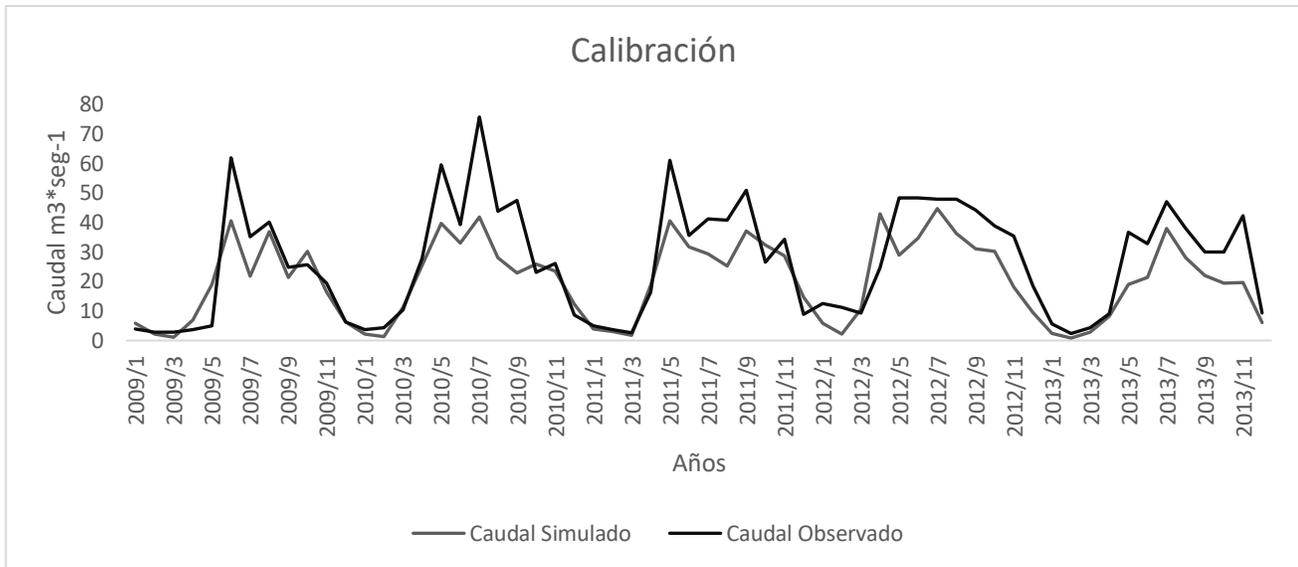


Figura 9. Calibración del periodo 2009-2013 con promedios ajustados.

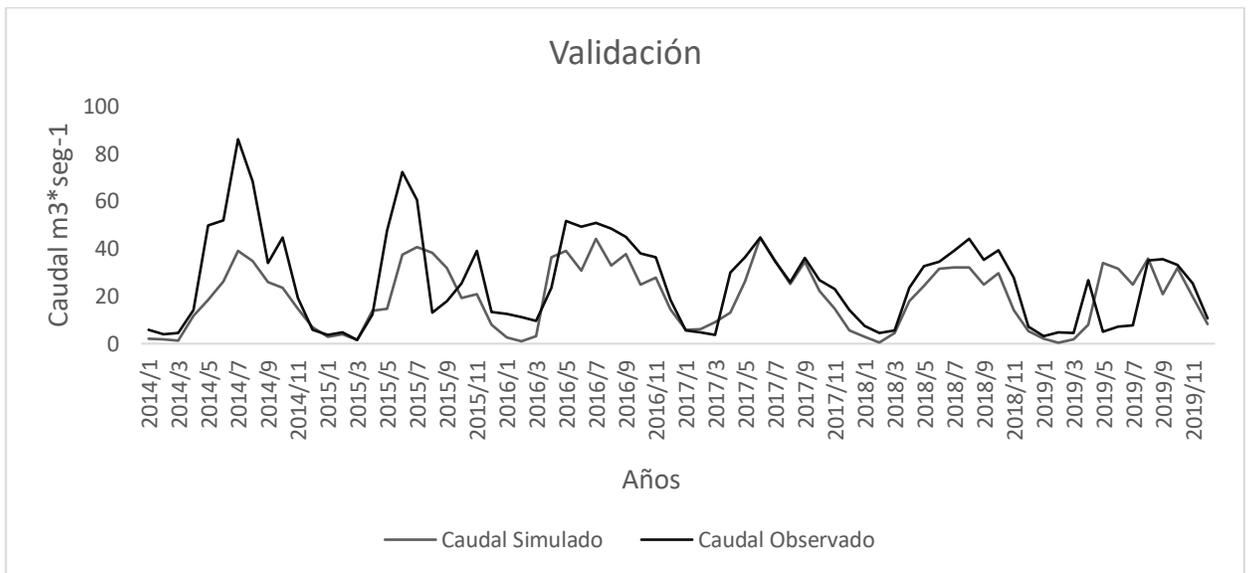


Figura 10. Validación del periodo 2014-2019 con promedios ajustados.

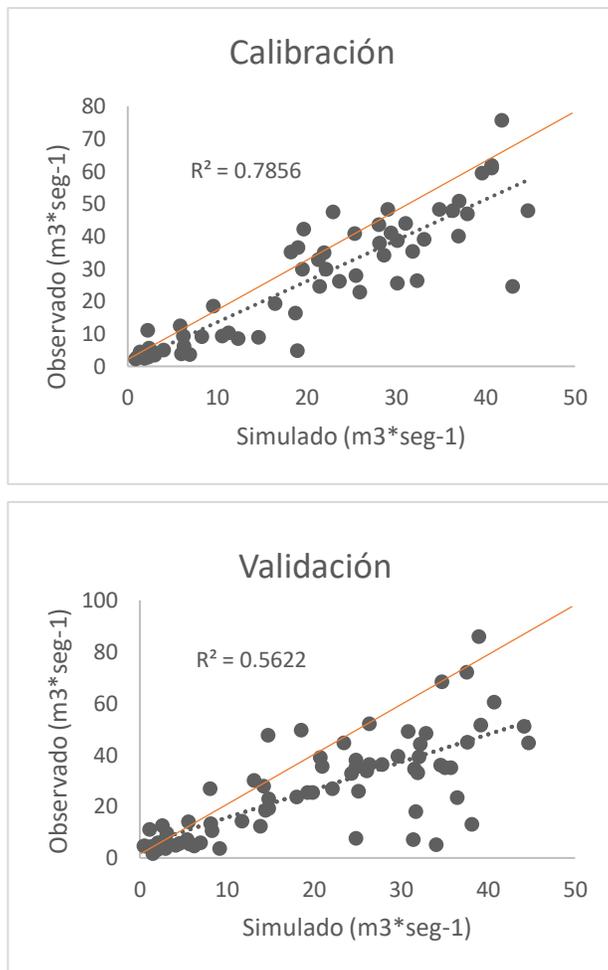


Figura 11. Distribución de los datos simulados y observados, analizados por el parámetro estadístico de R^2 . La línea punteada corresponde a la tendencia de los datos y la línea continua de tonalidad naranja representa la relación 1:1.

Los métodos estadísticos empleados para el periodo de calibración y validación en el ajuste de los datos de caudal observado, permitieron concluir un buen ajuste entre lo simulado y lo observado en la cuenca del río Charate. Fue evidente que sí, en la zona ocurrían fenómenos extremos de exceso de lluvias el ajuste del modelo se dificulta (Cruz-González et al., 2021; Oliveira Serrão et al., 2019). También se puede identificar que un gran número de valores observados se encuentran por encima de las estimaciones simuladas, esto se debe a los grandes volúmenes de agua que se tienen en la zona, esto es una característica distintiva de las cuencas que se ubican en zonas tropicales o húmedas ya que los regímenes de precipitación son muy elevados en comparación a las zonas

áridas. Otro de los factores que se debe tener en cuenta es la saturación que tiene el suelo ya que, el agua pasa a ocupar un espacio que antes se encontraba ocupado por aire (FAO, 2005). Una vez llenos estos espacios, el suelo no tiene capacidad de absorber más líquido, entonces tiende a generar escorrentía y un mayor número de flujos en la cuenca. Adicionalmente la clasificación de suelos indica que predomina el grupo hidrológico “C”, este tiene un potencial moderadamente alto para la escorrentía, los procesos de infiltración son lentos, las texturas finas también dificultan la absorción del agua, como sucede en la cuenca del Charate (Ruiz-Romera & Martínez-Santos, 2010). Además, las coberturas vegetales que predominan no tienen un potencial radicular amplio, que permita y apoye la infiltración.

2.4.4. Proyección de escenarios para el parámetro de escurrimiento y sedimentación en la cuenca del río Charate.

Es importante mencionar que el modelo SWAT, esta basado en un balance hídrico que permite conocer las salidas y entradas de agua en un área determinada y para lograr realizar esta proyección de escenarios el SWAT usa el modelo de cadena de Márkov, que permite conocer si un día será seco o húmedo, obteniendo un numero aleatorio para probabilidades de recibir eventos de lluvia, de esta manera de esta manera se puede predecir el comportamiento de la precipitación y posterior escorrentía (Barbudo et al., 2016).

Es así como se obtuvo un escenario futuro que comprende el periodo del 2020 a 2070, en este lapso de tiempo se evaluó el comportamiento del escurrimiento y la sedimentación que se presenta en la cuenca del río Charate. De esta manera puede lograr delimitar las que zonas podrían convertirse en puntos problemáticos para la estabilidad de la cuenca.

COMPORTAMIENTO DEL ESCURRIMIENTO

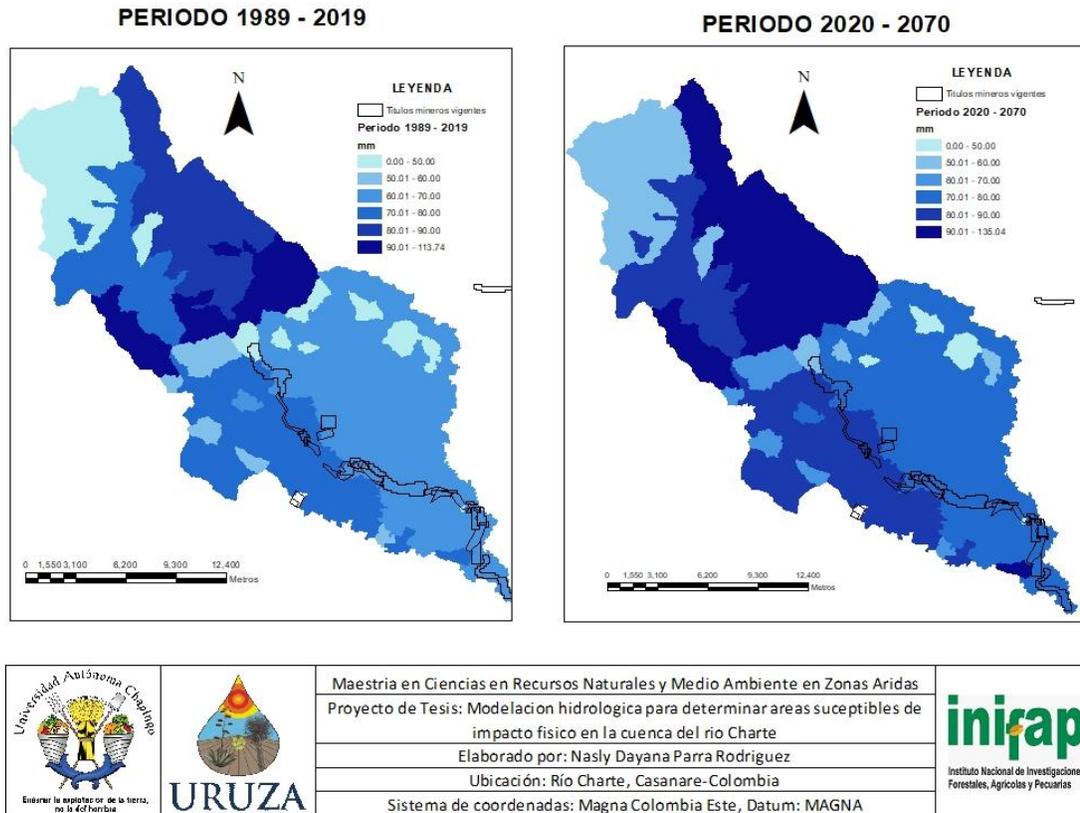


Figura 12. Comportamiento promedio mensual del escurrimiento en la cuenca del río Charte. Elaboración propia.

La Figura 12, permite identificar los dos periodos que se encuentran en evaluación (1989 a 2019), donde el valor mínimo de escurrimiento corresponde a los 0 mm y el máximo son 113.74 mm, mientras que en el periodo de (2020 a 2070) el valor mínimo es de 48.92 mm y el máximo es 135.03 mm. Se identificó que en la zona alta se mantienen los menores aportes de escurrimiento superficial, al ser áreas que actualmente tienen cobertura vegetal de tipo forestal. Sin embargo, en el periodo de 2020 a 2070 el escurrimiento aumenta pasando del rango de 50 mm medios mensuales, en la zona que ya se detecta una disminución de la cobertura boscosa, el escenario resulta un poco más drástico ya que se superan los 80 mm medios mensuales. De manera general en las zonas altas y medias los valores de escurrimiento superficial tienden a aumentar,

sumado a ello las condiciones pluviométricas de la zona; los valores de pendiente y la deficiencia en la condición de la vegetación pueden ocasionar grandes pérdidas de suelo. En la zona baja, donde se tiene una pendiente de tipo plana los valores de escurrimiento se encuentran de los 70 a 90 mm, los cuales son grandes estos aportes de agua, se les podría atribuir a la deficiente cobertura vegetal de la zona.

El comportamiento de la sedimentación, no se logró calibrar dado que no se contó con datos de aforo que permitiera evaluar la cantidad de sedimentos que se encuentran en el flujo superficial. Por esta razón la información que se proyecta en el mapa de sedimentos corresponde a los datos simulados por el modelo durante el periodo de 2020 a 2072. A falta de datos observados, los datos de erosión presentados, solo son indicativo de la erosión potencial del sitio de estudio en caso de que ocurriera el régimen pluvial simulado.

COMPORTAMIENTO DE LA SEDIMENTACIÓN

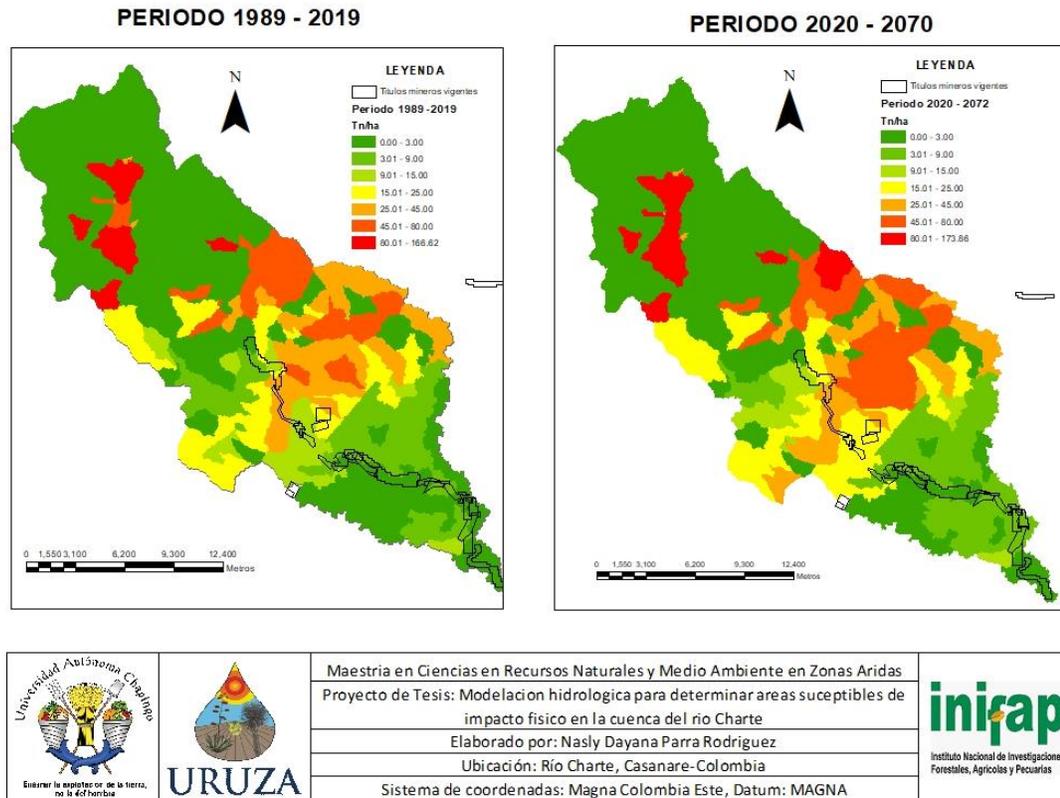


Figura 13. Comportamiento promedio mensual de la sedimentación en la cuenca del río Charte. Elaboración propia.

La anterior figura permite identificar los dos periodos que se encuentran en evaluación (1989 a 2019), donde el valor mínimo de sedimentación es de 0 t ha⁻¹ a 166.62 t ha⁻¹. Mientras que el periodo de 2020 a 2070 el valor máximo se encuentra cerca a los 173.86 t ha⁻¹. En la zona alta y media el valor de sedimentación oscila entre las 3 a 9 t ha⁻¹. Sin embargo, es posible observar que los HRU donde predomina una cobertura vegetal de tipo pastizal, con una condición regular y mala los valores de sedimentación superan las 25 t ha⁻¹ para el periodo del 1989 a 2019, en esta misma zona para el periodo de 2020 en adelante los valores incrementan por encima de las 45 t ha⁻¹. En el sector medio y bajo los valores incrementan por encima de los 25 t ha⁻¹, en estas áreas predomina la cobertura de pastizales y de bosque de galería, que en su mayoría se encuentran en condiciones regulares dada la influencia por las temporadas

secas y de lluvias que atraviesa el área de estudio. Basados en información suministrada por la Agencia Nacional Minera, se logró identificar que existen zonas que tienen solicitudes y títulos mineros vigentes de extracciones de materiales para construcción, que mantiene su área de influencia sobre el cauce principal, lo que podría estar generando un impacto en las actividades. En la zona baja se identifican que grandes aportes de sedimentación, que podría asociarse con la presencia de títulos mineros, a esto se le añade la facilidad de transporte lo que facilita las actividades mineras de la zona.

2.4.5. Propuestas de prevención

Una vez identificadas las áreas que podrían atravesar estos procesos de degradación, se puede proponer y poner en marcha actividades que busquen el bienestar de los ecosistemas y el desarrollo óptimo de los servicios que se encuentran disponibles en la cuenca, con la intención de mitigar los efectos del cambio climático, apoyar la seguridad y soberanía alimentaria y minimizar el riesgo ante procesos de degradación. Estas soluciones se pueden entender como una alternativa que involucra menor impacto a las condiciones ambientales que se tienen en la zona y en el caso del área de estudio se considera que el aumento de la vegetación, disminuye el proceso negativo de la escorrentía superficial sobre el suelo (Gonzalez et al., 2016; Sánchez-Cohen et al., 2015). En el caso de la cuenca alta se proyecta la realización de actividades de enriquecimiento como la reforestación, se espera que en estos HRU que no cuentan con una buena condición de vegetación, se implemente la siembra de especies arbóreas nativas, que contribuyan a la estabilidad del suelo y a la disminución de los daños en el suelo por acción de la lluvia. De igual manera, para la zona media-baja, se propone como actividad la implementación de los sistemas agroforestales, estos se consideran una alternativa eficiente que involucra el componente ambiental, social y económico que mantiene un equilibrio entre todos los actores interesados, estos sistemas estos son una alternativa útil, ya que permiten la interacción de distintos componentes como

árboles forestales, cultivos y algún tipo de ganadería. En el caso de la cuenca del río Charte y en consideración de las actividades que predominan esta zona se ubican los sistemas silvopastoriles (árboles y ganadería) y agrosilvopastoriles (árboles y cultivos), estos sistemas tienen gran adaptabilidad, flexibilidad y son estratégicos en la solución de problemas entre el sector ambiental y social. Para mejorar la confiabilidad del modelo que se proyecta en la cuenca del río Charte, se recomienda usar datos meteorológicos con mayor cercanía al área de la cuenca o dentro de la misma sería favorecedor para mejorar las estimaciones de precipitación en esta zona. Adicionalmente se podría recomendar que los registros de las estaciones hidrométricas, también se lograran obtener en una escala diaria, esto permitiría comparar con el dato mensual y aumentar la precisión en el comportamiento de escurrimiento.

2.5. CONCLUSIONES

El modelo SWAT se considera una buena alternativa para evaluar la condición hidrológica de la cuenca, permite entender el comportamiento del flujo y las variaciones que este tiene frente a los distintos patrones climáticos que se presentan en la actualidad. Para el caso de la Cuenca del río Charte se concluye que el modelo mantiene representatividad de las condiciones climáticas e hidrológicas de la zona, según los métodos estadísticos usados, ya que alcanzaron buenos ajustes en la simulación. Sin embargo, se logró detectar que en eventos donde se presentaron grandes volúmenes de caudal, el ajuste con los datos simulados fue complicado, lo que permite entender que el modelo es más preciso siempre y cuando los flujos sean pequeños, no mayores a ($40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Los parámetros que se evaluaron en la simulación hidrológica de la cuenca del río Charte, fueron la curva numérica y la conductividad hidráulica, los cuales se encuentran relacionados directamente con las condiciones edafológicas y de cobertura, es posible concluir que las subcuencas en las que predominaba la cobertura de pastizal, se tiene un mayor potencial para generar escurrimiento, mientras que las subcuencas en las que la cobertura predominante eran los

bosques, el escurrimiento que se generaba era menor. Esto es importante para conocer cuáles son las zonas de la cuenca en la que se debe proyectar las medidas de acción, que permitan disminuir los niveles de escurrimiento en la cuenca. Es decir, estos datos pueden ayudar a generar estrategias que permitan la adaptación y mitigación de los efectos adversos que se pueden encontrar en la cuenca, con la intención de mantener el uso eficiente del agua, minimizar la cantidad de contaminantes y disminuir los efectos del escurrimiento. Para remediar estas problemáticas se espera promover alternativas que involucren el manejo del suelo y de la vegetación propia de la cuenca.

2.6. REVISIÓN DE LITERATURA

- Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs*. https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf
- Barbecho, J., & Calle, J. (2012). *Caracterización de la conductividad hidraulica de los suelos de la subcuenca del río Tarqui*. [Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/771/1/ti897.pdf>
- Barbudo, L., Ochoa, J., & Verbel, E. (2016). *Aplicación del modelo Swat en el estudio hidrosedimentológico de la cuenca quebrada San Pedro en el Municipio de Curumaní, departamento del Cesar*. [Universidad de Manizales]. https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2667/Barbudo_Cadena_Loida_2016.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Barrios Alex, G., & Urribarri Lisbeth, A. (2010). Aplicación del modelo swat en los andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista Geografica Venezolana*, 51(1), 11–29. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730384002.pdf>
- Bautista-Ávalos, D., Cruz-Cárdenas, G., Moncayo-Estrada, R., Silva García, J. T., & Estrada-Godoy, F. (2014). Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 30(3), 263–274. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n3/v30n3a3.pdf>
- Cabrera, J. (2018). *Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U.)*. http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_8.pdf
- Chipana-Vasquez, R. (2012). *Estimación de los escurrimientos en la cuenca del río Porvenir, mediante la aplicacion del modelo SWAT*.
- Corpoboyaca. (2015). *Plan de ordenamiento y manejo de la Cuenca de Río Cane Iguaque* (Vol. 644). <http://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/pomca-cane-iguaque.pdf>
- Cruz-González, A., Sánchez-Cohen, I., Macías-Corral, M. A., Velásquez-Valle,

- M. A., & Trejo-Calzada, T. R. (2021). Hydrologic modeling to measure the impact of climate change in the Yaqui River basin. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(1), 77–94. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.02.040>
- Díaz Carvajal, Á., & Mercado Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452–470. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10171>
- Escobar-Escobar, D. (2019). *Evaluación hidrológica del cambio de coberturas y su incidencia en los caudales mensuales de la cuenca hidrográfica del río Jamundí*.
- Espinales, F., Alulema del Salto, R., & Michael, C. (2021). Determinación del número de curva (CN) de la cuenca del Río Portoviejo. *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores.*, Amc li, 1–16. <https://www.scielo.org.mx/pdf/dilemas/v8nspe2/2007-7890-dilemas-8-spe2-00017.pdf>
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2005. *Glosario de términos sobre humedad del suelo*. <https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s02.htm#TopOfPage>
- Francisco-Nicolás, N., Turrent-Fernández, A., Flores-López, H. E., Martínez-Menes, M., & Enríquez-Quiroz, J. (2010). Estimación Del Escurrimiento Superficial Con El Método Scs-Cn En El Trópico Subhúmedo De México. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 71–78. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v28n1/v28n1a8.pdf>
- García-Aguirre, M. (2008). Colegio de postgraduados. In *Tesis*. http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/256/Sanchez_Borja_M_DC_Fitosanidad_2010.pdf?sequence=1
- González, A., Álvarez, P., González, M., & Aguirre, Z. (2016). Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escurrimiento de la cuenca del río. *CEDAMAZ*, 50–59.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011). *Valores del n° de curva (cálculo de la escurrimiento)*. <http://riunet.upv.es/handle/10251/10783?locale-attribute=ca>
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2010. Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. In *Area: Vol. TH-62-04-1* (Issue 257).
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2010. *Mapa Nacional de Coberturas de la tierra. Adaptación Corine Land Cover. República de Colombia. Escala 1:100.000. Periodo 2005 - 2009*. <http://geoservicios.ideam.gov.co/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/a0cd1183-237d-4c98-9011-7dd769febf2>
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2011. *Análisis del impacto del fenómeno “la niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país tabla de contenido* (Issue 20). <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Análisis+Impacto+La+Niña.pdf/640a4a18-4a2a-4a25-b7d5-b3768e0a768a>
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2012.

- Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática “el niño” y “la niña.”*
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Análisis+Impacto+La+Niña.pdf/640a4a18-4a2a-4a25-b7d5-b3768e0a768a>
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2013a. *Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática “El Niño” y “La Niña”*. (Issue 1).
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2013b. *Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas*.
http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIAS_MAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2015. *Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión*. In *Ideam - Mads - U.D.C.a.*
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023647/Protocolo-erosion.pdf>
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) & UNAL. (Universidad Nacional de Colombia). 2018. *LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA*.
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>
- IGAC. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2014a. *Metodología Para La Clasificación De Las Tierras Por Su Capacidad De Uso*.
http://sofigac.igac.gov.co/files/mod_documentos/documentos/M40100-02-14 V2/M40100-02-14 V2 Para la clasificacion de las tierras por su capacidad de uso.pdf
- Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240–253.
<https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>
- Khalid, K., Fozi, M., Rahman, F., Radzali, M., Humaira, S., Othman, Z., & Bachok, M. (2016). Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm. *Procedia Engineering*, 162, 441–447.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.086>
- Lopez-Rivera, S. (1993). *Determinacion de escurrimiento*.
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20338/Capitulo4.pdf>
- López, M. (2012). *Calibración del modelo para el transporte de contaminante en los sedimentos en la cuenca del Jequetepeque, Cajamarca, Perú*.
- Martínez, P., & Patiño, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 3(1), 5–20.
- Moriasi, D. ., Arnold, J. ., Van Liew, M. ., Bingner, R. ., Harmel, R. ., & Veith, T. . (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
<https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf>
- Moriasi, D., Arnold, J., & Liew, M. W. Van. (2007). *Model Evaluation Guidelines*

- for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. May 2014. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- NASA. (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio). 2021. *Earthdata Search*. <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
- Ochoa, C. G., Cazenave, G., Amábile, G. V., & Collazos, G. (2017). *Empleo del modelo hidrológico SWAT en regiones de llanuras . Aplicación en una cuenca rural , arroyo Santa Catalina , Prov . de Buenos Aires*. 1–10.
- Oliveira Serrão, E. A., Tavares Silva, M., Salviano de Sousa, F. de A., Meiguins de Lima, A. M., Assis dos Santos, C., Paiva de Ataíde, L. C., & Rodrigues da Silva, V. de P. (2019). ORIGINAL ARTICLE FOUR DECADES OF HYDROLOGICAL PROCESS SIMULATION OF THE ITACAIÚNAS RIVER WATERSHED , SOUTHEAST AMAZON. 25(3), 0–3. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000300018>
- Oñate, F., & Aguilar, G. (2017). *Aplicación Del Modelo Swat Para La Estimación De Caudales Y Sedimentos En La Cuenca Alta Del Rio ... May*, 11. https://www.researchgate.net/publication/237734865_APLICACION_DEL_MODELO_SWAT_PARA_LA_ESTIMACION_DE_CAUDALES_Y_SEDIMENTOS_EN_LA_CUENCA_ALTA_DEL_RIO_CATAMAYO
- ONU. (Organización de las Naciones Unidas). 2021. *Desafío Global Agua*. <https://www.un.org/es/global-issues/water#:~:text=El agua está en el,supervivencia de los seres humanos>.
- Pacheco Moya, R. M., Quiala Ortiz, E., & Martínez Hernández, I. (2018). Determinación del parámetro número de curva en la cuenca Las Coloradas en un entorno SIG. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(2), 60–71.
- Paredes, F., & España, R. (2010). ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCURRIMIENTO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES SPOT 5 EN LOS LLANOS CENTRALES DE VENEZUELA. *Unell, Ciencia y Tecnología.*, 25–28. <http://revistas.unellez.edu.ve/index.php/ruct/article/view/157/150>
- Polo, M., Lafuente, P., & Giráldez, J. (2003). *Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada en suelos de olivar y su influencia en el balance hidrológico global. VI*, 209–214.
- Rochdane, S., Reichert, B., Messouli, M., Babqiqi, A., & Khebiza, M. Y. (2012). Climate change impacts on water supply and demand in Rheraya watershed (Morocco), with potential adaptation strategies. *Water (Switzerland)*, 4(1), 28–44. <https://doi.org/10.3390/w4010028>
- Ruiz-Romera, E., & Martínez-Santos, M. (2010). *Hidrología aplicada. Tema 4. Infiltración y humedad del suelo*. https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/47724/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_4.pdf
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes, R., & Fernández-Reynoso, S. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del río mixteco en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 48, 1–15.
- Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., Esquivel-Arriaga, G., Bueno-Hurtado, P., & Pedroza-Sandoval, A. (2015). Minimum hydrologic characterization for research in experimental watersheds with limited availability of information in arid lands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XIV(2), 185–208. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2015.07.007>

- Sánchez Galindo, M., Fernández Reynoso, D., Martínez Menes, M., Granados Rubio, E., & Berber Ríos, J. D. (2017). *Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca México con SWAT*. 1–27. <https://imta.gob.mx/tyca/descargas/preprint/Vol.-VIII-No.-5-Septiembre-Octubre-2017/Artículo 0322NS Versión final.pdf>
- Torres, B. E., Fernández, R. D., Oropeza, M. J. L., & Mejía, S. E. (2004). Calibración Del Modelo Hidrológico Swat En La Cuenca El Tejocote, Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 437–444. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311096007.pdf>
- UPME. (Unidad de Planeación Minero Energética) & UPTC (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia). 2015. *INFORME RÍO CHARTE, DEPARTAMENTO DE CASANARE* (Issue 6).
- Velasquez-Valle, M., Esquivel-Arriaga, G., Sanchez-Cohen, I., Castillo-Quiroz, D., Cano-Pineda, A., & Gutierrez-Luna, R. (2017). *Comportamiento hidrológico de una pequeña cuenca de uso silvopastoril en el Sureste de Coahuila*. <https://www.redalyc.org/journal/634/63454577007/html/>
- Weber, J., & Baigorri Ocampo, S. (2019). Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina). *Aqua-LAC*, 11(1), 34–54. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-1-03>

CAPITULO III

Variaciones hidrológicas a partir de impactos físicos en la cobertura vegetal en la Cuenca del Río Charte.

3.1. RESUMEN

El objetivo de este estudio fue correlacionar la cobertura vegetal con las variaciones hidrológicas en la cuenca del Río Charte en el departamento de Casanare, Colombia. Se utilizaron datos de escorrentía mensuales y anuales. Se utilizó la herramienta SWAT OUTPUT de SWAT, que es un visor de salida que permite la interpretación de los datos. Posteriormente se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 y se calcularon los respectivos índices de vegetación (NDVI). Se utilizaron análisis de regresión para encontrar la bondad de ajuste entre los valores de escorrentía hidrológica y los resultados del NDVI indicaron valores de $R^2 < 0.5$. Lo anterior permite concluir que, el índice de vegetación normalizada NDVI mantiene una correlación con los valores de escurrimiento que se detectaron en la cuenca del Río Charte en cada mes de evaluación.

Palabras claves: Cuenca, Cobertura vegetal, SWAT OUTPUT, Landsat 8, índice NDVI.

ABSTRACT

The aim of this study was to correlate vegetation cover to hydrological variations in the Charte River Watershed in the department of Casanare, Colombia. Monthly and annual runoff data were used. We used the SWAT OUTPUT tool of SWAT which is an output viewer that allows the interpretation of the data. Subsequently, Landsat 8 satellite images were used, and the respective vegetation indices (NDVI) were calculated. Regression analyses was used to find, the goodness of fit between the hydrological runoff values and the NDVI results indicated R^2 values < 0.5 . The foregoing allows us to conclude that the normalized vegetation index NDVI maintains a correlation with the runoff values that were detected in the Charte River watershed in each evaluation month.

Keywords: Basin, Vegetation cover, SWAT OUTPUT, Landsat 8, NDVI.

3.2. INTRODUCCIÓN

Una cuenca hidrográfica es un área en la que se concentra un gran contenido de agua, que tiene la particularidad de mantener un flujo constante en movimiento, que finalmente desemboca en otra corriente hídrica (IMTA, 2019). De manera general la cuenca hidrográfica es considerada una unidad territorial básica, que tiene como principal objetivo el desarrollo de la planificación ambiental y socioeconómica (Semanart, 2014). Por esta razón en las cuencas se desencadenan problemáticas que se agudizan según la presión que ejerce el medio sobre el recurso natural que esta posee.

Basados en el Estudio general de suelo y zonificación de tierras, adelantado por el IGAC, (2014b), el departamento de Casanare cuenta con una extensión de 4.4 millones de hectáreas, se ha estimado que el 54.27% tiene una vocación ganadera orientada a la producción intensiva, mientras que el 8.79% se contempla como áreas óptimas para cultivos semi intensivos e intensivos, que generalmente son establecidos en las llanuras de inundación de los ríos ya que mantienen mayor fertilidad. La cuenca del río Charate no se encuentra lejos de esta apreciación, según el POMCA, (2005), se reportó que en el área de la cuenca predomina la ganadería, la agricultura de cultivos básicos de subsistencia y otros de importancia económica como la palma africana y el arroz. Estas dos grandes actividades ocupan el 76.32% del área total de la cuenca. Adicionalmente, en el río Charate se tienen actividades extractivas de materiales como arena y gravilla, se desconoce el volumen total de extracción, pero se tiene un área total de intervención de 1,697 ha destinadas exclusivamente a la minería de materiales de río (ANNA, 2020) generalmente en las zonas del cauce o las vegas de inundación, según el decreto 2811 de 1974 artículo 83, establece a las rondas de protección con un aislamiento máximo de 30 metros área en la que no se podría realizar ningún tipo de intervención. Sin embargo, esta actividad no se cumple en la cuenca del río Charate.

Todas estas actividades son importantes para el sostenimiento económico de las comunidades que habitan en el área de influencia de la cuenca, a su vez generan

un impacto en las condiciones ambientales de la misma. Una de las alternativas que se ha implementado son los modelos hidrológicos, como una herramienta que ayuda a conocer el estado actual y futuro de la cuenca (Cabrera, 2018). El modelo hidrológico SWAT se ha usado con este propósito y para su funcionamiento requiere datos topográficos, como tipo de suelo, tipo de coberturas, variables de temperatura y precipitación (Neitsch et al., 2010) que son necesarias para la ejecución del modelo, una vez concluido este proceso se procede a la calibración y validación, etapa en la que se busca la correlación de los datos observados contra los datos simulados, es así como se analiza la ocurrencia de los procesos de escurrimiento. En investigaciones adelantadas por (Cruz-González et al., 2021; Hurtado-Pidal & Yáñez-Borja, 2015; Paredes & España, 2010; Weber & Baigorri Ocampo, 2019) se consideró que los procesos de escurrimiento se amplifican cuando existen zonas donde la cobertura vegetal es escasa o presenta una mala condición. Adicionalmente, (Chipana-Vasquez, 2012; Jodar-Abellan et al., 2018; Uribe et al., 2013; Valverde-Gamboa, 2018) tuvieron en cuenta las afectaciones al cauce del río y los grandes aportes de sedimentos al flujo superficial, de igual manera estos valores están condicionados a la inexistencia de cobertura.

Una de las metodologías que ha sido muy implementada para determinar la presencia de cobertura vegetal en un área es el cálculo del índice de NDVI, este índice permite medir la energía que es absorbida y emitida por las coberturas, a través de valores de intensidad (Beltrán, 2017). En investigaciones como (Cartaya et al., 2014) se implementó el índice NDVI para determinar la cubierta vegetal en zonas de interés ecológico. (Weber & Baigorri Ocampo, 2019) usaron el NDVI para clasificar las coberturas predominantes en la cuenca. Entendiendo la importancia que tiene la cobertura vegetal para mitigar los procesos de degradación en la cuenca, se plantea como objetivo la determinación de las variaciones hidrológicas en la esorrentía superficial y la relación que se tiene con la cobertura vegetal presente en la cuenca. Estos resultados sirven para optimizar la toma de decisiones alrededor del recurso hídrico, siendo un gran

apoyo para mejorar los planes de manejo que serán implementados en las áreas críticas de la cuenca

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en dos departamentos Boyacá y Casanare, sobre la zona nororiental de Colombia, en la coordenada superior 5°26'54.36"N 72°38'35.06"W y la coordenada inferior 4°43'18.26"N 72°10'48.16"W, la cuenca tiene un área total de 100.319 hectáreas, que abarcan cinco municipios Labranzagrande, Pajarito, Aguazul, Yopal y Maní.

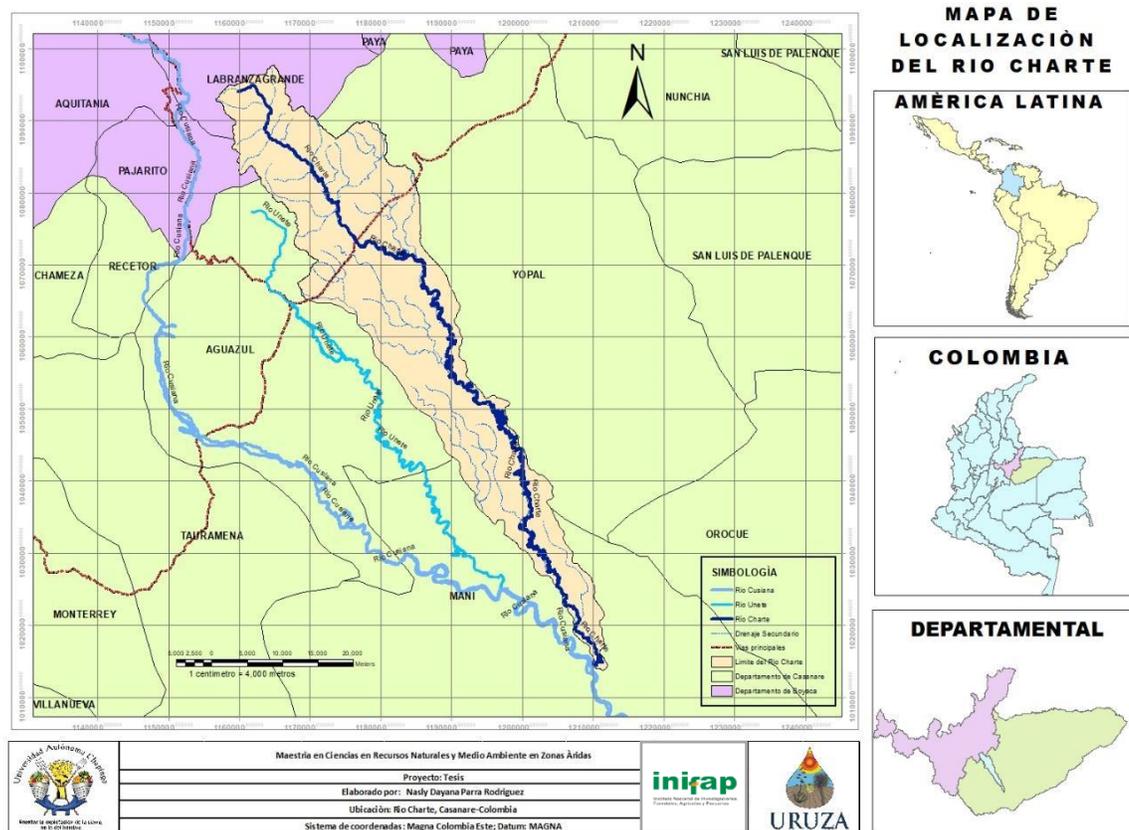


Figura 14. Mapa de ubicación de la cuenca del río Charte en Casanare Colombia. Elaboración propia.

Adicionalmente, se realizó una caracterización biofísica de la cuenca, en la que

se tuvo en cuenta parámetros como la topografía, se evidenció que la cuenca tiene una altura máxima de 3.245 msnm y una altitud mínima 147 msnm. La caracterización hidrológica indica que el río Charte se encuentra en el área hidrográfica de la Orinoquia (3), en la zona hidrográfica del Meta (35), sobre la subzona hidrográfica del río Cusiana (3519) (IDEAM, 2013b), la cuenca tiene una extensión total de 163 km desde su nacimiento hasta su desembocadura. En cuanto a la caracterización climática, en la zona se tiene un régimen de lluvias monomodal, donde las mayores precipitaciones inician en el mes de mayo, culmina en octubre con precipitaciones máximas de 400 mm mensuales; mientras que los meses de noviembre a abril se tienen las menores precipitaciones y las mayores temperaturas (IDEAM, 2021).

La caracterización de cobertura de la cuenca proviene de la plataforma del IDEAM a escala 1:100.000, esta información se maneja bajo la metodología Corin Land Cover adaptada a Colombia (IDEAM, 2010) y se clasificó siguiendo la nomenclatura de Swat caso similar ocurre con el tipo de suelo que se tuvo en cuenta el estudio de la FAO/UNESCO a una escala de 1:5000000, y se clasificó con la base de suelos global de la FAO.

Cuadro 10. Tipos de cobertura que predominan en la cuenca.

Simbología	Uso	Simbología	Uso
RNGE	Hierbas y pastos	FRST	Bosques mixtos
URHD	Zonas Urbanizadas	WETF	Bosque húmedo
SWRN	Zonas sin cobertura	AGRL	Agricultura
WATR	Zonas con agua		

Los anteriores insumos nos necesarios para el funcionamiento del modelo hidrológico SWAT, los datos que aquí se obtienen se apoyan en la herramienta Swat Output Viewer de manejo libre que facilita la representación cartográfica, por cada subcuenca y ayuda a caracterizar datos de escurrimiento. En el caso del análisis de cobertura, se proyecta el uso del software de manejo libre QGIS

3.18, en este se realiza todo el procesamiento de las imágenes satelitales tipo Landsat 8, que se evaluarán en una escala temporal.

3.3.2. Índice de vegetación normalizado (NDVI)

Una vez concluido el proceso de calibración y validación, se consideraron los datos volúmenes de escurrimiento. Esta información se encuentra disponible desde el periodo de (1989- 2019), con estos datos se procedió a generar resultados estadísticos que permitieran la comparación e interpretación de los datos que se encuentran en evaluación.

Como se ha mencionado la presencia de cobertura vegetal es un valor determinante para la ocurrencia de escurrimiento, de allí la importancia de conocer el comportamiento de la vegetación en una escala temporal. Para realizar el análisis de coberturas se procedió a la obtención de imágenes satelitales tipo Landsat 8, que se encuentran entre el periodo de (2013-2019). Estas imágenes se analizaron a través del software Qgis 3.18 de manejo libre. Se eligió el índice de vegetación (NDVI), ya que es un indicador de biomasa fotosintéticamente activa que permite detectar cambios en el crecimiento de la vegetación o diferenciar otros tipos de cobertura artificial que podrían encontrarse en el área de estudio (TYC, 2019). En investigaciones como las adelantadas por (Aguilar et al., 2010; Díaz-García, 2015; Revelo et al., 2020) usaron el índice de vegetación normalizada (NDVI) para identificar aspectos importantes en un cultivo como el estado fitosanitario y la presencia de determinadas especies (Ecuación 1). El NDVI se puede calcular haciendo uso de una combinación entre bandas espectrales (Banda roja e infrarrojo cercano (NIR)), estas bandas permiten evaluar la intensidad en que se presenta el pigmento de clorofila en las plantas, es así como se discretiza de manera puntual las características de la vegetación

$$NDVI = \frac{(NIR - \text{Banda Roja})}{(NIR + \text{Banda Roja})} \quad (1)$$

El dato resultante de NDVI varía entre -1 y 1, donde los valores positivos corresponden a zonas con vegetación, a mayor resultado se puede entender como mayor densidad en la vegetación y mayor sanidad en las plantas. Si, se obtienen datos negativos es indicativo para la presencia de nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo o afloramientos rocosos (Díaz-García, 2015; Zamar, 2004)

3.3.3. Análisis de ajuste entre las variables de escurrimiento y la cobertura vegetal predominante en la zona.

Una vez considerada toda la información de escurrimiento proveniente de la modelación hidrológica con SWAT en escala anual para el periodo de (2013-2019), se usó el programa Excel de Microsoft Office. En el caso del análisis de cobertura del índice NDVI para los respectivos años, se buscó encontrar la relación de dicho conjunto de datos de escurrimiento con los valores de NDVI para cada una de los HRU que se encuentran en análisis. Para encontrar dicha relación se implementó el coeficiente de determinación (R^2) Ecuación (2). El valor que contempla este coeficiente se encuentra entre 0 a 1, donde los valores aceptables para la correlación se mantienen en 0.5 o por encima de este (Sánchez Galindo et al., 2017; Salas-Martínez et al., 2014)

$$R^2 = \frac{\Sigma[(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 * (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2]}{\Sigma(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 * \Sigma(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (2)$$

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Análisis de coberturas

Para la obtención y preprocesamiento de la información, se tuvo en cuenta un factor que resulta muy limitante en el manejo de imágenes satelitales, la cantidad

de nubes que se encuentran sobre la zona de estudio. De esta manera, se consideraron imágenes con un rango menor al 20% de nubosidad, bajo esta condición se descartó información proveniente de los meses donde ocurren los mayores aportes de precipitación, ya que en este periodo el porcentaje de nubes sobre la cuenca tiende a ser mayor de lo esperado. Una vez determinada esta información base, se inició con el análisis de cobertura predominante en la zona de estudio, para imágenes pertenecientes a la temporada de verano, que ocurre durante los meses de octubre a marzo de los años 2013 y 2019.

Es importante considerar que el valor de NDVI de un mes en particular, tiene relación con las condiciones pluviométricas del mes en análisis y una influencia del mes anterior. En el siguiente cuadro se expresan los rangos de NDVI, que indican el tipo de cobertura o característica que se encuentra siendo expresada por dicho índice.

Cuadro 11. Rangos de clasificación para las coberturas de la tierra en relación al valor de NDVI.

Valores NDVI	de Cobertura de la tierra	Descripción
< -0.1	Clases no vegetales	Agua y nubes
-0.1 – 0.15	Tierra desnuda	Suelo degradado y sin cobertura.
0.15 – 0.25	Vegetación Dispersa	Tierras cultivadas, herbazales, pastizales,
0.25 -0.40	Vegetación Abierta	Vegetación leñosa, plantación arbustiva
>0.40	Vegetación Cerrada	Vegetación cerrada, bosque

Fuente: (Vargas, N., 2017 como se cito en Segura-Guzmán & Bejarano-Flórez, 2019)

En la siguiente figura se ejemplifica el comportamiento del índice de vegetación, de una imagen captada en el mes de enero del 2014 y otra perteneciente al mes

de octubre del 2019; se tomó como área representativa la cuenca alta y media hasta el punto de aforo.

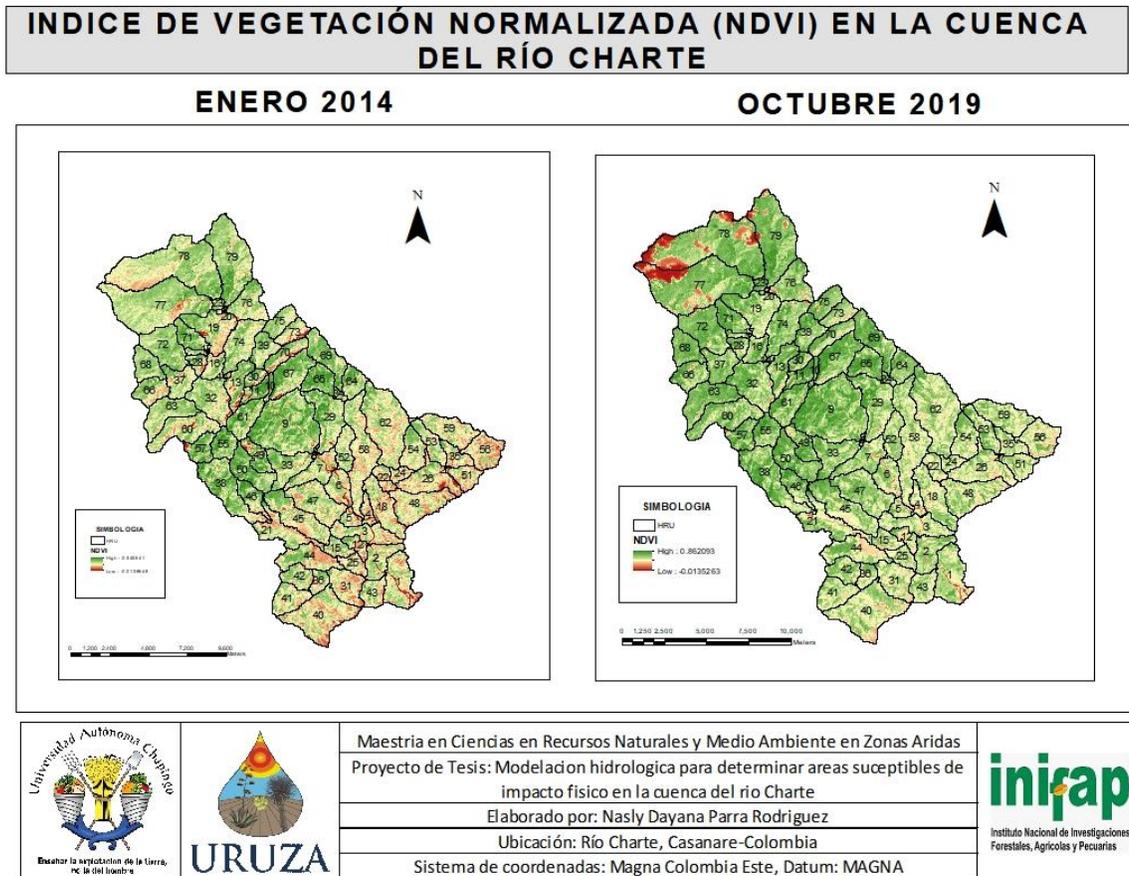


Figura 15. Comportamiento de NDVI en la temporada de verano y de lluvia en la cuenca. Elaboración propia.

En la imagen satelital que representa el índice de vegetación para el mes enero del 2014, se puede identificar dos grandes diferencias en cuanto a cobertura vegetal predominante, la primera de ellas corresponde al rango que define la cobertura de pastizales y de tierras cultivadas, que se distribuyen en pequeños remanentes desde la cuenca alta, ubicándose en zonas donde se presenta la menor altura. Adicionalmente se puede identificar que en la zona de cuenca media en cercanía al punto de aforo y donde se tiene la menor altura, predomina la cobertura de tipo pastizal. También se tiene cobertura vegetal de tipo leñosa, que se distribuye mayoritariamente en la cuenca alta y en las mayores

pendientes. Estadísticamente se tiene una mejor relación de ajuste, ya que se tienen menor dispersión en los datos de NDVI.

Caso contrario sucede con la imagen satelital del mes de octubre del 2019, donde la cobertura predominante se encuentra desde el rango del 0.25 a >40 de NDVI lo que comprende una vegetación con características leñosas que podría encontrarse dispersa o cerrada, mientras que los valores de NDVI que definen la cobertura de pasturas tienen menor representación cartográfica. Además, la relación de ajuste es menor de lo esperado. Como se ha nombrado anteriormente el índice de vegetación se encuentra influenciado por la disponibilidad de precipitación y la humedad del suelo (Belda et al., 1999; De la casa & Ovando, 2006; Tiedemann & Zerda, 2008), razón por la que se debe tener presente que las condiciones climáticas mejoran o empeoran la estacionalidad de la vegetación que se encuentra en la zona. Por ende, se tendrán valores de NDVI distintos con el paso de una época seca a lluviosa.

Tal como se puede demostrar en la anterior figura, para el mes de enero del año 2014 se tiene un valor máximo de NDVI que corresponde a 0.5 lo que indica una vegetación de tipo leñosa, el valor mínimo de NDVI contempla características de nubosidad y agua. Adicionalmente se reconoce que durante el mes de octubre de 2019 el valor de NDVI incrementó a 0.6 lo que indica la presencia de una cobertura en mejor estado, el valor mínimo también es identificado como nubes y agua. Para ampliar la información del comportamiento del índice NDVI, se utilizaron seis imágenes satelitales.

Cuadro 12. Descripción de datos de las imágenes satelitales utilizadas.

Tipo de imagen	Año	Mes
Landsat 8	2013	Octubre
Landsat 8	2014	Enero
Landsat 8	2016	Enero
Landsat 8	2017	Octubre

Landsat 8	2018	Febrero
Landsat 8	2019	Agosto

Una vez se logró determinar los respectivos índices de vegetación normalizada para algunos meses en particular. Se procedió a tomar en cuenta los valores de NDVI en los HRU que no presentaban ningún tipo de afectación por factores como la nubosidad, esto se realizó con base a la composición de una imagen real del periodo que se encontraba en análisis. Una vez obtenida dicha imagen satelital, se procedió a eliminar los HRU que afectaban el análisis al encontrarse con una presencia de nubosidad. Para obtener los valores estadísticos de NDVI por cada HRU, se usó la herramienta zonal statistics anclada al software Qgis, esta herramienta permite generar una base de datos, en la que se rescatan los valores máximos, mínimos y promedios, estos datos se relacionaran con los valores de escurrimiento. A continuación, se presenta gráficamente el comportamiento del NDVI en seis periodos de mes y años distintos, las tonalidades rojizas corresponden a los menores valores de NDVI, los valores altos se encuentran representados en tonalidades verdes.

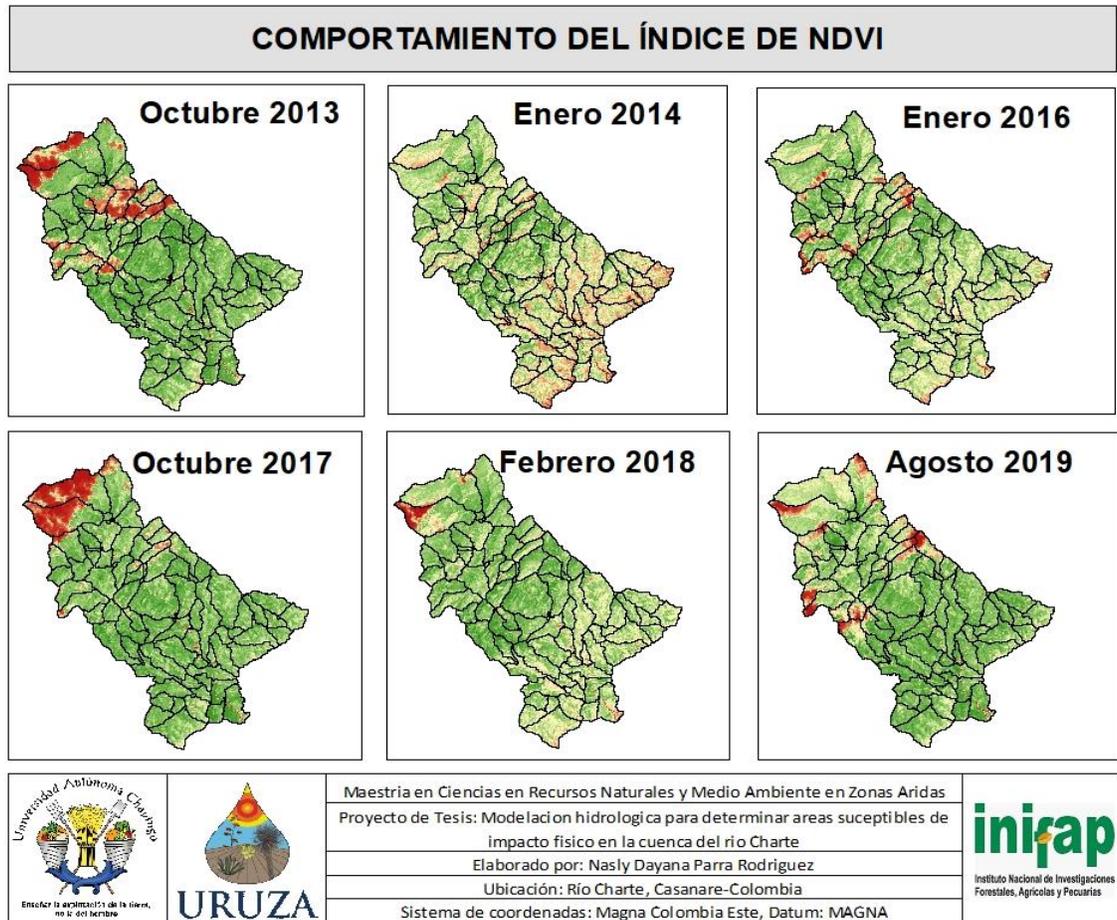


Figura 16. Valores de NDVI por cada año que se encuentra en análisis.
Elaboración propia.

3.4.2. Análisis de escurrimiento.

Para conocer el comportamiento del parámetro de escurrimiento en la cuenca se implementó el uso de la herramienta SWAT OUTPUT, esta permite identificar y discretizar valores de escurrimiento por cada HRU que previamente fue considerado por el modelo de simulación SWAT, a partir de un conglomerado de años que comprende el periodo de (1989-2019). Con la información proporcionada por este software y la proveniente del Access de la simulación SWAT se procedió a evaluar el valor promedio de escurrimiento para los años que se encontraban siendo representados por las imágenes satelitales de los años (2013 y 2019). Esta información se descargó del SWAT OUTPUT en un

formato Excel delimitado por comas (csv). Estos datos se relacionan con los valores de NDVI, que anteriormente fueron obtenidos.

3.4.3. Evaluación del método estadístico

Una vez culminado el proceso de análisis del índice NDVI con la ayuda de los sistemas de información geográfica y mediante el uso el software Qgis, y la extracción de datos de escurrimiento que provienen de la herramienta SWAT OUTPUT, se procedió a relacionar estos valores mediante el coeficiente de determinación R^2 .

Este análisis se realizo teniendo en cuenta una imagen satelital de un mes y año específico. De manera general se puede percibir que entre mayor sea el escurrimiento menor es el valor de NDVI captado, mientras que a menor escurrimiento mayor índice de NDVI considerado en cada HRU.

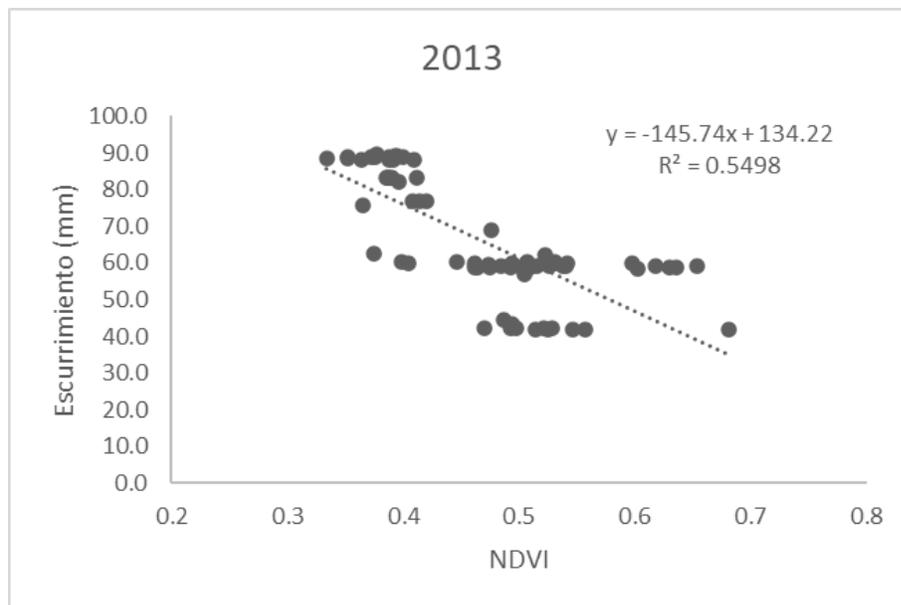


Figura 17. Relación de NDVI y escurrimiento para el octubre de 2013.

Para la imagen que representa el mes de octubre del año 2013, se encuentra

distribuido de la siguiente manera: Los menores rangos de escurrimiento tienen los valores más altos índices de NDVI, se puede observar que el valor de NDVI se mantiene entre 0.3 a 0.7 con un rango de escurrimiento de 90 mm a 40 mm. Se puede observar dos agrupaciones de datos; la primera en el rango de los 90 mm a 70 mm con un NDVI de 0.3 a 0.4, el segundo grupo se encuentra desde los 60 mm a los 40 mm y se extiende en un NDVI de 0.4 a 0.7. De manera general se encontró que el valor de ajuste es una R^2 : 0.54.

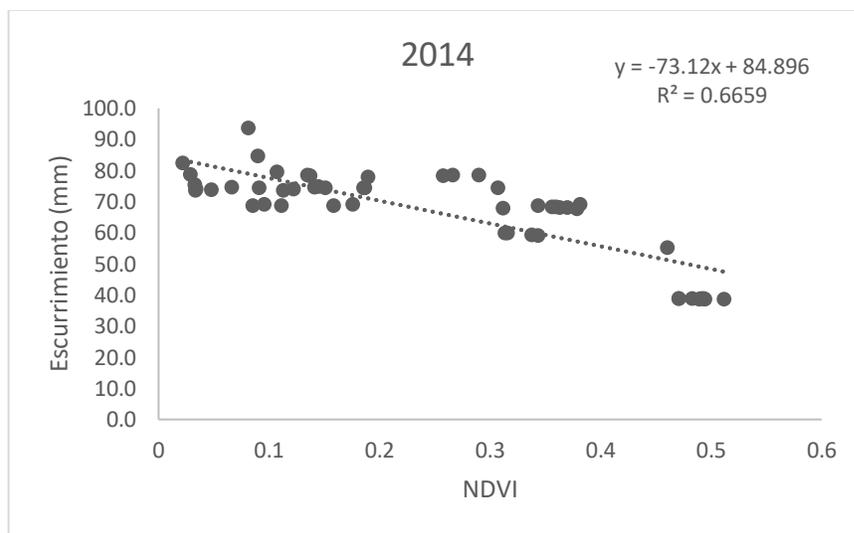


Figura 18. Relación de NDVI y escurrimiento para enero de 2014.

El siguiente análisis se realizó a partir de una imagen del mes de enero del 2014, el comportamiento de NDVI y escurrimiento tiene el siguiente comportamiento: A mayor escurrimiento menor expresión del índice, en este caso se tiene no evidencia un comportamiento agrupado. Los datos de escurrimiento consideran su máximo desde 90mm a 50 mm, en el caso del NDVI el máximo valor reportado es de 0.5 y mínimo se encuentra entre 0 y 0.1. Puede considerarse que en meses anteriores y enero la presencia de lluvias es limitada, razón por la cual el índice mantiene una expresión reducida haciendo mas presentativo la falta de vegetación. Finalmente, el ajuste de R^2 : 0.66.

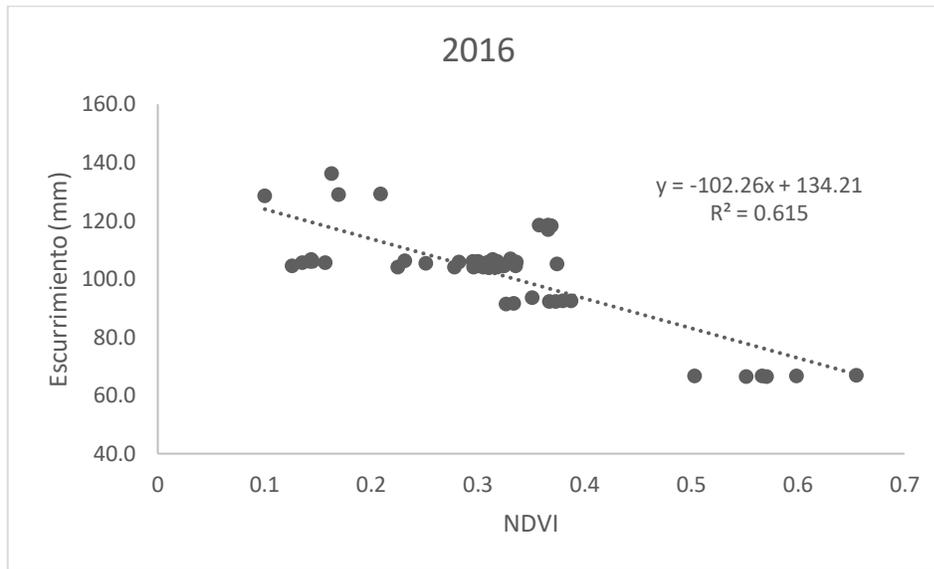


Figura 19. Relación de NDVI y escurrimiento para enero del 2016.

En el mes de enero de 2016 se relaciono el NDVI y el valor de escurrimiento, se logro obtener un ajuste de R^2 : 0.61. Los datos de escurrimiento tienen un rango de 160 mm a 40 mm, mientras que el valor de NDVI se encuentra de 0.1 a 0.7, se observa una pequeña acumulación de datos entre el rango de 120 a 90 mm con un NDVI de 0.3 a 0.4. En este caso particular se tiene una mayor distribución de los datos y puede asumirse una mayor presencia de cobertura de tipo pastizal y arbustiva.

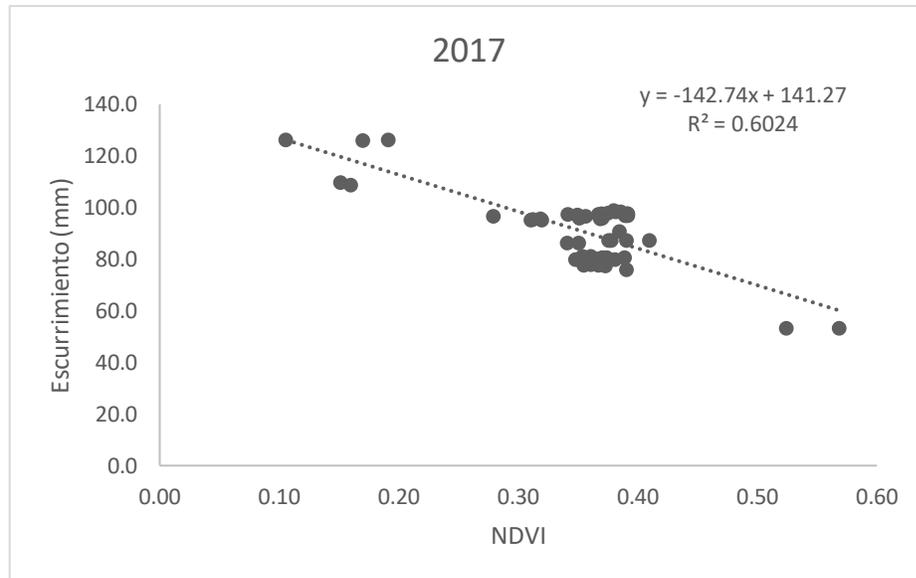


Figura 20. Relación de NDVI y escurrimiento para el mes de octubre del 2017. El siguiente análisis se realizó a partir de una imagen proveniente del mes de octubre del 2017, el comportamiento de NDVI y escurrimiento tiene el siguiente comportamiento: A mayor escurrimiento menor expresión del índice, mientras que a mayor valor de NDVI menor escurrimiento. Aunque el valor máximo de escurrimiento es de 120 mm, se observa una agrupación de datos desde el rango de 0.3 a 0.5 que tienen una constante, en el caso del ajuste de R^2 : 0.60.

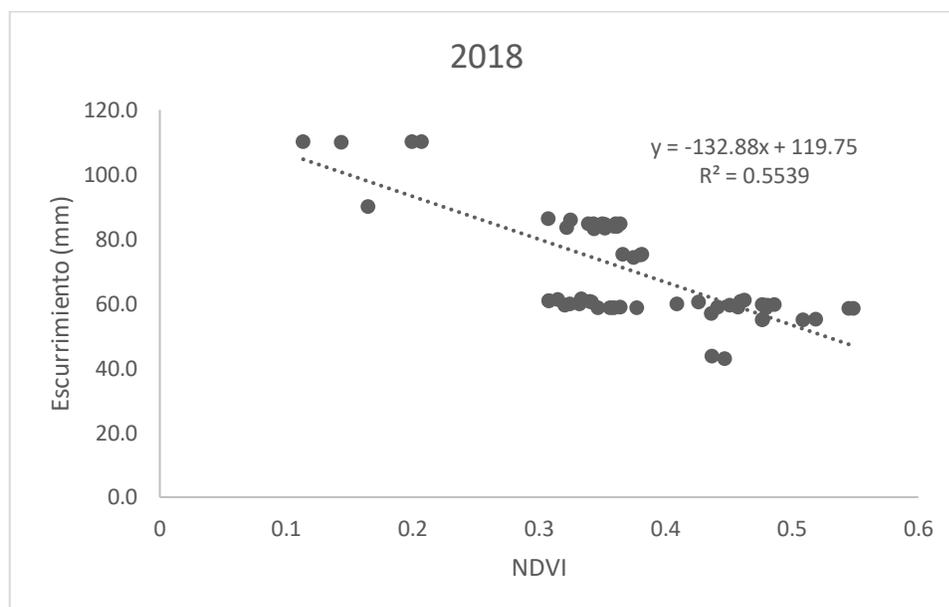


Figura 21. Relación de NDVI y escurrimiento para el mes de febrero de 2018.

Para el mes febrero de 2018, se obtuvieron los siguientes datos: El rango máximo de escurrimiento 110 mm a 40 mm; mientras que el valor de NDVI oscila entre 0.55 a 0.1 respectivamente, aunque se tiene una mayor acumulación de datos a partir de 0.3 a 0.55, indicando la presencia de vegetación de tipo pastizal y arbustiva. En el caso del ajuste de R^2 : 0.55, que es un valor aceptable.

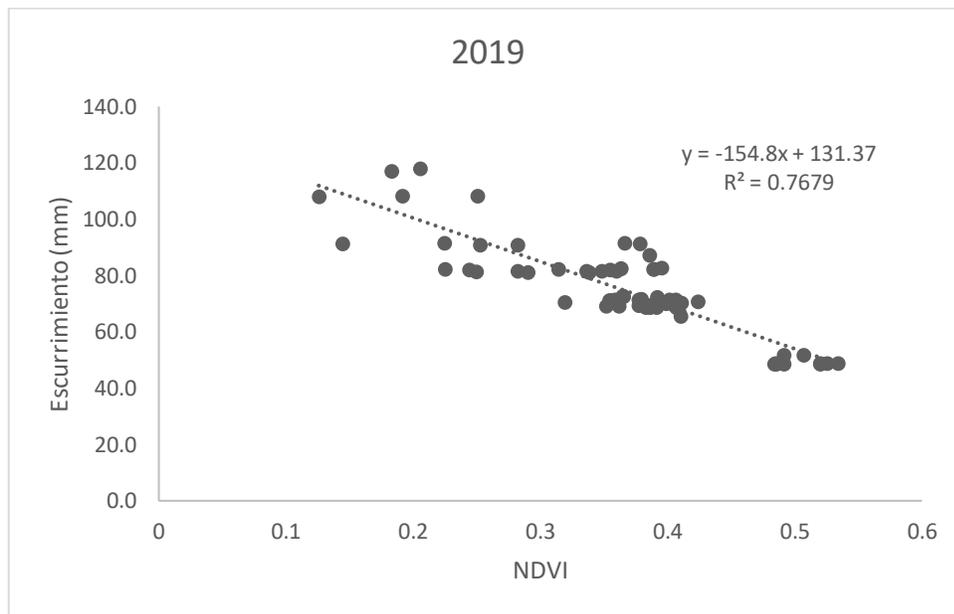


Figura 22. Relación de NDVI y escurrimiento para el mes de agosto 2019.

Para el mes de agosto del 2019 se detectó un comportamiento de mejor ajuste para R^2 ya que alcanzo un 0.76, indicativo de una buena relación entre los datos. El valor máximo de escurrimiento se encuentra en 120 mm, el mínimo en 50 mm; el valor de NDVI tiene un rango más reducido se encuentra entre 0.1 a 0.5. Esta imagen presentó datos más cercanos a la línea de ajuste, se puede atribuir al hecho que en el mes de agosto se tienen condiciones climáticas, ya que hace parte del periodo de lluvias en la zona.

Las anteriores figuras permiten considerar que los valores de relación de los valores se encuentran siendo aceptables, al encontrarse por encima de los 0.5 de R^2 . Todas las gráficas presentaron el mismo comportamiento a razón del

aumento de una de las variables la siguiente tiene una correspondencia a la disminución.

Es importante considerar que existen una serie de factores físico-químicos del suelo y distintas variaciones climáticas que intervienen y ejercen influencia directa sobre las variables que se encuentran siendo estudiadas. En el caso del escurrimiento se deben considerar factores como la disponibilidad de precipitación, cobertura vegetal predominante, tipo de pendiente, el coeficiente de escurrimiento, y varias características de suelo. Mientras que el valor de NDVI, tiene una relación directa con la precipitación y la cobertura vegetal, es decir los factores climáticos tienen mayor influencia sobre las fluctuaciones climáticas drásticas; como eventos o fenómenos de niño (sequia), niñas (precipitación) e incendios, esto puede desencadenar disminuciones o aumentos drásticos en el valor de NDVI que se calcula para determinado tiempo.

3.5. CONCLUSIONES

Se considera que el índice de vegetación normalizada (NDVI), expresa la relación proporcional con la variable de escurrimiento en la cuenca. Sin embargo, se detecta que este tipo de índices son muy sensibles a la intervención de factores climáticos como la precipitación y la temperatura, que influyen drásticamente para tener un mayor valor de NDVI, hecho que minimiza el valor de R^2 .

Aunque el índice de vegetación se calcula para un periodo específico de tiempo, Se debe considerar la influencia de eventos climáticos del mes anterior, ya que factores como el tipo de suelo y la retención de agua en el mismo, permitirán tener una mejor expresión de vigor de la vegetación.

También se puede entender que el índice de vegetación normalizada (NDVI) expresa el comportamiento de la vegetación, pero no es suficiente para definir si, en la cuenca se presenta una pérdida de cobertura vegetal ya que el NDVI solo es

un indicativo del estado de la clorofila en las plantas, en el caso de la cuenca del río Charte gran parte de su cobertura vegetal tiene características caducifolias, que entrado el periodo de lluvias vuelve a componer todo su follaje.

3.6. LITERATURA CITADA

- Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., & Contreras, C. (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Redalyc*, 14, 49–65. <https://www.redalyc.org/pdf/837/83715125003.pdf>
- ANNA (Agencia Nacional Minera) 2020. *Geovisor Agencia Nacional de Minería*. <https://www.anm.gov.co/?q=anna-mineria>
- Belda, F., Melia, J., & Segarra, D. (1999). *Relación entre el NDVI, precipitación y humedad del suelo. Aplicación a zonas forestales de la provincia de Alicante*. 80–83. <http://aet.org.es/congresos/viii/alb20.pdf>
- Beltrán, D. (2017). *Aplicación de índices de vegetación para evaluar procesos de restauración ecológica en el parque forestal embalse del neusa*. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17210/BeltranHernandezDiegoHernan2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cabrera, J. (2018). *Unidad de Respuesta Hidrológica (H.R.U.)*. http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_8.pdf
- Cartaya, S., Zurita, S., Rodríguez, E., & Montalvo, V. (2014). *Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabi, Ecuador*. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17210/BeltranHernandezDiegoHernan2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chipana-Vasquez, R. (2012). *Estimación de los escurrimientos en la cuenca del río Porvenir, mediante la aplicación del modelo SWAT*.
- Cruz-González, A., Sánchez-Cohen, I., Macías-Corral, M. A., Velásquez-Valle, M. A., & Trejo-Calzada, T. R. (2021). Hydrologic modeling to measure the impact of climate change in the Yaqui River basin. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(1), 77–94. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.02.040>
- De la casa, A., & Ovando, G. (2006). Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias.*, 35, 67–85. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86435105.pdf>
- Díaz-García, J. J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS / RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Hurtado-Pidal, J., & Yáñez-Borja, D. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del Río Las Juntas. *Revista*

- Geoespacial*, 12(November), 106–122. <https://bit.ly/3kmttlls>
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2010. *Mapa Nacional de Coberturas de la tierra. Adaptación Corine Land Cover. República de Colombia. Escala 1:100.000. Periodo 2005 - 2009.* <http://geoservicios.ideam.gov.co/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/a0cd1183-237d-4c98-9011-7dd769febfb2>
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2011. *Análisis del impacto del fenómeno “la niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país tabla de contenido* (Issue 20). <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Análisis+Impacto+La+Niña.pdf/640a4a18-4a2a-4a25-b7d5-b3768e0a768a>
- IDEAM. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2013b. *Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas.* [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIAS MAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIAS_MAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf)
- IGAC. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) 2014b. *Estudio general de suelos zonificación de tierras: Departamento de Casanare.*
- IMTA. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2019. *¿Que es una cuenca?* <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240–253. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., & Williams, J. . (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resources Institute*, 1–647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2010). (*Soil and Water Assessment Tool*) *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario.* <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Paredes, F., & España, R. (2010). ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCURRIMIENTO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES SPOT 5 EN LOS LLANOS CENTRALES DE VENEZUELA. *Unell, Ciencia y Tecnología.*, 25–28. <http://revistas.unellez.edu.ve/index.php/ruct/article/view/157/150>
- POMCA. (Plan de Ordenamiento de Cuencas Hidrográficas). 2005. *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del Río Charte.*
- Revelo, D., Mejía, J., Montoya, B., & Hoyos, J. (2020). Análisis de los índices de vegetación NDVI , GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*) Analysis of the Vegetation Indices NDVI ., *Ingeniería y Desarrollo*, 38. <https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/12960/214421445144>
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes, R., & Fernández-Reynoso, S. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del río mixteco en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 48, 1–15.
- Sánchez Galindo, M., Fernández Reynoso, D., Martínez Menes, M., Granados Rubio, E., & Berber Ríos, J. D. (2017). *Modelo hidrológico de la cuenca del*

- río Sordo, Oaxaca Mexico con SWAT. 1–27.
<https://imta.gob.mx/tyca/descargas/preprint/Vol.-VIII-No.-5-Septiembre-Octubre-2017/Artículo 0322NS Versión final.pdf>
- Segura-Guzmán, A., & Bejarano-Flórez, S. (2019). *Análisis del índice normalizado de diferencia de vegetación (NDVI) en la zona sur del departamento del tolima*. [Universidad de Ibagué].
<https://repositorio.unibague.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12313/1827/1/Tra bajo de grado.pdf>
- Semanart. (2014). *El medio ambiente en México*.
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/03_suelos/3_3.html
- Tiedemann, J., & Zerda, H. (2008). Relación temporal NDVI- Precipitación del bosque y pastizal natural de Santiago del Estero, Argentina. *Infor*, 14(3), 497–507.
<https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/17478/25187.pdf;jsessionid=EE253368FCFF9A0B6573236B209C8DB3?sequence=1>
- TYC. (2019). *NDVI, ¿qué es y para qué sirve?*
<https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- Uribe, N., Quintero, M., & Valencia, J. (2013). *Aplicación Del Modelo Hidrológico Swat (Soil and Water Assessment Tool) a La Cuenca Del Río Cañete (Swat)*.
https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/107463/Segundo Informe_SWAT 2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Valverde-Gamboa, E. (2018). *Producción De Agua Y Sedimento Actual Y Futuro a Partir De Cambios De Cobertura Forestal, Sector Prusia , Parque Nacional [Instituto Tecnológico de Costa Rica]*.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10335/modelacion_hid rologica_cuantificar_produccion_agua_sedimento_actual_futuro_a_partir_c ambios_cobertura_forestal_sector_prusia_parque_nacional_volvan_irazu.p df?sequence=1&isAllowed=y
- Weber, J., & Baigorri Ocampo, S. (2019). Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina). *Aqua-LAC*, 11(1), 34–54. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-1-03>
- WWF. (World Wildlife Fund INC). 2020. *Cambio climático y energía*.
- Zamar, J. L. (2004). *El índice normalizado de vegetación como indicador de la sustentabilidad de un territorio agrícola*. [Universidad Córdoba].
<https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/4645/Zamar%2C José Luis - El Índice normalizado de vegetación como indicador de la sustentabilidad de un territorio agrícola.pdf?sequence=4&isAllowed=y>