EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA HÍDRICA DE LA MICROCUENCA HATO LAGUNA MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT

PAULA CAMILA MONGUI AVILA

PAULA ANDREA SIERRA RUIZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL

TUNJA

2021

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA HÍDRICA DE LA MICROCUENCA HATO LAGUNA MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT

PAULA CAMILA MONGUI AVILA

PAULA ANDREA SIERRA RUIZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director:

M.sc. Camilo Andrés Rojas Cruz

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL

TUNJA

2021

DEDICATORIA

Este trabajo de grado lo dedico a Dios por permitirme cursar esta etapa tan especial, a mis abuelos y a mi familia por haberme forjado como la persona que soy, por creer en mis capacidades y por su apoyo incondicional y motivación a superarme y cumplir cada una de mis metas en el transcurso de mi carrera. A mi mejor amiga que con su alegría me motivo a seguir adelante y luchar para alcanzar mis sueños y a todas las personas que hicieron posible este trabajo.

Paula Camila Mongui Ávila

Dedico este trabajo de grado, a Dios por permitirme culminar esta etapa, a mis padres quienes son mi motivación y fortaleza diaria, por su inmenso esfuerzo, apoyo y amor incondicional a lo largo de mi vida y carrera universitaria, a mis hermanos por su respaldo y compañía y a todas las personas que me han acompañado a lo largo de este proceso.

Paula Andrea Sierra Ruiz

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expresamos nuestro agradecimiento a Dios por guiarnos a lo largo de nuestra carrera universitaria, por darnos la sabiduría y la capacidad intelectual para realizar este proyecto y por permitirnos culminar esta etapa satisfactoriamente.

A nuestros padres por apoyarnos en todo momento, por los valores que nos inculcaron, y por darnos la oportunidad de tener una educación de excelente calidad en el transcurso de nuestras vidas, brindándonos siempre su comprensión, solidaridad y un excelente ejemplo a seguir.

Así mismo, agradecemos a nuestro director el Ingeniero Camilo Andrés Rojas Cruz por su asesoría y trabajo constante a lo largo de nuestro trabajo de grado, por brindarnos sus conocimientos y promover ambientes de aprendizaje, permitiéndonos adquirir nuevos saberes e interés por la investigación en pro del cuidado del recurso hídrico.

A la Universidad Santo Tomas seccional Tunja por promover espacios académicos de reflexión y aprendizaje, por sus excelentes instalaciones y por inculcarnos la ética, la creatividad y la moral para ser profesionales íntegras que sirvan a la sociedad Colombina.

Por último, le agradecemos a la facultad de Ingeniería ambiental y sus docentes por contribuir en nuestra formación académica y personal, por ofrecernos diferentes espacios y actividades de aprendizaje y por darnos la oportunidad de crecer profesionalmente mediante los conocimientos y el apoyo dado.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 12
ABSTRACT 13
1. INTRODUCCIÓN 14
2. OBJETIVOS 16
2.1 Objetivo general 16
2.2 Objetivos específicos 16
3. ANTECEDENTES 17
3.1 Estudios a nivel internacional sobre las alteraciones en la respuesta hídrica por el cambio en el uso de suelos 17
3.2 Estudios a nivel nacional sobre las alteraciones en la respuesta hídrica por el cambio en el uso de suelos 19
4. MARCO TEÓRICO 20
4.1 Modelo hidrológico 20
4.2 Modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) 21
4.3 Cuencas hidrográficas 23
4.4 Respuesta hidrológica de cuencas 23
4.5 Clima 24
4.6 Coberturas vegetales y uso de la tierra 24
4.7 Expansión de la frontera agrícola 25
5. GENERALIDADES 26
5.7 Características de los tipos de suelos de la microcuenca Hato laguna. 31
6. METODOLOGÍA 33
6.1 Revisión de información primaria 33
6.2 Delimitación de la zona de estudio 33
6.3 Preparación datos de entrada modelo SWAT. 34
6.3.1 Procesamiento de datos hidrometeorológicos 34
6.3.2 Procesamiento de suelos 37
6.3.3 Procesamiento de coberturas vegetales. 42
6.3.4 Definición de pendientes 45
6.4 Aplicación del modelo SWAT 46
6.5 Calibración y Validación del modelo SWAT 47
6.6 Planteamiento de Escenarios 48

6.7 Análisis de información y planteamiento de estrategias 48
7. RESULTADOS 49
7.1 Microcuenca Hato Laguna y sus subcuencas 49
7.2 Unidades De Respuesta Hidrológica (HRUs) 49
7.3 Calibración y validación del modelo 51
7.4 Comportamiento hidrológico de la Microcuenca 55
7.4.1 Percolación (PERC_mm) 56
7.4.2 Evapotranspiración Real (ET_mm) 57
7.4.3 Flujo de retorno (GW_Qmm) 59
7.4.4 Escorrentía Superficial (SURQ_mm) 60
7.4.5 Escorrentía Subsuperficial (LAT_Qmm) 61
7.5 Escenarios 62
7.5.1 Escenario 1 62
7.5.2 Escenario 2 65
7.6 Comportamiento del caudal obtenido de la situación inicial y de los escenarios planteados 67
7.7 Comportamiento de la escorrentía superficial obtenida de la situación inicial y de los escenarios planteados 68
7.8 Comportamiento del rendimiento hídrico obtenido de la situación inicial y de los escenarios planteados 69
7.9 Comportamiento de la evapotranspiración obtenida de la situación inicial y de los escenarios planteados 70
7.10 Curvas de duración de caudales obtenidas de la situación inicial y de los escenarios planteados 71
7.11 Comportamiento de rendimiento de sedimentos obtenido de la situación inicial y de los escenarios planteados 74
7.12 Respuesta hidrológica de la microcuenca y su relación con las coberturas vegetales 75
7.13 Estrategias para la rehabilitación y equilibrio de la respuesta hídrica de la microcuenca . 77
8. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO 82
9. CONCLUSIONES 84
RECOMENDACIONES 85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 87
ANEXOS 94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización área de estudio. 26
Figura 2. Precipitación media mensual - Estación Las Cintas, 2009-2015. 27
Figura 3. Caudales medios mensuales multianuales – Estación Hato Laguna, 2009-2015. 28
Figura 4. Caudales medios mensuales vs precipitación media mensual, 2009-2015. 29
Figura 5. Valores totales mensuales de brillo solar, 2009-2015. 29
Figura 6. Valores medios mensuales de humedad relativa, 2009-2015. 30
Figura 7. Valores máximos y mínimos mensuales de temperatura, 2009-2015. 30
Figura 8. Valores mensuales multianuales del recorrido del viento, 2009-2015. 31
Figura 9. Modelo Digital de Elevación (DEM) empleado para la microcuenca Hato laguna. 33
Figura 10. Localización de las estaciones empleadas. 35
Figura 11. *txt para la precipitación de la estación Las Cintas 36
Figura 12. *txt con la ubicación de las estaciones 36
Figura 13. Mapa de los tipos de suelos de la microcuenca Hato laguna 37
Figura 14. Esquema general programa NumCur 37
Figura 15. Implementación Soil Water Characteristics 38
Figura 16. * txt que relaciona los tipos del suelo del mapa con la base de datos del SWAT. 41
Figura 17. Tabla "usersoil" del archivo "SWAT2012" modificada para el área de estudio. 41
Figura 18. Mapa de coberturas vegetales de la microcuenca Hato laguna 42
Figura 19. *txt que relaciona los usos del suelo del mapa con la base de datos del SWAT. 45
Figura 20. Esquema del procedimiento realizado en la implementación del modelo SWAT. 46
Figura 21. Esquema del procedimiento realizado para la calibración y validación del modelo SWAT. 47
Figura 22. Mapa de las Subcuencas de la microcuenca Hato laguna 49
Figura 23. Distribución de las unidades de respuesta hidrológica (HRUs) en la microcuenca Hato laguna 51
Figura 24. Caudal simulado Vs Caudal observado para la calibración 51
Figura 25. Calibración del modelo empleando SWAT CUP. 52
Figura 26. Caudales simulados Vs Caudales observados en la validación 54
Figura 27. Balance hídrico de la microcuenca Hato laguna. 55
Figura 28. Mapa del promedio anual multianual de percolación de la microcuenca Hato Laguna 56

Figura 29. Mapa del promedio anual multianual de la evapotranspiración real de la microcuenca Hato Laguna..... 58

Figura 30. Mapa del promedio anual multianual del flujo de retorno de la microcuenca Hato Laguna 59

Figura 31. Mapa del promedio anual multianual de la escorrentía superficial de la microcuenca Hato Laguna..... 60

Figura 32. Mapa del promedio anual multianual de la escorrentía subsuperficial de la microcuenca Hato Laguna..... 61

Figura 33. Cobertura vegetal escenario 1..... 64

Figura 34. Balance hídrico del escenario 1 65

Figura 35. Mapa coberturas vegetales escenario 2. Ampliación de la frontera agrícola..... 66

Figura 36. Balance hídrico escenario 2. Ampliación de la frontera agrícola. 67

Figura 37. Comportamiento caudales situación inicial vs escenarios planteados..... 68

Figura 38. Comportamiento escorrentía superficial situación inicial vs escenarios planteados. 68

Figura 39. Comportamiento rendimiento hidrico situación inicial vs escenarios planteados. 69

Figura 40. Comportamiento evapotranspiración situación inicial vs escenarios planteados..... 70

Figura 41. Comportamiento rendimiento de sedimentos situación inicial vs escenarios planteados 74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de los tipos de suelos de la microcuenca Hato laguna. 31

Tabla 2. Estaciones área de estudio microcuenca Hato laguna. 35

Tabla 3. Parámetros físico químicos de los suelos de la microcuenca Hato laguna. 40

Tabla 4. Porcentaje de ocupación de las coberturas vegetales en la microcuenca Hato Laguna 43

Tabla 5. Asignación códigos SWAT a la microcuenca Hato laguna. 43

Tabla 6. Clasificación de pendientes empleado en la microcuenca Hato laguna. 45

Tabla 7. Unidades de respuesta hidrológica de la microcuenca Hato laguna, según las subcuencas 50

Tabla 8. Parámetros empleados para la calibración del modelo. 52

Tabla 9. Desempeño en la calibración 53

Tabla 10. Niveles de desempeño estadístico 53

Tabla 11. Desempeño en la validación..... 54

Tabla 12. Comparación del desempeño de la calibración y validación..... 55

Tabla 13. Uso de suelos escenario 1..... 62

Tabla 14. Coberturas vegetales escenario 2. Ampliación de la frontera agrícola con cultivos de cebolla y hortalizas. 66

Tabla 15. Estrategias para la rehabilitación y equilibrio de la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna. 78

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación general del balance hídrico 22
Ecuación 2. Ecuación de albedo del suelo..... 39
Ecuación 3. Ecuación de materia orgánica..... 39
Ecuación 4. Ecuación del factor k de erodabilidad del suelo 39
Ecuación 5. Factor $\boldsymbol{fcsand}$..... 39
Ecuación 6. Factor $\boldsymbol{fcl - si}$..... 40
Ecuación 7. Factor $\boldsymbol{forgc}$ 40
Ecuación 8. Factor $\boldsymbol{fhisad}$ 40

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Promedio anual multianual de percolación de la microcuenca Hato Laguna 94

ANEXO 2. Promedio anual multianual de la evapotranspiración real de la microcuenca Hato Laguna..... 95

ANEXO 3. Promedio anual multianual del flujo de retorno de la microcuenca Hato Laguna ... 97

ANEXO 4. Promedio anual multianual de la escorrentía superficial de la microcuenca Hato Laguna..... 99

ANEXO 5. Promedio anual multianual de la escorrentía subsuperficial de la microcuenca Hato Laguna..... 101

ANEXO 6. Comportamiento hidrológico situación actual..... 103

ANEXO 7. Comportamiento hidrológico escenario 1. 103

ANEXO 8. Comportamiento hidrológico escenario 2. 104

ANEXO 9. Comportamiento sedimentos situación inicial..... 105

ANEXO 10. Comportamiento sedimentos escenario 1. 105

ANEXO 11. Comportamiento sedimentos escenario 2. 106

ANEXO 12. Promedio anual multianual del flujo de retorno del escenario 1 de la microcuenca Hato Laguna..... 106

ANEXO 13. Promedio anual multianual del flujo de retorno del escenario 2 de la microcuenca Hato Laguna..... 108

RESUMEN

La expansión de la frontera agrícola es una de las principales problemáticas a nivel ecosistémico, debido a la perdida de bosques nativos, biodiversidad, degradación del suelo y alteraciones en el comportamiento hídrico. El modelo hidrológico SWAT, permite estudiar el impacto ante el cambio de uso y la cobertura del suelo en cuencas hidrográficas y diferentes escenarios bajo regímenes de flujo. De acuerdo con lo anterior, el objetivo del presente proyecto es, evaluar los efectos de la expansión de la frontera agrícola sobre la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna del municipio de Aquitania, Boyacá.

Se recopilo información hidrometeorológica, de siete estaciones, características de los tipos de suelos, clasificación de pendientes e información de la cobertura vegetal mediante la metodología Corine Land Cover lo que permitió establecer las unidades de respuesta hidrológica (HRUs). El modelo SWAT fue calibrado y validado para un periodo de 6 años (2010-2015), con base en los valores de indicadores de eficiencia r^2, NASH y PBIAS se caracteriza el modelo como bueno y muy bueno. Se plantearon dos escenarios de variación de cobertura vegetal, el primero se enfatiza en la vocación de uso de suelos, mientras que el segundo se centra en la expansión de la frontera agrícola.

El comportamiento hidrológico de la microcuenca Hato laguna, permite inferir que la ampliación de la frontera agrícola ocasionada por cultivos de cebolla, genera un incremento en el rendimiento de sedimentos, escorrentía superficial y una disminución en la percolación y recarga de acuíferos, por lo cual, se plantearon estrategias para prevenir, controlar y/o mitigar esta problemática, dentro de las cuales se encuentran la restauración de zonas quemadas e implementación de rondas hídricas de 5 metros y la restauración agroecológica.

Palabras claves: Frontera agrícola, SWAT, respuesta hídrica, restauración agroecológica.

ABSTRACT

The expansion of the agricultural frontier is one of the main problems at the ecosystem level, due to the loss of native forests, biodiversity, soil degradation and alterations in water behavior. The SWAT hydrological model allows studying the impact of land use and land cover change in watersheds and different scenarios under flow regimes. Accordingly, the objective of this project is to evaluate the effects of the expansion of the agricultural frontier on the water response of the Hato laguna micro-watershed in the municipality of Aquitania, Boyacá.

Hydrometeorological information was collected from seven stations, soil type characteristics, slope classification and vegetation cover information using the Corine Land Cover methodology, which made it possible to establish the hydrological response units (HRUs). The SWAT model was calibrated and validated for a period of 6 years (2010-2015), based on the values of efficiency indicators r2, NASH and PBIAS, the model was characterized as good and very good. Two scenarios of vegetation cover variation were proposed, the first one emphasizes the land use vocation, while the second one focuses on the expansion of the agricultural frontier.

The hydrological behavior of the Hato laguna micro-watershed allows inferring that the expansion of the agricultural frontier caused by onion crops generates an increase in sediment yield, surface runoff and a decrease in percolation and aquifer recharge; therefore, strategies were proposed to prevent, control and/or mitigate this problem, among which are the restoration of burned areas, the implementation of 5-meter water courses and agro-ecological restoration.

Key words: Agricultural frontier, SWAT, water response, agroecological restoration.

1. INTRODUCCIÓN

La respuesta hídrica es el resultado de la entrada de lluvia, su transformación en escorrentía y su circulación hacia la salida de la cuenca (Verdú, 2003). Siendo uno de los principales indicadores del balance existente entre los recursos naturales (agua) de una cuenca y su aprovechamiento, ya que al aprovecharse de forma inadecuada los recursos la disponibilidad de estos disminuirá en cantidad y en calidad (Granada et al., 2013). De acuerdo a lo anterior es importante conocer la distribución espacial y temporal de la precipitación para la correcta caracterización de la respuesta hídrica y la evaluación de sus riesgos (Verdú, 2003).

Por otro lado, es importante tener en cuenta que los cambios en la cobertura del suelo pueden generar impactos sobre la respuesta hídrica, cuya magnitud depende de las características biogeofísicas de la cuenca y de las condiciones previas al evento de lluvia (Aguayo et al., 2016), influyendo entonces el cambio de coberturas junto con el comportamiento de la escorrentía en el régimen hidrológico de las cuencas (Bronstert et al., 2002). Por lo que podría decirse que principalmente la cubierta vegetal condiciona tal respuesta hidrológica (Ayora, 2016).

De acuerdo a lo anterior y debido a la importancia de conocer la respuesta hídrica de una Cuenca, Microcuenca o Subcuenca se planteó como objetivo evaluar los efectos de la expansión de la frontera agrícola sobre la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna del municipio de Aquitania, Boyacá. Considerando que la expansión de la frontera agrícola es el desarrollo de cultivos en zonas que anteriormente no se ocupaban para tal fin, debido a su importancia ecosistémica o a la presencia de recursos naturales nativos. Ocasionando esto una transformación en el paisaje, puesto que se remplazan pastizales naturales o bosques en estados de conservación por mosaicos destinados a la agricultura (Pérez et al., 2014). Dando como resultado esta expansión cambios en la cobertura del suelo, específicamente en el de la microcuenca Hato laguna.

Por lo que se realizó una revisión de información primaria en la que se verificaron los datos hidrometeorológicos diarios (caudal, precipitación, humedad relativa, temperatura, brillo solar y velocidad del viento) de las estaciones Aeropuerto A lleras, Cintas las y Hato laguna, junto con la revisión del POMCA de la Cuenca del Lago de Tota, el EOT de Aquitania y el Plan de Desarrollo, para la obtención de información de los conflictos de uso y afectaciones en el recurso hídrico de la microcuenca. Posterior a ello se hizo la delimitación de la zona de estudio implementando un DEM y el modelo hidrológico SWAT, considerando la estación Limnimétrica como el punto de

salida de la microcuenca. A su vez re efectuó el procesamiento de los datos hidrometeorológicos con la finalidad de verificar la cantidad y calidad de la información para así elegir el periodo en el que se correría el modelo, teniendo en cuenta el método boxplot para identificar valores atípicos en la precipitación, es decir aquellos que están distantes al resto de datos y la regresión múltiple y simple para completar los datos faltantes de temperatura, en los que la estación no registro valores. Así mismo se elaboró una revisión de los suelos y las coberturas vegetales de la zona de estudio por medio del "Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá del año 2010" y la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:25.000. Una vez tenida la información de suelo y clima se procedió con la aplicación del modelo, su calibración y validación, mediante la aplicación del software SwatCup; teniendo en cuenta los valores obtenidos en el coeficiente de determinación R2, el Percent bias-PBIAS y el Nash-Sutcliffe.

Obtenido finalmente como resultados las unidades de respuesta hidrológica de la microcuenca, el balance hídrico y los datos del comportamiento del agua (flujo superficial, escorrentía, percolación y evapotranspiración) para los 6 años de estudio, igualmente se obtuvo dos escenarios con los que se evaluaron el efecto del cambio de cobertura en la respuesta hídrica y tres estrategias para la rehabilitación y equilibrio de la respuesta hídrica de la microcuenca, teniendo en cuenta la población y su economía junto con la protección del medio ambiente. Concluyendo, que el cambio de coberturas vegetales afecta la disponibilidad del recurso hídrico y que mediante la implementación de las coberturas más adecuadas se mejora la respuesta hídrica.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar los efectos de la expansión de la frontera agrícola sobre la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna del municipio de Aquitania, Boyacá.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las unidades taxonómicas presentes en la microcuenca Hato laguna.
- Implementar el modelo semidistribuido SWAT para verificar el comportamiento de la microcuenca Hato laguna.
- Calibrar y validar el modelo SWAT para la microcuenca Hato laguna, a partir de los caudales históricos y simulados.
- Formular estrategias que permitan la rehabilitación y el equilibrio en la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna.

3. ANTECEDENTES

El cambio de uso de suelos, tiene una alta influencia en la respuesta hídrica de cuencas, debido a la variación de diferentes procesos hidrológicos como la infiltración, la evapotranspiración y la intercepción del dosel entre otros, los cuales afectan los regímenes hidrológicos y mecanismos de escorrentía (Jin *et al*., 2019).

Actualmente, existen varios métodos que permiten determinar los efectos del cambio en el uso de suelos en cuencas, dentro de los cuales se encuentran los métodos experimentales, que se aplican en cuencas hidrológicas pequeñas con un largo periodo de estudio. Encontrándose entre tales métodos los modelos hidrológicos agrupados que consideran la cuenca como una unidad, y modelos hidrológicos distribuidos o semidistribuidos (Jin *et al*., 2019). Siendo los distribuidos aquellos en donde la cuenca es dividida en elementos pequeños, llamados grillas o mallas, cuyos procesos interaccionan entre sí; pasando el flujo de un punto a otro, drenando así el agua por toda la cuenca (Avalos, 2020). Por su parte los semidistribuidos dividen la cuenca en zonas con comportamiento hidrológico semejante, analizando cada una de forma independiente para luego combinar sus resultados (Chuquín, 2016), no requiriendo tanta cantidad de datos de entrada (Avalos, 2020).

3.1 Estudios a nivel internacional sobre las alteraciones en la respuesta hídrica por el cambio en el uso de suelos

La herramienta para la evaluación del suelo y agua para una cuenca (SWAT) hace parte de un modelo semidistribuido, con una alta aplicación a nivel mundial. En el estudio realizado por (Jin *et al*., 2019), implementaron el modelo SWAT modificado que permitió evaluar los efectos de uso/cobertura de suelo en los procesos hidrológicos, de acuerdo con diferentes condiciones climáticas en la región árida del noroeste de China, específicamente en la cuenca del río Heihe, determinando que de 1990 a 2000 las superficies agrícolas aumentaron 10,65% y las superficies de pastizales disminuyeron 9,13%, mientras que de 2000 a 2009 las áreas agrícolas aumentaron 3,45% y las áreas de pastizales 0,90, adicionalmente, evidenciaron que, el aumento de superficies agrícolas genero un incremento en los flujos laterales y evaporación.

De acuerdo con (Rawat y Manish, 2015) las actividades con mayor incidencia en el cambio de uso de suelos son la expansión de la frontera agrícola, urbanización, deforestación, y acciones diarias que ocasionan un cambio temporal en el uso de tierras, afectando el equilibrio hídrico, como se

evidencia en el estudio realizado por (Welde y Gebremariam, 2017), en el cual se estimaron los potenciales impactos de la cobertura terrestre en la respuesta hídrica de flujo en arroyos y sedimentos en tres escenarios diferentes de 2000 y 2008, 2000 y 1986, 1980 y 1986 respectivamente, estableciendo que el incremento de zonas agrícolas y tierra desnuda genero un mayor flujo anual y estacional de arroyos y mayor rendimiento de sedimentos.

Adicionalmente, dentro de los impactos de la expansión de la frontera agrícola se encuentran la afectación del recurso hídrico en la disminución de la cantidad disponible, en la calidad del agua (Pérez *et al.,* 2014) y en la degradación de los recursos hídricos superficiales (eutrofización y alteración de cuerpos de agua) (Viglizzo y Jobbágy, 2010).

Tal es el caso de la cuenca forestal de San Salvador, en el pirineo central, España, en donde se presentó cambios ambientales y de uso de suelos, por lo que se realizó el análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca, así como la variabilidad en las relaciones precipitación-caudal, logrando establecer que la respuesta hidrológica es no lineal en relación con el volumen de precipitación; así mismo, se evidencio que el coeficiente de escorrentía cumple con un patrón de variación entre períodos húmedos cuando la cuenca puede responder hidrológicamente, mientras que en periodos secos no hay reacción cuando hay precipitación (Serrano y Cazares, 2019).

Por otra parte, es necesario considerar los escenarios en los que se evalúa el cambio de coberturas por expansión forestal, como se menciona en el estudio realizado por (Agauyo *et al,* 2016) en la cuenca del rio Vergara, en Chile, en el que se estimó del año 2000 a 2008 el cambio en el uso de suelos por plantaciones forestales, aumentando en 42,7 mil hectáreas ocupando el 50% de la superficie de la cuenca, reemplazando zonas agropecuarias, bosque nativo y matorrales, lo que generó una disminución en los caudales principalmente en la época de estiaje, estableciendo una reducción de 20,4% de la escorrentía en verano por cada 10% de incremento en plantaciones forestales.

De acuerdo con (Zhang *et al.*, 2020) el cambio de uso de suelos es el factor dominante en el cambio hidrológico de cuencas, por lo que en su estudio “Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia” se simulo el impacto de la variación en el uso de suelos por deforestación, forestación y urbanización en el balance hídrico, en la cuenca del río North Johnstone al este de Australia, estableciendo cuatro escenarios (Deforestación, urbanización/deforestación, repoblación forestal y

urbanización), observando que el mayor impacto se generó en la escorrentía superficial a nivel anual siendo de 8.9%, 5.7 %, -9.5% y 15.9% en cada uno de los escenarios respectivamente.

3.2 Estudios a nivel nacional sobre las alteraciones en la respuesta hídrica por el cambio en el uso de suelos

En el caso de Colombia, de acuerdo con Caro y Velandia (2019), la ampliación de la frontera agrícola y terrestre ha generado grandes consecuencias en el medio ambiente, así como alteraciones en el ciclo hidrológico y en la dinámica del agua, como se evidencia en la Subcuenca "Los Pozos", ubicada en la cuenca hidrográfica de la Laguna de Tota. La cual ha sido altamente afectada por el cultivo de cebolla. Por lo que, para cuantificar los efectos causados en el cambio de cobertura y su respuesta hidrológica, emplearon el modelo de simulación hidrológica SWAT, identificando dentro del análisis paramétrico de sensibilidad, que el parámetro más sensible es el proceso de escorrentía. Destacando que para la calibración obtuvieron un desempeño satisfactorio para R2 y NSE y bueno para PBIAS; mientras que para la validación alcanzaron un ajuste entre los caudales observados y simulados con R2 Y NSE bueno y PBIAS satisfactorio. Además, fueron propuestos nueve escenarios, que se articularon con los elementos de planificación territorial (Caro-Camargo & Velandia-Tarazona, 2019).

Por otra parte, en el estudio realizado por (Hernández, 2015), estimaron los parámetros morfométricos y las unidades de respuesta hidrológica de la cuenca del rio Raquira, en Boyacá, lo que permitió determinar estrategias de planificación centrados en los objetivos de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) y la relación de actividades productivas con los servicios ecosistémicos.

En la subcuenca hidrográfica del rio Apie ubicado en la región norte del departamento de Huila, se evaluó la vulnerabilidad del sistema hidrológico, así como las causas de la escasez hídrica a partir del modelo SWAT lo que permitió establecer índices de características naturales (IRH) y derivados de la intervención antropogénica (IUA e IVH) evaluando las características de las unidades hidrológicas a partir de la cobertura, tipo de suelo y pendiente, obteniendo para la calibración el error medio del balance (BE) de 2,93%, y el coeficiente de eficiencia de Nash para la raíz cuadrada de los caudales (E2) de 61,72, mientras que para la calibración el BE de 5,84%, y el (E2) de 64,66 considerado como un ajuste satisfactorio (Ovalle, 2019).

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Modelo hidrológico

Un modelo hidrológico es una herramienta mediante la cual se simula los procesos hidrológicos de una cuenca; siendo importante el proceso lluvia-escorrentía. Por lo que entre sus objetivos se encuentra estimar las variables de escorrentía a partir de datos meteorológicos, como precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa (Andrade & Melo Ribeiro, 2020). Destacando a la vez que la modelación hidrológica es de gran importancia para el estudio y análisis de fenómenos relacionados con el recurso hídrico como las inundaciones, permitiendo incluso en algunos casos la toma de decisiones, ya sea en la ordenación de cuencas hidrográficas o para verificar los criterios de diseño de obras e infraestructuras hídricas. De igual forma estos permiten conocer mejor el comportamiento y funcionamiento del ciclo hidrológico, por lo que se consideran una representación simplificada de la realidad, más exactamente de un sistema real complejo. Siendo tal representación de forma física o matemática (expresión analítica) (Garzón & González, Sf). Enfatizando que los modelos matemáticos estiman la respuesta hidrológica de las cuencas mediante la representación de las condiciones topográficas e hidráulicas (Morresi, et. Al, 2018), por lo que resulta importante conocer las entradas y salidas del sistema, teniendo en cuenta las metas y objetivos del modelo, debido a que algunos predicen la escorrentía total mensual y otros evalúan tormentas individuales obteniendo hidrogramas de escurrimiento (Garzón & González, Sf).

Por otro lado, entre los modelos hidrológicos se encuentran los de caja negra, en los cuales se implementan parámetros calculados por la identificación de relaciones estadísticamente significativas entre ciertas variables; mientras que los conceptuales representan en términos matemáticos simplificados los procesos físicos de una cuenca y simulan los complejos teniendo en cuenta parámetros claves y los teóricos se describen por ecuaciones diferenciales, siguiendo procesos químicos o leyes de la física. Igualmente están los modelos distribuidos, los cuales son importantes para simular los patrones espaciales de respuesta hidrológica dentro de una cuenca (Ocampo & Vélez, 2014).

En cuanto a los modelos para simulaciones hidrológicas actualmente se han desarrollado varios softwares con aprobación internacional, existiendo incluso algunos de versión libre. Siendo realizados los más reconocidos por grupos de Ingeniería Hidrológica como HEC (Hydrologic Engineering Center, United States Army Corps of Engineers), MIKE (Danish Hydraulic Institute),

SWMM (Storm Water Management Model, EPA) y SWAT (Soil y Water Assessment Tool, Texas A&M University, USA) (Morresi, et. Al, 2018).

4.2 Modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool)

El modelo hidrológico SWAT desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola y la Universidad de Texas A&M es una herramienta de acceso libre, la cual evalúa suelo y agua; por lo que es muy utilizada en estudios que investigan el impacto al cambiar el uso y la cobertura del suelo en cuencas hidrográficas y diferentes escenarios bajo regímenes de flujo. Siendo un modelo semidistribuido con la capacidad de simular largos periodos y con una representación más precisa del proceso hídrico, requiriendo información específica de entrada (Andrade & Melo Ribeiro, 2020). Caracterizándose por su capacidad para describir de forma secuencial diferentes procesos físicos, a diferentes escalas temporales y espaciales, haciendo posible la cuantificación de los efectos generados por los cambios en el uso y ocupación del suelo, sobre la escorrentía superficial y subterránea, la erosión y deposición de sedimentos, la calidad del agua y las cargas contaminantes. Resaltando igualmente que para obtener resultados satisfactorios del flujo de agua y los sedimentos se requiere de una buena cantidad de información acerca del tiempo, los suelos, la topografía, vegetación y factores antrópicos, lo que para algunos autores resulta una limitante a la hora de usar el modelo (Blainski et al., 2017). No obstante, este permite dividir una cuenca hidrográfica en varias “Subcuencas”, siendo beneficioso cuando diferentes áreas presentan suelos o usos que difieren en propiedades como para impactar el comportamiento hidrológico de forma específica; además de que la subdivisión permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varios cultivos y suelos (Neitsch et al., 2011).

Por otro lado, en lo concerniente al funcionamiento del modelo este divide la cuenca en unidades de respuesta hidrológica (HRU), las cuales son áreas homogéneas que contienen los mismos tipos de suelo, uso, coberturas y pendientes. Contando también con componentes climáticos, edáficos, topográficos, vegetativos y de manejo del suelo que permiten simular el flujo, los sedimentos y nutrientes a diferentes niveles (Andrade & Melo Ribeiro, 2020). Siendo además importante especificar el umbral de cobertura del suelo, el tipo y la pendiente a la hora de implementar el modelo, ya que diferentes umbrales producen diferentes distribuciones de HRU y que la incorporación de estas en el modelo son una fortaleza puesto que permite que se adapte a tamaños que van desde parcelas de campo hasta cuencas de ríos completos (Pai et al., 2012).

Asimismo, el modelo SWAT se desarrolla en dos fases; basándose la primera fase (terrestre) en la ecuación general del balance hídrico (Ecuación 1). La cual describe el movimiento del agua por entre el suelo (Fernández, 2017); controlado así mismo la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y cargas de plaguicidas al canal principal. (Neitsch *et al*., 2011).

Ecuación 1. *Ecuación general del balance hídrico*

$$\boldsymbol{SW_t} = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{Sur} - E_a - W_{Seep} - Q_{gw})$$

Fuente: (Neitsch *et al.*, 2011)

Donde:
Sw_t: Cantidad final de agua en el suelo (mm)
SW_0: Cantidad inicial de agua en el suelo (mm)
t: Tiempo en días
R_{day}: Precipitación diaria total (mm)
Q_{sur}: Total escorrentía superficial diaria (mm)
E_a: Evaporación diaria total (mm)
W_{seep}: Cantidad de agua que se filtró y se almacenó durante todo el día (mm)
Q_{gw}: Flujo de retorno diario (mm)

Mientras que la fase de tránsito modela el movimiento del agua, sedimentos y demás a través de la red de canales hasta la desembocadura o cierre de la cuenca, lo que significa que estima la forma en la que se transporta el agua, es decir el flujo de la corriente. Estimándose la fase terrestre en función del balance hídrico y la fase de transito mediante el coeficiente variable de almacenamiento desarrollado por Williams o el método de Muskingum (Fernández, 2017). Prediciendo, la escorrentía superficial mediante el método del número de curva (CN) del Servicio de Conservación del Suelo (SCS) o por un parámetro de retención que varía según el uso y propiedades del suelo y las condiciones hidrológicas. Entre tanto la evapotranspiración potencial (PET), se puede calcular por los métodos de Penman-Monteith, Priestley-Taylor y el de Hargreaves (Andrade & Melo Ribeiro, 2020).

Para la calibración y validación del modelo SWAT (última etapa de la modelación) es necesario que en la etapa de calibración se realice el ajuste a la salida para que los valores simulados se aproximen a los valores observados. Efectuando a la vez algunos ajustes en los parámetros más sensibles del modelo (Andrade & Melo Ribeiro, 2020) e implementando índices estadísticos como el coeficiente de correlación de Pearson, el error medio cuadrático o la desviación del volumen de escorrentía (Fernández, 2017). Siendo importante resaltar que en el caso de presentarse desviaciones significativas entre los datos observados y simulados se realiza la modificación de los parámetros significativos mediante el análisis de sensibilidad realizado por el software SWAT-

CUP (Blainski *et al*., 2017). Repitiendo el proceso hasta que la comparación de las variables observadas y simuladas den valores satisfactorios. Procediendo a validar el modelo una vez es calibrado (Fernandez, 2017), siendo los periodos de calibración y validación diferentes (Andrade & Melo Ribeiro, 2020).

A su vez, para valorar el rendimiento del modelo SWAT se pueden aplicar diferentes métodos estadísticos como el sesgo porcentual (Percent bias-PBIAS), la razón RSR que relaciona la raíz cuadrada del error medio (RMSE-Root Mean Square Error) (Ocampo & Vélez, 2014), el criterio de Schultz que representa la desviación de los caudales simulados respecto de los observados (Pérez & Barbosa, 2018), el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación (R2) que indica el ajuste entre el simulado y el observado (Blainski *et al*., 2017), evidenciando un R2 cercano a uno un ajuste muy bueno (Andrade & Melo Ribeiro, 2020). Expresándose en el caso del Nash-Sutcliffe el ajuste perfecto entre los datos simulados y observados como NSE=1, demostrando los valores de NSE<0 que los valores observados son mejores que los resultados simulados (Blainski *et al*., 2017).

4.3 Cuencas hidrográficas

Una cuenca hidrográfica es un sistema abierto, el cual recibe energía y materia de la atmosfera, que posteriormente se pierde a través del caudal y la descarga de los sedimentos (Geraldi, 2010). Aunque se considera igualmente una superficie en la que el agua precipitada es trasferida a las partes topográficas por medio de un sistema de drenaje (Placencia, 2006), descargando generalmente en una quebrada, rio, lago, pantano, acuífero (Calderón & Montoya, 2016), en otras cuencas aledañas o en el océano. Siendo así en conjunto con los acuíferos las unidades fundamentales de la hidrología, clasificándose en endorreicas (cerradas y alargadas con el punto de salida dentro de los límites de la cuenca) y exorreicas (abiertas con la descarga generalmente en una corriente o en el mar) (Placencia, 2006). Enfatizando además que los bordes de las cuencas podría decirse que son los vértices de las montañas, pudiendo ser muy pequeña o muy grande (Calderón & Montoya, 2016).

4.4 Respuesta hidrológica de cuencas

La respuesta hídrica de una cuenca es el resultado de la entrada de lluvia, su transformación en escorrentía y la circulación hacia la salida de la cuenca (Verdú, 2003). Siendo uno de los principales indicadores del balance existente entre los recursos naturales de una cuenca y su

aprovechamiento, destacando que al aprovecharse de forma inadecuada los recursos la disponibilidad de estos disminuirá en calidad y cantidad (Granada *et al*., 2013). Esta respuesta hidrológica depende de una serie de factores, como lo son el tiempo y la intensidad de un evento especifico de precipitación, la geomorfología de la cuenca, el estado de humedad del suelo previo a las precipitaciones y las condiciones y estado de la vegetación y el de la superficie del suelo, influyendo así el manejo que se le da a la cuenca, puesto que en áreas intervenidas en donde se modifica la cobertura vegetal, se afecta igualmente la interceptación y evapotranspiración, dependiendo tal afectación de la cantidad de dosel removido o del sotobosque destruido, del tiempo de la intervención, de las tecnologías o métodos empleados e incluso de los eventos climáticos inmediatos a la intervención (Stadtmüller, 1994).

4.5 Clima

El clima es el conjunto de condiciones atmosféricas que predominan en un lugar y periodo determinado, el cual puede ser días, meses, años e incluso siglos (IDEAM, 2018). Los fenómenos que componen el clima principalmente son temperatura, presión, precipitación, brillo solar y viento, los cuales junto con otros factores afectan la cantidad y tipo de vegetación y fauna que predominan en un lugar. En cuanto al sistema climático a nivel general se estructura en cinco áreas de estudio conocidas como atmosfera, océanos, criósfera, biósfera y litósfera. Generando este sistema energía cinética debido a la diferencia entre la energía recibida y la emitida (Alvarino, 2016). Por otro lado, igualmente es importante tener en cuenta que la variabilidad climática son las fluctuaciones observadas en el clima en periodos de tiempo relativamente cortos (Alvarino, 2016).

4.6 Coberturas vegetales y uso de la tierra

Las coberturas vegetales son las capas de vegetación natural que cubren la superficie terrestre, las cuales presentan unas características fisonómicas y ambientales, permitiendo su estudio y análisis tomar decisiones y evaluar el estado de un lugar determinado (Toro, 2014). Por su parte el uso del suelo es la ocupación de una superficie en función de su capacidad agrologica y el potencial de desarrollo, clasificándose de forma general en urbano y rural (PAOT, 2003). Aunque en algunas ocupaciones los usos del suelo son un tipo de coberturas desarrolladas por las personas, como lo es a agricultura, la ganadería, el uso urbano o el recreativo, estando esto determinado en algunos casos por aspectos socioeconómicas y culturales de un núcleo poblacional. En cuanto a su

clasificación actualmente existen numerosos sistemas que clasifican las coberturas y uso de suelos, resaltando que en el caso específico de Colombia se cuenta con un sistema propuesto por el IGAC y el IDEAM (Rico & Rico, 2014).

4.7 Expansión de la frontera agrícola

La expansión agrícola consiste en el desarrollo de cultivos en zonas que anteriormente no se ocupaban para tal fin, debido a su importancia ecosistémica o a la presencia de recursos naturales nativos. Asociando esta expansión a la deforestación, debido a que se genera una transformación en el paisaje, puesto que se remplazan extensiones de bosque en diferentes estados de conservación por mosaicos destinados a la agricultura. Sin embargo, se da igualmente en zonas con pastizales naturales, aumentando así el proceso de desertificación y la pérdida de biodiversidad, sin contar con que el incremento en el uso de agroquímicos genera efectos sobre la salud humana, el recurso hídrico y el suelo. Evidenciándose la afectación del recurso hídrico en la disminución de la cantidad y la calidad del mismo (Pérez et al., 2014) y en la degradación de los recursos hídricos superficiales (eutrofización y alteración de cuerpos de agua) (Viglizzo & Jobbágy, 2010). De igual forma la expansión agrícola afecta el clima, junto con el ciclo del carbono y el nitrógeno en la biosfera, contribuyendo en algunos casos con emisiones de gases de efecto invernadero (Paruelo et al., 2005). Por otra parte, cabe destacar que en los últimos años se les ha dado mayor atención a los impactos de la expansión de la frontera agrícola sobre el ambiente, pero a la vez han sido motivo de controversia pese a los efectos que genera (Viglizzo & Jobbágy, 2010).

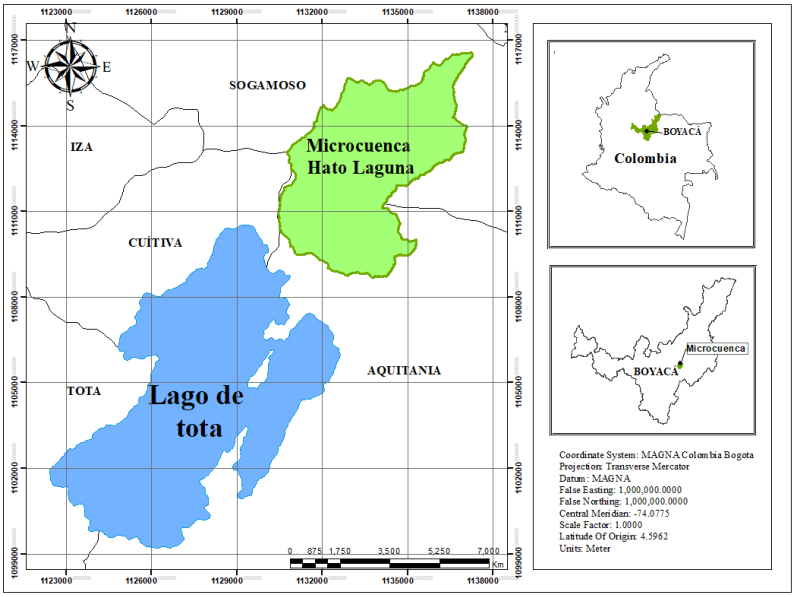
5. GENERALIDADES

La microcuenca Hato laguna se encuentra ubicada entre los municipios de Aquitania y Sogamoso, Boyacá, en la vereda Hato laguna de Aquitania (Figura 1); se caracteriza por ser uno de los afluentes con mayor drenaje a la laguna de tota (Vela, 2005). Cuenta con un área de 30,76 Km^2 (Secretaria de salud de Boyacá, 2012) y está conformada por las corrientes La martinera, el Racal, Los Hoyos, la Quebrada Lamuda y Tablón y el Rio Hato Laguna (Cardozo, 2016). La principal actividad productiva en la microcuenca es la agricultura (CONPES, 2014), dentro de los principales cultivos se encuentran la cebolla larga (*Allium fistulosum*), habas (*Vicia faba*), arveja (*Pisum sativum*) y papa (*Solanum tuberosum*), siendo la cebolla el cultivo de mayor presencia (Vela, 2005).

El aporte hídrico de la microcuenca a la laguna de tota, es en promedio de 0,58 m^3/s y está regulado por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, CORPOBOYACA, siendo esta de uso público. Sin embargo, se encuentran suspendidos los tramites de nuevas concesiones de agua y la ampliación de caudal (CONPES, 2014). Abasteciendo para el 2012 a 635 habitantes de tipo doméstico y a 224 Ha de riego (Cardozo, 2016).

Figura 1

Localización área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en lo que respecta a la vegetación los árboles nativos o introducidos que se encuentran en las márgenes del rio han sido talados y en el caso de las plantaciones de pino se han quemado, llegando incluso a secar zonas húmedas (CONPES, 2014) o eliminar las coberturas vegetales existentes, entre estos frailejones y otras especies importantes en la conservación del agua, esto con la finalidad de cultivar cebolla (Secretaria de salud de Boyacá, 2012). La escasez hídrica, es otra de las principales problemáticas ambientales durante los periodos secos, lo cual se refleja en la media de las series de caudales, destacando que la precipitación media anual es de 1139 mm. Igualmente se presenta inconvenientes por la explotación de minas de carbón, ya que se encuentran varias bocaminas en la parte alta en zonas pantanosas o dentro de la ronda del rio (30 metros a cada lado), sin contar con los debidos permisos para la explotación. A la vez los campesinos realizan zanjas profundas para la realización de drenajes con piedra e implementan maquinaria para las labores de arar y rellenar (Secretaria de salud de Boyacá, 2012).

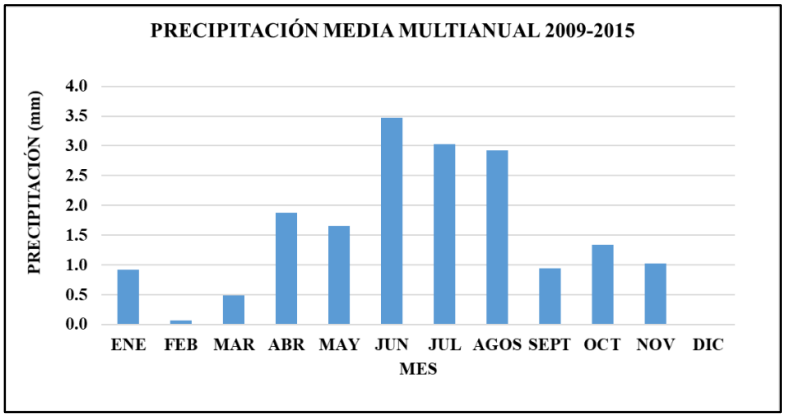
En el caso de las variables físicas y químicas que evalúan la contaminación del recurso hídrico, los ortofosfatos de la microcuenca evidencio excelentes condiciones respecto a esta variable para el año 2012, mientras que en el caso de la *Escherichia Coli* y los Coliformes Fecales se presentaron condiciones de contaminación no tan alta (Secretaria de salud de Boyacá, 2012).

5.1. Precipitación

La microcuenca Hato Laguna se encuentra principalmente dentro del área de influencia de la estación Cintas, encontrándose en la figura 2 los valores medios mensuales multianuales en mm/mes registrados por esta estación para el periodo de 2009-2015. Permitiendo a su vez evidenciar que los meses de abril, junio, julio y agosto son los más lluviosos, mientras que los meses de diciembre y febrero son los más secos. Además, se puede decir que en los 7 años la máxima precipitación es de 30.51 mm/mes y el mínimo 0 mm, presentándose una precipitación media anual de 17.74 mm.

Figura 2

Precipitación media mensual - Estación Las Cintas, 2009-2015.



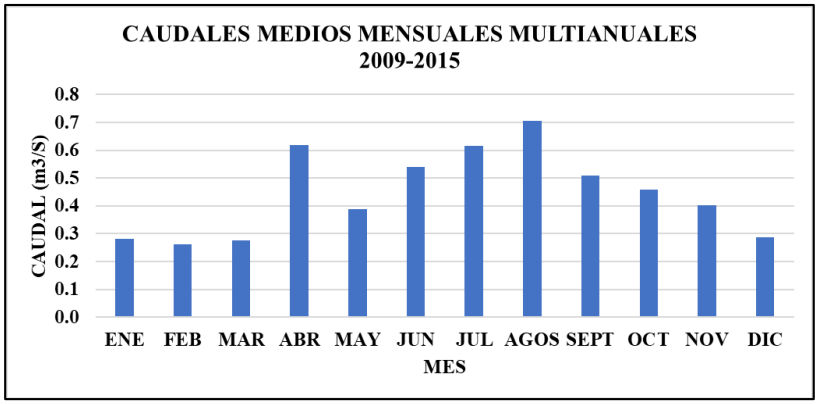
Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

5.2. Caudales

Los caudales de la microcuenca Hato Laguna son registrados por la estación Limnimétrica Hato Laguna, la cual se encuentra a la salida de esta; evidenciándose en la figura 3 los valores medios mensuales de caudales para el periodo comprendido entre 2009-2015, resaltando que en los meses de abril, junio, julio y agosto se presentan los caudales más altos con valores de 0.62 m^3/s, 0.54 m^3/s, 0.62 m^3/s y 0.71 m^3/s respectivamente; mientras que los meses de diciembre, enero y febrero tienen bajo caudales, lo que permite ver que los caudales de la microcuenca tienen una distribución similar con la precipitación, conforme se ve en la figura 4, en la que se tiene los caudales y las precipitaciones.

Figura 3

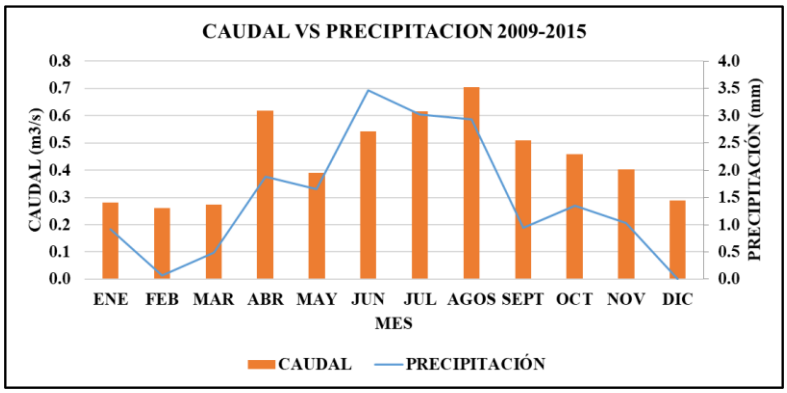
Caudales medios mensuales multianuales – Estación Hato Laguna, 2009-2015.



Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

Figura 4

Caudales medios mensuales vs precipitación media mensual, 2009-2015.



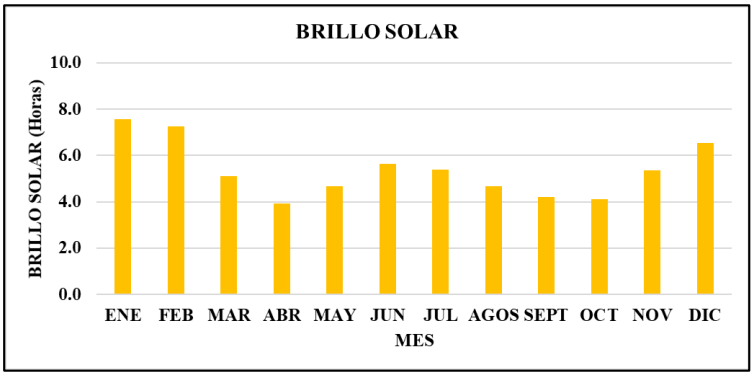
Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

5.3. Brillo solar

El brillo solar para la zona de estudio se tomó de la estación Aeropuerto A lleras C, presentándose en el mes de enero el valor más alto de brillo solar con 7.57 horas/mes y el más bajo en abril con 3.94 horas/mes (figura 5), donde las precipitaciones fueron un poco altas, siendo así el brillo solar alto en las épocas de menos precipitaciones y bajo en los meses de mayor lluvia.

Figura 5

Valores totales mensuales de brillo solar, 2009-2015.



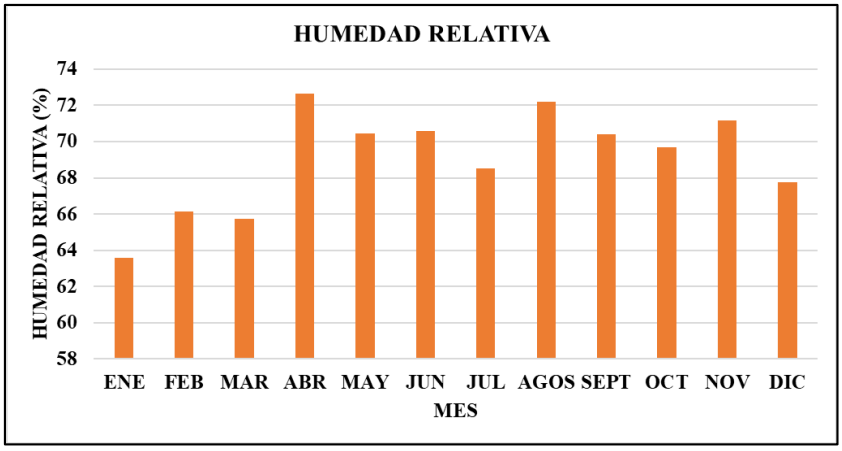
Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

5.4. Humedad Relativa

La humedad relativa multianual se tomó de la estación Aeropuerto A lleras C, presentándose la mayor en abril y agosto con valores de 72.67 % y 72.21 % respectivamente y la menor humedad relativa en enero con 63.58 %, mes en el que las precipitaciones fueron bajas.

Figura 6

Valores medios mensuales de humedad relativa, 2009-2015.



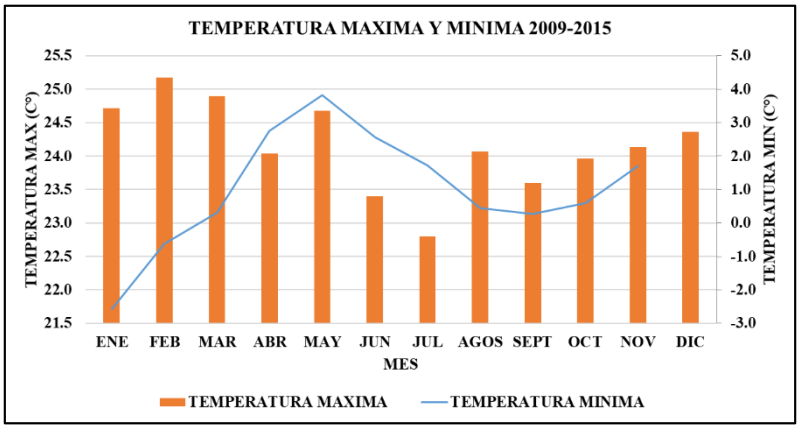
Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

5.5. Temperaturas Máximas y mínimas

Las temperaturas para la microcuenca Hato Laguna se toma de la estación Aeropuerto A lleras C, debido a que es la más cercana y se encuentra en el área de influencia de la microcuenca, presentándose la máxima multianual en el mes de febrero con un valor de 25.2 °C y la mínima en enero con -2.6 °C. Evidenciándose que el mes con menos precipitaciones fue el de mayor temperatura.

Figura 7

Valores máximos y mínimos mensuales de temperatura, 2009-2015.



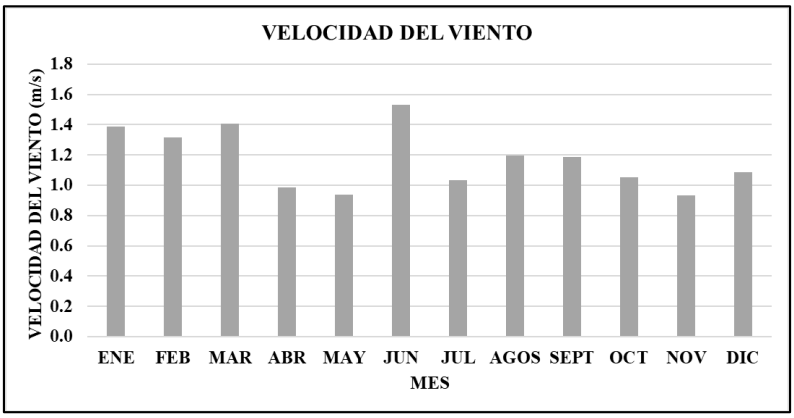
Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

5.6. Velocidad del viento

La velocidad del viento se obtuvo de la estación Aeropuerto A lleras C, presentándose los valores más bajos en mayo y noviembre con 0,94 m/s de acuerdo a como se observa en la figura 8 y el más alto en el mes de junio con 1.53 m/s, destacando que en este mes se presentó la mayor precipitación.

Figura 8

Valores mensuales multianuales del recorrido del viento, 2009-2015.



Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

5.7 Características de los tipos de suelos de la microcuenca Hato laguna.

La microcuenca hato laguna, presenta 4 unidades dentro de las cuales se encuentran Humic Endoaquepts, Lithic Dystrocryepts, Lithic Udorthents y Typic Hapludands, las características de cada tipo de suelo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.

Características de los tipos de suelos de la microcuenca Hato laguna.

UNIDAD TAXONOMICA	UCS	UCSF	PERFIL	PAISAJE	CLIMA	TIPO DE RELIEVE	LITOLOGIA	CARACTERISTICAS
Humic Endoaquepts	MHH	MH Ha	504A	Montañas estructurales erosionales	Muy frío, húmedo	Vallecitos	Depósitos superficiales clásticos	Relieve plano a ligeramente inclinado, con

							hidrogravigénicos	pendientes de 1-3% y 3-7%; afectados por pedregosidad en superficie, suelos superficiales, por nivel freático fluctuante y saturación de aluminio mayor del 75%, imperfectamente drenados.
Lithic Dystrocryepts	MEE	MEEg	PB-1A	Montañas estructurales erosionales	Extremadamente frío, húmedo y muy húmedo	Crestas y crestones homoclinales	Rocas sedimentarias clásticas arenosas con intercalaciones de limo arcillosas	Relieve moderado a fuertemente escarpado, con pendientes superiores a 50%, paisajes modelados previamente por glaciares y posteriormente afectados por meteorización física y erosión glaciárica,
Lithic Udorthents	MHE	MHEg	PB-13A	Montañas estructurales erosionales	Muy frío, húmedo	Crestas y crestones homoclinales	Rocas sedimentarias clásticas arenosas con intercalaciones de limo arcillosas	Relieve moderado y fuertemente escarpado, con pendientes superiores al 50%, suelos físicamente sin limitantes en su profundidad pero químicamente superficiales por presentar saturación de aluminio mayor del 75%, bien drenados.
Typic Hapludands	MHV	MHVf	174A	Montañas estructurales erosionales	Muy frío, húmedo	Vigas, lomas y glacís	Depósitos superficiales de ceniza volcánica sobre rocas sedimentarias clásticas mixtas	Relieve moderado a fuertemente quebrado y moderadamente escarpado, con pendientes 12-25%, 25-50% y 50-75%, hay evidencia de movimientos en masa afectados en sectores por fragmentos de roca en superficie.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de IGAC (2015).

6. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto de investigación se realizaron las actividades planteadas a continuación.

6.1 Revisión de información primaria

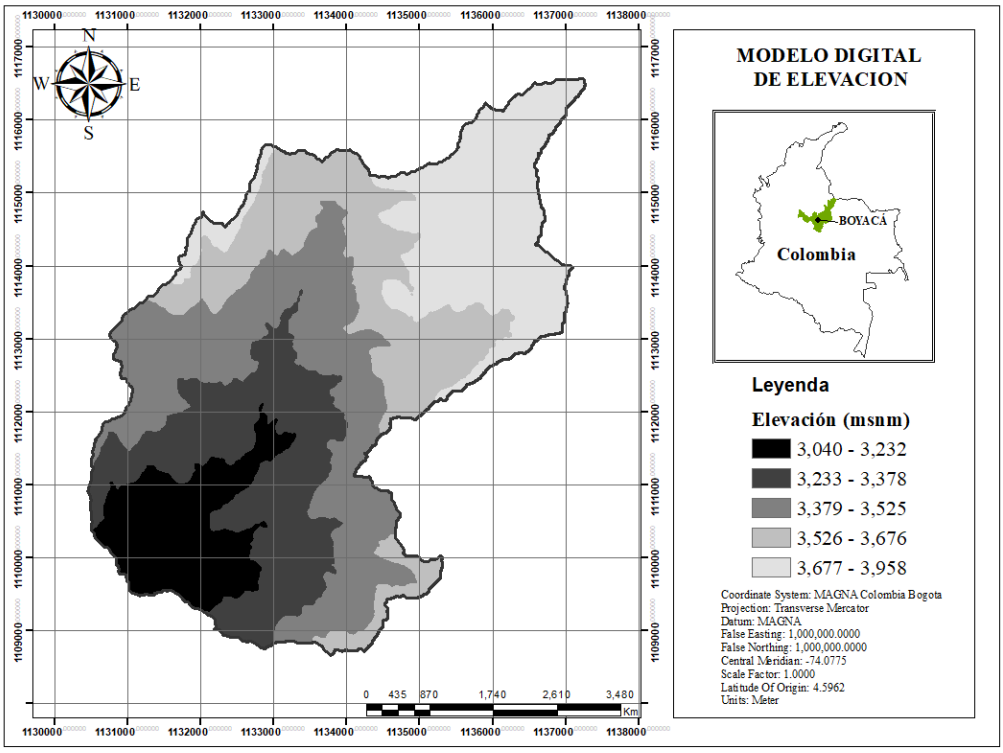
Inicialmente, se realizó una revisión detallada de los datos históricos diarios existentes en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), referentes a caudal, precipitación, humedad relativa, temperatura, brillo solar y velocidad del viento de las estaciones ubicadas en la microcuenca Hato laguna, o cerca a esta. De igual forma, se empleó el Modelo Digital de Elevación (DEM) para la zona de estudio suministrado por ASF Data Search y se examinó el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Lago de Tota, el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) de Aquitania y el Plan de Desarrollo, con la finalidad de verificar la información existente sobre los conflictos de uso de suelos y afectaciones sobre el recurso hídrico en la microcuenca.

6.2 Delimitación de la zona de estudio

Luego de seleccionar el Modelo Digital de Elevación (DEM) del año 2012, a una resolución espacial de 12.5 m (figura 9), junto con la estación limnimétrica Hato laguna, tomándola como punto de cierre y la red hídrica en formato shape se ingresó en el software ArcGis realizando un proceso de re proyección de coordenadas al Sistema de Referencia Zona Colombia Bogotá, y mediante la herramienta hidrológica SWAT, se efectuó el cierre de la microcuenca, obteniendo el área de la microcuenca, la dirección y acumulación de flujos, la definición de las subcuencas, el tramo del rio principal y los cálculos de los parámetros geomorfológicos.

Figura 9

Modelo Digital de Elevación (DEM) empleado para la microcuenca Hato laguna.



Fuente: Elaboración propia.

6.3 Preparación datos de entrada modelo SWAT.

6.3.1 Procesamiento de datos hidrometeorológicos

Una vez obtenidos los datos hidrometeorológicos diarios de las estaciones Aeropuerto A lleras C, Cintas las, Iza, Toquilla y Hato laguna (tabla 2) (figura 10) por parte del IDEAM, se organizaron los caudales, precipitaciones, la humedad relativa, temperatura, brillo solar y velocidad del viento, destacando que los datos obtenidos van desde el año de instalación de cada estación hasta el año 2017. Posteriormente, se procedió a verificar la cantidad y calidad de la información de cada año, a partir del análisis de doble masa para los datos de precipitaciones de la estación Cintas, empleando tres estaciones base que fueron Iza, Firavitoba y Toquilla-Aut, mientras que para las precipitaciones de la estación Iza y Toquilla, se tomó como base las estaciones potrerito, Firavitoba y Aeropuerto A lleras C, conociendo mediante los quiebres que se presentan en cada diagrama las causas de los fenómenos naturales, o si han sido ocasionados por errores sistemáticos.

Tabla 2

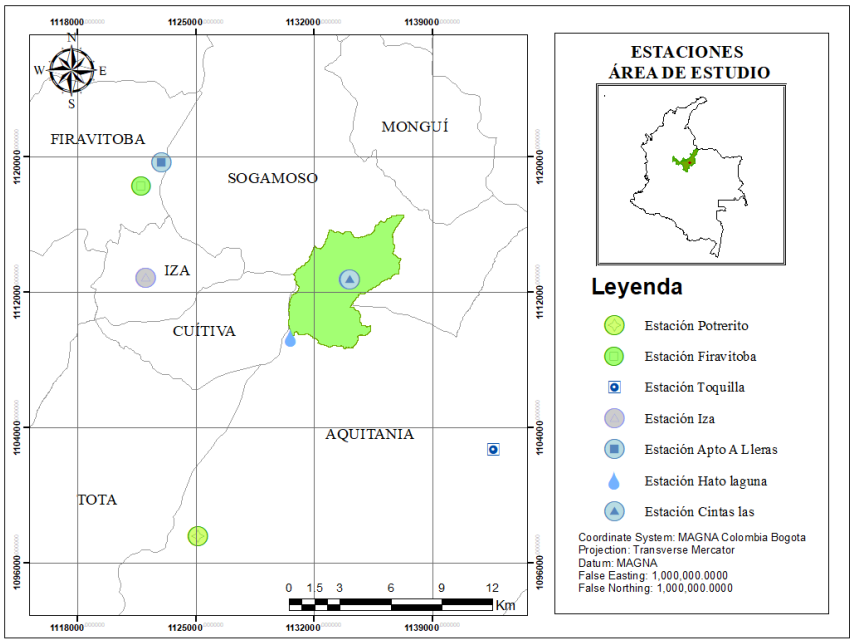
Estaciones área de estudio microcuenca Hato laguna.

Código	Nombre de la estación	Categoría	Parámetro	Ubicación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
35097030	Hato laguna	Limnimétrica	Caudal	Aquitania	5.583°	-72.9°	3020
24035340	Aeropuerto A lleras C	Climática Principal	Brillo solar Velocidad del viento Temperatura Humedad relativa	Sogamoso	5.676°	-72.968°	2500
35190010	Cintas las	Pluviográfica	Precipitación	Sogamoso	5.614°	-72.867°	3400
24030230	Iza	Pluviométrica	Precipitación	Iza	5.615°	-72.976°	2470
35195060	Toquilla-Aut	Climática Ordinaria	Precipitación	Aquitania	5.523°	-72.790°	2950
24030540	Firavitoba	Pluviométrica	Estación de referencia análisis de doble masa	Firavitoba	5.664°	-72.978°	2486
35160010	Potrerito	Pluviométrica	Estación de referencia análisis de doble masa	Aquitania	5.477°	-72.948°	3470

Fuente: Elaboración propia.

Figura 10

Localización de las estaciones empleadas.



Fuente: Elaboración propia.

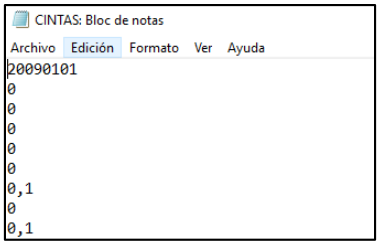
Para identificar valores atípicos en la precipitación se realizó un boxplot, mientras que, para los parámetros de brillo solar, temperatura, humedad relativa, caudal y velocidad del viento se realizaron gráficos de dispersión. Con base en los cuales se realizó el análisis de las variables hidrometeorológicas para el periodo de 2009 a 2015 y posterior simulación del modelo, considerando el periodo con mejor calidad de información en cuanto a menos datos faltantes, valores atípicos y fenómenos de variabilidad climática mínimos. Dejándose el año 2009 como el periodo de calentamiento del modelo.

Adicionalmente los datos faltantes de temperaturas se completaron mediante el método de regresión lineal simple y múltiple, considerando la estación Surbata bonza ubicada en Duitama. Destacando además que para completar los datos faltantes de humedad relativa se empleó el método de interpolación lineal.

Una vez completadas las temperaturas y la humedad relativa se ordenaron los datos hidrometeorológicos en formato*txt (figura 11) para su posterior ingreso al modelo, contando cada uno con el año de inicio, enfatizando que en los días donde hacían falta valores se empleó el número -99 de acuerdo a lo estipulado en el manual del modelo. Siendo además importante resaltar que en otro *txt se recopilo la localización, nombre y elevación de cada estación utilizada (figura 12).

Figura 11

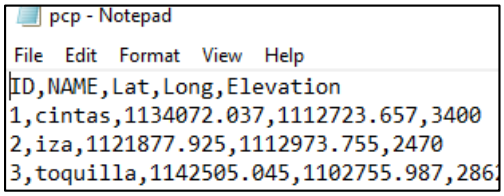
**txt para la precipitación de la estación Las Cintas*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12

**txt con la ubicación de las estaciones*



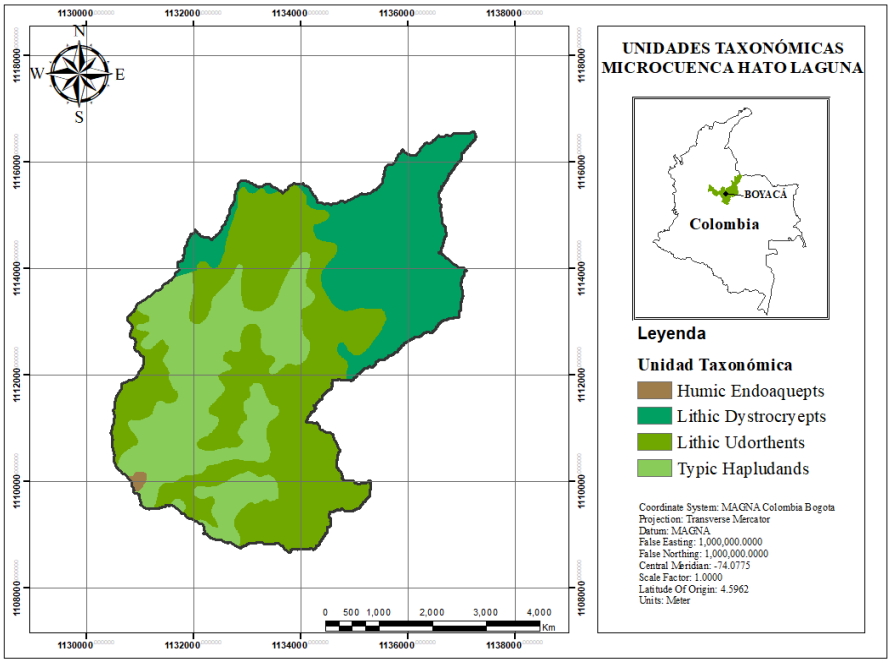
Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Procesamiento de suelos

Para determinar las unidades taxonómicas de la microcuenca Hato laguna se empleó el "Mapa de suelos del departamento de Boyacá a escala 1:100.000" en formato Shapefile (SHP), conteniendo información referente a paisaje, clima, tipo de relieve, litología, las características del suelo, tomado del Geoportal del IGAC y procesado en el software Arcgis como se evidencia en la figura 13.

Figura 13

Mapa de los tipos de suelos de la microcuenca Hato laguna

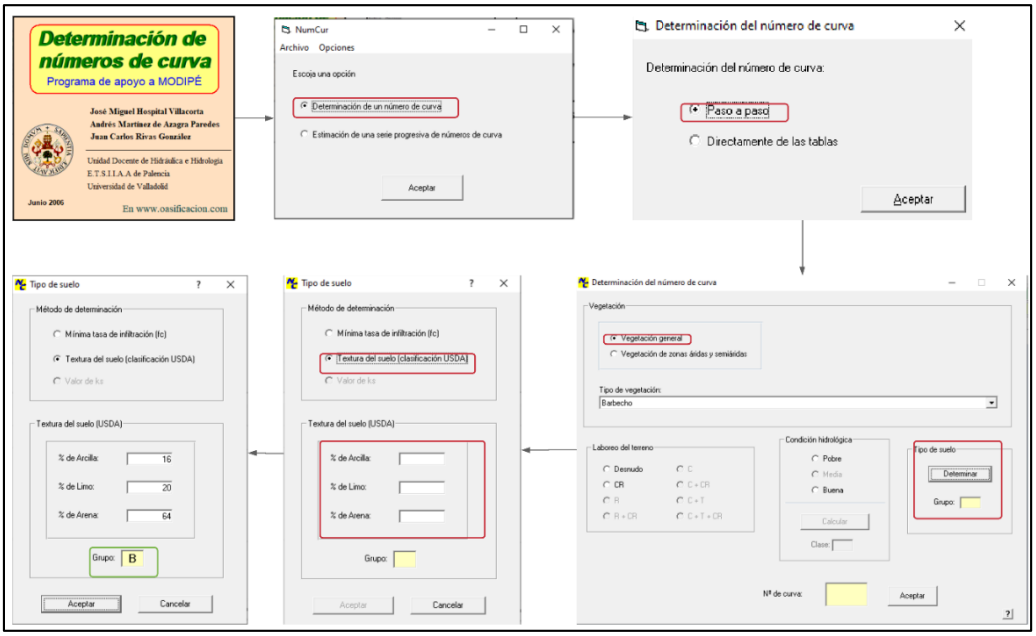


Fuente: Elaboración propia con base en datos de IGAC (2015)

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos (tabla 3) de los tipos de suelos de la microcuenca Hato laguna se obtuvo 9 (número de capas, profundidad máxima de enraizamiento, textura, profundidad, carbono orgánico, porcentaje de arcillo, limo, arena y roca) del "Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá del año 2010". Por otra parte, el parámetro grupo hidrológico, se determinó empleando el programa NumCur, como se muestra a continuación:

Figura 14

Esquema general programa NumCur

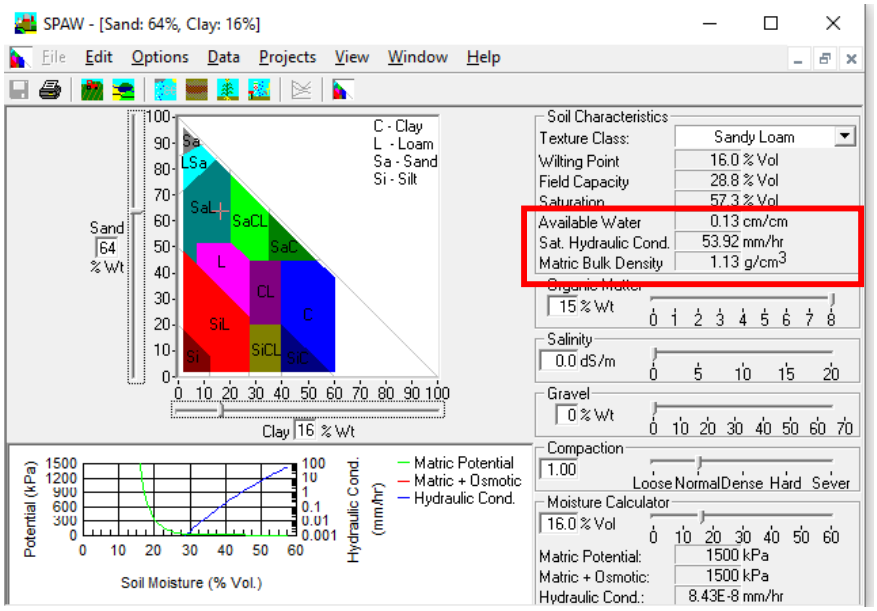


Fuente: Elaboración propia.

La disponibilidad de agua en el suelo (Available water), conductividad hidráulica saturada (Sat. Hydraulic Cond) y densidad aparente del suelo (Matric Bulk Density) se determinó a partir del porcentaje de arena (Sand), porcentaje de arcilla (clay) y porcentaje de materia orgánica, con el programa Soil Water Characteristics versión 6.02.74, como se muestra en la figura 15.

Figura 15

Implementación Soil Water Characteristics



Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el albedo del suelo, se empleó la ecuación 2 propuesta por Baumer, en el año 1990 (Argota, 2011), en función de la materia orgánica (Ecuación 3). El porcentaje de materia orgánica, se relaciona a partir del carbono orgánico y el factor de Van Bemmelen de (1,724)

Ecuación 2. *Ecuación de albedo del suelo*

$$\boldsymbol{A} = \frac{0.6}{\exp(0.4M)}$$

Fuente: (Argota, 2011)

Donde:

A: Albedo del suelo
OM (%): Materia orgánica en el suelo.

Ecuación 3. *Ecuación de materia orgánica*

$$\boldsymbol{Materia\ org\acute{a}nica}\ (\%) = \%C.org\ X\ 1{,}724$$

Fuente: (Argota, 2011)

Donde:

%C.org: Porcentaje de carbono orgánico.

En cuanto al factor K de erodabilidad del suelo se calculó mediante la ecuación de propuesta por Williams en el año 1995 (Ecuación 4)

Ecuación 4. *Ecuación del factor k de erodabilidad del suelo*

$$\boldsymbol{K_{USLE}} = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisad}$$

Fuente: (Williams, 1995)

Donde:

$\boldsymbol{f_{csand}}$=Factor que da baja erodabilidad del suelo, para suelos con alto contenido de arena gruesa y altos valores de erodabilidad para suelos con poca arena.

$\boldsymbol{f_{cl-si}}$= Factor que da bajos valores de erodabilidad del suelo para suelos con alto contenido de arcilla o limo.

$\boldsymbol{f_{orgc}}$=Factor que reduce la erodabilidad del suelo para suelos con alto contenido de carbono orgánico
$\boldsymbol{f_{hisad}}$= Factor que reduce la erodabilidad del suelo para suelos con extremadamente alto contenido de arena
Los factores se calculan mediante las ecuaciones 5, 6, 7 y 8 respectivamente.

Ecuación 5. *Factor* $\boldsymbol{f_{csand}}$

$$\boldsymbol{f_{csand}} = \left(0.2 + 0.3 \exp\left[-0.256 * ms * \left(1 - \frac{msil}{100}\right)\right]\right)$$

Fuente: (Williams, 1995)

Ecuación 6. *Factor* f_{cl-si}

$$f_{cl-si} = \left(\frac{msilt}{mc+msilt}\right)^{0.3}$$

Fuente: (Williams, 1995)

Ecuación 7. *Factor* f_{orgc}

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.0256*orgC}{orgC+\exp[3.72-2.95*orgC]}\right)$$

Fuente: (Williams, 1995)

Ecuación 8. *Factor* f_{hisad}

$$f_{hisad} = \left(1 - \frac{0.7*\left(1-\frac{ms}{100}\right)}{\left(1\frac{ms}{100}\right)+\exp[-5.51+22.9*\left(1\frac{ms}{100}\right)}\right)$$

Fuente: (Williams, 1995)

Donde:

ms= porcentaje de arena
msilt= porcentaje de limo
mc=porcentaje de arcilla
orgC= porcentaje de carbono orgánico.

En cuanto a los parámetros fracción de la porosidad y volumen máximo de ruptura del perfil del suelo se adaptó un valor de 0,5 establecido por SWAT al no tener los valores para este.

Tabla 3

Parámetros físico químicos de los suelos de la microcuenca Hato laguna.

PERFIL	SNAM (Nombre del suelo)	NLAYERS	HYDGRP(Grupo Hidrológico)	SOL_ZMX (profundidad máxima de enraizamiento (mm)	ANION_EXCL (fracción de porosidad donde los aniones son excluidos)	SOL_CRK (volumen máximo de ruptura del perfil del suelo (m3/m3)	TEXTURE (textura de la capa del suelo)	SOL_Z (Profundidad mm)	SOL_BD (densidad aparente g/cm3)	SOL_AWC (disponibilidad de agua en el suelo (mm/mm)	SOL_K (conductividad hidráulica (mm/h)	SOL_CBN (carbono orgánico %)	Materia orgánica (%)	CLAY (% arcilla)	SILT (% limo)	SAND (%arena)	ROCK (% roca)	SOL_ALB (albedo del suelo	USÑE_K (Factor K de erodabilidad del suelo)
PB1A	Lith	2	B	50	0,5	0,5	FA	400	1,13	0,13	53,92	8.9	15,5	16	20	64	0	0.0012	0.161

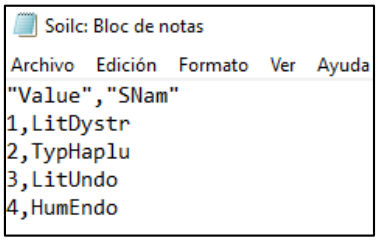
			B		0,5	0,5	FA rA	480	1,43	0,09	54,97	1.6	2,9	10	22	68	0	0.1889	0.169
PB 13 A	**Lithic Udorthents**	1	C	10	0,5	0,5	FL	160	0,99	0,19	44,64	5.0	8,6	22	50	28	15	0.0192	0.182
174 A	**Typic Hapludands**	5	C C C D D	100	0,5 0,5 0,5 0,5 0,5	0,5 0,5 0,5 0,5 0,5	F F FA r Ar Ar	160 350 680 910 1440	1,25 1,36 1,39 1,46 1,43	0,15 0,15 0,14 0,12 0,13	20,48 13,95 4,74 1,52 1,64	3.0 2.0 1.5 0.7 0.4	5,3 3,5 2,6 1,3 0,8	24 24 34 40 40	38 38 34 20 30	38 38 32 40 30	0 0 0 0 0	0.0716 0.1505 0.2123 0.25 0.25	0.169 0.169 0.160 0.143 0.156
504 A	**Humic Endoaquept**	2	B D	50	0,5 0,5	0,5 0,5	FA Ar	350 1000	1,16 1,38	0,13 0,13	44,16 1,16	12,2 0,8	21,2 1,5	18 46	18 26	64 28	0 0	0.0001 0.25	0.156 0.148

Fuente: Elaboración propia.

Al haber definido los suelos, sus parámetros fisicoquímicos requeridos (tabla 2) y el procesamiento del shape en ArcGis se le asignó un valué en la tabla de atributos a cada tipo de suelo con la finalidad de poder identificarlos posteriormente, correlacionando los tipos de suelo del mapa con la base de datos del SWAT a partir de un *txt con el "value" y el "name" del suelo (figura 16) y una modificación a la tabla "usersoil" (figura 17) del archivo "SWAT2012", con el fin de configurarlo a la zona de estudio, ya que SWAT solo incluye datos de suelos de Estados Unidos.

Figura 16

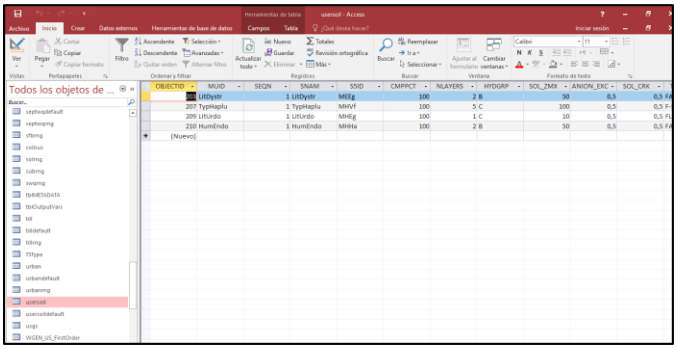
** txt que relaciona los tipos del suelo del mapa con la base de datos del SWAT.*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17

Tabla "usersoil" del archivo "SWAT2012" modificada para el área de estudio.



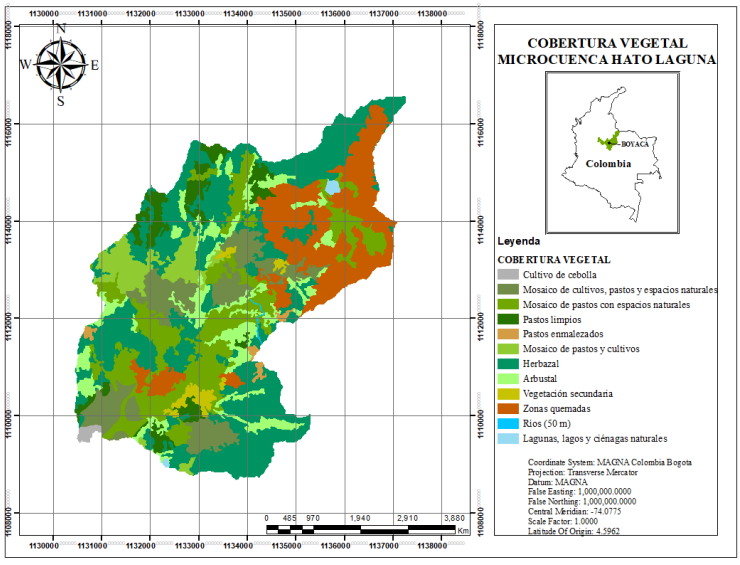
Fuente: Elaboración propia.

6.3.3 Procesamiento de coberturas vegetales.

Los diferentes tipos de cobertura vegetal de la microcuenca Hato laguna, se determinaron a partir del "Mapa de coberturas de la tierra en zonas de paramos priorizados del país, periodo 2010-2012 a escala 1:25.000" en formato Shapefile, el cual fue realizado mediante la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia y se encuentra en el Geoportal del IDEAM, contiene información detallada acerca del código de cada cobertura, la leyenda, el área y una cobertura y leyenda de tercer nivel. Encontrando en la zona de estudio 12 tipos de coberturas, como se ve en la figura 18. Destacando que el Herbazal, los Mosaicos de pastos con espacios naturales y las Zonas quemadas son las coberturas que más porcentaje de ocupación tienen con un 32.15%, 17.6 % y un 16,98 % respectivamente, evidenciándose en la tabla 4.

Figura 18

Mapa de coberturas vegetales de la microcuenca Hato laguna



Fuente: Elaboración propia con base en datos de IGAC (2015)

Tabla 4

Porcentaje de ocupación de las coberturas vegetales en la microcuenca Hato Laguna

TIPO DE COBERTURA	CODIGO	AREA (Km^2)	PORCENTAJE
Pastos limpios	PAST	1.619011	5.34
Herbazal	BROM	9.73948	32.15
Mosaico de pastos con espacios naturales	FRSD	5.330984	17.6
Arbustal	MESQ	2.809545	9.27
Zonas quemadas	SWRN	5.145608	16.98
Vegetación secundaria	RNGE	0.376715	1.24
Mosaico de pastos y cultivos	RYEG	1.514713	5
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	AGRC	3.31965	10.96
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	WATR	0.094231	0.31
Pastos enmalezados	RNGB	0.207003	0.68
Hortalizas (Cultivo de Cebolla de rama)	ONIO	0.107317	0.35
Ríos (50 m)	WATR	0.032883	0.11

Fuente: Elaboración propia

Una vez definido los tipos de cobertura vegetal para la zona de estudio se realizó la clasificación dentro de las categorías del modelo SWAT, para lo cual se hizo una búsqueda bibliográfica con la finalidad de determinar los códigos SWAT según el tipo de cobertura, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5

Asignación códigos SWAT a la microcuenca Hato laguna.

Tipo de cobertura de acuerdo con la clasificación Corine Land Cover	Descripción	Código SWAT	Referente bibliográfico empleado
231. Pastos limpios	Son tierras con un porcentaje de cubrimiento de pastos limpios superior al 70%. Hay prácticas de manejo como limpieza, encalamiento y o fertilización (IDEAM, 2010)	PAST	(Hernández, 2015)
233. Pastos enmalezados	Son tierras formadas por pastos y malezas, conformando vegetación secundaria (con una altura menor a 1.5 m) debido a procesos de abandono (IDEAM, 2010).	RNGB	(Hernández, 2015)
242. Mosaico de pastos y cultivos	Son tierras con la presencia de pastos y cultivos, con un tamaño de parcelas inferior a 25 Ha, la distribución es muy dispersa por lo que no se pueden representar de manera individual (IDEAM, 2010).	RYEG	(Hernández, 2015)

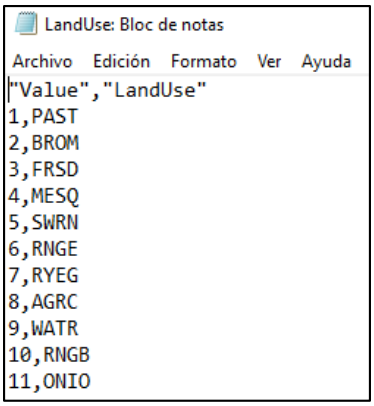
243. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Son superficies ocupadas principalmente por cultivos y pastos en combinación con espacios naturales, son parcelas con áreas superiores a 25 Ha, los cultivos y pastos ocupan entre el 30 y 70% (IDEAM, 2010).	AGRC	(Uribe *et al.*, 2013)
244. Mosaico de pastos con espacios naturales	Está constituido por superficies con pastos en combinación con espacios naturales, los pastos cuentan con un área inferior a 25 Ha siendo del 30 al 70% de superficie total. Los espacios naturales están constituidos por bosque natural, arbustales, bosque de galería o ripario, pantanos y otras áreas no intervenidas o poco transformadas (IDEAM, 2010).	FRSD	(Uribe *et al.*, 2013)
321. Herbazal	Está conformado por zonas vegetales de tipo herbáceo, desarrollado de tipo natural formando una cobertura densa (>70% de ocupación) o abierta (30 a 70% de ocupación). Son formaciones vegetales sin intervención (IDEAM, 2010).	BROM	(Hernández, 2015)
3232. Vegetación secundaria	Estas conformado principalmente por vegetación arbustiva y herbácea cuyo dosel es irregular, en algunas ocasiones hay árboles y enredaderas siendo el proceso inicial de sucesión vegetal después de medidas de deforestación de bosques o aforestación de pastizales (IDEAM, 2010).	RNGE	(Hernández y Salamanca, 2019).
334. Zonas quemadas	Son zonas afectadas por cultivos recientes, con la presencia de material carbonizado en áreas naturales, y seminaturales (bosques, cultivos, sabanas y arbustales) (IDEAM, 2010).	SWRN	(Welde y Gebremariam, 2017)
511. Ríos (50 m)	Hace referencia a ríos con un ancho del cauce mayor o igual a 50 m (IDEAM, 2010).	WATR	(Uribe *et al.*, 2009)
512. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Lagunas, ciénagas u otros cuerpos agua naturales con área mayor o igual a 25 Ha, con cobertura de vegetación acuática flotante que no represente más de 30% del área del cuerpo de agua (IDEAM, 2010).	WATR	(Uribe *et al.*, 2009)
2141. Cebolla	Son coberturas terrestres, pertenecientes a la familia de las aliáceas (plantas bianuales, es decir que requieren dos ciclos para producir semillas) con una parte comestible (bulto) en la primera etapa de crecimiento y vástagos en la segunda etapa (IDEAM, 2010).	ONIO	Databases SWAT (APPENDIX A)
32222. Arbustal	Presenta vegetación mesofilica, donde predominan arbustos achaparrados y arboles pequeños, es característico de zonas humedad con altos niveles de precipitación y humedad atmosférica, esta principalmente en zonas de paramo o bosques de niebla (IDEAM, 2010).	MESQ	(Uribe *et al.*, 2009)

Fuente: Elaboración propia con base en datos de IGAC (2015)

Igualmente, en el software ArcGis se le asignó un Valué en la tabla de atributos a cada cobertura. Posterior a esto se preparó un *txt que relaciona los usos del suelo del mapa con la base de datos del SWAT, teniendo el "value" y el uso de suelo "LandUse" (figura 19) de acuerdo al orden de la tabla de atributos para posteriormente ser ingresado al modelo.

Figura 19

**txt que relaciona los usos del suelo del mapa con la base de datos del SWAT.*



Fuente: Elaboración propia.

6.3.4 Definición de pendientes

Para definir las pendientes de la microcuenca Hato laguna se empleó la clasificación de pendientes adaptada por el IGAC de acuerdo con el rango de pendientes, estableciendo 5 clases como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6

Clasificación de pendientes empleado en la microcuenca Hato laguna.

Rango de pendientes empleado para el modelo	Rango de pendientes IGAC (%)	Relieve
CLASE I (0-7%)	0-3%	Topografía plana, plano - cóncava
	3-7%	Topografía ligeramente inclinada y ligeramente ondulada
CLASE II (7-25%)	7-12%	Topografía moderadamente inclinada, ligeramente quebrada y moderadamente ondulada.
	12-25%	Topografía fuertemente inclinada, moderadamente quebrada y fuertemente ondulada
CLASE III (25-50%)	25-50%	Topografía ligeramente empinada, fuertemente quebrada y ligeramente escarpada.
CLASE IV (50-75%)	50-75%	Topografía moderadamente empinada y moderadamente escarpada.
CLASE V (75-9999%)	>75%	Topografía fuertemente empinada y fuertemente escarpada.

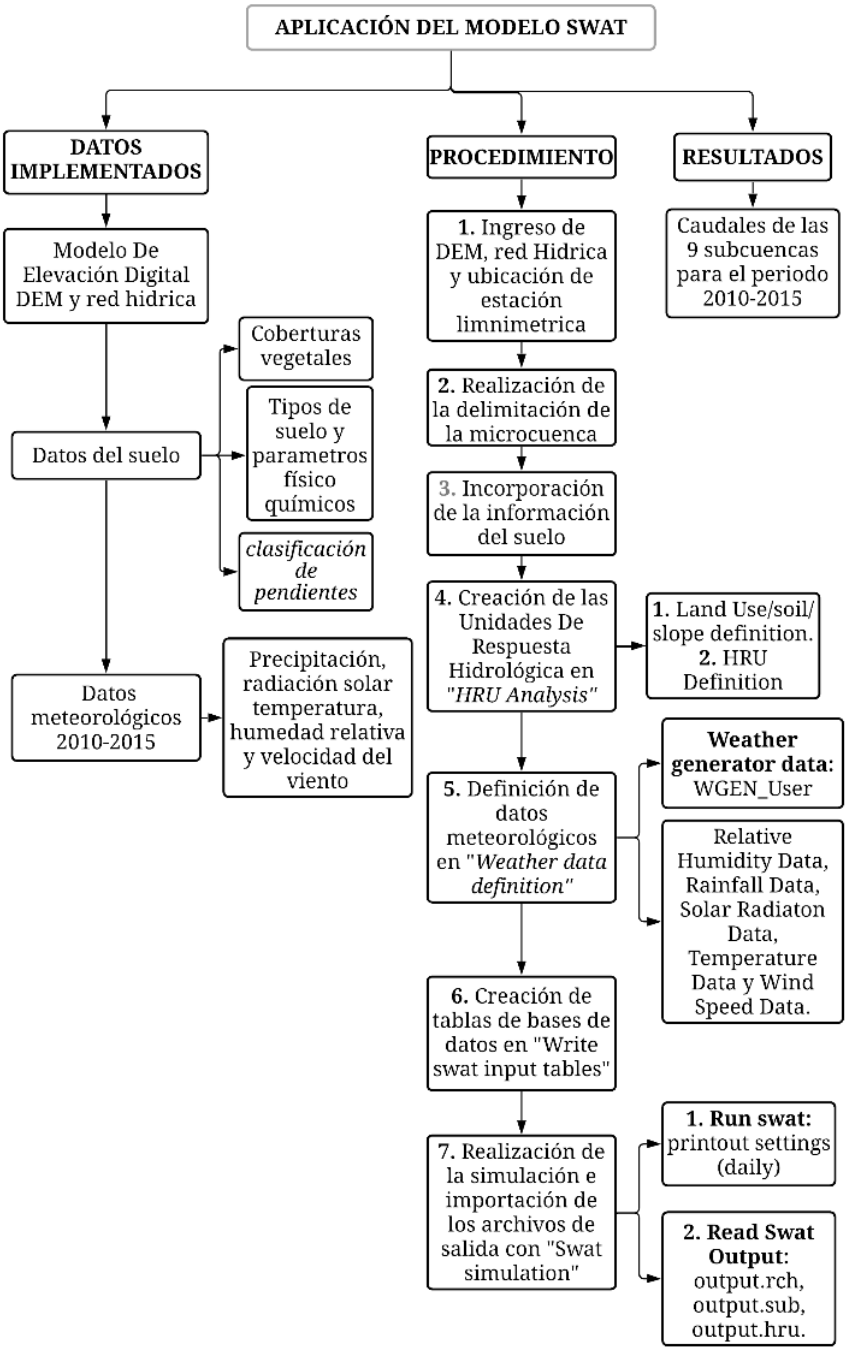
Fuente: Elaboración propia con base en datos de IGAC (2015)

6.4 Aplicación del modelo SWAT

En el siguiente esquema (figura 20) se encuentra los datos utilizados en la aplicación del modelo SWAT, el procedimiento realizado y los resultados obtenidos una vez fue corrido el modelo.

Figura 20

Esquema del procedimiento realizado en la implementación del modelo SWAT.



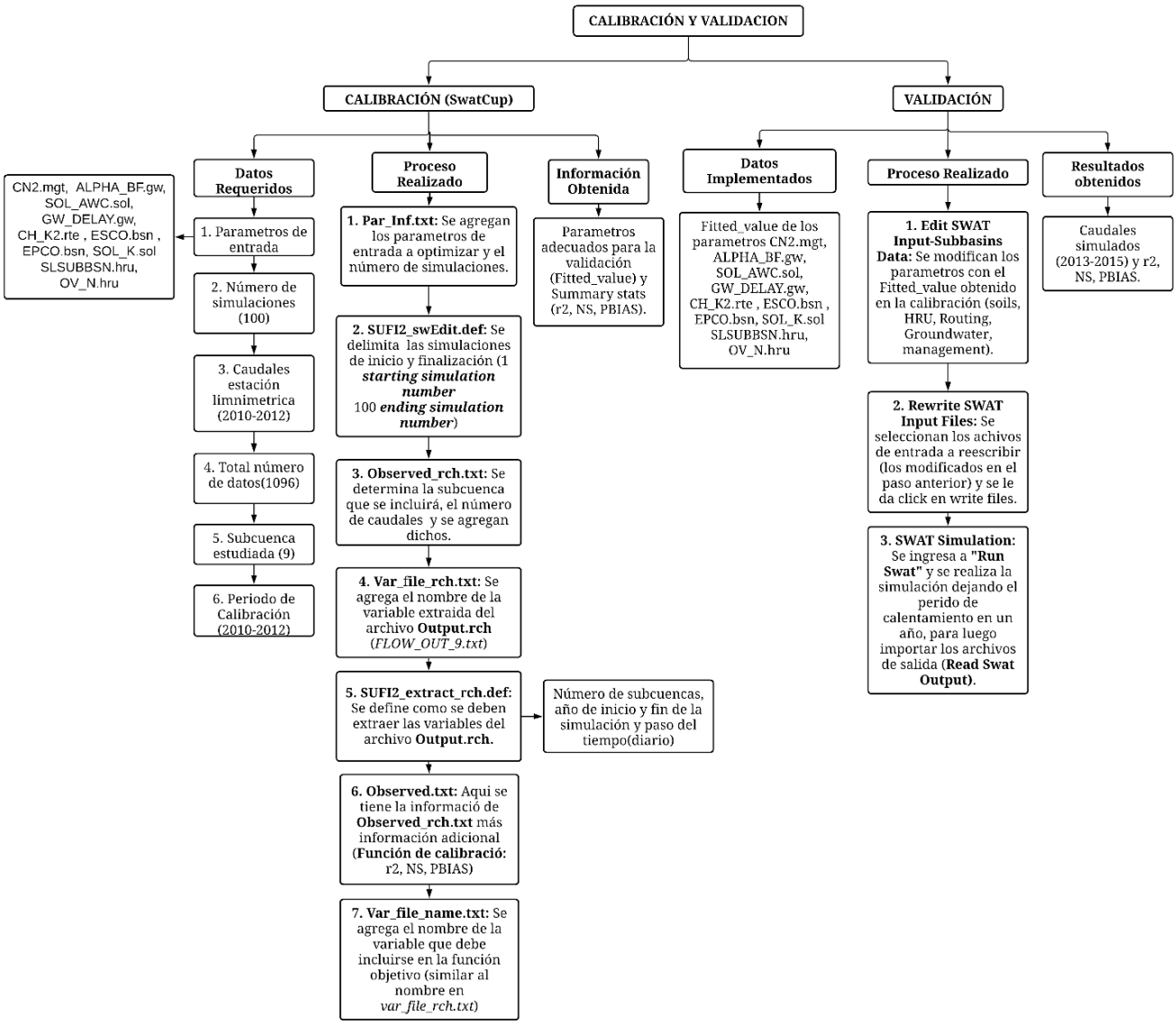
Fuente: Elaboración propia

6.5 Calibración y Validación del modelo SWAT

La calibración y validación fue un proceso realizado una vez se corrió de forma satisfactoria el modelo encontrándose en la figura 21 las actividades realizadas en los dos procesos y lo obtenido en ellos.

Figura 21

Esquema del procedimiento realizado para la calibración y validación del modelo SWAT.



Fuente: Elaboración propia

6.6 Planteamiento de Escenarios

El planteamiento de los 2 escenarios de “cambio de coberturas vegetales” para la microcuenca se hizo una vez se corrió, valido y calibro el modelo, teniendo en cuenta para ello el POMCA de la cuenca del lago de Tota e información bibliográfica concerniente a la zona de estudio.

6.7 Análisis de información y planteamiento de estrategias

Con los resultados obtenidos tanto del modelo como de los escenarios planteados y teniendo en cuenta la información presente en el EOT de Aquitania, POT de Sogamoso y en el POMCA del lago de tota se plantearon 3 estrategias orientadas en la rehabilitación y equilibrio de la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna, las cuales vinculan acciones en tres componentes, áreas afectadas por quema, conservación de áreas de reserva y ronda hídrica y procesos de restauración agroecológica.

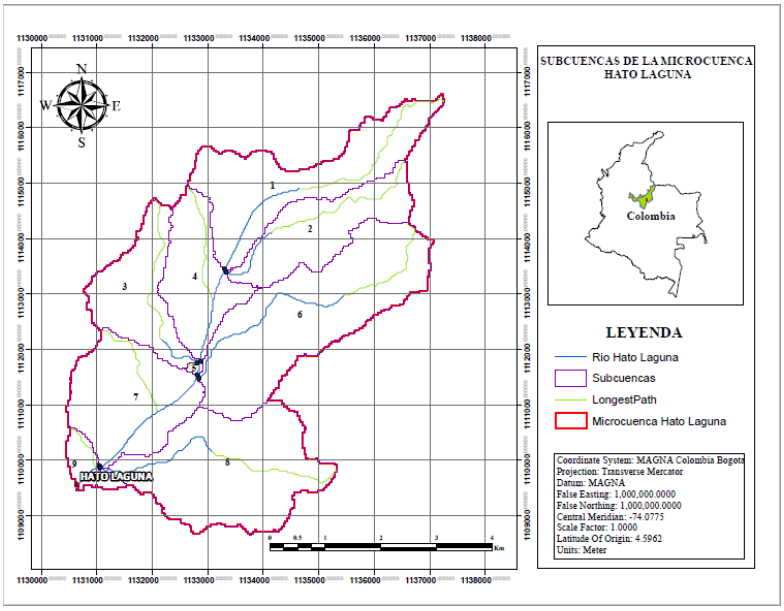
7. RESULTADOS

7.1 Microcuenca Hato Laguna y sus subcuencas

Mediante el modelo SWAT se delimito la microcuenca y se obtuvo la red de drenaje, contando la microcuenca con un área de 30.297 Km^2, siendo su cauce principal el rio Hato Laguna y cuenta con 4 afluentes en su recorrido. Siendo la elevación mínima de 3.044 m.s.n.m. y la máxima de 3.958 m.s.n.m. A su vez el modelo hidrológico SWAT, en conjunto con el software de ArcGIS (10.5), subdividió la microcuenca en 9 Subcuencas, contando cada uno con un cauce como se evidencia en la figura 22.

Figura 22

Mapa de las Subcuencas de la microcuenca Hato laguna



Fuente: Elaboración propia

7.2 Unidades De Respuesta Hidrológica (HRUs)

Las unidades de respuesta hidrológica (HRUs) se obtienen como el resultado de la división de cada una de las Subcuencas, siendo estas unidades zonas que presentan condiciones de suelo, usos y pendientes homogéneas, generando así una marca particular sobre la cantidad y calidad del agua de la microcuenca. Evidenciando con ellas las áreas que más aportan agua. Enfatizando que la microcuenca Hato Laguna se dividió en 54 HRUs, ordenándose como se evidencia en la tabla 7.

Tabla 7

Unidades de respuesta hidrológica de la microcuenca Hato laguna, según las subcuencas.

SUBCUENCA	ÁREA (Km^2)	N° HRUs	COBERTURAS VEGETALES	SUELOS	PENDIENTES(%)
1	4.687713	4	BROM	LitDystr LitUrdo	7-25; 25-50
2	3.063946	2	SWRN	LitDystr	7-25; 25-50
3	2.715792	9	BROM RYEG	LitDystr TypHaplu LitUrdo	7-25; 25-50
4	2.67584	13	MESQ RYEG BROM	LitUrdo TypHaplu LitDystr	7-25; 25-50
5	0.059928	2	BROM	LitUrdo	7-25; 25-50
6	6.752856	9	FRSD SWRN	LitDystr LitUrdo TypHaplu	7-25; 25-50
7	3.893427	8	BROM FRSD	LitUrdo TypHaplu	7-25; 25-50
8	5.864398	2	BROM	LitUrdo	7-25; 25-50
9	0.58311	5	AGRC (ONIO)	HumEndo LitUrdo TypHaplu	0-7; 7-25; 25-50

Fuente: Elaboración propia con información resultante del modelo SWAT.

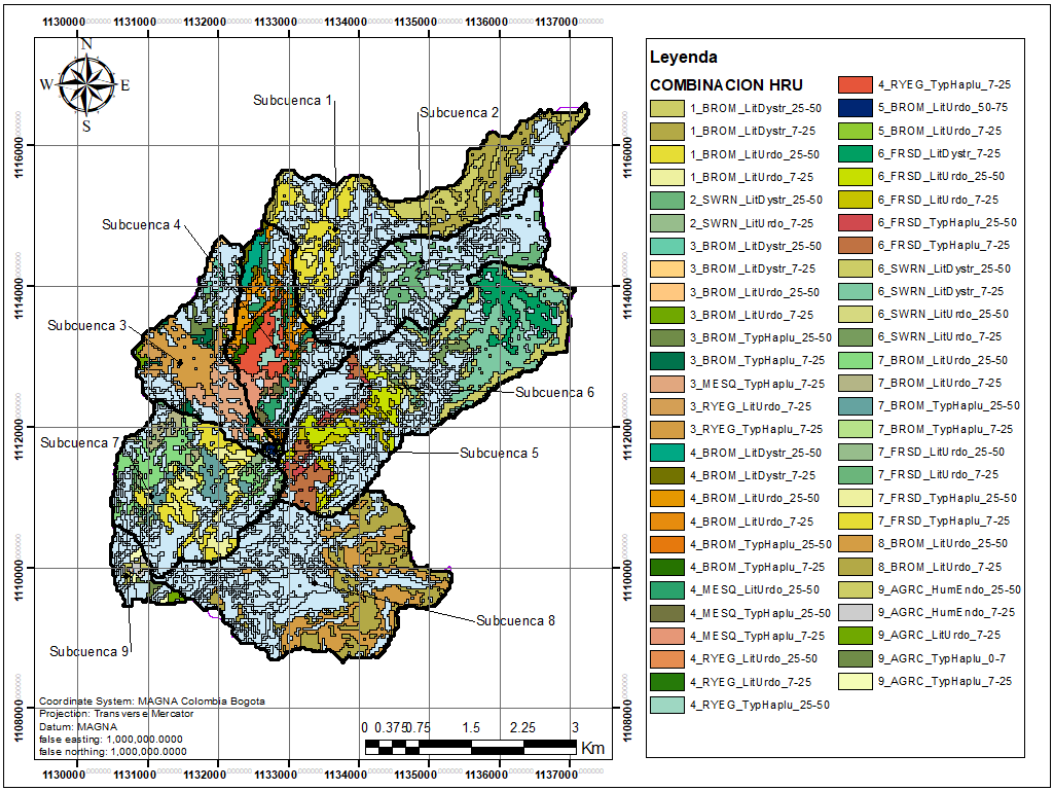
De acuerdo a la anterior tabla y a lo obtenido al correr el modelo se puede determinar que en las Subcuencas 3,4 y 6 se presentan los mismos tipos de suelos y pendientes, mientras que la Subcuenca 9 cuenta con una cobertura vegetal, un tipo de suelo y una pendiente diferente a los de las demás Subcuencas, siendo además está relativamente pequeña y encontrándose en ella los cultivos de cebolla (ONIO).

Por otro lado, se puede decir que la mayor cantidad de unidades de respuesta hidrológica (13) se encuentran en la Subcuenca 4 a pesar de su corta extensión y la posible presencia de cultivos, destacando que esto ocurre posiblemente porque entre su cobertura vegetal se encuentra vegetación como arbustos y árboles pequeños, pastos y vegetaciones sin intervención. Además, que cuenta con los suelos Lithic Dystrocryepts, Lithic Udorthents y Typic Hapludands, los cuales se dan en climas fríos y muy húmedos ayudando entonces a que el aporte de agua de la Subcuenca sea mejor.

En la figura 23 se encuentra el mapa de la distribución de las unidades de respuesta hidrológica (HRUs) en la microcuenca.

Figura 23

Distribución de las unidades de respuesta hidrológica (HRUs) en la microcuenca Hato laguna



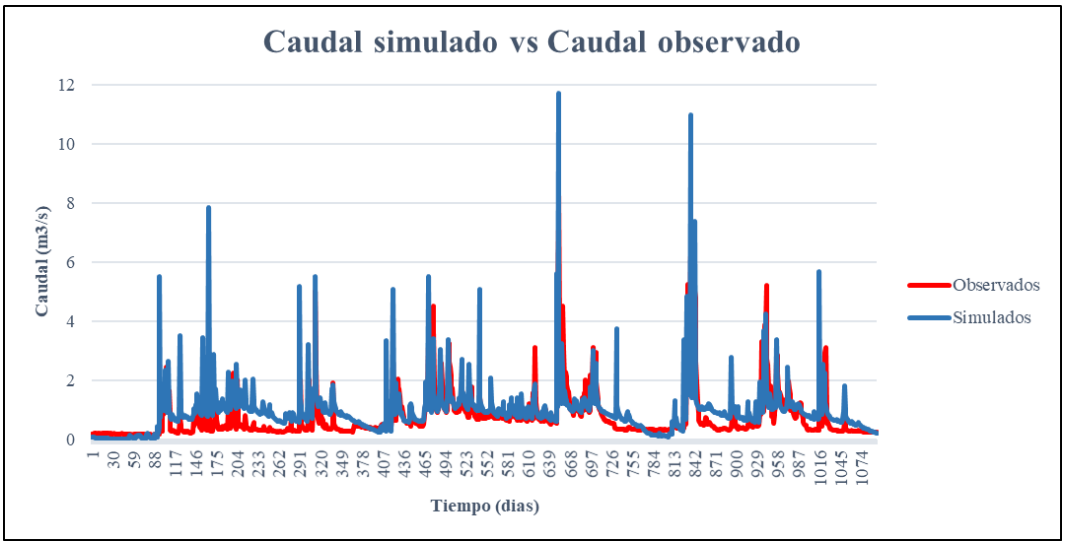
Fuente: Elaboración propia

7.3 Calibración y validación del modelo

Una vez obtenidos los caudales simulados, se compararon con los caudales observados (figura 24) y se procedió a realizar la calibración del modelo, a partir de la selección de 10 parámetros propuestos por (Abbaspour, 2011) los cuales se ajustaron hasta mejorar la capacidad de predicción del modelo mediante un valor mínimo y máximo como se muestran en la tabla 8. Destacando que el periodo de calibración fue de 2010-2012 (3 años).

Figura 24

Caudal simulado Vs Caudal observado para la calibración



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Parámetros empleados para la calibración del modelo.

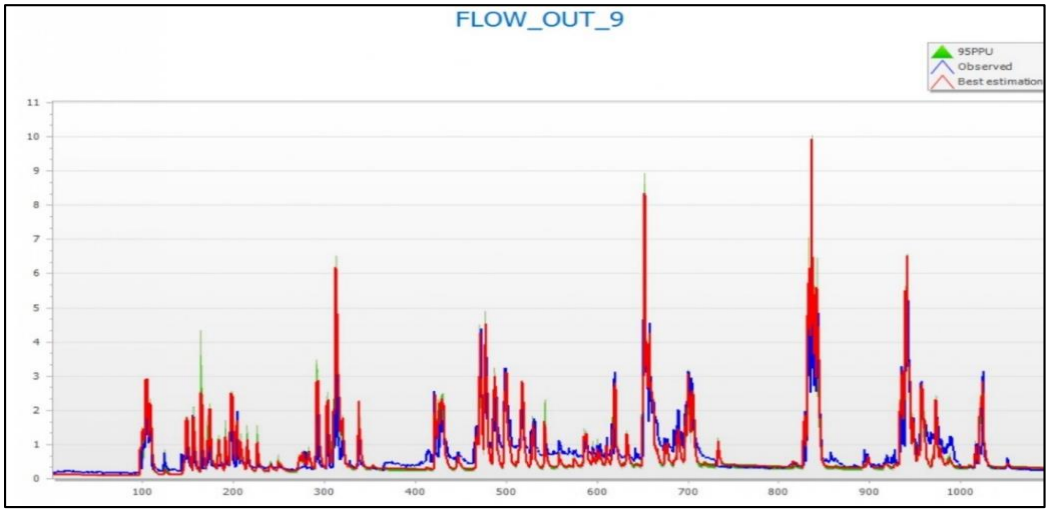
PARÁMETRO	RANGO	VALOR AJUSTADO
CN2	41-47	45.049999
ALPHA_BF	0.9-1	0.977500
SOL_AWC	0.42-0.52	0.468500
GW_DELAY	228-236	234.759995
CH_K2	270-278	472.600006
ESCO	0.5-0.9	0.790000
EPCO	0.7-1	0.704500
SOL_K	0.5-0.8	0.067250
SLSUBBSN	145-150	148.524994
OV_N	0.06-0.08	0.075700

Fuente: Elaboración propia

En la figura 25 se presenta gráficamente los resultados obtenidos con la calibración del modelo, mientras que en la tabla 9 se muestra los valores obtenidos del coeficiente de determinación r^2, el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo porcentual (Percent bias-PBIAS).

Figura 25

Calibración del modelo empleando SWAT CUP.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

Desempeño en la calibración

	r2	NASH	PBIAS
Desempeño en la calibración	0.80	0.72	2.7

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 10 el desempeño del modelo para la calibración con respecto a la clasificación del coeficiente de determinación fue bueno, el indicie de eficiencia Nash-Sutcliffe fue bueno y en el caso del Percent bias-PBIAS muy bueno.

Tabla 10

Niveles de desempeño estadístico

NIVEL DE DESEMPEÑO	r2	NSE	PBIAS
Muy bueno	**r2** =1	0.75≤**NSE**≤1.00	**PBIAS**≤±10
Bueno	0.8≤ **r2**≤1	0.65≤**NSE**≤0.75	±10≤**PBIAS**≤±15
Satisfactorio	0.50≤ **r2**≤0.8	0.50≤**NSE**≤0.65	±15≤**PBIAS**≤±25
Insatisfactorio	**r2** ≥0.5	**NSE**≤0.50	**PBIAS**≥±25

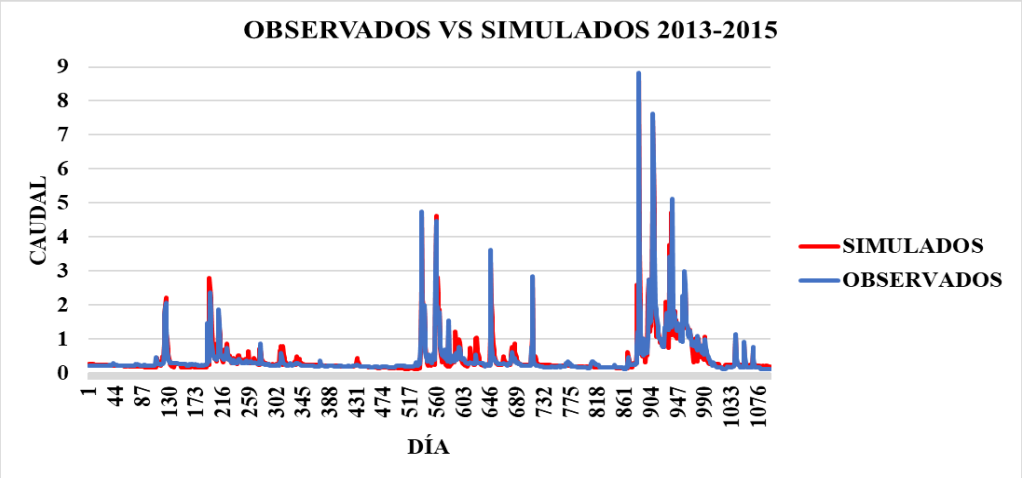
Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Moriasi *et al.*, 2007)

Una vez obtenida la calibración con un desempeño bueno, se realizó la validación utilizando los 10 parámetros calibrados, más específicamente el valor ajustado de cada parámetro; para lo cual se modificaron dichos valores en SWAT y se corrió nuevamente el modelo, obteniendo así los caudales simulados que fueron posteriormente comparados con los observados en la estación

Limnimétrica según se observa en la figura 26. Resaltando que el periodo de validación fue de 3 años y compendio los años de 2013 a 2015.

Figura 26

Caudales simulados Vs Caudales observados en la validación



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al desempeño en la validación se realizó de forma manual mediante la aplicación de las formulas ya establecidas para cada método y se utilizó al igual que en la calibración el coeficiente de determinación r^2, el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo porcentual (Percent bias-PBIAS), compilándose en la tabla 11 los valores obtenidos.

Tabla 11

Desempeño en la validación

	r2	NASH	PBIAS
Desempeño en la validación	0.862	0.849	-4.601

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, es de resaltar que tanto en la calibración como en la validación se tuvo buen desempeño, observándose en la tabla 12 la comparación de los resultados obtenidos en los dos procesos, de los cuales se puede decir que en la validación el ajuste entre los caudales observados y simulados fue un poco mejor que los obtenidos en la calibración, obteniendo un buen desempeño de r^2 y muy buen desempeño de NASH y PBIAS.

Tabla 12

Comparación del desempeño de la calibración y validación

	CALIBRACIÓN			VALIDACIÓN		
	r2	**NASH**	**PBIAS**	**r2**	**NASH**	**PBIAS**
Desempeño en la calibración y validación	0.80	0.72	2.7	0.862	0.849	-4.601

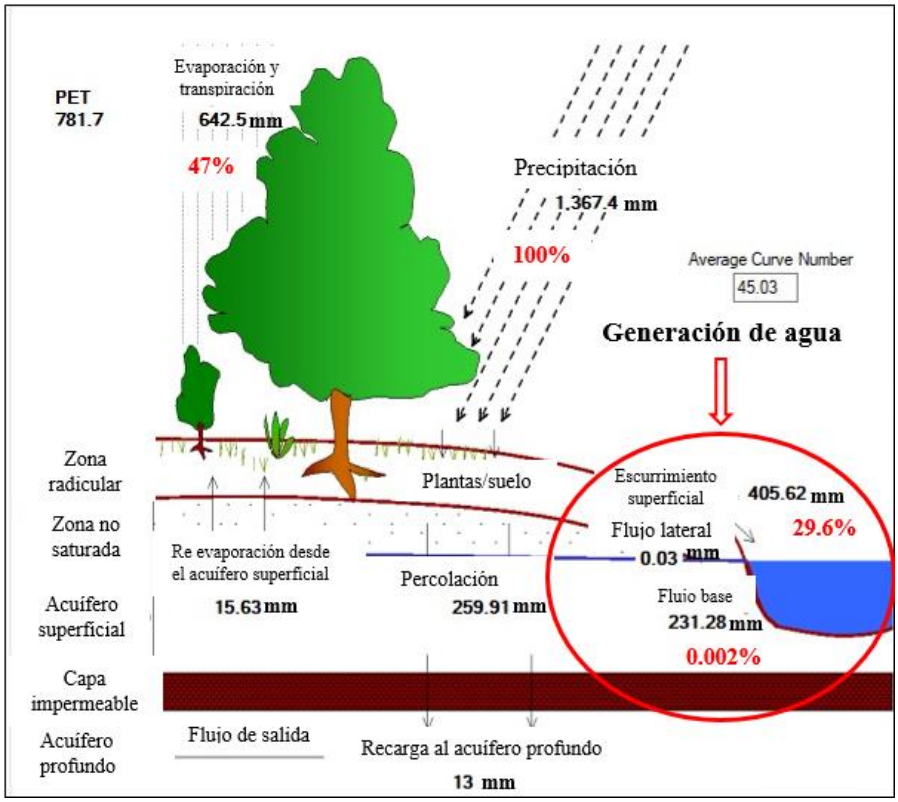
Fuente: Elaboración propia

7.4 Comportamiento hidrológico de la Microcuenca

En la figura 27 se encuentra el balance hídrico de la microcuenca Hato laguna para el periodo simulado (2009-2015), correspondiendo los valores a los promedios anuales multianuales de la microcuenca en mm/año, generado por el modelo SWAT, teniéndose con ello que la precipitación promedio es de 1367,4 mm al año, mientras que por su parte la escorrentía superficial es de 405,62 mm; lo que quiere decir que el 29,66% de la precipitación se convierte en escorrentía superficial, el 47% en evaporación y transpiración y el 19% en percolación.

Figura 27

Balance hídrico de la microcuenca Hato laguna generado en SWAT.



Fuente: Elaboración propia

7.4.1 Percolación (PERC_mm)

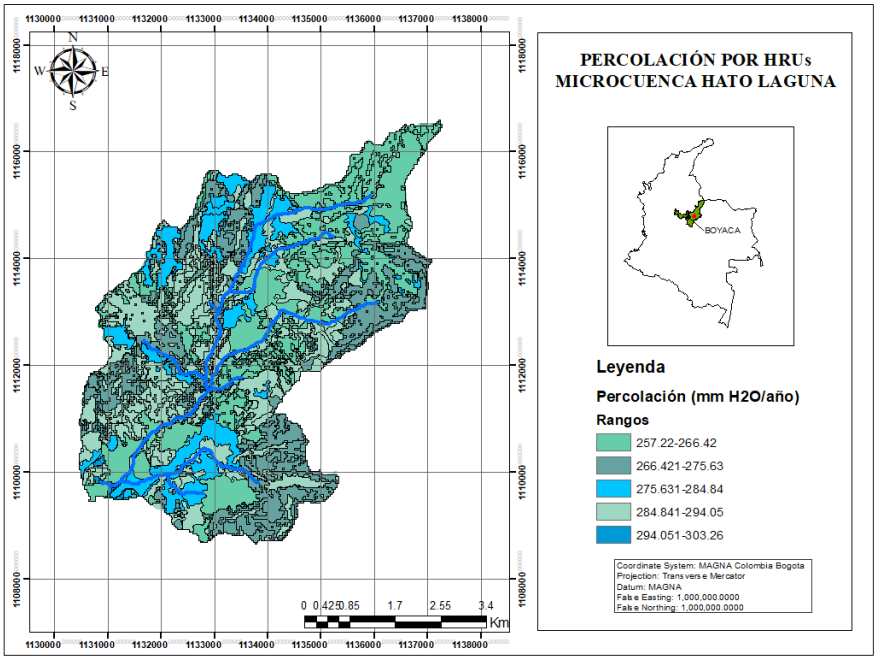
La percolación es el agua que una vez llega a la superficie del suelo pasa o se filtra a través del perfil de este (Giraldo & Jaramillo, 2004). Teniendo para la microcuenca Hato Laguna que la percolación corresponde al 19 % (259.91 mm) de la precipitación promedio anual multianual (1367 mm) (figura 27), para el total del área de estudio. Presentándose las mayores percolaciones en las HRUs con vegetación de mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales en el tipo de suelo Typic Hapludands con pendientes de 0-7 % y de 7-25%, siendo el valor de 294.051 mm a 303.26 mm. Resaltando que estas HRUs se ubican en la parte más baja de la ronda del rio Hato Laguna, en la Subcuenca 9.

En cuanto a la parte superior de la microcuenca la percolación obtenida fue la más baja variando entre 257.22 mm a 266.42 mm en zonas quemadas y herbazales con suelos Lithic Dystrocryepts y pendientes de 7-25% y 25-50%. Permitiendo los resultados evidenciar que las coberturas vegetales asociadas al suelo Typic Hapludands presentan una mayor percolación, que cuando se encuentran en el Lithic Dystrocryepts. Esto debido a que los suelos Typic Hapludands en general son de textura liviana y con una capacidad de infiltración alta (Acón-Ho et al., 2013).

En lo que respecta a las Subcuencas es de resaltar que la 4 presento la mayor percolación con un valor de 3619,48 mm de acuerdo a como se evidencia en el anexo 1, dándose esto posiblemente porque en esta Subcuenca se presenta la mayor cantidad de unidades de respuesta hidrológica tal y como se observa en la tabla 7, aunque pese a ello la mayor percolación a nivel de unidades de respuesta hidrológica se dio en la 53, la cual se ubica a la salida de la microcuenca (Subcuenca 9).

Figura 28

Mapa del promedio anual multianual de percolación de la microcuenca Hato Laguna



Fuente: Elaboración propia.

7.4.2 Evapotranspiración Real (ET_mm)

La evapotranspiración real se da en las condiciones reales del medio, influyendo la cobertura vegetal (natural o cultivada), las condiciones edáficas y los niveles de humedad del suelo (Agriculture, 1985). Esta incluye evaporación de ríos y lagos, suelos descubiertos y superficies vegetativas, además la "evaporación" dentro de las hojas de las plantas (transpiración) (Uribe, 2010).

Para el caso de la micro cuenca Hato laguna la evapotranspiración real representa el 47% (figura 27) de la precipitación promedio anual multianual con un valor promedio de 642.5 mm para toda el área de estudio, variando a nivel de HRUs entre 561.52 mm y 700.49 mm (figura 29), presentándose las mayores evapotranspiraciones reales en las zonas con cobertura vegetal arbustal, herbazal y mosaico de pastos con espacios naturales, en el tipo de suelos Typic Hapludands y pendientes de 7-25% y 25-50% variando entre 672.691 mm a 700.9 mm.

En cuanto a la menor evapotranspiración se da en la parte media-baja de la microcuenca variando entre 561.52 mm a 589.31 mm en coberturas de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales y herbazal, sobre el tipo de suelo Lithic Udorthents y pendientes de 7-25% y 25-50%. Enfatizando que en esta posiblemente se infiltra de buena forma el agua y queda contenida en el suelo o avanza

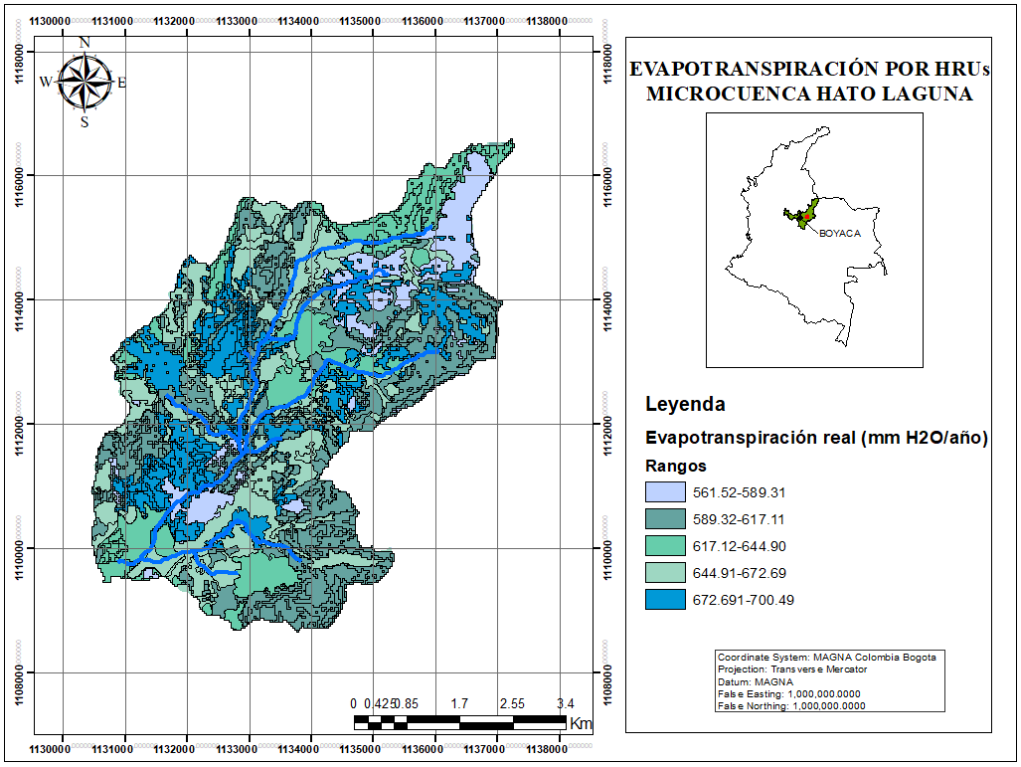
lentamente al sistema de agua-superficie a través de pasos subterráneos, siendo menor la cantidad de agua del suelo que vuelve a la atmosfera como resultado de la evaporación y de la transpiración de las plantas (Uribe, 2010).

Permitiendo los resultados evidenciar que las coberturas vegetales asociadas al suelo Typic Hapludands presentan una mayor evapotranspiración real, que cuando se encuentran en el Lithic Udorthents, ya que este suelo presenta un grupo hidrológico C, siendo el potencial de escorrentía moderadamente alto cuando está húmedo (Díaz & Mercado, 2017).

En lo que respecta a las Subcuencas es de resaltar que la 4 presento la mayor evapotranspiración real con un valor de 8424,13 mm de acuerdo a como se evidencia en el anexo 2, dándose esto posiblemente porque en esta Subcuenca se presenta la mayor cantidad de unidades de respuesta hidrológica tal y como se observa en la tabla 7.

Figura 29

Mapa del promedio anual multianual de la evapotranspiración real de la microcuenca Hato Laguna



Fuente: Elaboración propia.

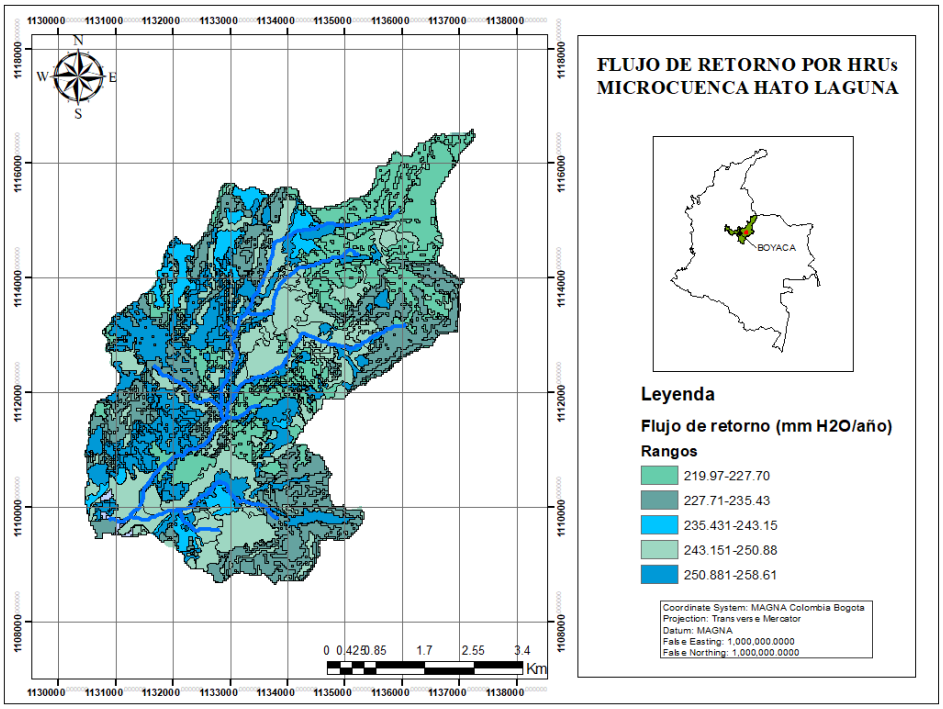
7.4.3 Flujo de retorno (GW_Qmm)

El flujo de retorno es la cantidad de agua subterránea originado del manto freático, la cual contribuye con el caudal (Uribe, 2010). Representando en la microcuenca el 16.91 % (231.28 mm) de la precipitación promedio anual multianual de toda el área (figura 27). Presentándose el menor flujo de retorno en las áreas con zonas quemadas, herbazal y mosaico de pastos con espacios naturales, en los tipos de suelos Lithic Dystrocryepts y Lithic Udorthents, con pendientes de 7-25 % y de 25-50 % con valores entre 219.97 mm a 227.70 mm. En el caso del mayor flujo de retorno vario entre 250.881 mm a 258.61 mm en coberturas de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales sobre el suelo Typic Hapludands y con pendientes de 0-7 % y 7-25 %.

Permitiendo los resultados evidenciar que las coberturas vegetales asociadas al suelo Typic Hapludands presentan un mayor flujo de retorno, que cuando se encuentran en el Lithic Dystrocryepts. Resaltando además que el comportamiento de las HRUs es similar al analizado en la percolación, por lo que en cuanto al mayor flujo de retorno a nivel de Subcuenca se da en la 4 con un valor de 3074,70 mm de acuerdo a como se evidencia en el anexo 3.

Figura 30

Mapa del promedio anual multianual del flujo de retorno de la microcuenca Hato Laguna



Fuente: Elaboración propia.

7.4.4 Escorrentía Superficial (SURQ_mm)

La escorrentía superficial es el flujo que se da sobre una superficie inclinada (Neitsh et al., 2005), moviéndose relativamente rápido hacia una corriente contribuyendo a su vez en esta (Uribe, 2010). Para la generación de la escorrentía el modelo SWAT usa los valores diarios de precipitación, simulando volúmenes de superficie de escorrentías y promedios máximos de esta para cada unidad de respuesta hidrológica (HRU) (Neitsh et al., 2005). En el caso de la microcuenca Hato Laguna se puede decir que de los 1367,4 mm de precipitación el 29.6 % se convirtió en escorrentía superficial con 405.62 mm (figura 27).

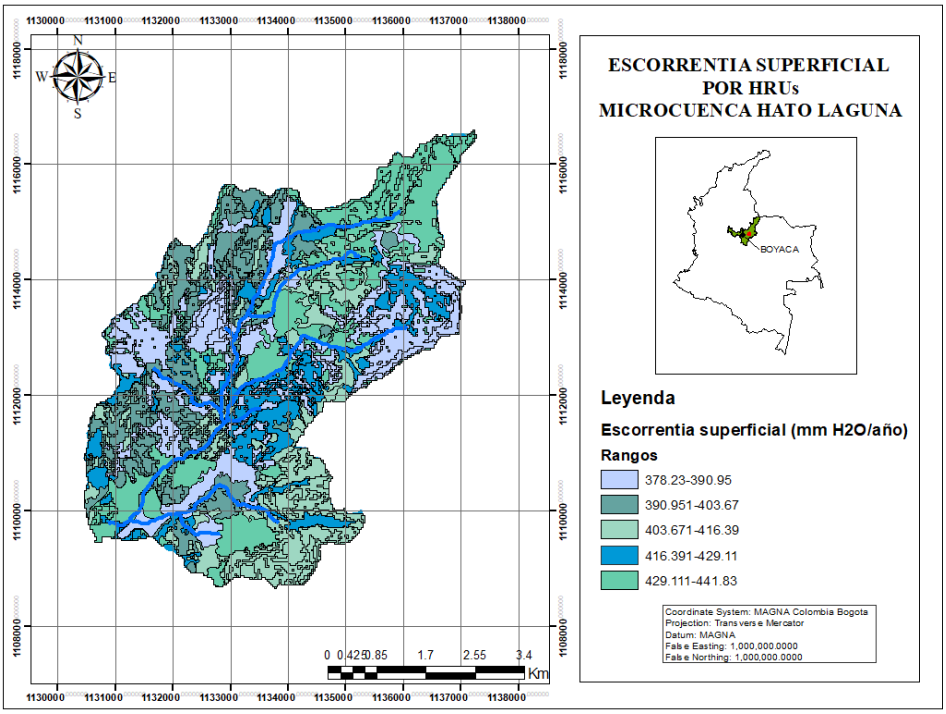
Por otro lado, teniendo en cuenta el mapa (figura 31) la mayor escorrentía superficial vario entre 429.111 mm a 441.83 mm en zonas con mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales y herbazales, en los tipos de suelos Humic Endoaquepts y Lithic Dystrocryepts y con pendientes de 7-25 % y de 25-50 %. Posiblemente porque el suelo Humic Endoaquepts de grupo hidrológico B y D cuenta con una capacidad de infiltración muy baja y el movimiento del agua a través del suelo resulta limitado o muy limitado, presentando un elevado potencial de escorrentía cuando está saturado (Mongil & Navarro, 2012).

En cuanto a la menor escorrentía superficial, esta se dio en áreas con vegetación de arbustal, herbazal, zonas quemadas y mosaico de pastos con espacios naturales, en los suelos Typic Hapludands y Lithic Udorthents con pendientes de 7-25 % y de 25-50 %. Siendo varias las HRUs con baja escorrentía superficial de acuerdo al anexo 4.

Por otro lado, se resalta que a nivel de Subcuenca la mayor escorrentía superficial fue de 5194.38 mm de acuerdo a como se evidencia en el anexo 4.

Figura 31

Mapa del promedio anual multianual de la escorrentía superficial de la microcuenca Hato Laguna



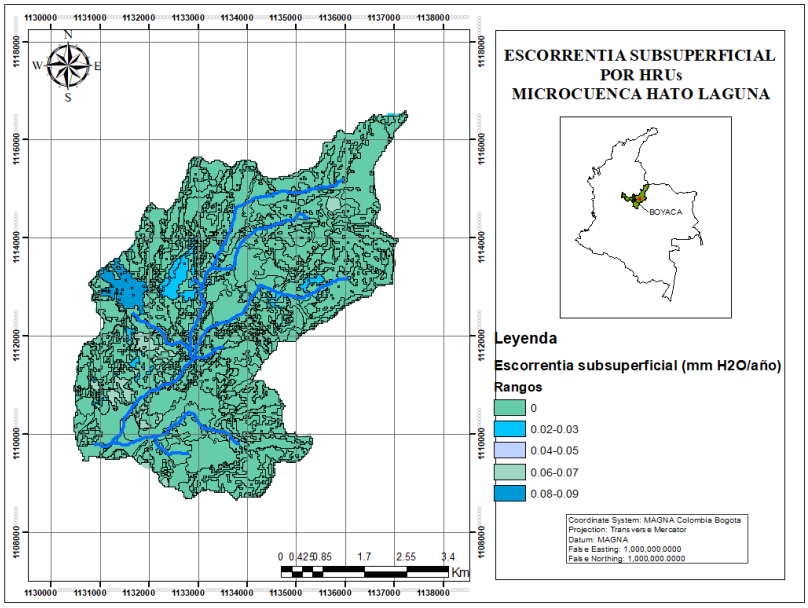
Fuente: Elaboración propia.

7.4.5 Escorrentía Subsuperficial (LAT_Qmm)

La escorrentía subsuperficial es el agua que se desplaza lateralmente por los horizontes superiores (debajo de la superficie de un terreno) descargando través del suelo en los cursos de agua ((Breña & Jacobo, 2006). Representando en la microcuenca el 0.002% de la precipitación total, con un valor de 0.03 mm (figura 27). Presentándose la mayor escorrentía subsuperficial en la HRU 15 (anexo 5) donde se encuentra la cobertura vegetal de herbazal en el suelo Typic Hapludands con pendiente 25-50% variando entre 0.08 mm a 0.09 mm (figura 32). Mientras que la más baja fue de 0 mm y se presentó en 49 HURs, evidenciando en la figura 32 que en muy pocas zonas se tuvo escorrentía subsuperficial mayor a 0 (entre 0.02 mm y 0.09 mm).

Figura 32

Mapa del promedio anual multianual de la escorrentía subsuperficial de la microcuenca Hato Laguna



Fuente: Elaboración propia.

7.5 Escenarios

Para determinar el efecto del cambio de cobertura en la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna, se propusieron dos escenarios, el primero está orientado con los lineamientos del Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Aquitania, el Plan de Ordenamiento Territorial de Sogamoso y el Plan de ordenación y manejo para la cuenca del lago de Tota (POMCA), el segundo se enfoca en la ampliación de la frontera agrícola.

7.5.1 Escenario 1

El escenario 1 se enfoca en la zonificación de suelo rural propuesto en el EOT del municipio de Aquitania y POT del municipio de Sogamoso, mediante el cual se establecieron las actividades que se pueden desarrollar, de acuerdo con el uso de suelos recomendado. Adicionalmente, se vincularon estrategias de restauración agroecológica propuestas en el POMCA del lago de Tota las cuales se encuentran orientadas en zonas de reserva natural y zonas de subpáramos y bosques altoandinos como se muestra en la tabla 13 y figura 33.

Tabla 13

Uso de suelos escenario 1.

Uso de suelos de acuerdo con el EOT/POT	Descripción	Código SWAT	Área (km^2)	Porcentaje

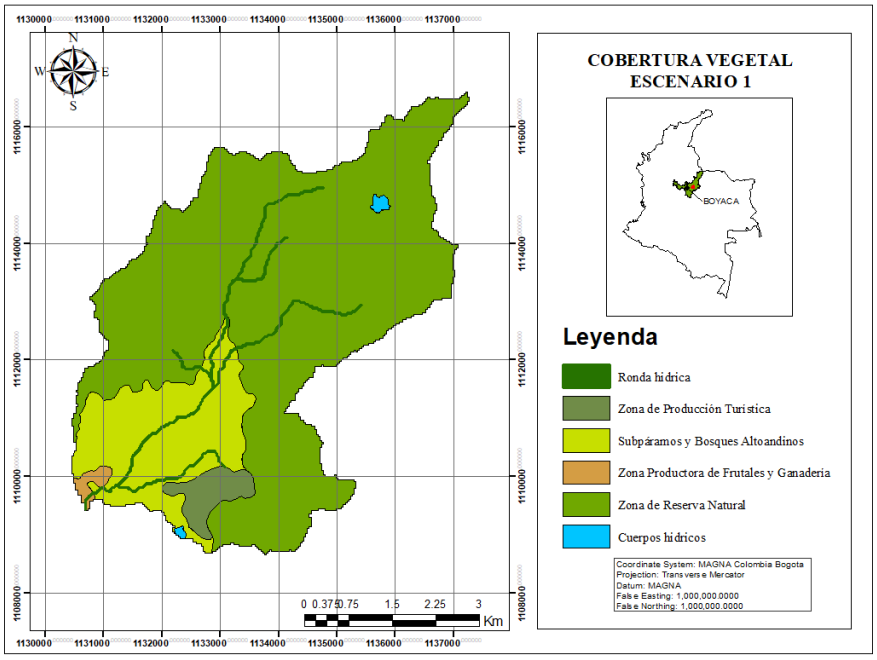
Áreas de riberas de quebradas y ríos	Hace referencia a las franjas de suelos ubicadas parametralmente a lo largo de los causes de aguas (ronda hídrica) en el caso de ríos y quebradas que sean afluentes al lago de Tota debe ser de 5 metros. Son áreas aisladas y su restauración puede ser de forma natural o revegetalizada utilizando para ello material vegetal propio de la zona de vida. ·**Usos Principales:** Bosques protector con especie nativas, conservación de suelos, restauración y aislamiento. ·**Usos Compatibles:** Bosque protector productor y recreación pasiva conectada. ·**Usos condicionados:** Captación de aguas, siempre y cuando no afecten el cuerpo de agua ni se realice sobre los nacimientos. Construcción de infraestructura de apoyo para actividades de recreación, embarcaderos, puentes y obras de adecuación y extracción racional de material de arrastre. ·**Usos prohibidos:** Usos agropecuarios, industriales, urbanos y suburbanos, loteo y construcción de viviendas, vías, minería, disposición de residuos sólidos, vertimiento de aguas residuales, contaminación por agroquímicos, tala y rocería de la vegetación. (EOT de Aquitania, 2004)	FRST	0.17	0.56
Subpáramos y Bosques Altoandinos (F3)	Estas zonas deben contar con vegetación nativa altoandina y vegetación de subpáramo, la recuperación debe ser mediante regeneración natural o restauración ecológica. · **Uso principal:** Conservación y protección integral de los recursos naturales, forestal y faunístico. ·**Usos Compatibles**: Programas ecoturísticos, restauración ecológica e investigación controlada. · **Usos Condicionados:** Establecimiento de sistemas productivos no contaminantes, infraestructura básica para usos compatibles, vías y captación de acueductos. ·**Usos Prohibidos:** Agropecuarios, industriales, urbanísticos, minero de tipo intensivo y otras actividades que ocasionan deterioro ambiental. (EOT de Aquitania, 2004)	OAK	3.354	11.07
Zona de Reserva Natural (R)	Son zonas con una altura superior a los 3.300 msnm, áreas compartidas con otros municipios (Sogamoso). ·**Uso principal:** Conservación protección integral de los recursos naturales, forestal y faunístico. ·**Usos Compatibles:** programas ecoturísticos, restauración ecológica e investigación controlada. ·**Usos Prohibidos:** Agropecuarios, industriales, urbanísticos, minero y otras actividades que ocasionan deterioro ambiental. (EOT de Aquitania, 2004)	FRST	23.30	84.34
Zona Productora de Frutales y Ganadería (C4-P)	Son coberturas vegetales con cultivos de cobertura densa y permanente como frutales, pastos de pradera y de corte y vegetación protectora en los terrenos más pendientes. ·**Uso Principal:** Frutales ·**Uso Compatible:** Ganadería extensiva, vivienda del propietario.	FRSD	0.22	0.73

	·**Uso Condicionado:** Vías, embalses, granjas, agroindustria. ·**Uso Prohibido:** Urbanismo, minería en todas sus formas. (EOT de Aquitania, 2004)			
Zonas de Producción Turística (T)	Son zonas con bosques protectores, infraestructura turística, malla ambiental, vías de acceso. ·**Uso Principal:** Recreación general, centros vacacionales, turismo y similares. ·**Uso Compatible:** Recuperación ambiental, Agricultura tecnificada, vías de comunicación, servicios públicos. ·**Uso Condicionado:** Comercio pesado. ·**Uso Prohibido:** Granjas porcinas y avícolas, industria, minería, urbanismo. (EOT de Aquitania, 2004)	FRST	1	3.30

Fuente: Elaboración propia con información del (EOT de Aquitania, 2004)

Figura 33

Cobertura vegetal escenario 1.

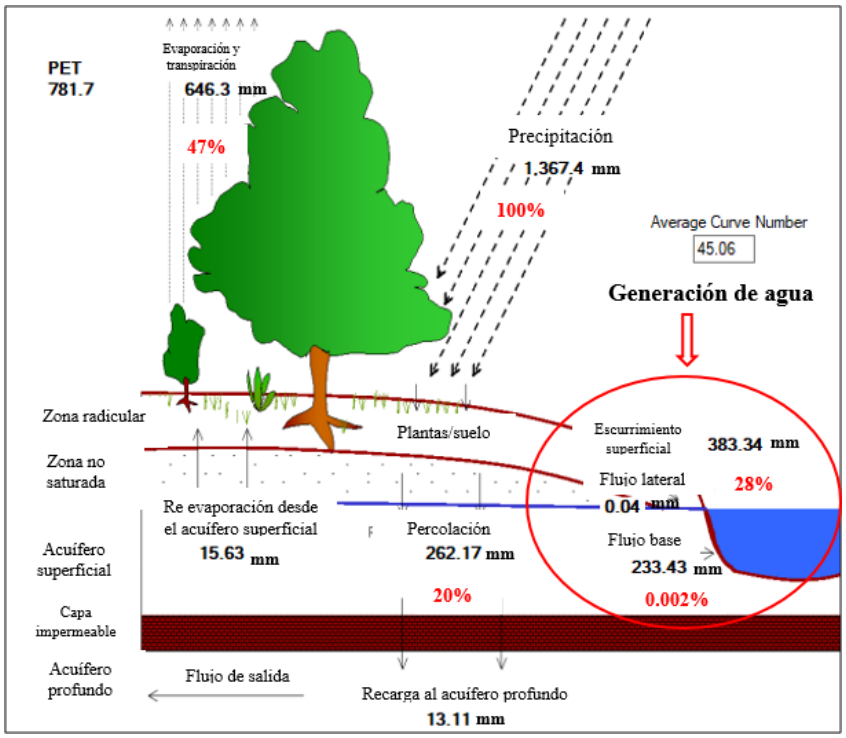


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el balance hídrico del escenario 1 (figura 34), el 47% de la precipitación se convierte en evaporación y transpiración, el 28% en escorrentía superficial, y el 20% en percolación, esto debido al aumento de cobertura vegetal, caracterizado principalmente por zonas boscosas, lo que genera un incremento de evaporación y transpiración, así como percolación y por ende una mayor recarga de acuífero profundo, por otra parte, existe una disminución de escurrimiento superficial en comparación con la situación inicial figura 27.

Figura 34

Balance hídrico del escenario 1



Fuente: Elaboración propia.

7.5.2 Escenario 2

El escenario 2 se enfoca en una ampliación de la frontera agrícola la cual llega hasta la zona donde se encuentra vegetación nativa (reserva), estando los cultivos de forma dispersa. Destacando que para la ampliación del área cultivada se tuvo en cuenta el documento de "productividad sectorial agropecuaria" y el "plan departamental de extensión agropecuaria", en el que se evidencia que las hortalizas son altamente cultivables en el departamento, resaltando la Cebolla larga, el Tomate y la Cebolla cabezona con la mayor cantidad (Gobernación de Boyacá, 2020). Siendo la cebolla de rama la hortaliza que más se siembra en Boyacá, ocupando 2800 Ha en Aquitania, Tota, Sogamoso, Cuitiva y la uvita (Gobernación de Boyacá, 2019). Contando la microcuenca con cultivos de cebolla. Por otro lado, la expansión de la frontera agrícola de la microcuenca fue del 3.23%, que es el porcentaje de aumento del área sembrada por cultivos transitorios en el departamento Gobernación de Boyacá, 2018), enfatizando que las hortalizas forman parte de los cultivos transitorios y dentro de estas esta la cebolla (Parques Nacionales Naturales, 2018) la cual se siembra en la microcuenca junto con otros cultivos transitorios como se muestra en la tabla 14 y

figura 35. Siendo importante tener en cuenta que para el caso del Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales el porcentaje de aumento de los cultivos se sacó solo para la mitad del are de esta cobertura, debido a que las áreas de cultivos y pastos ocupan entre 30% y 70% de la superficie total de la unidad (IDEAM, 2014).

Tabla 14

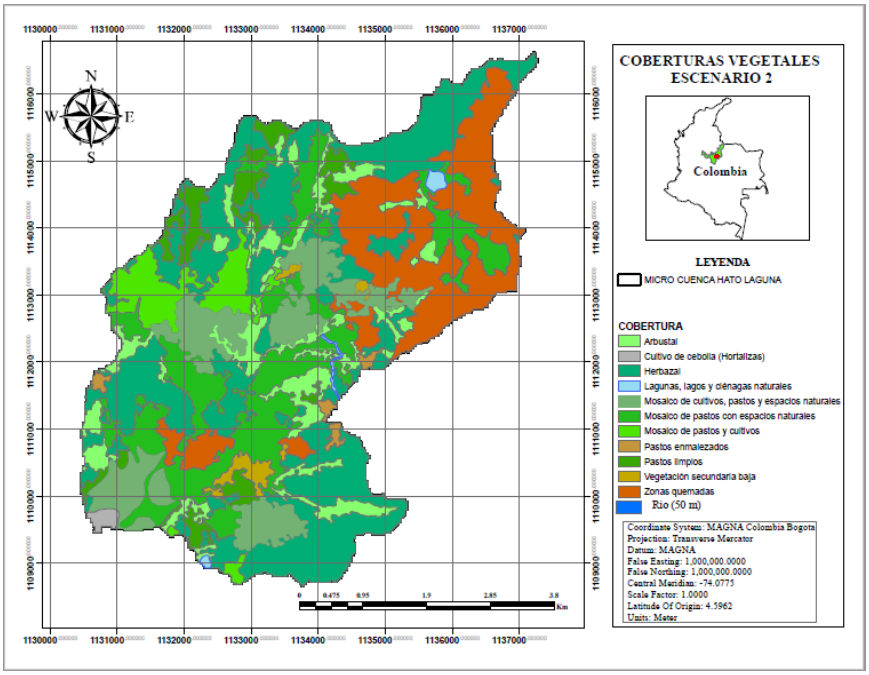
Coberturas vegetales escenario 2. Ampliación de la frontera agrícola con cultivos de cebolla y hortalizas.

TIPO DE COBERTURA	CODIGO	AREA (Km^2)	PORCENTAJE
Pastos limpios	PAST	1.619011	5.34
Herbazal	BROM	9.710386	32.05
Mosaico de pastos con espacios naturales	FRSD	5.291525	17.47
Arbustal	MESQ	2.80947	9.27
Zonas quemadas	SWRN	5.129772	16.93
Vegetación secundaria baja	RNGE	0.376535	1.24
Mosaico de pastos y cultivos	RYEG	1.539174	5.08
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	AGRC	3.373262	11.13
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	WATR	0.094231	0.31
Pastos enmalezados	RNGB	0.207003	0.68
Hortalizas (Cultivo de Cebolla de rama)	ONIO	0.114362	0.38
Ríos (50 m)	WATR	0.032883	0.11

Fuente: Elaboración propia.

Figura 35

Mapa coberturas vegetales escenario 2. Ampliación de la frontera agrícola.

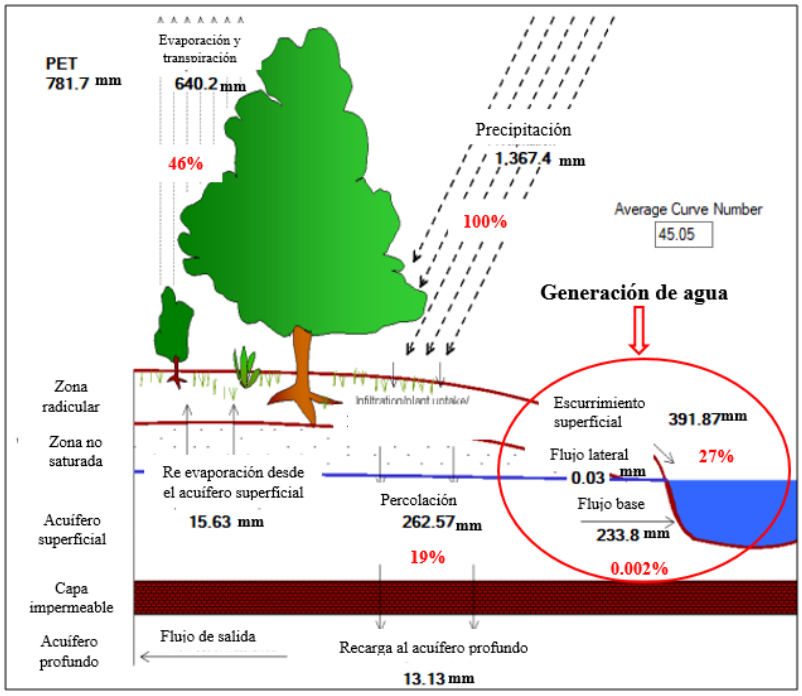


Fuente: Elaboración propia.

El balance hídrico del segundo escenario (figura 36) muestra que el 46% de la precipitación se convierte en evaporación y transpiración, el 27% en escorrentía superficial, y el 19% en percolación, sin embargo, se observa un aumento de 8.53 mm de escorrentía superficial en comparación con el escenario 1, ocasionado principalmente a la expansión de la frontera agrícola, lo que genera una menor infiltración.

Figura 36

Balance hídrico escenario 2. Ampliación de la frontera agrícola.



Fuente: Elaboración propia.

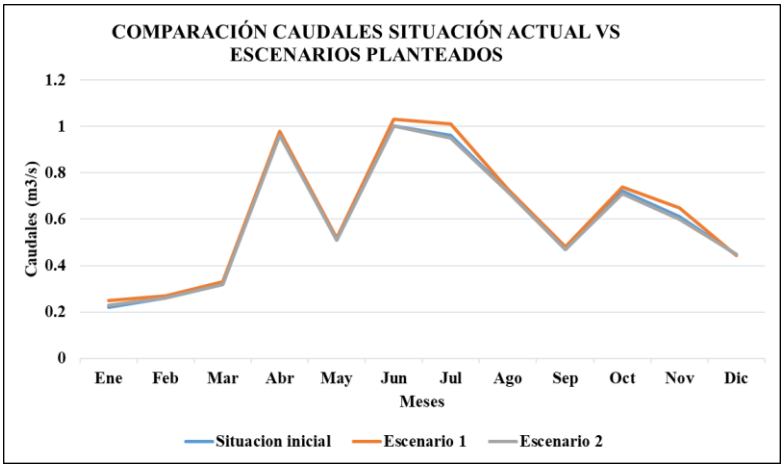
7.6 Comportamiento del caudal obtenido de la situación inicial y de los escenarios planteados

El comportamiento del caudal, en el escenario 1 fue superior respecto al escenario 2 y la situación inicial, esto se relaciona directamente con el cambio en el uso de suelos, ya que el escenario con mayor ampliación de frontera agrícola (escenario 2) fue el de menor caudal, mientras el escenario con mayor cobertura vegetal, principalmente áreas boscosas (escenario 1) fue el de mayor caudal, presentando el caudal más alto en el mes de junio el cual fue de 1 m^3/s. Por otra parte, en lo que

respecta a la situación inicial se evidencia en la figura 37 que el comportamiento del caudal fue creciente, con disminución en los meses de mayo y septiembre.

Figura 37

Comportamiento caudales situación inicial vs escenarios planteados.



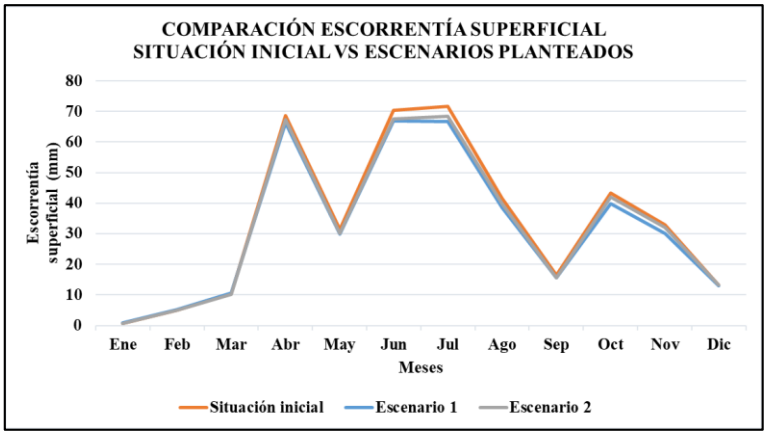
Fuente: Elaboración propia

7.7 Comportamiento de la escorrentía superficial obtenida de la situación inicial y de los escenarios planteados

De acuerdo con la figura 38 Existe mayor escorrentía superficial en la situación inicial de la microcuenca Hato laguna, en relación con los dos escenarios planteados, siendo el escenario 1 el de menor escorrentía al presentar mayor cobertura y, por ende, mayor infiltración. Alcanzando los niveles máximos de escorrentía durante los meses de abril, junio, julio y octubre, en los que la precipitación fue superior a 140 mm, como se muestra en el anexo 6 para la situación inicial, anexo 7 para el escenario 1 y anexo 8 para el escenario 2.

Figura 38

Comportamiento escorrentía superficial situación inicial vs escenarios planteados.



Fuente: Elaboración propia

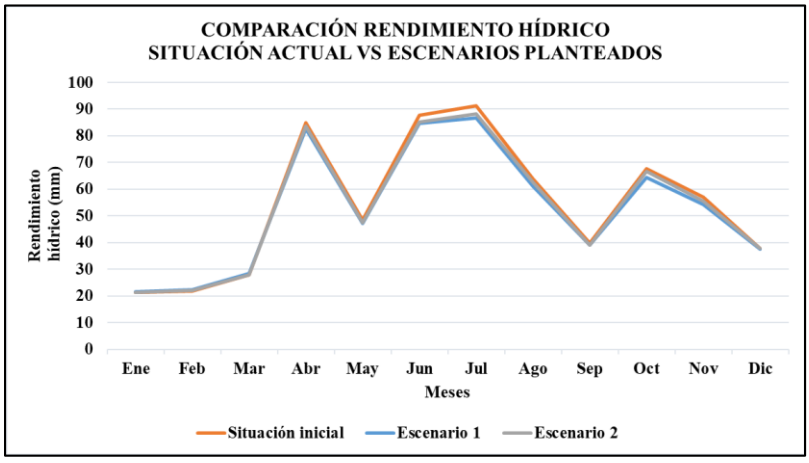
7.8 Comportamiento del rendimiento hídrico obtenido de la situación inicial y de los escenarios planteados

El comportamiento del rendimiento hídrico tanto para la situación inicial como para los escenarios planteados (figura 39) fue muy semejante, sin embargo, la situación inicial presento los niveles más altos de rendimiento hídrico durante los meses de abril (84.84 mm), junio (87.74 mm), julio (91.17 mm) y octubre (67.78 mm), ya que existe una mayor cantidad de agua superficial.

El rendimiento hídrico consiste en una redistribución de la precipitación en función de la cobertura vegetal (Pons *et al.*, 2018), por lo tanto, en el escenario 2 y en la situación inicial donde existe menos vegetación y, por ende, un incremento de escorrentía superficial, el rendimiento hídrico es mayor en comparación con el escenario 1 donde hay más áreas boscosas.

Figura 39

Comportamiento rendimiento hídrico situación inicial vs escenarios planteados.



Fuente: Elaboración propia.

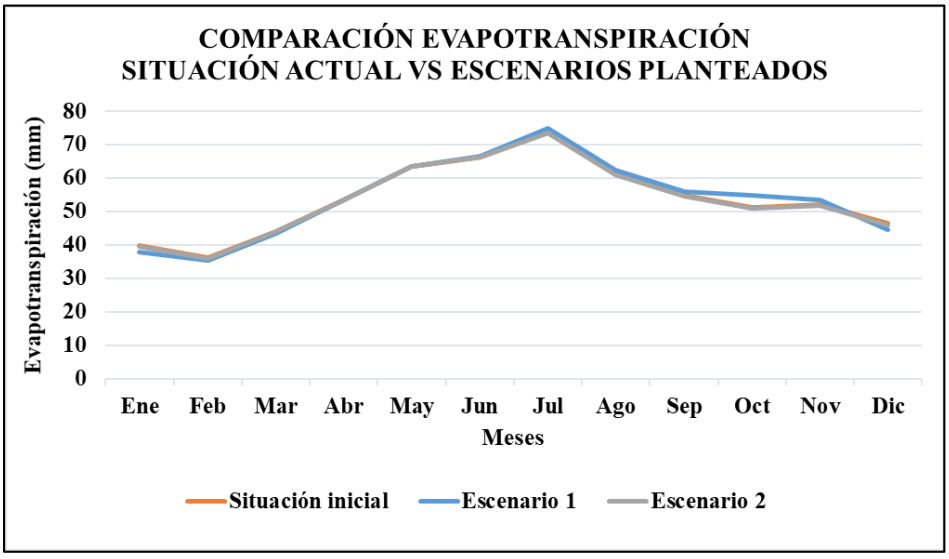
7.9 Comportamiento de la evapotranspiración obtenida de la situación inicial y de los escenarios planteados

En la figura 40 se evidencia el comportamiento de la evapotranspiración obtenida de la situación inicial y de los escenarios planteados, donde los primeros meses (enero, febrero, marzo y abril) es mayor la evapotranspiración en la situación inicial y en el escenario 2 respecto al escenario 1 y durante los meses de mayo a noviembre es mayor la evapotranspiración en el escenario 1 respecto a la situación inicial y el escenario 2, esto debido a que tanto en la situación inicial como en el escenario 2, hay presencia de cultivos y según (FAO, 1990) durante las primeras etapas del cultivo, la evaporación está dada por la fracción de radiación solar que llega al suelo, y va disminuyendo a lo largo del cultivo por la proyección de sombra que da el dosel del cultivo al suelo.

El nivel más alto de evapotranspiración se dio en el mes de julio siendo de 73.65 mm para la situación inicial, 73.34 mm para el escenario 2 y 74.95 mmm para el escenario 1.

Figura 40

Comportamiento evapotranspiración situación inicial vs escenarios planteados.



Fuente: Elaboración propia.

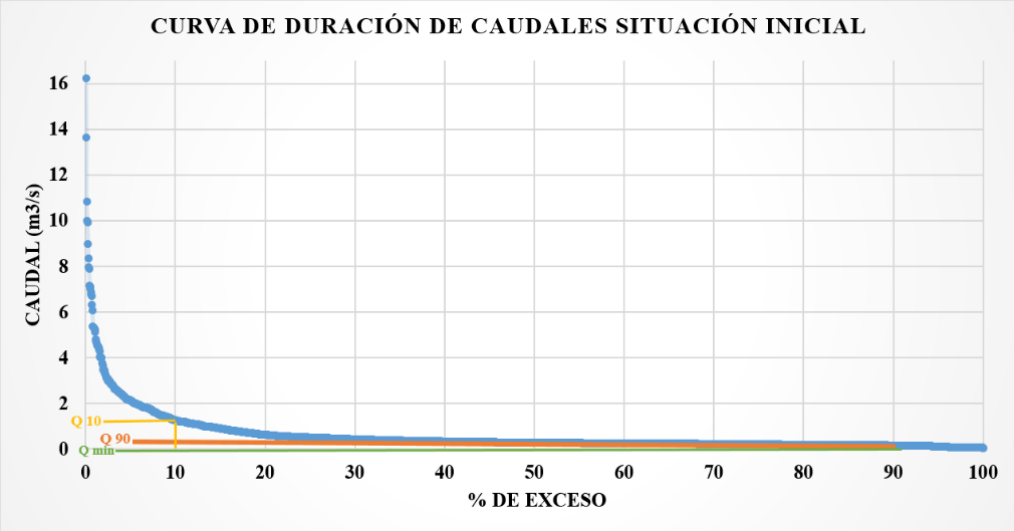
7.10 Curvas de duración de caudales obtenidas de la situación inicial y de los escenarios planteados

La curva de duración de caudal es un procedimiento grafico el cual permite realizar estimaciones del porcentaje de tiempo en que un caudal (diario, semanal, mensual o anual) es excedido o igualado en magnitud (Espejo Díaz et al., 2014). Este método es utilizado para validar modelos hidrológicos o para comparar y modelar la respuesta hidrológica de una cuenca (Marín Villegas, 2011).

En la figura 41 se encuentra la curva de duración de caudales para la situación inicial, estando en el eje vertical los caudales medios diarios y en el horizontal la probabilidad de que estos puedan ser igualados o excedidos. Resaltando que el caudal mínimo probable es de 0.05 m3/s, mientras que el caudal máximo es de 16.25 m3/s de acuerdo a como se observa en la tabla 15. A demás el caudal igualado o superado el 90% del tiempo fue de 0.1685 m^3/s y el igualado o superado el 10% del tiempo de 1.26 m^3/s.

Figura 41

curva de duración de caudal situación inicial



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Datos obtenidos de la curva de duración de caudal de la situación inicial

Registro	Q (m^3/s)

Máximo registro	16.25
Menor registro	0.05
Registro del 10%, Q aguas altas	1.26
Registro del 50%, Q medio	0.29
Registro del 90%, Q aguas bajas	0.1685
Caudal disponible	0.0375
Caudal ecológico	0.0125

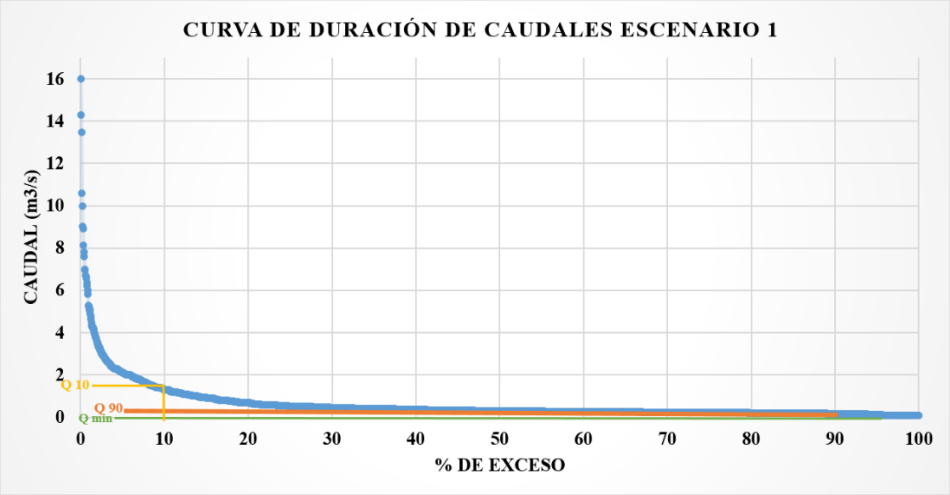
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la curva del escenario 1 (figura 42), se puede decir que el caudal mínimo probable es de 0.07 m^3/s y el máximo de 16 m^3/s. Siendo el Q_{10} el caudal de aguas altas, el Q_{90} el caudal de aguas bajas y el Q_{min} el caudal mínimo probable.

En cuanto al caudal igualado o superado el 90% del tiempo (igualado o superado por 346 días) fue de 0.148 m^3/s y el igualado o superado el 10% del tiempo de 1.30 m^3/s.

Figura 42

curva de duración de caudal escenario 1.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16

Datos obtenidos de la curva de duración de caudal del escenario 1

Registro	Q (m^3/s)
Máximo registro	16
Menor registro	0.07
Registro del 10%, Q aguas altas	1.30

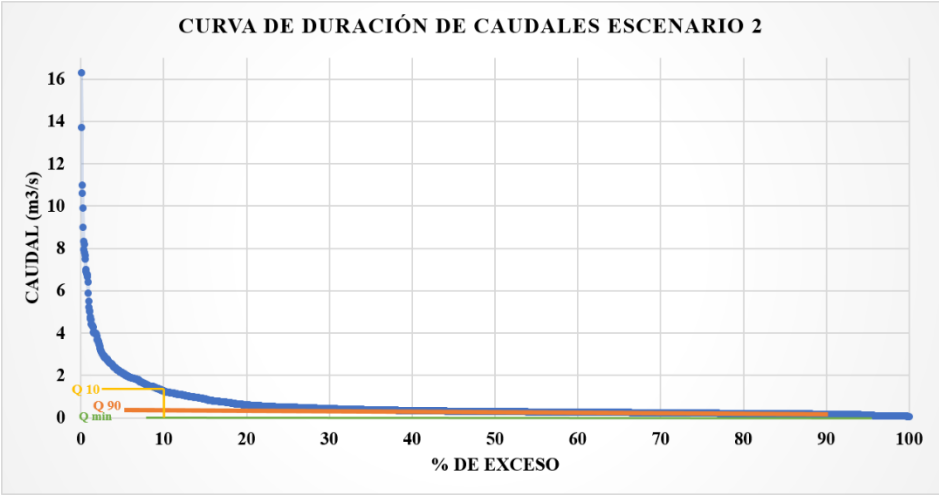
Registro del 50%, Q medio	0.30
Registro del 90%, Q aguas bajas	0.1748
Caudal disponible	0.0544
Caudal ecológico	0.0181

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la figura 43 se encuentra la curva de duración de caudales para el escenario 2, en donde el caudal máximo fue de 16 m^3/s, mientras que el mínimo probable de 0.05 m^3/s igual al de la situación inicial. En cuanto al caudal igualado o superado el 90% del tiempo (igualado o superado por 346 días) fue de 0.169 m^3/s.

Figura 43

curva de duración de caudal escenario 2



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17

Datos obtenidos de la curva de duración de caudal del escenario 2.

Registro	**Q (m^3/s)**
Máximo registro	16.3
Menor registro	0.05
Registro del 10%, Q aguas altas	1.259
Registro del 50%, Q medio	0.291
Registro del 90%, Q aguas bajas	0.169
Caudal disponible	0.0375
Caudal ecológico	0.0125

Fuente: Elaboración propia.

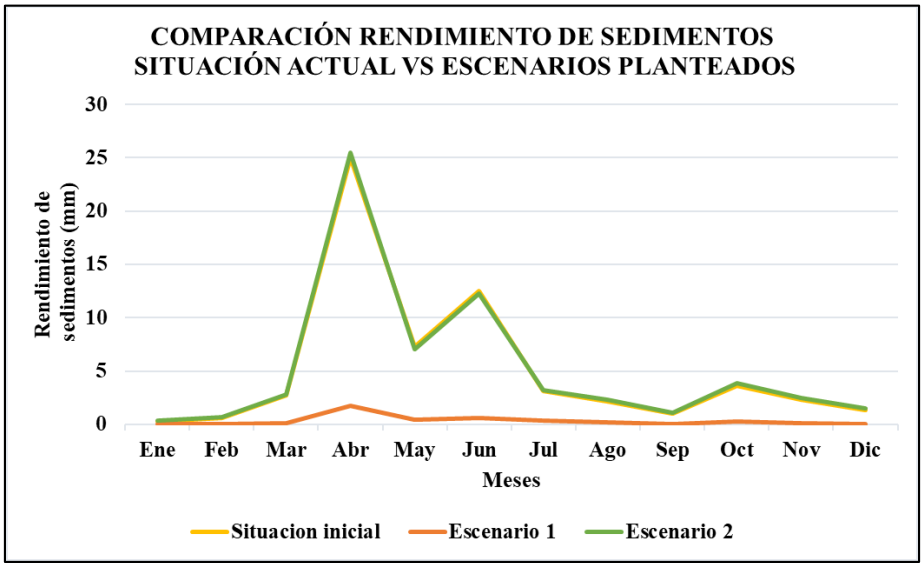
Por otro lado, para los 3 casos se puede decir que la pendiente baja en la curva de duración indica pequeñas variaciones del caudal y una respuesta lenta a la lluvia. A demás, el caudal mínimo probable de la curva es el que el rio puede suministrar durante todo el año con una probabilidad de excedencia próxima al 100 %. Presentando el escenario 1 el caudal mínimo probable más alto con 0.07 m^3/s, el caudal igualado o superado el 90% del tiempo de 1.30 m^3/s y el igualado o superado el 10% del tiempo de 0.1748 m^3/s.

7.11 Comportamiento de rendimiento de sedimentos obtenido de la situación inicial y de los escenarios planteados

En la figura 44 se muestra como es el comportamiento del rendimiento de sedimentos, siendo mayor en la situación inicial y en el escenario 2 respecto al escenario 1, puesto que, presenta menor cobertura vegetal por lo tanto los procesos de erosión de los suelos por ausencia de vegetación principalmente en las zonas quemadas, implica un transporte del suelo el cual se convierte en sedimentos al llegar a corrientes hídricas (Montoya y Montoya, 2005). Alcanzando el nivel máximo de rendimiento de sedimentos en el mes de abril siendo para la situación actual de 25.02 mm, para el escenario 2 de 25.48 mm, y para el escenario 1 de 1.77 mm.

Figura 44

Comportamiento rendimiento de sedimentos situación inicial vs escenarios planteados.



Fuente: Elaboración propia.

En el anexo 9, 10 y 11, se muestra como es el comportamiento de sedimentos en la situación inicial, escenario 1 y escenario 2 respectivamente, donde el rendimiento máximo de sedimentos en tierras altas en la situación inicial es de 253.28 Mg/Ha en el escenario 1 de 8.81 Mg/Ha y en el escenario 2 de 252.72 Mg/Ha. Por otra parte, el rendimiento medio de sedimentos en las tierras altas es de 61.96 Mg/Ha para la situación inicial, 4.17 Mg/Ha para el escenario 1 y 63.1 Mg/Ha, en el escenario 2, el incremento se debe a la expansión de la frontera agrícola, lo que genera mayor erosión del suelo y por tanto un aumento de sedimentos.

7.12 Respuesta hidrológica de la microcuenca y su relación con las coberturas vegetales

Una microcuenca es una zona cuya agua fluye a la corriente principal de una Subcuenca (García et al., 2005). Cuenta con un área de drenaje entre tres mil y cincuenta mil hectáreas, aunque dependiendo de las condiciones orográficas se pueden presentar microcuencas con superficies menores a tres mil hectáreas (Sánchez et al., 2003). Destacando que en la microcuenca se presentan interacciones entre lo social, económico y ecológico las cuales interfieren en la disponibilidad de los recursos naturales y por ende en el bienestar de los habitantes de la microcuenca (Barragán et al., 2018).

La microcuenca a su vez tiene una respuesta hidrológica, la cual se ve influenciada por aspectos climáticos, la litología, pendientes y la cubierta vegetal, haciendo que varíen los regímenes hidrológicos. Resaltando que los usos del suelo y la vegetación afectan la calidad y cantidad de agua, generando alteraciones en el régimen fluvial los cambios hechos por el hombre (Serrano et al., 2015).

Para esta investigación se estudió la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna ante cambios de cobertura vegetal, teniéndose un comportamiento con las coberturas determinadas a partir del "Mapa de coberturas de la tierra en zonas de paramos priorizados del país, periodo 2010-2012 a escala 1:25.000". Así mismo se planteó dos escenarios de cambio de coberturas (figura 33 y 35) con la finalidad de ver en cuál de las 3 situaciones s resulto mejor la respuesta hídrica de la microcuenca y así plantear estrategias que mejoren a largo plazo dicha.

Teniendo en cuenta lo anterior en primer lugar se tiene un caudal promedio anual multianual para la condición inicial de 6,76 m3/año, mientras que para el escenario 1 y 2 de 7,43 m3/año y 6,73 m3/año, respectivamente, evidenciándose que el caudal del escenario uno es mayor que los de los

otros dos casos. Siendo importante destacar que en las 3 situaciones se implementaron los mismos 4 tipos de suelos (tabla 1), modificando tan solo las coberturas vegetales. Resaltando que para la condición inicial los herbazales ocuparon el 32.15% del área total de la microcuenca, los mosaicos de pastos con espacios naturales el 17.6 % y las zonas quemadas el 16.98% (tabla 4) siendo estas 3 coberturas las de mayor área, mientras que por su parte los cultivos (cultivo de Cebolla de rama, mosaico de pastos y cultivos y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales) ocuparon tan solo el 8.84%.

En el caso del escenario 1 la zona de reserva natural ocupo el 84.34% del área total de la microcuenca, el Subpáramos y Bosques Alto andinos el 11.07% y el área de actividades productivas (Zona Productora de Frutales y Ganadería y Zonas de Producción Turística) tan solo el 4.03%, siendo importante tener presente que para este escenario se consideró lo estipulado en el EOT de Aquitania y POT de Sogamoso, junto con las estrategias propuestas en el POMCA del lago de Tota.

Por su parte en el escenario 2 se plantea una expansión de la frontera agrícola ocupando los cultivos un área de 5.03 Km2, realizándose esta expansión de acuerdo con los valores contenidos en el "documento de productividad sectorial agropecuaria" y el "plan departamental de extensión agropecuaria" estando distribuidos los cultivos por toda la microcuenca.

De acuerdo a las coberturas implementadas para cada caso y los caudales obtenidos se puede decir que la cobertura vegetal si afecta la respuesta hídrica de la microcuenca, en especial cuando se realizan modificaciones humanas, ya que dichas pueden hacer que se presente cambios significativos (López et al., 2020). Por lo que posiblemente al ser menor el área productiva del escenario 1 con respecto a las otras dos condiciones hizo que fuese mayor su caudal, además que presento mayor área con coberturas adecuadas.

Siendo importante tener en cuenta que en el caso del escenario 2 y la condición inicial se pudo generar una disminución de la escorrentía superficial a causa de una mayor capacidad de infiltración en la microcuenca, unido con el efecto de partición que ocasiona la vegetación sobre la evaporación, interceptación y redistribución de la precipitación; provocándose así una disminución de los caudales. A la vez los cambios de cobertura vegetal producen una alteración o cambio en la evapotranspiración (Pérez, 2018).

No obstante, la respuesta hídrica de la microcuenca Hato Laguna ante cambios en el uso del suelo está determinada por el comportamiento individual de sus subcuencas, por ser parte de las cuencas de meso y gran escala (> 10 km2) (Aguayo, et. al, 2016). Por lo que se estudió de forma individual el comportamiento del caudal para cada subcuenca de cada situación encontrándose el mayor caudal en los 3 casos en la subcuenca 9, siendo el de la condición inicial de 227.72 m^3/s, el del escenario 1 de 220,70 m^3/s y en el 2 de 223.85 m^3/s. Lo anterior debido a que en esta subcuenca se encuentra el punto de salida.

Finalmente, de acuerdo con el flujo base, es decir, el almacenamiento y descarga de agua subterránea, se identificó que para la situación inicial (anexo 3), fue mayor en la subcuenca 4 debido a la presencia de suelos Typic Hapludands que por sus características físico químicas y mineralógicas permiten la recarga de acuíferos con mayor rapidez. Sin embargo, debido a la presencia de zonas sin cobertura vegetal de forma parcial o total hay un menor flujo base respecto al escenario 1, según el anexo 12, es posible establecer que, debido a la homogeneidad de coberturas principalmente por áreas boscosas presenta 50 HRU, adicionalmente, el flujo base aumenta en el escenario 1 respecto a la situación inicial, para la subcuenca 9, en promedio 728.42 mm H2O/año la cual conforma el punto de salida de la microcuenca y de 54.78 mm H2O/año en la subcuenca 1 donde hay área de zonas quemadas.

Por otra parte, en el escenario 2 (anexo 13), en zonas donde hay ampliación de la frontera agrícola (subcuenca 7) hay una disminución de 70.18 mm H2O/año respecto al escenario 1, así como en la subcuenca 9 con presencia de cultivos pastos y espacios naturales disminuyo 645.52 mm H2O/año.

7.13 Estrategias para la rehabilitación y equilibrio de la respuesta hídrica de la microcuenca

De acuerdo con la curva de duración de caudales para la situación inicial (figura 41), el escenario 1 y el escenario 2 figura 42 y 43 respectivamente, se determinó que, a partir de la implementación de las coberturas propuestas en el escenario 1, se puede alcanzar una gestión integral del recurso hídrico, mediante prácticas de uso, manejo y conservación de las fuentes hídricas que permitan satisfacer diferentes necesidades humanas y que contribuyan en la conservación de la microcuenca, por tal razón, es fundamental que se siga manteniendo el caudal ecológico. Adicionalmente, es importante resaltar que, el flujo base del escenario 1 fue el mayor, ya que existe una mayor recarga de acuíferos y descarga de agua subterránea principalmente durante los periodos de sequía. Así

mismo es de resaltar que de acuerdo con la tabla 16 el caudal disponible del escenario 1 (0.0544 m^3/s) fue el mayor de las 3 situaciones, mientras que el de la situación inicial y el escenario 2 fue el mismo con un valor de 0.0375 m^3/s (tabla 15 y 17), lo cual posiblemente se da porque dichos tienen las mismas coberturas vegetales, pero con diferentes áreas, ocupando más espacio los cultivos en el escenario 2 debido a la ampliación de la frontera agrícola. Destacando que en el escenario 1 se tiene una fuente suficiente para suministrar posibles demandas de la población.

Las estrategias formuladas, se encuentran orientadas hacia un desarrollo sostenible del recurso hídrico; de tal forma que faciliten la planificación y toma de decisiones de los gestores o autoridades competentes, en lo que respecta al manejo de la microcuenca y permitan una disponibilidad hídrica y el aprovisionamiento continuo y responsable de los servicios ecosistémicos brindados por la microcuenca. Es por esto, que las estrategias se centran en el uso racional, integrado y participativo de los recursos, en especial del agua, suelo y vegetación; logrando con ello una producción y manejo sostenible y óptimo de tales recursos, ocasionando un mínimo deterioro ambiental y beneficios a los habitantes de la microcuenca.

Dentro de las estrategias para la rehabilitación y equilibrio de la respuesta hidria de la microcuenca, se encuentran los planes y acciones contemplados en el POMCA del lago de tota, así como diferentes acciones que permitan una articulación de la comunidad con el fin de lograr un desarrollo sostenible en la microcuenca Hato laguna, de acuerdo con su capacidad y vocación de uso. En la tabla 18 se describen cada una de las estrategias planteadas.

Tabla 18

Estrategias para la rehabilitación y equilibrio de la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna.

ESTRATEGIAS PARA LA REHABILITACIÓN Y EQUILIBRIO DE LA RESPUESTA HÍDRICA DE LA MICROCUENCA HATO LAGUNA.		
OBJETIVO: Formular acciones específicas que permitan la rehabilitación y equilibrio de la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna.		
Estrategia para la restauración de zonas quemadas en la microcuenca Hato laguna.	**Descripción general**	La parte alta y media de la microcuenca Hato laguna presenta zonas quemadas de forma parcial y total, generando áreas sin cobertura vegetal que por procesos naturales ocasionan erosión del suelo y en periodos de lluvia arrastre de sedimentos, es por esto, que en estas zonas se debe realizar una restauración con especies nativas que permitan disminuir la degradación del suelo y por ende la afectación ecosistémica.
	Objetivo	Disminuir la degradación del suelo de la microcuenca Hato laguna mediante la restauración con especies nativas.

	Acciones principales	• Restauración de zonas quemadas (5.14 km^2) mediante la siembra de especies nativas como Aliso (*Alnus acuminata*), Arrayán (*Myrcianthes sp*.) y Raque (Vallea stipularis). • Manejo de cobertura vegetal y uso de suelos • Manejo de zonas de reserva de acuerdo con los planes de ordenamiento territorial • Organización y participación activa de la comunidad para la restauración	
	Acciones complementarias	• Sensibilización y educación ambiental a la comunidad sobre los procesos actuales de cultivos.	
	Beneficios	**Ambientales**	Restaurar la perdida y degradación ecosistémica, evitando el arrastre de sedimentos y posibles desplazamientos de tierra (derrumbes), así como la disminución de la erosión del suelo. Rehabilitación de la microcuenca Hato laguna, favoreciendo la recarga de acuíferos Con la fijación del CO2 por parte de los árboles, ayuda contra en cambio climático.
		Sociales	Con la restauración con especies nativas, los bosques proporcionan servicios ecosistémicos, dentro de los cuales se encuentran la limpieza del aire y la retención de partículas contaminantes perjudiciales para el ser humano, así como la proporción de agua. Por lo que trae beneficios en el bienestar y salud de la comunidad (Coussy, 2017).
		Económicos	Dentro de los beneficios económicos no maderables, se encuentran las setas, plantas comestibles y medicinales que se pueden encontrar en zonas de restauración, así como miel y aceites (Coussy, 2017). Adicionalmente, el pago por servicios ambientales orientado a la protección y conservación el cual constituye un incentivo económico o en especie, se encuentra reglamentado por el Decreto 1007 del 2018.
Implementación de rondas hídricas de 5 metros.	**Descripción general**	De acuerdo con el POMCA del lago de tota, las especies nativas de árboles (Alisos) que se encontraban en las márgenes de los ríos de la microcuenca Hato laguna fueron talados para la comercialización, desarrollando actividades (cultivos) en zonas de ronda hídrica, generando procesos de erosión ribereña, es por esto, que se deben implementar rondas hídricas de acuerdo con los lineamientos de los planes de ordenamiento territorial (5 metros) que permitan un equilibrio ecológico con protección para los cuerpos hídricos y suelos reduciendo la sedimentación.	
	Objetivo	Generar un equilibrio en la respuesta hidrológica de la microcuenca Hato laguna, mediante la implementación de rondas hídricas de 5 metros.	
	Acciones principales	• Implementar rondas hídricas de 5 metros conformando bosques de galería y ripario mediante la siembra de especies nativas como Aliso (*Alnus acuminata*), Arrayán (*Myrcianthes sp*.) y chusque (*Chusquea tessellata*), los cuales deben estar dispuestos por dos hileras de árboles a las márgenes del cauce. • Manejo de cobertura vegetal y uso de suelos	

		• Organización y participación activa de la comunidad	
	Acciones complementarias	• Sensibilización y educación ambiental a la comunidad sobre los procesos de comercialización de especies nativas en rondas hídricas.	
	Beneficios	**Ambientales**	Los bosques de ribera filtran los sedimentos y sustancias contaminantes mejorando la calidad del agua. Adicionalmente, constituye barreras naturales evitando la erosión ribereña reduciendo la velocidad de la corriente y además absorben y fijan dióxido de carbono. Mejoran la biodiversidad aumentando el hábitat de aves insectos y anfibios (Sánchez *et al.*, 2006).
		Sociales	El aumento de bosques riparios trae beneficios para la purificación del aire, existe mayor disponibilidad hídrica que puede ser usada para el abastecimiento, así como mejor calidad hídrica, beneficiando el bienestar y salud de la población cercana (Sánchez *et al.*, 2006).
		Económicos	Dentro de los beneficios económicos se encuentran los estímulos como el pago por servicios ambientales, así como el aprovechamiento de los espacios útiles, en la medida en la que se pueda establecer zonas de amortiguamiento en las que se puedan introducir especies de beneficio económico sin alterar las condiciones de la zona (Meli et al., 2017).
Restauración agroecológica en áreas de cultivos (mosaico de cultivos)	**Descripción general**	Una de las principales problemáticas en la microcuenca Hato laguna, es el uso indiscriminado de agroquímicos, abonos y la eliminación de cobertura vegetal y especies nativas para los cultivos de cebolla, ocasionando alteraciones en la respuesta hídrica de la microcuenca, por lo que es necesario crear estrategias como la restauración agroecológica en las zonas afectadas.	
	Objetivo	Generar procesos de restauración agroecológica en área de cultivos en la microcuenca Hato laguna.	
	Acciones principales	• Restauración agroecológica en áreas de cultivos y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (3.37 km^2), de tal forma que se suministren servicios ecosistémicos de forma sostenible y sin alterar la producción • Conformación de barreras vivas al interior de cultivos con especies nativas • Manejo de cobertura vegetal y uso de suelos • Manejo de zonas de reserva de acuerdo con los planes de ordenamiento territorial • Organización y participación activa de la comunidad para la restauración agroecológica	
	Acciones complementarias	• Sensibilización y educación ambiental a la comunidad sobre los nuevos procesos de cultivos	
	Beneficios	**Ambientales**	Uno de los principales beneficios es la regulación hídrica en el aumento de los caudales base y recarga de acuíferos, captura de dióxido de carbono, protección de los suelos contra la erosión y degradación, así como la recirculación de nutrientes (FAO, 2017).

		Sociales	Dentro de los beneficios sociales se encuentra la seguridad alimentaria y nutricional, con acceso a los alimentos cultivados de manera sostenible o en los bosques y áreas boscosas, así como el acceso a fuentes hídricas para su abastecimiento (FAO, 2017).
		Económicos	Con el aumento de los bienes agrícolas y forestales los agricultores tienen un fuente de ingreso económicos, generando una mayor estabilidad socioeconómica, adicionalmente existe un reconocimiento por servicios ecosistémicos (incentivos financieros) (FAO, 2017).

Fuente: Elaboración propia

Destacando, además que con las diferentes estrategias planteadas se contribuirá o responderá esencialmente a 3 objetivos de desarrollo sostenible. Primero, al objetivo 6 (agua limpia y saneamiento) puesto que, se plantearon estrategias que contribuyen a un uso eficiente del recurso hídrico y en la protección y restablecimiento del ecosistema dentro de la microcuenca, con la finalidad de que haya una "sostenibilidad en la extracción y el abastecimiento de agua dulce" en concordancia con las metas del objetivo 6, a su vez se espera que mediante diferentes programas se fortalezca la participación de la comunidad en la gestión del agua, siendo importante puesto que en la región andina a pesar de su abundancia hídrica, se ha venido deteriorando su entorno ambiental (Villanueva Parra *et al.,* 2018) . De igual forma, se contribuirá con el objetivo 12 (Producción y consumo responsable), ya que dentro de las estrategias o medidas planteadas se plantea la restauración agroecológica, en la cual se suministran servicios ecosistémicos de forma sostenible, sin alterar la producción.

Finalmente, se contribuye con el objetivo 15 (Vida de ecosistemas terrestres) puesto que, se articulan acciones con el fin de promover la gestión sostenible de superficies forestales (escenario 1) y disminuir los procesos de erosión, así como la degradación de tierras, mediante el desarrollo y ordenación sostenible de bosques y áreas destinadas a la conservación, manteniendo los servicios ecosistémicos.

Ayudando con lo anterior en el alcance de los objetivos y metas trazadas para los ODS, en donde se hace un llamado a la protección, defensa y saneamiento del medioambiente, en especial de los espacios protegidos (Sierra *et al.,* 2018) que sufren impactos antropogénicos en los que se incluye la tala de árboles para la siembra y/o creación de potreros (Granados *et al.,* 2015).

8. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO

El desarrollo de la investigación permite obtener tanto impactos sociales como ambientales a corto, mediano y largo plazo, siendo tales impactos positivos para la población y la microcuenca Hato laguna, la cual es de gran importancia a nivel ecosistémico, debido a que brinda diferentes servicios como resultado de las interrelaciones entre flora, fauna y demás recursos naturales, favoreciendo así a las comunidades aledañas.

Entre los impactos a corto plazo se tiene en primera medida la identificación de la problemática de la expansión de la frontera agrícola en la microcuenca, lo cual se refleja en la tala y quema de las especies nativas y en la invasión de la ronda hídrica del rio Hato Laguna, afectando la disponibilidad del recurso hídrico. Además, se identificaron los procesos hídricos que se llevan a cabo en la microcuenca, por medio del modelo semidistribuido SWAT, el cual permitió identificar mediante las unidades de respuesta hidrológica las zonas con condiciones de suelo, usos y pendientes homogéneas que afectan de forma particular la cantidad y calidad del agua de la microcuenca, dando la posibilidad de formular estrategias que permitan la obtención de una respuesta hídrica buena con la finalidad de beneficiar a la población humana, vegetal y animal en cuanto a la disponibilidad de agua, un ambiente sano y el desarrollo de actividades sostenibles que permitan contribuir con los objetivos de desarrollo sostenible 6 (agua limpia y saneamiento), 12 (Producción y consumo responsable) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres). De igual forma, con el presente estudio se produce un aporte en el campo de la investigación, permitiendo el documento a las Autoridades Nacionales o Departamentales Competentes verificar el estado de la microcuenca para un posible seguimiento y control del tema.

En cuanto a los impactos a mediano plazo se encuentra la implementación de las 3 estrategias plateadas para la rehabilitación y equilibrio de la respuesta hídrica de la microcuenca, a la vez que permiten mejorar las condiciones del suelo, al realizarse actividades productivas sostenibles de acuerdo a la disponibilidad y estado de los recursos naturales y teniendo en cuenta los usos y coberturas más adecuadas, procurando con ello proteger los recursos naturales de la microcuenca y a la economía de la población cumpliendo con ello con los objetivos de desarrollo sostenible 12 y 15.

Finamente, los impactos a largo plazo son principalmente el mejoramiento de la respuesta hídrica de la microcuenca y el estado de la vegetación y los recursos allí existentes, mediante el desarrollo de las estrategias planteadas en la investigación. Además del aumento en la productividad de las actividades económicas realizadas en la zona de estudio; impulsando a su vez la conservación de los recursos naturales de los municipios de Aquitania y Sogamoso, para lo cual es importante la generación de nuevos conocimientos para la población sobre uso eficiente del recurso hídrico y la protección y restablecimiento del ecosistema, obteniendo también con ello el cumplimiento a la meta del objetivo de desarrollo sostenible 6. Pudiendo generarse otros estudios a nivel nacional mediante la metodología planteada en la presente investigación, promoviendo así el análisis y mejora de la respuesta Hídrica de diferentes microcuencas del país protegiendo con ello el recurso hídrico y las actividades productivas de la población colombiana.

9. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible concluir que, el modelo SWAT permitió determinar el comportamiento hidrológico de la microcuenca Hato laguna ante el cambio de coberturas y principales escenarios de ampliación de la frontera agrícola, mediante el balance hídrico, el cual permitió la cuantificación del recurso hídrico a partir de variables como escurrimiento superficial, flujo lateral, percolación, evaporación y transpiración.

En cuanto a las unidades de respuesta hidrológica (HRUs) la microcuenca Hato Laguna se dividió en 54 HRUs, en las 9 subcuencas, siendo la subcuenca 4 la que mayor HRU presenta con un total de 13, así como un mayor tipo de coberturas, con predominio de pastos, vegetación arbustal y zonas con presencia de cultivos.

Con base en los valores de indicadores de eficiencia para la calibración, como el coeficiente de determinación r^2 (0.80), el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (0.72) y el sesgo porcentual (Percent bias-PBIAS) (2.7), se caracteriza el modelo como bueno, mientras que para la validación el r^2 (0.86), el NASH (0.84) y el PBIAS (-4.14) como muy bueno, por lo que puede ser empleado en la toma de decisiones en cuanto a las estrategias que permitan mantener un equilibrio en la respuesta hídrica de la microcuenca Hato laguna.

De acuerdo con el comportamiento hidrológico de la microcuenca, se evidencio que, las zonas con presencia de cultivos, así como zonas con ausencia de cobertura vegetal total o parcial presentaron los niveles más bajos de percolación en promedio 257.22-266.42 mm H2O/año y los niveles más altos de escorrentía superficial (429.11 – 441.83 mm H2O/año), con un flujo de retorno entre 243.151-250.88 mm H2O/año en zonas con cultivos y de 219.97-227.70 mm H2O/año en zonas quemadas. Adicionalmente, la contribución del agua subterránea al caudal (flujo base) fue mayor en suelos Typic Hapludands, ya que la macroporosidad es mayor que la microporosidad, por lo tanto, la entrada de agua al suelo es más rápida, generando una mayor recarga de acuíferos, sin embargo, se evidencio que en zonas con cobertura vegetal de tipo arbóreo el flujo base aumento lo cual es favorable durante los periodos de sequía por la descarga de agua subterránea a ríos y quebradas para el abastecimiento.

Así mismo, es posible concluir que la modelación de la respuesta hidrológica de la microcuenca Hato laguna, ante los escenarios de cambio de cobertura en los dos escenarios planteados, permite

evidenciar la importancia de áreas de riberas de quebradas y ríos (ronda hídrica) de 5 metros, áreas de reserva y bosque de subpáramo, así como restauración agroecológica, de tal forma que, en las zonas con escasa vegetación o sin vegetación no sigan los procesos erosivos y por ende un aumento en los sedimentos, ocasionando contaminación hídrica y procesos de desplazamiento de tierra. Disminuyendo el rendimiento de sedimentos en promedio 57.78 mm al año si se implementan las estrategias planteadas, sin embargo, si se sigue ampliando la frontera agrícola (escenario 2) aumentara en promedio 1.14 mm al año el rendimiento de sedimentos.

Adicionalmente, en lo que respecta a escorrentía superficial al cumplir con el escenario 1 se disminuiría en promedio 22.28 mm al año, aumentando por otra parte la recarga de acuíferos 0.11 mm al año, sin embargo, para que esto ocurra es necesaria la planificación e implementación por parte de las entidades territoriales, así como la participación activa en los diferentes proyectos de la comunidad presente en la microcuenca.

Dentro de las estrategias planteadas se vinculó la restauración agroecológica, la cual permitirá revertir la degradación del suelo y generar a las comunidades un beneficio económico, así mismo, se planteó zonas de reserva y recuperación forestal, principalmente en zonas afectadas por procesos antropogénicos y áreas quemadas, donde los procesos de erosión y transporte de sedimento son mayores, zonas en las que también puede surgir un beneficio económico a partir de incentivos (pago por servicios ambientales).

Finalmente, es posible concluir que, la ampliación de la frontera agrícola, ocasiona una alteración del ciclo hidrológico y la dinámica hídrica, debido al cambio en el uso de suelos, lo que genera un impacto a nivel ambiental por la pérdida de la perdida de bosques nativos, biodiversidad, degradación del suelo y alteraciones en el comportamiento hídrico, a nivel social, debido a los impactos ocasionados por la contaminación hídrica así como las repercusiones en la salud y bienestar, y a nivel económico por los bajos rendimientos de los cultivos al disminuir el caudal base principalmente en periodos de sequía. Por lo que la herramienta para la evaluación del suelo y agua para una cuenca hidrográfica (SWAT), facilita el estudio del comportamiento hídrico ante cambios de cobertura y uso de suelos, lo que permite establecer las medidas adecuadas y oportunas para mantener un equilibrio en la microcuenca.

RECOMENDACIONES

Se recomienda instrumentar y tener mayor continuidad en los registros diarios de variables como brillo solar, humedad relativa, velocidad del viento, temperatura máxima y mínima, pues la eficiencia del modelo, depende de la calidad y cantidad de información hidrometeorológica registrada.

Es importante recopilar mayor información de campo principalmente de uso de suelos, de tal forma que, se permita corroborar los tipos de coberturas para tener información más precisa, debido a que el modelo hidrológico SWAT está configurado con coberturas de Estados Unidos. Adicionalmente, la información en formato SHAPE referente a usos actuales de la microcuenca y cambios de cobertura, debe ser actualizada, debido a la importancia de aportes hídricos al lago de tota.

Para la implementación de áreas de restauración agroecológica, se recomienda realizar estudios complementarios para verificar que cultivos son más aptos de acuerdo con las características fisicoquímicas de los suelos, así como especies nativas en específico para las barreras vivas a implementar en los cultivos.

De acuerdo con los resultados de comportamiento hídrico de los escenarios planteados, no se debe ampliar la frontera agrícola en áreas con una elevación superior a los 3300 msnm, adicionalmente se debe realizar una restauración con especies nativas como Aliso (*Alnus acuminata*), Arrayán (*Myrcianthes sp.)* y Raque (*Vallea stipularis*), en zonas quemadas, de tal forma que no sigan los procesos de degradación del suelo por erosión y arrastre de sedimentos. Finalmente, es necesario implementar rondas hídricas de 5 metros, que permitan evitar los procesos de erosión ribereña y mejorar la calidad de fuentes hídricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acón-Ho, J., Alpízar-Oses, L., & WingChing-Jones, R. (2013). Percolación y lixiviación de nutrimentos en suelos bananeros al este del río reventazón, Costa Rica. agronomía mesoamericana, 24(2), 329-336.

Agriculture, I.-A. I. for C. on. (1985). Compendio de agronomía tropical (Vol. 1). Bib. Orton IICA / CATIE.

Aguayo, M., Stehr, A., & Link, O. (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal. Revista de geografía Norte Grande, 65, 197-214. https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000300010.

Andrade, M. P., & Melo Ribeiro, C. B. (2020). Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul whatershed streamflow using the SWAT model. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 25(12), 1-13. https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190034

Argota, T. (2011). *Simulación hidrológica de la cuenca del Rio Amajac, Estado de Hidalgo aplicando el modelo SWAT* (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México D.F.

Avalos Alave, E. A. (2020). Modelización hidrológica semidistribuida en la cuenca del río Huancané-Puno [Tesis de pregrado, altiplano de puno]. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/13708/Avalos_Alave_Eddy_Alberth.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Barragan Acosta, M. C., Daza Lesmes, N. M., Calderón Larrañaga, Y., Navarro Cuervo, L. F., & Tosse Luna, O. (2018). Guía metodológica para la formulación de los planes de manejo ambiental de microcuencas (a. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). a. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/planificacion-de-cuencas-hidrograficas/microcuenca

Blainski, É., Porras, E. A. A., Garbossa, L. H. P., Pinheiro, A., Blainski, É., Porras, E. A. A., Garbossa, L. H. P., & Pinheiro, A. (2017). Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 22(33). https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716110

Breña, A. F., & Jacobo, M. A. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. (Universidad Autónoma Metropolitana). Universidad Autónoma Metropolitana. https://uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf

Bronstert, A., Niehoff, D., & Bürger, G. (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities: EFFECTS OF CLIMATE AND LAND-USE CHANGE ON STORM RUNOFF GENERATION. Hydrological Processes, 16(2), 509-529. https://doi.org/10.1002/hyp.326

Caro-Camargo, C. A., & Velandia-Tarazona, J. E. (2019). The effect of changes in vegetation cover on the hydrological response of the sub-basin los Pozos. DYNA (Colombia), 86(208), 182-191. Scopus. https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.74115

Chuquin vasco, D. A. (2016). Aplicación de un modelo semidistrubuido de precipitación-escorrentía para la evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Jalón [Tesis posgrado, Universidad Politécnica de valencia]. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/67872/CHUQUIN%20-%20APLICACI%C3%93N%20DE%20UN%20MODELO%20SEMIDISTRUBUIDO%20DE%20PRECIPITACI%C3%93N-ESCORRENT%C3%8DA%20PARA%20LA%20EVALUACI%C3%93N....pdf?sequence=1&isAllowed=y

CONPES. (2014). Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del lago de tota. Departamento Nacional de Planeación. https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/conpes/12-Conpes%20No.%203801-2014.pdf

Coussy, Nasuk (2017). Los servicios ambientales del bosque nativo: concepto y relevancia jurídica en el plan de manejo forestal y de preservación. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile] http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146175

del Valle Morresi, M., Marcus, R., Gardiol, M., & Biancotti, E. (2018). Modelación hidrológica hidráulica con información de actores sociales en la cuenca del arroyo Las Turbias, Santa Fe Argentina. Aqua-LAC, 10(2), 46-60.

Diaz 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.

Espejo Díaz, A. F., López Niño, D. R., & Mora Fernández, F. C. (2014). Análisis del desempeño del método polinómico y el método área-indice para estimar la curva de duración de caudales en cuencas no instrumentadas aplicado a la quebrada La Piñalera Departamento de Casanare, Colombia [Tesis posgrado, universidad católica de Colombia]. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1659/1/Trabajo%20de%20grado_ANALISIS%20DEL%20DESEMPE%C3%91O%20DEL%20METODO%20POLINOMICO%20Y%20EL%20METODO%20AREA-INDICE.pdf

FAO. (1990). Evapotranspiracion. *Serie Didactica, Facultad de Agronomia y Zootecnica, Universidad Nacional de Tucuman*, *45*.

FAO. (2017). Agroforesteria para la restauración del paisaje. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*, 20. http://www.fao.org/3/b-i7374s.pdf

Fernández, R. (2017). Utilización del Programa "SWAT" para la Estimación de la Emisión de Sedimentos en Cuencas. TRIM, 12, 21-32. http://www5.uva.es/trim/TRIM/TRIM12_files/RFernandez.pdf

Garcia Azuero, A. F., Campos Arce, J. J., Villalobos, R., Jiménez, F., & Solórzano, R. (2005). Enfoques de manejo de recursos naturales a escala de paisaje: Convergencia hacia un enfoque ecosistémico. CATIE. https://www.researchgate.net/publication/283266178_Enfoques_de_manejo_de_recursos_naturales_a_escala_de_paisaje_convergencia_hacia_un_enfoque_ecosistemico

Garzón Martínez, C. M., González López, A., & Mafla chamorro, F. R. (s. f.). Estado del arte de modelos hidrológicos. Universidad Mariana, 5(2), 116-119. https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000300010

Geraldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2011). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. Universidad de Alicante, 2, 215-225.

Giraldo Jiménez, J. F., & Jaramillo Robledo, A. (2004). Ciclo hidrológico y transporte de nutrimentos en cafetales bajo diferentes densidades de sombrío de guamo. Cenicafé (Colombia), 55(1), 52-68.

Gobernación de Boyacá. (2018). OTDB ordenamiento territorial departamental de Boyacá (productividad sector agropecuario Documento Diagnóstico en construcción). Gobernación de Boyacá. http://www.dapboyaca.gov.co/wp-content/uploads/2018/09/PRODUCTIVIDAD-SECTOR-AGROPECUARIO.pdf

Gobernación de Boyacá. (2019). Plan departamental de extensión agropecuaria - PDEA. Gobernación de Boyacá. https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Documents/PDEA%27s%20Aprobados/PDEA%20Boyac%C3%A1.pdf

Gobernación de Boyacá. (2020). Plan departamental de extensión agropecuaria (PDEA) 2020-2023. Gobernación de Boyacá. https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/PublishingImages/Paginas/PDEA/Boyaca.pdf

Granada Isaza, C. A., Ventura Ramos, E., Baumann, J., Oropeza Mota, J. L., & Mobayed Khodr, N. (2013). Efecto del estado de degradación en la respuesta hidrológica de dos unidades de escurrimiento en la cuenca del río la sierra, México | Revista científica europea, ESJ. 9(21). https://doi.org/10.19044/esj.2013.v9n21p%25p

Granados, N. P., Camargo, C. C., Acosta, P. M., & Herrera, J. B. (2015). Páramo de Siscunsí, en la cuenca alta de la Martinera. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería, 1-8. https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/1164

Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. Á., & López-Ríos, G. (2006). Riparian Zones Ecology. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, *XII* (1).

Hernández, Diana. (2015). Estimación de los parámetros morfométricos y las unidades de respuesta hidrológica de la cuenca del rió Ráquira departamento de Boyacá a través del programa swat. [Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia] https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2352/1/Trabajo_Grado_Cuenca_Raquira.pdf

Hernández, Luisa & Salamanca, Julián. (2019). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su influencia en la generación de caudales pico de la cuenca Sardinata, del Departamento de Norte de Santander – Colombia. [Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia]. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23391/1/Proyecto_v2_EDITADO.pdf

Ibáñez, C. A. (2004). Los sistemas terrestres y sus implicaciones medioambientales (Ministerio de educacion y ciencia). sociedad anonima de fotocomposicio. https://sede.educacion.gob.es/publiventa/PdfServlet?pdf=VP11738.pdf&area=E

IDEAM, & Instituto HUMBOLT. (2014). Informe final componente coberturas de la tierra en los páramos priorizados a escala 1:25.000 (metodología corine land cover adaptada para Colombia). IDEAM. http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9580/13-13-014-093CE.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instituto Geografico Agustin Codazzi. (2005). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá. *TOMO I*.

Jin, X., Jin, Y., & Mao, X. (2019). *Land Use / Cover Change Effects on River Basin Hydrological Processes Based on a Modified Soil and Water Assessment Tool : A Case Study of the Heihe River Basin in Northwest China ' s Arid Region*. https://doi.org/10.3390/su11041072

López-Ortiz, M. I., Melgarejo, J., & Fernández-Aracil, P. (2020). Riesgo de inundación en España: Análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes (Universitat d'Alacant). Universitat d'Alacant. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/109063/1/riesgo-inundacion-espana-399-408.pdf

Marín Villegas, C. A. (2011). Determinación de curvas de duración de caudal para cuencas intermitentes [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/14657/u442887.pdf

Meli, P., Ruiz, L., Aguilar, R., Rabasa, A., Rey-Benayas, J. M., & Carabias, J. (2017). Bosques ribereños del trópico húmedo de México: Un caso de estudio and aspectos críticos para una restauración exitosa. *Madera Bosques*, *23*(1), 181–193. https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311118

Mongil, J. M., & Navarro, J. (2012). Infiltración y grupos hidrológicos de suelos en las laderas de los páramos (Valladolid). Cuadernos de investigación geográfica, 38(1), 131-153.

Montoya, Luis & Montoya, Rubén (2005). *Transporte de sedimentos en las corrientes del*. 101–109.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute. https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf

Neitsh, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2005). Herramientas de evaluación de suelo y agua, documentación teórica versión 2005. CIAT. https://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf

Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: Caso del Río Chinchiná. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 13(24), 43–58. http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v13n24/v13n24a04.pdf

Ovalle, Erika. (2019). Evaluación de la vulnerabilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Aipe mediante la estimación de indicadores hídricos y modelación de la respuesta hidrológica. [Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia]. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23396/1/PROYECTO.pdf

Pai, N., Saraswat, D., & Srinivasan, R. (2012). Field_SWAT: A tool for mapping SWAT output to field boundaries. Computers & Geosciences, 40, 175-184. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.07.006

PAOT. (2003). Informe anual 2003 apéndice temático Documentos de referencia. IDEAM. http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/informes/informe2003_borrame/temas/suelo.pdf

Parques Nacionales Naturales. (2018). Instructivo para el levantamiento y actualización de coberturas de la tierra en las áreas de parques nacionales naturales (Vol. 4). Parques Nacionales Naturales. https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2019/03/Instructivo-para-el-levantamiento-y-actualizacion-de-coberturas-de-la-tierra-en-las-areas-de-PNN.pdf

Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., & Verón, S. R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. Ciencia hoy, 15(87), 14–23. https://www.agro.uba.ar/users/steinbac/Anexo5-Paruelo%20y%20cajas.pdf

Pérez Martínez, J. C., & Barbosa Cadena, C. D. (2018). Aplicación del Modelo de Simulación Hidrológica e Hidráulica HEC-HMS y HEC-RAS para la estimación de manchas de inundación a una escala 1: 25.000 en la cuenca del río Chicú [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás].

Pérez, A. M., Serafini, M. C., & Antes, M. E. (2014). Impactos de los cambios de cobertura y uso de la tierra sobre los componentes ambientales en la provincia de San Pablo, entre los años 1996-2019. XVI Simposio Internacional SELPER 2014, 16, 1-20. https://selper.org.co/papers-XVI-Simposio/Otros/OT1-Impacto-uso-del-suelo.pdf

Pérez-Cutillas, P., Cataldo, M. F., Zema, D. A., de-Vente, J., Boix-Fayos, C., Pérez-Cutillas, P., Cataldo, M. F., Zema, D. A., de-Vente, J., & Boix-Fayos, C. (2018). Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España). Bosque (Valdivia), 39(1), 119-129. https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000100119

Pons, V. L. (2018). Evaluación del servicio ecosistémico de rendimiento hídrico entre los años de 1994 y 2016 en el municipio de Valle de Bravo, estado de México. *Papeles de Geografía*, *0*(64), 93–113.

Rawat, J. S., & Kumar, M. (2015). Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *18*(1), 77–84. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.02.002

Sánchez Vélez, A. S., Garcia Nuñes, R. M., & Palma Trujano, A. (2003). La cuenca hidrográficaunidad básica de planeación y manejo de recursos naturales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable. http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cuenca_hidrografica.pdf

Secretaría de Medio ambiente y Desarrollo Rura. (2014). Actualización del mapa de coberturas vegetales, análisis multitemporal y métrica del paisaje del municipio de envigado (Secretaría de Medio ambiente y Desarrollo Rura). Universidad Militar Nueva Granada. https://www.envigado.gov.co/planeacion/SiteAssets/010_ACORDEONES/DOCUMENTOS/2018/09/Informe_Final_Coberturas_Vegetales_Envigado.pdf

Serrano Amado, a. m., & Cazares. (2019). La sostenibilidad factor determinante para el turismo en Colombia. 40(13), 12-17.

Serrano Muela, M. P., Martí Bono, C. E., Nadal-Romero, E., Regüés-Muñoz, D., Lana-Renault, N., & Latrón, J. (2005). Respuesta hidrológica de una cuenca forestal en la montaña media pirenaica: El caso de San Salvador. Cuaderno de investigación geográfica, 31, 59-76.

Sierra, H. G., Vega, M. E., & Castellanos, P. A. (2018). Estudios sobre medio ambiente y sostenibilidad: Una mirada desde Colombia (Universidad Santo Tomás. (pp. 282-299). https://repository.usta.edu.co/handle/11634/27501

Stadtmüller, T. (1994). Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales, medidas para mitigarlo: Una revisión bibliográfica (Vol. 1-246). Bib. Orton IICA / CATIE.

Uribe, N. (2010). SWAT: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT 2005. CIAT. https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf

Uribe, N., Estrada R. D. y Jarvis, A (2009). Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: el caso de las cuencas Tuluá-Morales, Guabas, Sabaletas, Amaime, Nima, Bolo, Fraile, Desbaratado y Palo). Recuperado de http://www.asocana.org/documentos/6122011-7521004a-00ff00,000a000,878787,c3c3c3,0f0f0f,b4b4b4,ff00ff,ffffff,2d2d2d,b9b9b9,d2d2d2.pd

Uribe, N., Quintero, M. y Valencia, J. (2013). Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a la Cuenca del Río Cañete (SWAT). Recuperado de https://es.scribd.com/document/188349117/Modelo-Hidrologico-Swat

Vela, Fernando. (2005). Plan de ordenación y manejo de la cuenca del lago de tota (Capitulo VII: Sistemas Productivos). CORPOBOYACA. https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/diagnostivo-sistemas-productivos-lago-tota.pdf

Verdú Arnal, J. M. (2003). Análisis y modelización de la respuesta hidrológica y fluvial de una extensa cuenca de montaña mediterránea (río Isábena, Pre- Pirineo) [Universitat de Lleida]. https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8233/Tjmva1de1.pdf?sequence=1

Viglizzo, E., & Jobbágy, E. G. (2010). Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental (Instituto Nacional De Tecnología Agropecuaria). Ediciones INTA Buenos Aires. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-expansin_frontera_agropecuaria_2010.pdf

Villanueva Parra, P. A., Guerrero Sierra, H. F., & Acosta Castellanos, P. M. (2018). La gestión pública del servicio de agua desde un enfoque de desarrollo sostenible: El caso de Florencia–Caquetá. En Estudios sobre medio ambiente y sostenibilidad: Una mirada desde Colombia (pp. 218-251). Universidad Santo Tomás. https://repository.usta.edu.co/handle/11634/27473

Welde, K., & Gebremariam, B. (2017). Effect of land use land cover dynamics on hydrological response of watershed: Case study of Tekeze Dam watershed, northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, *5*(1), 1–16. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.03.002

Williams, J.R. (1995). In Computer Models of Watershed Hidrology. Chapter 25. The epic model. Water Resources Publications. Highlands Ranch.

Zhang, H., Wang, B., Liu, D. L., Zhang, M., Leslie, L. M., & Yu, Q. (2020). Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia. *Journal of Hydrology*, *585*(February), 124822. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124822

ANEXOS

ANEXO 1. Promedio anual multianual de percolación de la microcuenca Hato Laguna

PERC_MM	
SUBCUENCA-HRUS	**PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL**
1	**1070.80**
1	263.37
2	263.48
3	271.96
4	271.99
2	**514.58**
5	257.22
6	257.36
3	**2503.81**
7	272.24
8	288.34
9	285.44
10	264.61
11	264.51
12	272.96
13	272.95
14	291.68
15	291.09
4	**3619.48**
16	272.34
17	272.36
18	288.11
19	288.48
20	268.65
21	285.07
22	285.63
23	264.67
24	264.78
25	273.11
26	273.08
27	291.83
28	291.37
5	**548.55**
29	274.30
30	274.25

6	**2419.51**
31	258.11
32	258.24
33	266.17
34	266.20
35	261.25
36	267.96
37	268.03
38	287.01
39	286.54
7	**2250.90**
40	269.65
41	269.74
42	288.92
43	288.49
44	274.24
45	274.20
46	293.10
47	292.56
8	**547.27**
48	273.65
49	273.62
9	**1460.87**
50	287.05
51	286.89
52	280.79
53	303.26
54	302.88
TOTAL GENERAL	**14935.77**

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2. Promedio anual multianual de la evapotranspiración real de la microcuenca Hato Laguna

ET_MM	
SUBCUENCA-HRUS	**PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL**
1	**2516.62**
1	663.06
2	663.11
3	595.22

	4	595.23	
2			**1359.32**
	5	679.68	
	6	679.64	
3			**5846.01**
	7	590.31	
	8	683.91	
	9	700.49	
	10	659.96	
	11	659.84	
	12	592.40	
	13	592.35	
	14	683.36	
	15	683.39	
4			**8424.13**
	16	589.89	
	17	589.91	
	18	683.39	
	19	683.43	
	20	608.91	
	21	700.01	
	22	699.99	
	23	659.40	
	24	659.48	
	25	591.98	
	26	591.96	
	27	682.89	
	28	682.90	
5			**1176.99**
	29	588.52	
	30	588.47	
6			**5860.26**
	31	677.34	
	32	677.29	
	33	612.65	
	34	612.69	
	35	670.80	
	36	610.00	
	37	609.87	
	38	694.77	
	39	694.84	
7			**5123.50**
	40	605.19	

	41	605.06
	42	688.87
	43	688.94
	44	588.73
	45	588.72
	46	678.97
	47	679.03
8		**1180.81**
	48	590.41
	49	590.39
9		**3113.36**
	50	634.60
	51	634.45
	52	561.52
	53	641.43
	54	641.36
TOTAL GENERAL		**34601.00**

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3. Promedio anual multianual del flujo de retorno de la microcuenca Hato Laguna

GW_Q MM	
SUBCUENCA-HRUS	**PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL**
1	**910.36**
1	224.29
2	224.39
3	230.82
4	230.85
2	**440.07**
5	219.97
6	220.10
3	**2126.05**
7	232.92
8	244.62
9	241.28
10	225.54
11	225.45
12	231.90

	13	231.89	
	14	246.49	
	15	245.97	
4			**3074.70**
	16	233.03	
	17	233.05	
	18	244.43	
	19	244.76	
	20	228.67	
	21	240.97	
	22	241.48	
	23	225.61	
	24	225.72	
	25	232.06	
	26	232.03	
	27	246.65	
	28	246.25	
5			**466.65**
	29	233.35	
	30	233.30	
6			**2058.95**
	31	220.86	
	32	220.98	
	33	226.23	
	34	226.26	
	35	223.68	
	36	228.09	
	37	228.17	
	38	242.55	
	39	242.13	
7			**1910.84**
	40	229.87	
	41	229.95	
	42	244.64	
	43	244.24	
	44	233.27	
	45	233.24	
	46	248.05	
	47	247.58	
8			**465.27**
	48	232.65	
	49	232.62	
9			**1251.83**

50	246.67
51	246.52
52	241.77
53	258.61
54	258.26
TOTAL GENERAL	**12704.74**

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4. Promedio anual multianual de la escorrentía superficial de la microcuenca Hato Laguna

SURQ_MM	
SUBCUENCA-HRUS	**PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL**
1	**1661.73**
1	430.56
2	430.74
3	400.19
4	400.24
2	**832.47**
5	416.11
6	416.36
3	**3626.11**
7	405.91
8	391.48
9	378.34
10	433.03
11	432.87
12	402.39
13	402.36
14	390.10
15	389.62
4	**5194.38**
16	406.18
17	406.22
18	391.49
19	391.79
20	389.42
21	378.23
22	378.70
23	433.19

	24	433.36
	25	402.69
	26	402.64
	27	390.42
	28	390.05
5		**810.47**
	29	405.30
	30	405.17
6		**3569.40**
	31	417.77
	32	418.02
	33	385.30
	34	385.38
	35	422.29
	36	388.80
	37	388.93
	38	381.66
	39	381.24
7		**3152.33**
	40	392.53
	41	392.67
	42	385.73
	43	385.34
	44	405.13
	45	405.07
	46	393.15
	47	392.70
8		**807.72**
	48	403.89
	49	403.83
9		**2151.88**
	50	441.83
	51	441.55
	52	428.92
	53	419.93
	54	419.64
TOTAL GENERAL		**21806.49**

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5. Promedio anual multianual de la escorrentía subsuperficial de la microcuenca Hato Laguna

LATQ_MM	
SUBCUENCA-HRUS	**PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL**
1	**0.00**
1	0.00
2	0.00
3	0.00
4	0.00
2	**0.00**
5	0.00
6	0.00
3	**0.08**
7	0.00
8	0.00
9	0.00
10	0.00
11	0.00
12	0.00
13	0.00
14	0.00
15	0.08
4	**0.06**
16	0.00
17	0.00
18	0.00
19	0.00
20	0.00
21	0.03
22	0.00
23	0.00
24	0.00
25	0.00
26	0.00
27	0.00
28	0.03
5	**0.00**

	29	0.00
	30	0.00
6		**0.02**
	31	0.00
	32	0.00
	33	0.00
	34	0.00
	35	0.00
	36	0.00
	37	0.00
	38	0.00
	39	0.02
7		**0.09**
	40	0.00
	41	0.00
	42	0.00
	43	0.02
	44	0.00
	45	0.00
	46	0.00
	47	0.07
8		**0.00**
	48	0.00
	49	0.00
9		**0.00**
	50	0.00
	51	0.00
	52	0.00
	53	0.00
	54	0.00
TOTAL GENERAL		**0.25**

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 6. Comportamiento hidrológico situación actual.

Mes	Precipitación (mm)	Caudal (m3/s)	Caída de nieve (mm)	Escorrentía superficial (mm)	Flujo lateral (mm)	Rendimiento hídrico (mm)	Evapotranspiración (mm)	Rendimiento de los sedimentos (mm)	Evapotranspiración potencial (mm)
1	23.87	0.22	0.00	0.63	0.00	21.29	39.71	0.32	75.50
2	54.66	0.26	0.00	4.95	0.00	21.91	36.10	0.62	65.52
3	76.52	0.32	1.33	10.38	0.00	27.97	44.02	2.70	59.34
4	165.88	0.97	0.00	68.63	0.00	84.84	53.53	25.02	63.72
5	125.23	0.51	0.00	31.39	0.00	48.48	63.48	7.32	69.49
6	189.02	1.0006	0.00	70.39	0.00	87.74	66.35	12.54	68.18
7	200.62	0.96	0.00	71.62	0.00	91.17	73.65	3.10	76.51
8	144.88	0.72	0.00	41.57	0.00	63.79	61.17	2.14	64.17
9	88.07	0.47	0.00	16.53	0.00	39.75	54.75	0.98	60.40
10	133.37	0.72	0.00	43.34	0.00	67.78	51.19	3.59	59.86
11	114.40	0.61	3.05	32.90	0.00	56.99	51.95	2.32	58.05
12	50.53	0.447	3.95	13.26	0.00	37.76	46.37	1.31	60.56

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7. Comportamiento hidrológico escenario 1.

Mes	Precipitación (mm)	Caudal (m3/s)	Caída de nieve (mm)	Escorrentía superficial (mm)	Flujo lateral (mm)	Rendimiento hídrico (mm)	Evapotranspiración (mm)	Rendimiento de los sedimentos (mm)	Evapotranspiración potencial (mm)
1	23.87	0.25	0.00	0.77	0.00	21.49	37.85	0.01	75.50
2	54.66	0.27	0.00	5.24	0.00	22.33	35.35	0.03	65.52
3	76.52	0.33	1.33	10.58	0.00	28.40	43.36	0.12	59.34
4	165.88	0.98	0.00	66.23	0.00	82.73	53.46	1.77	63.72
5	125.23	0.52	0.00	29.79	0.00	47.15	63.55	0.47	69.49
6	189.02	1.03	0.00	66.99	0.00	84.62	66.46	0.63	68.18

7	200.62	1.01	0.00	66.79	0.00	86.64	74.95	0.39	76.51
8	144.88	0.73	0.00	38.52	0.00	61.02	62.44	0.22	64.17
9	88.07	0.48	0.00	15.55	0.00	38.99	55.82	0.07	60.40
10	133.37	0.74	0.00	39.79	0.00	64.40	54.95	0.27	59.86
11	114.40	0.65	3.05	30.05	0.00	54.19	53.44	0.15	58.05
12	50.53	0.443	3.95	13.01	0.00	37.49	44.45	0.05	60.56

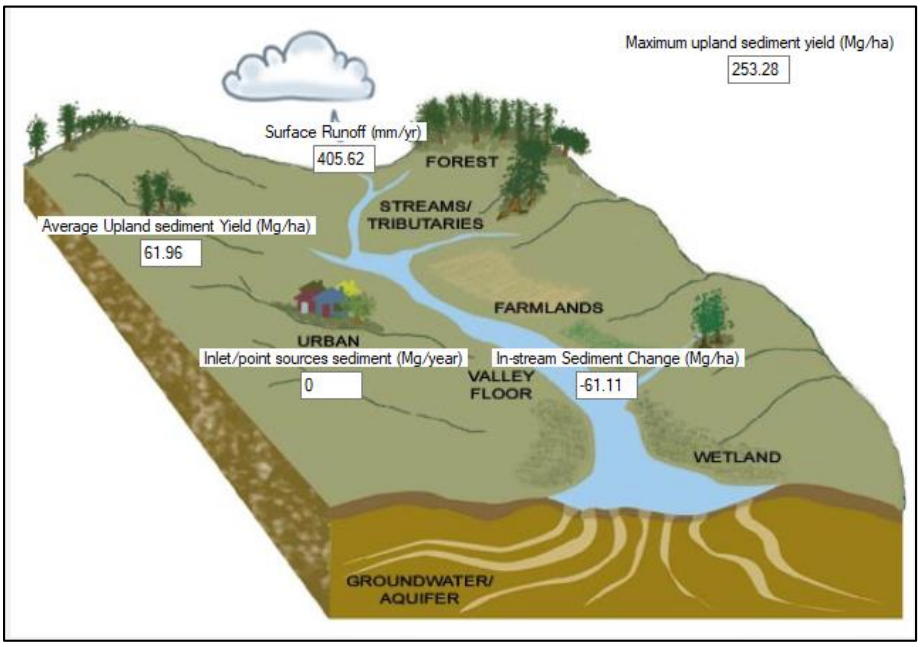
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 8. Comportamiento hidrológico escenario 2.

Mes	**Precipitación (mm)**	**Caudal (m^3/s)**	**Caída de nieve (mm)**	**Escorrentía superficial (mm)**	**Flujo lateral (mm)**	**Rendimiento hídrico (mm)**	**Evapotranspiración (mm)**	**Rendimiento de los sedimentos (mm)**	**Evapotranspiración potencial (mm)**
1	23.87	0.23	0.00	0.60	0.00	21.40	39.46	0.38	75.50
2	54.66	0.26	0.00	4.98	0.00	22.04	35.96	0.65	65.52
3	76.52	0.32	1.33	10.20	0.00	27.90	43.86	2.80	59.34
4	165.88	0.96	0.00	67.34	0.00	83.69	53.41	25.48	63.72
5	125.23	0.51	0.00	30.20	0.00	47.45	63.37	7.05	69.49
6	189.02	1.0005	0.00	67.61	0.00	85.15	66.23	12.27	68.18
7	200.62	0.95	0.00	68.38	0.00	88.19	73.34	3.20	76.51
8	144.88	0.719	0.00	39.92	0.00	62.50	60.99	2.32	64.17
9	88.07	0.47	0.00	15.56	0.00	39.13	54.58	1.06	60.40
10	133.37	0.71	0.00	41.91	0.00	66.68	50.97	3.90	59.86
11	114.40	0.6	3.05	32.08	0.00	55.46	51.74	2.52	58.05
12	50.53	0.44	3.95	13.11	0.00	37.85	46.04	1.47	60.66

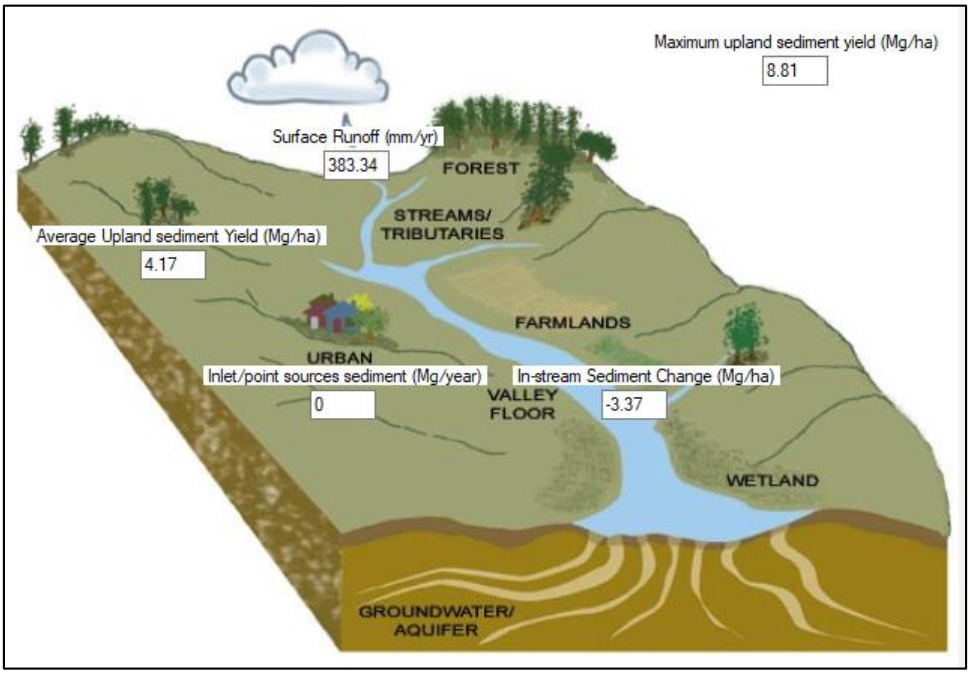
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9. Comportamiento sedimentos situación inicial



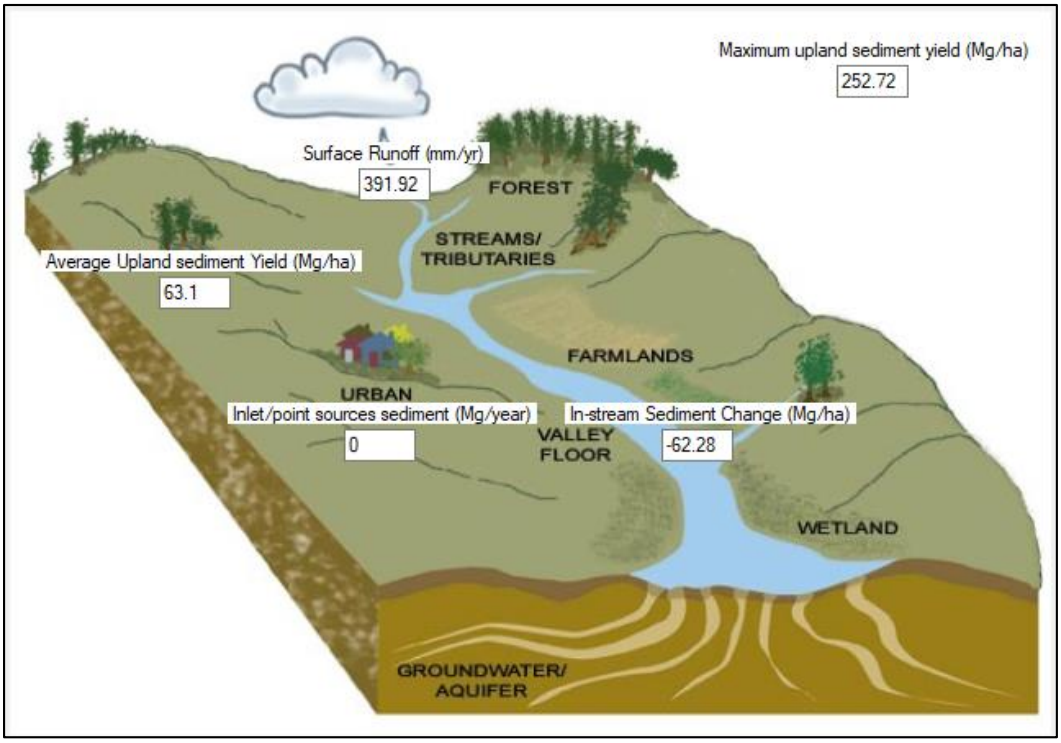
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 10. Comportamiento sedimentos escenario 1.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 11. Comportamiento sedimentos escenario 2.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 12. Promedio anual multianual del flujo de retorno del escenario 1 de la microcuenca Hato Laguna

GW_Q MM	
SUBCUENCA-HRUS	**PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL**
1	**965.14**
1	240.18
2	240.26
3	242.32
4	242.38
2	**1462.86**
5	240.12
6	240.22
7	242.34
8	242.29
9	248.75
10	249.13
3	**1469.15**
11	241.28

	12	241.20
	13	243.22
	14	243.27
	15	250.30
	16	249.88
4		**987.22**
	17	243.32
	18	243.38
	19	250.43
	20	250.08
5		**737.70**
	21	245.93
	22	245.87
	23	245.90
6		**967.58**
	24	240.92
	25	240.83
	26	242.94
	27	242.89
7		**1987.52**
	28	245.79
	29	245.82
	30	251.88
	31	252.23
	32	244.40
	33	244.33
	34	251.33
	35	251.73
8		**1732.26**
	36	245.31
	37	245.29
	38	251.62
	39	251.26
	40	243.88
	41	243.81
	42	251.08
9		**2000.25**
	43	249.41
	44	248.98
	45	249.20
	46	246.63
	47	246.60
	48	253.51

49	253.19
50	252.73
TOTAL GENERAL	**12309.66**

ANEXO 13. Promedio anual multianual del flujo de retorno del escenario 2 de la microcuenca Hato Laguna

GW_Q MM	
SUBCUENCA-HRUS	**PROMEDIO ANUAL MULTIANUAL**
1	**923.50**
1	229.12
2	229.23
3	232.56
4	232.59
2	**450.90**
5	225.52
6	225.39
3	**1899.45**
7	234.68
8	244.52
9	230.41
10	230.28
11	233.64
12	233.62
13	246.41
14	245.88
4	**3092.62**
15	234.80
16	234.81
17	244.34
18	244.68
19	230.46
20	240.88
21	241.39
22	230.45
23	230.56
24	233.78
25	233.75
26	246.57
27	246.16
5	**470.09**

	28	235.07
	29	235.02
6		**2081.71**
	30	226.25
	31	226.38
	32	227.95
	33	227.97
	34	228.97
	35	229.80
	36	229.87
	37	242.47
	38	242.05
7		**1917.34**
	39	231.57
	40	231.63
	41	244.57
	42	244.17
	43	234.98
	44	**234.95**
	45	247.97
	46	247.49
8		**468.70**
	47	234.37
	48	234.33
9		**1254.19**
	49	233.67
	50	246.84
	51	243.59
	52	258.53
	53	258.17
TOTAL GENERAL		**12558.49**