



Representación histórica de la hidrología de la cuenca del río Canalete, Córdoba, Colombia, considerando la evolución del uso del suelo

Historical representation of the hydrology of the Canalete river basin, Cordoba, Colombia, considering the evolution of land use

María José Moreno Vega
Ingeniero Sanitario y Ambiental
Escuela Abierta de Desarrollo en Ingeniería y Construcción
majomove@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1201-9468>
Córdoba, Colombia

Juan David de la Ossa Atencia
Ingeniero Sanitario y Ambiental
juan.delaossaa@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1791-4402>
Córdoba, Colombia

Lina María García Corrales
PhD. Ingeniería Civil
Universidad del Norte
lmcorrales@uninorte.edu.co
<https://orcid.org/0000-0003-3132-1889>
Atlántico, Colombia.

Resumen

El impacto de la representación histórica de la hidrología de la cuenca del río Canalete considerando la evolución del uso del suelo, relaciona en un mismo escenario tanto la variable física y la variable hidrológica a través de herramientas computacionales, para así brindar resultados eficientes y veraces en los procesos de planificación y gestión ambiental. Utilizando el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), se efectuó la simulación del balance hidrológico de la cuenca del río Canalete, ubicada en el departamento de Córdoba, Colombia, para evidenciar la incidencia del cambio de uso del suelo en su hidrología y comprender las relaciones entre estas dos variables. El modelo reprodujo satisfactoriamente los caudales multianuales desde 1988 hasta 2015, siendo este el periodo de modelación para las diferentes configuraciones pasadas de uso del suelo correspondientes a 1996, 2001, 2005, 2011 y 2015. Con datos obtenidos por estaciones meteorológicas, se realizó un análisis estadístico basado en el coeficiente R^2 , lo que permitió comparar la semejanza de los datos resultantes de la modelación con los datos reales obtenidos del Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Canalete y poder definir los escenarios en los cuales se produjeron los cambios hidrológicos. Posteriormente, se describió el comportamiento de los escenarios de las configuraciones pasadas de uso del suelo correspondientes a 1996, 2005 y 2015.

Palabras clave: modelo hidrológico, SWAT, caudales multianuales, configuraciones del suelo, planificación y gestión ambiental.

Abstract

The impact of the historical representation of the hydrology of the Canalete River basin, considering the evolution of land use, is to be able to relate in the same scenario the changes in land use and the hydrology of the basin through computational tools that provide efficiency and accuracy of results in the planning and environmental management processes. Using the SWAT hydrological model "Soil and Water Assessment Tool", the hydrological balance of the Canalete river basin located in the department of Cordoba, Colombia, was simulated in order to evidence the impact of land use change on its hydrology, and understand the relationships between these two variables. The model successfully reproduced the multiannual flows from 1988 to 2015, this being the modeling period for the different past land use configurations corresponding to 1996, 2001, 2005, 2011 and 2015. With data obtained by meteorological stations, it was possible to carry out a statistical analysis based on the R^2 coefficient, which made it possible to compare the similarity of the data resulting from the modeling with the real data obtained from the Environmental Diagnosis of the Canalete River Basin and to be able to define the scenarios in which the hydrological changes caused were determined. Subsequent, the behavior of the scenarios of the past configurations of land-use corresponding to 1996, 2005 and 2015 was described.

Keywords: hydrological model, SWAT, multiannual flows, soil configurations, environmental planning and management.

Introducción

Actualmente se reconoce que el ser humano altera el ciclo hidrológico a escala local y global. El cambio de la cobertura vegetal, asociado con la expansión de la agricultura, la urbanización y la contaminación, tienen una profunda influencia en los procesos hidrológicos que son necesario investigar, tanto en cuencas pequeñas como a nivel regional (Sahagian, 2000, p. 39-48; Sharma, et al., 2000, p.117-139).

En muchas cuencas se desarrollan procesos de planificación y gestión ambiental, en las cuales se plantean medidas de ordenamiento que incluyen la gestión del uso del suelo. Sin embargo, estos mecanismos de manejo no incorporan dentro de su análisis, los impactos hidrológicos provocados por los cambios de uso del suelo pasados, para comprender las relaciones entre las dos variables fundamentales. Para el caso de estudio, la representación histórica de los impactos hidrológicos de los cambios del uso del suelo, tiene especial relevancia, por una parte, porque la cuenca del río Canalete se encuentra ubicada en la zona de vida de bosque seco tropical, que corresponde a uno de los ecosistemas más amenazados (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge-CVS, 2005, p.12); adicionalmente este ecosistema se encuentra en proceso de deterioro, debido a la deforestación de las áreas boscosas para dar paso a la agricultura extensiva de pastos y cultivos migratorios (Maass, 1995, p. 399–422). En general, en las cuencas rurales, los cambios en el uso del suelo han tenido efectos sobre su hidrología, especialmente en relación con inundaciones y sequías (Gumindoga, et al., 2014, p. 76-78). Por lo anterior, se hace relevante adelantar una evaluación que incluya los cambios espaciales y las consecuencias hidrológicas en diferentes periodos.

Así mismo, con el fin de dar solución a la problemática expuesta, se pretendió realizar la representación hidrológica de la cuenca río Canalete mediante un modelo computacional, que permitió analizar el comportamiento del balance hidrológico de la cuenca, basado en la incorporación de diferentes configuraciones pasadas de uso del suelo; para el análisis de los resultados no se realizó calibración del programa.

En la presente investigación se pretende determinar la influencia del cambio de uso del suelo durante el rango de tiempo comprendido entre 1988-2015, verificando el nivel de afectación sobre los caudales de la cuenca del río Canalete. Para ello, el ejercicio contempla el planteamiento de tres posibles escenarios donde se dejan constantes tanto la información climática como el tipo de suelo y el único parámetro variable es precisamente el cambio de uso de suelo de la cuenca para tres años específicos.

La representación histórica de la hidrología de la cuenca del río Canalete, considerando la evolución del uso del suelo, relaciona en un mismo escenario los cambios de uso del suelo y su hidrología, a través de herramientas computacionales que brindan una eficiencia y veracidad de resultados para impactar los procesos de planificación y gestión ambiental, en los cuales se planteen medidas de ordenamiento territorial que incluyen la gestión del uso del suelo.

Desarrollo

Para el desarrollo de la investigación se definieron cuatro fases que permitieron la implementación estructurada y eficiente para la misma. La fase uno del proyecto abarcó de manera general lo concerniente al componente metodológico del estudio.

Este componente tuvo un enfoque mixto ya que ya que implicó un proceso de recolección, análisis y vinculación de datos cualitativos y cuantitativos. La tipología del estudio de la investigación fue descriptiva debido a que tuvo por objeto principal la representación hidrológica permitiendo determinar impactos a esta y su posterior análisis con respecto a las diferentes categorías de uso del suelo identificadas.

Referente a los métodos del estudio, se hizo uso de la deducción, análisis y síntesis, así mismo dentro de las técnicas e instrumentos para la recolección de datos se utilizó el software SWAT 10.3 y en la organización y sistematización de la información se aplicó un análisis de contenido que permita seleccionar la información más relevante para la investigación.

La fase dos contempló las configuraciones del suelo. La fase tres consistió en el modelo computacional y en la etapa 4 se determinaron los cambios hidrológicos ocasionados.

Descripción de la cuenca

La primera fase corresponde a la metodología de estudio, en la cual se realizó la descripción de la cuenca con la intención de conocer sus características y generar así una línea base sobre su condición actual.

Los cambios en el uso de la tierra y el patrón de cobertura del suelo son los factores más importantes para la evaluación de las condiciones del balance hidrológico en una zona. En tanto los cambios en el patrón de uso de la tierra y su estimación describen la utilización de los recursos de la tierra por actividades hechas por el hombre, particularmente la agricultura y la urbanización (YanYun et al., 2014, Singh et al., 2012). Las inferencias hidrológicas del patrón de uso de la tierra pueden ayudar a entender el escenario cambiante

de la demanda de agua de diferentes actividades tales como el requerimiento agrícola, las necesidades domésticas, la industrialización y también se puede utilizar para comprender la infiltración, recarga y tasa de escorrentía de la cuenca. Sin embargo, los cambios en los patrones de uso de la tierra se convierten en un componente importante en el monitoreo hidrológico y la gestión de recursos naturales (Rawat et al., 2013, Sylla et al., 2012).

Con respecto al cambio de uso de suelo natural o rural a uso urbano produce importantes transformaciones, como por ejemplo el aumento de la escorrentía superficial, especialmente cuando se producen fuertes precipitaciones de tormenta lo que ocasiona desbordes, inundaciones, erosión, difusión de contaminantes, entre otros efectos (Goudie, 1990; Weng, 2001). Puesto que Hough (1984) ha determinado que si se reduce la cobertura de árboles y vegetación en el área urbana decrece la evapotranspiración de 40% a 25%; aumenta la tasa de escorrentía de 10% a 30%; disminuye el tiempo de retraso entre la iniciación de precipitaciones y escorrentía; y, decrece la infiltración subterránea de 50% a 32%.

Ahora bien, con el fin de conocer y evaluar los cambios en el uso de suelo y su efecto en la hidrología de la zona, se pretende establecer una línea base del área de estudio; esta información fue obtenida del Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica río Canalete, realizado por la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS) (2005).

La cuenca hidrográfica del río Canalete se ubica en la zona noroccidental del departamento de Córdoba, en la costa caribeña colombiana, en el extremo norte de Sur América. En la **tabla 1** se registran sus coordenadas planas de ubicación, con datos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC, origen Bogotá, para las posiciones extremas en los cuatro puntos cardinales.

Tabla 1.

Coordenadas de ubicación de la cuenca

PUNTO	X	COORDENADAS	Y
Norte	771 472 mE		1 490 663 mN
Sur	767 070 mE		1 439 598 mN
Este	779 554 mE		1 473 466 mN
Oeste	751 507 mE		1 472 326 mN

Fuente: (CVS, 2005)

El río Canalete tiene un cauce principal con una longitud aproximada de 90.2 km, desde el nacimiento cercano a la cota de los 300 metros sobre el nivel del mar (msnm) hasta su desembocadura en el Mar Caribe (**figura 1**).

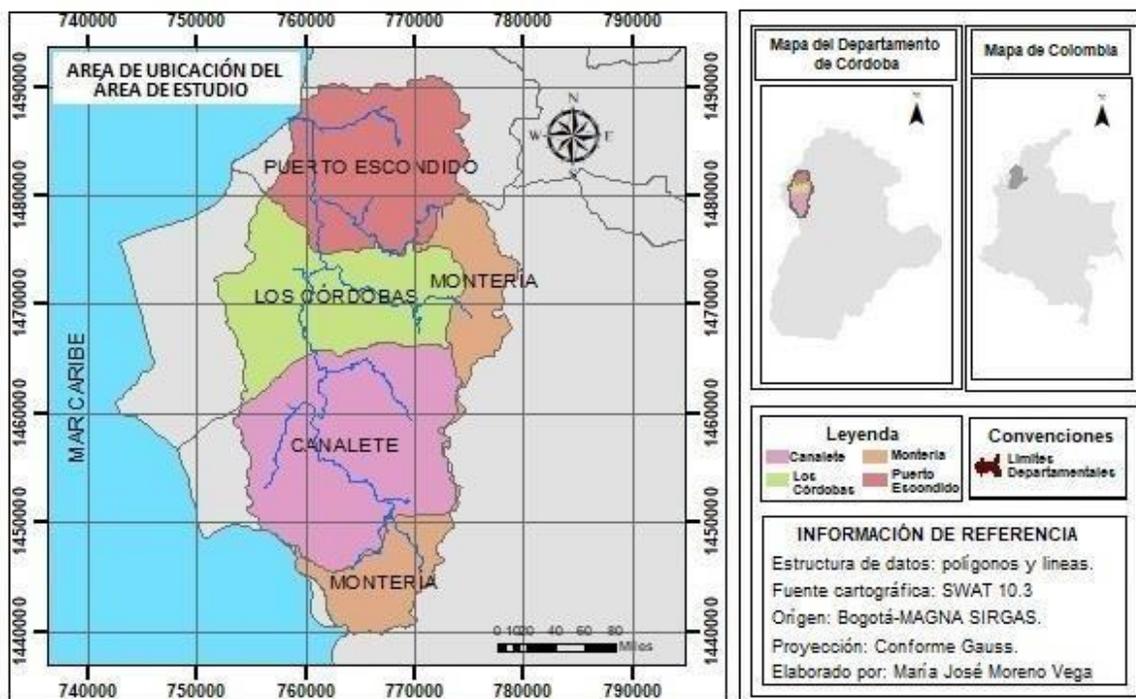


Figura 1. Delimitación de la cuenca del río Canalete, Córdoba. Fuente: Elaboración propia

Los procesos de intervención que se dan en el territorio nacional y en el departamento son, de manera crítica, evidentes en el sector costanero de Córdoba y, para el caso presente, en la totalidad de la cuenca del río Canalete.

La primera impresión que queda al visitar este sector del departamento, es que la totalidad de sus tierras están dedicadas a la ganadería. Luego del análisis de los diferentes componentes físico-bióticos y socioeconómicos, la conclusión es que aquella primera impresión no se aleja mucho de la realidad, con la circunstancia agravante de que no toda el área es apta para dicha actividad y que, además, ha reducido y desplazado la actividad agrícola a zonas poco aptas para su explotación.

De acuerdo con los resultados del presente diagnóstico, la cuenca del río Canalete se encuentra situada en el piso térmico cálido según la zonificación térmica del IGAC y con base en el método de Thornwaite el tipo climático es semiseco (**figura 2**).

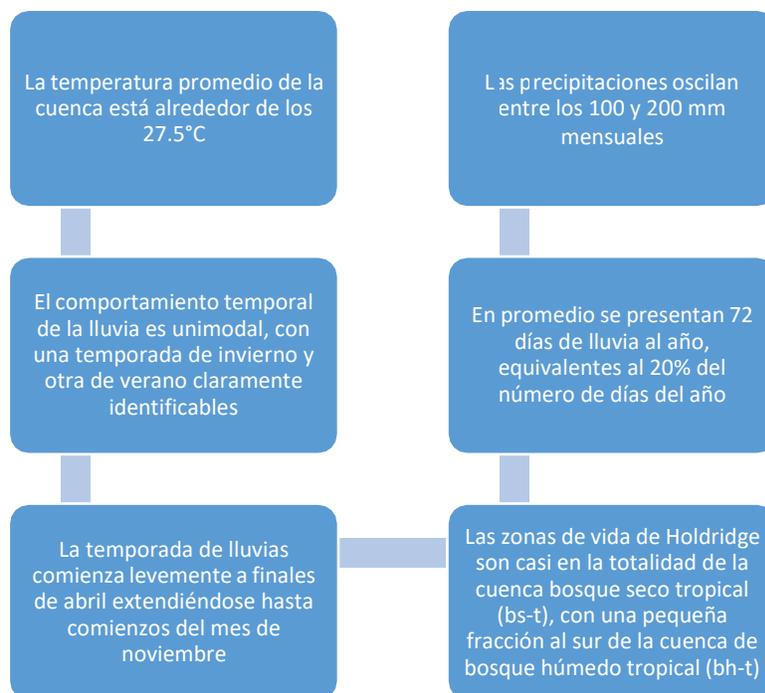


Figura 2. Línea base de la cuenca del río Canalete, Córdoba. Fuente: Elaboración propia

Modelo Hidrológico

Una vez definida la línea base, se da paso a la ejecución de la fase dos, en donde se identificaron diferentes modelos hidrológicos, se revisaron sus características y requerimientos de información, para seleccionar aquel que se ajuste a la información recopilada y que considere especialmente los usos del suelo dentro de los procesos hidrológicos.

Para la realización de una adecuada identificación de los modelos hidrológicos, se hizo una revisión bibliográfica de modelos como SWAT, HEC-HMS, entre otros, en donde se compararon sus características de funcionamiento y requerimientos de entrada principalmente, así como el tipo de descarga del modelo. Seleccionando finalmente, el programa SWAT, el cual cuenta con una interfaz sencilla de funcionamiento, requerimientos de información de fácil acceso y descarga libre.

El modelo hidrológico SWAT “Soil and Water Assessment Tool” es un modelo determinístico, distribuido con un grado cognoscitivo conceptual o también conocido como caja gris - físicamente basado, desarrollado para predecir los impactos en las prácticas del manejo de los suelos y vegetación en la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en grandes y complejas cuencas con diferentes suelos, uso del suelo y condiciones de manejo durante largos periodos (Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2010).

Las ventajas que tiene el modelo SWAT son: que se puede trabajar con una interface gráfica en ArcGIS, lo cual hace más fácil su manejo y utilización; la predicción sobre el impacto relativo de los datos de entrada alternativos sobre la calidad del agua y otras variables de interés, se puede cuantificar; cuenta con un método ágil de extrapolación e

integración de la información; la disponibilidad de datos de entrada y salida es inmediata; posee un amplio proceso de iteraciones de procesos físicos; es un modelo gratuito (Uribe, 2010). Como requerimientos de entrada para un funcionamiento adecuado del modelo, se deben ingresar diferentes coberturas de información, las cuales se especifican en la **figura 3**.



Figura 3. Requerimientos de información del modelo computacional SWAT. Fuente: (CIAT,2010)

Simulación hidrológica

Al seleccionar el modelo computacional a utilizar y definir los requerimientos de entrada, damos paso a la fase 3, en donde se preparó la información para ingresarla en el modelo hidrológico de la cuenca, incorporando la información hidrológica y simulando las diferentes configuraciones pasadas de uso del suelo, para obtener las respuestas hidrológicas de cada configuración.

La primera información que debe ser preparada y configurada, ya que de esta dependen los cálculos realizados por la herramienta SWAT, es la información satelital DEM, para lo cual se realizaron los pasos descritos en la **figura 4**.



Figura 4. Procedimiento de preparación del DEM. Fuente: Elaboración propia

Este nuevo raster permitió realizar la elaboración del mapa de delimitación de la cuenca del río Canalete mediante archivo raster y capa base de delimitación de la cuenca a través del procesamiento del modelo computacional se obtuvo una nueva delimitación con el objetivo de cubrir el margen de error de la capa inicial, tal y como se visualiza en la **figura 5**.

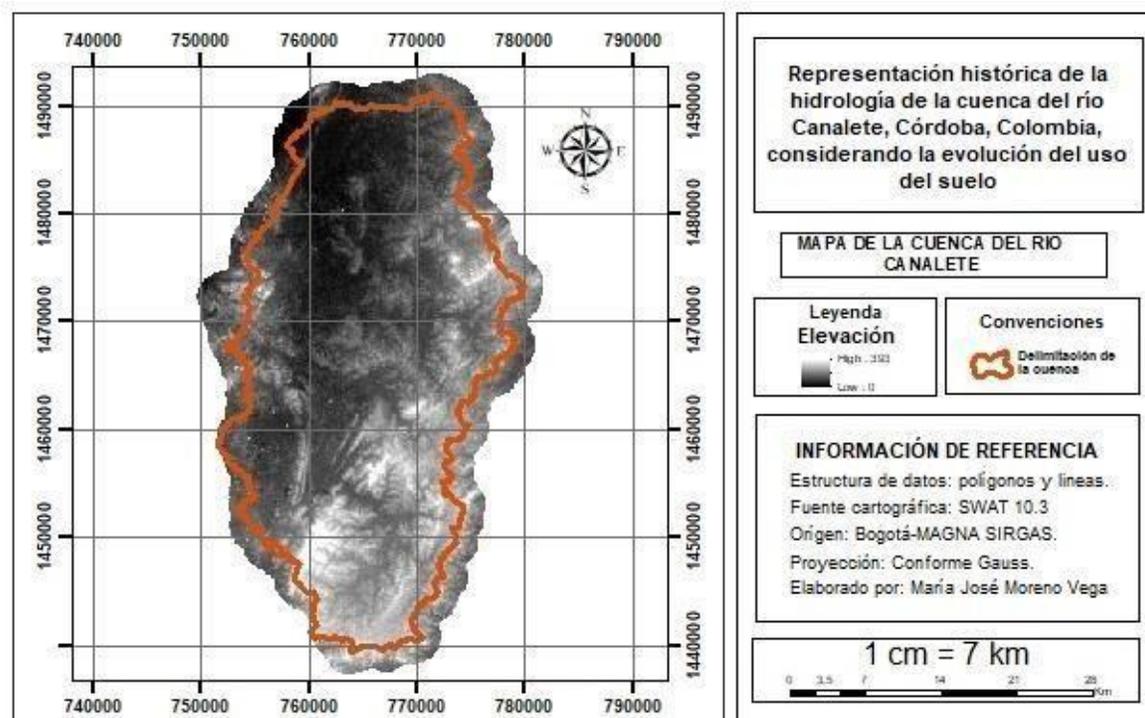


Figura 5. Mapa de la cuenca del río Canalete. Fuente: Elaboración propia

Se entiende que el formato ráster se fundamenta en la división del área de estudio en una matriz de celdillas, generalmente cuadradas. Cada una de estas celdillas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma. Este formato, por tanto, cubre la totalidad del espacio, este hecho supone una ventaja fundamental ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier punto del mismo. (De Meers, 2002; Tomlin, 1991).

Luego de que la información topográfica (Dem) fue procesada, se creó un nuevo proyecto en la herramienta SWAT y se ingresó y ajustó la información de uso y tipo de suelo, para esto se siguieron los pasos descritos en la **figura 6**.

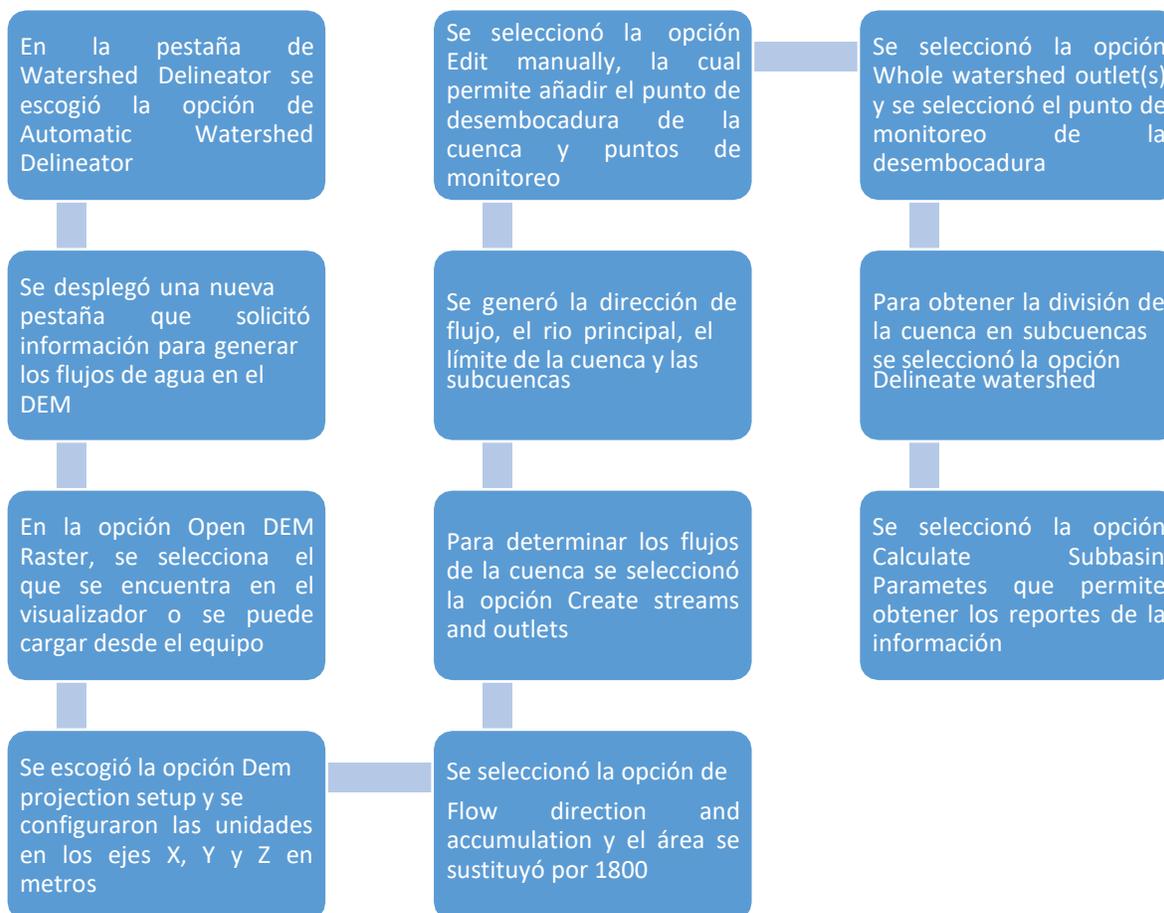


Figura 6. Procedimiento de generación de cuencas y direcciones de flujo. Fuente: Elaboración propia

Para este caso en específico, se adicionó un punto de monitoreo que se encuentra en las coordenadas planas 761117.5217 y 1464233.3048. De la información resultante de este procedimiento se realizó el mapa de flujos del agua y de subcuencas (las cuales son enumeradas de forma predeterminada por el programa), como se visualiza en las **figuras 7 y 8**.

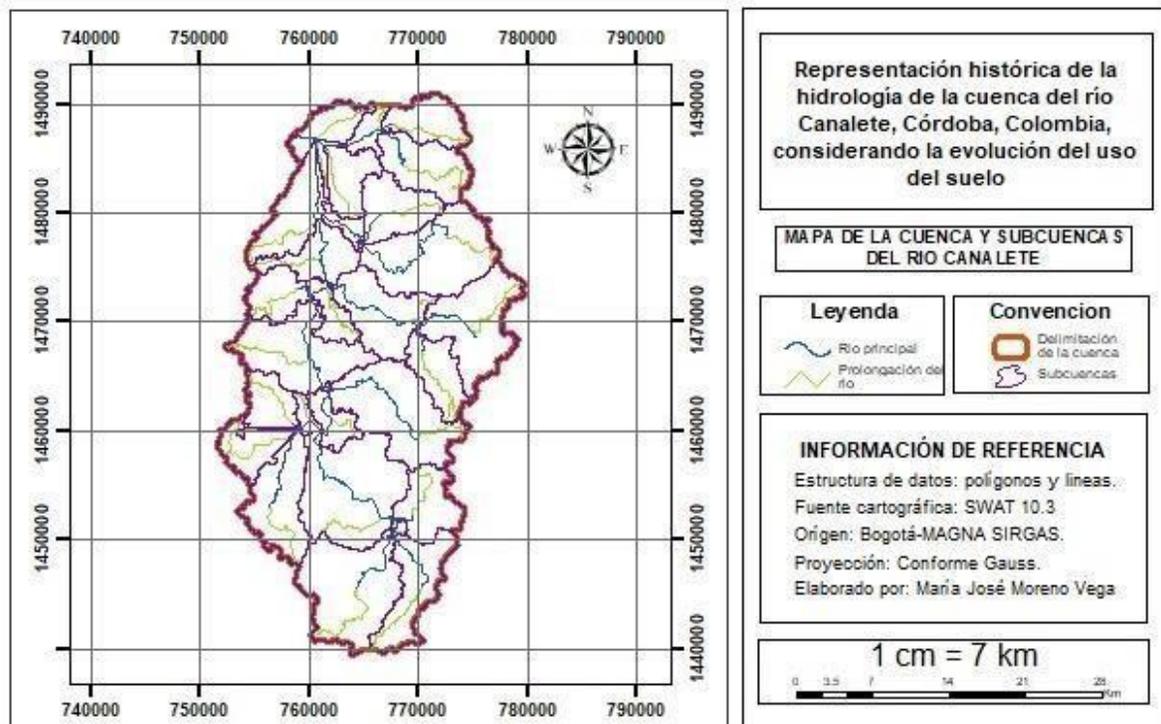


Figura 7. Mapa de la cuenca del río Canalete. Fuente: Elaboración propia

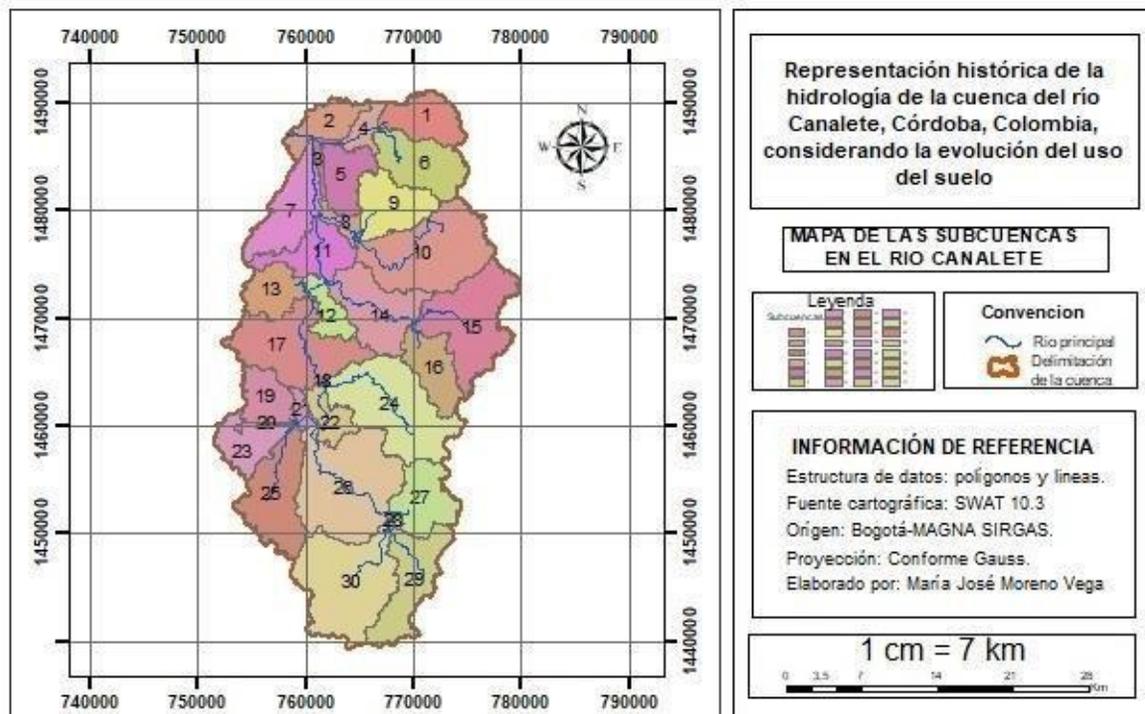


Figura 8. Mapa de flujo de agua, cuencas y subcuencas. Fuente: Elaboración propia

Al generar las delimitaciones de cuencas, subcuencas y establecer las direcciones de flujo, se ingresan las capas de tipo y de uso de suelo obtenidas de la CVS, para lo cual se sigue el procedimiento indicado en la **figura 9**.

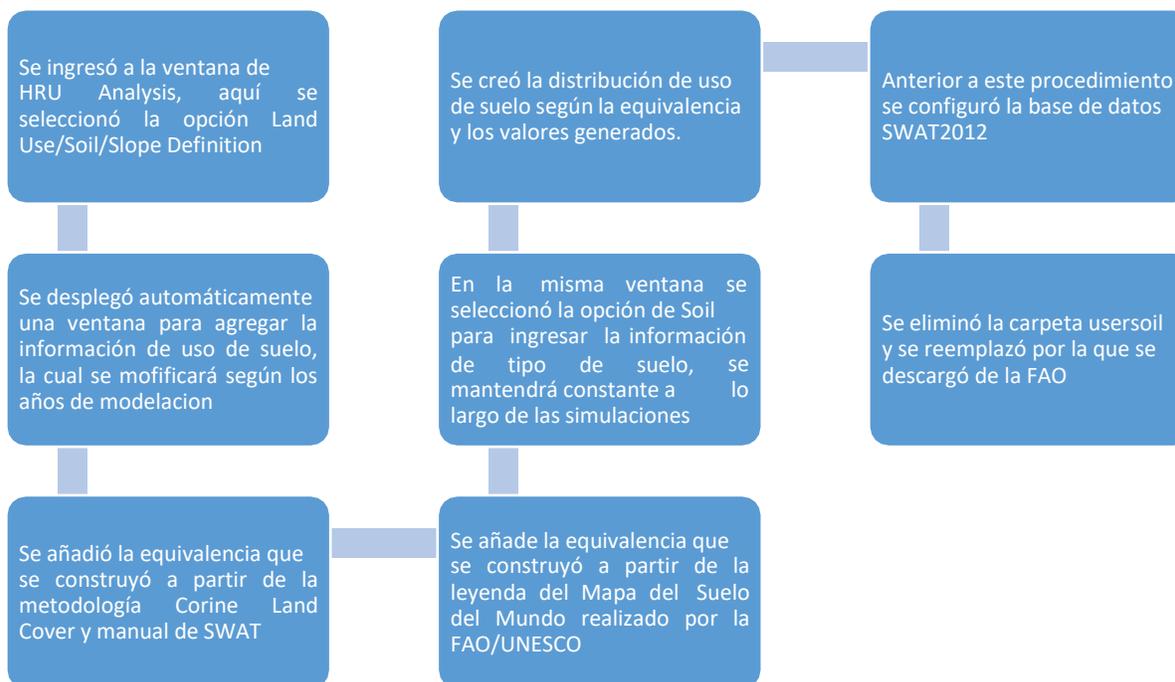


Figura 9. Procedimiento de preparación de tipo de suelo y uso de suelo. Fuente: Elaboración propia

Debido a que las capas no poseen referencias que permitan identificar el significado de los grupos de valores, se hace necesario ingresar equivalencias que traduzcan los valores generados por el modelo. Las equivalencias que se usaron luego de haber ingresado las capas de uso y de tipo de suelo corresponden a las mostradas en la **figura 10**.

"VALUE", "NAME"	
0, Sample-0	
1, Af14-3c-1	
2, Af17-1-2a-2	
3, Af32-2ab-3	
4, Ao39-2b-4	
5, Ao41-2bc-5	
6, Ao63-3b-6	
7, Bc8-2b-7	
8, Bc9-2b-8	
9, Bd30-2-3c-9	
11, Bd31-2c-11	
16, Be45-2a-16	
.	
.	
6720, Nd4-3c-6720	
6721, xh36-2a-6721	
6722, C11-3a-6722	
6723, De5-2b-6723	
6997, WATER-6997	
6998, GLACIER-6998	
	"Value", "Landuse"
	1, URML
	2, PAST
	3, AGRL
	4, FRSD
	5, MESQ
	6, WATR
	7, AGRR
	8, UTRN
	9, WETL

Figura 10. Equivalencias de tipo y uso de suelo. Fuente: Elaboración propia

De este procedimiento se obtuvieron los mapas de distribución de uso y tipo de suelo respectivamente (**figura 11 y 12**).

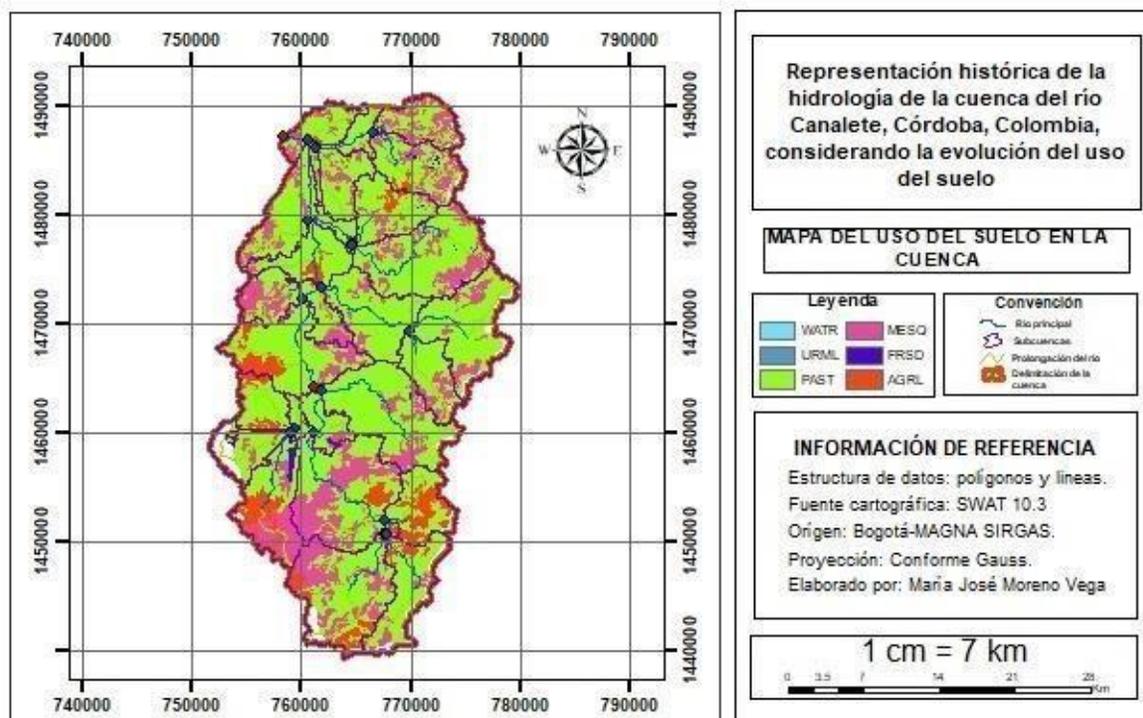


Figura 11. Mapa de uso de suelo. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que la línea de delimitación de la cuenca mostrada en las imágenes fue obtenida mediante procesamiento computacional de SWAT, se presentan espacios vacíos, los cuales se explican si se considera que el límite original y las capas de información ya procesadas provienen de la misma fuente.

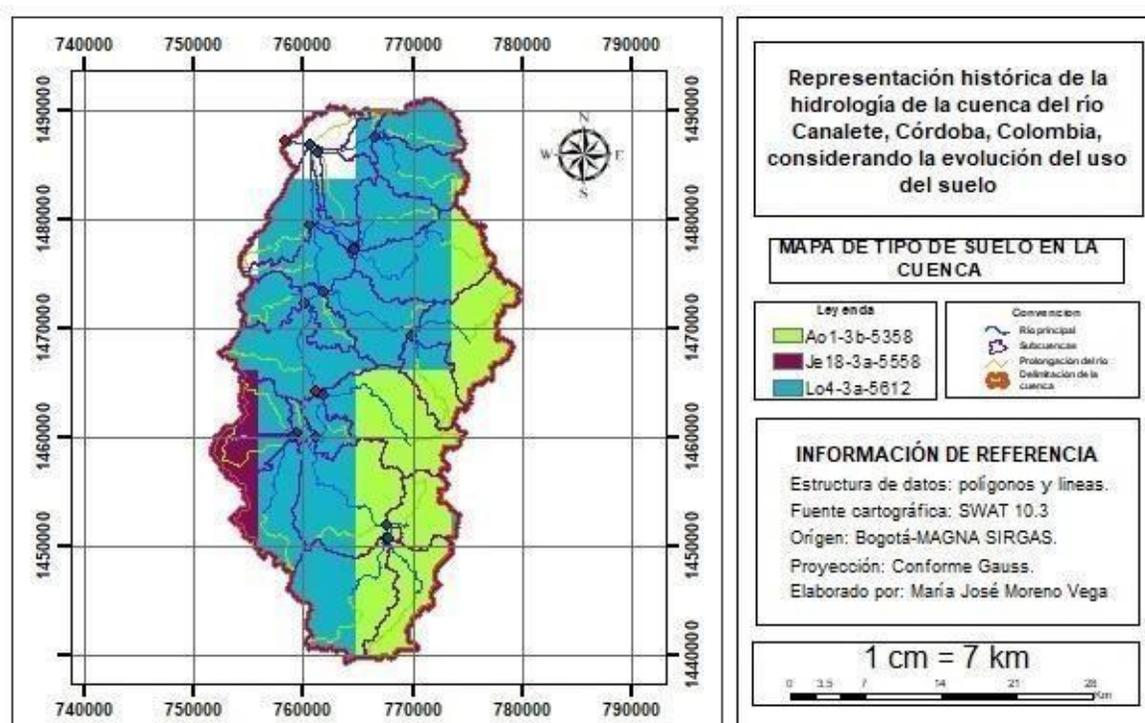


Figura 12. Mapa de tipo de suelo. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, es importante generar las pendientes del estudio hidrológico. Para que el programa pueda calcular las pendientes del terreno, este solicita unos rangos, que para nuestro caso corresponden a los mostrados en la **tabla 2**.

Tabla 2.

Rango de pendientes.

Nº	Rango
1	7-12
2	12-25
3	25-50
4	50-999.9

Fuente: Elaboración propia.

En continuidad con el procedimiento, se procedió a crear las unidades de respuesta hidrológica, para lo cual se utilizó la herramienta HRU Definition, que está dentro de la carpeta HRU Analysis del ArcSWAT.

Al momento de seleccionar la opción Create HRUs, automáticamente se agrupan en unidades de respuesta hidrológica aquellas características similares. Es así como se generó el mapa de HRUs de la cuenca del río Canalete (**figura 13**).

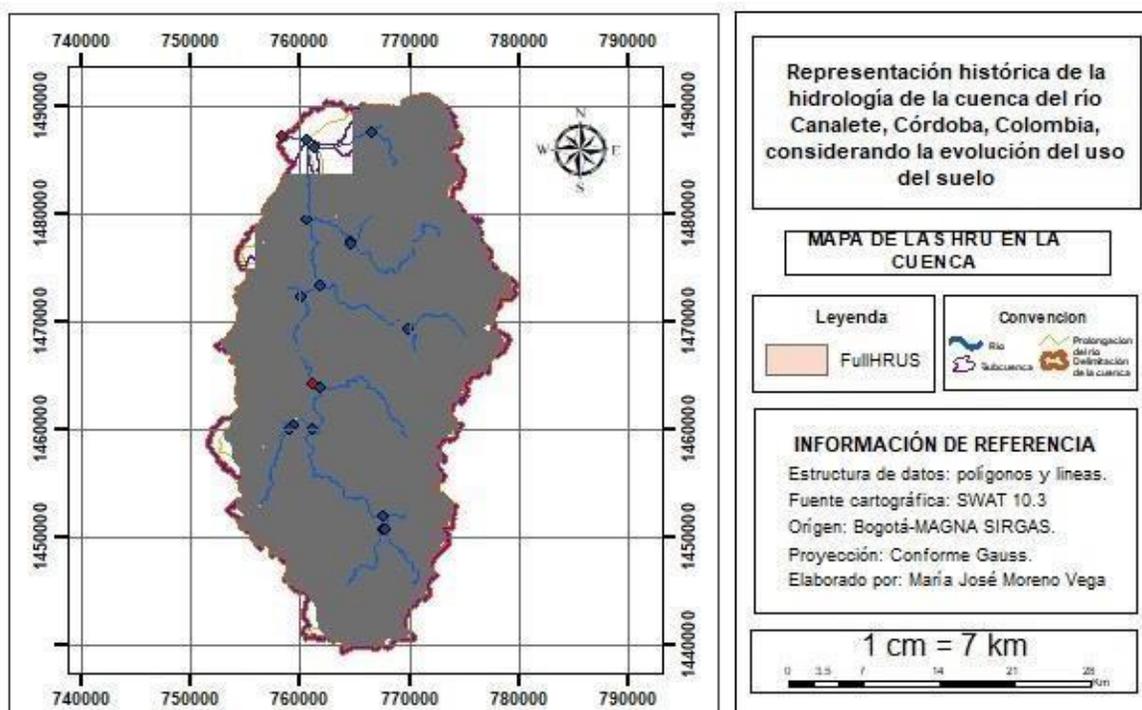


Figura 13. Mapa HRU de la cuenca del río Canalete. Fuente: Elaboración propia

Por último, los datos climáticos registrados por las estaciones fueron revisados para la depuración de datos anómalos y llenado de datos faltantes; una vez que se tuvieron los datos debidamente procesados, se utilizó la herramienta Weather Data Definition que está dentro de la carpeta Write Input Tables del ArcSWAT, para definir los parámetros que se van a simular con el motor climático global de SWAT, en donde se especifica cuáles parámetros son los que se van a simular con información de las estaciones meteorológicas. Debido a la información disponible y suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, los parámetros que no se van a simular con el motor climático global son la precipitación y la temperatura.

Para el ingreso de los datos de precipitación se necesitó crear una carpeta donde se debían tener un archivo en formato de texto plano (txt) para cada una de las estaciones, con las precipitaciones diarias desde 1985 hasta 2015. Este programa discrimina los años por bisiestos y los meses con sus respectivos días completos. En esa misma carpeta se debe tener un archivo .txt con la información de las estaciones (**figura 14**).

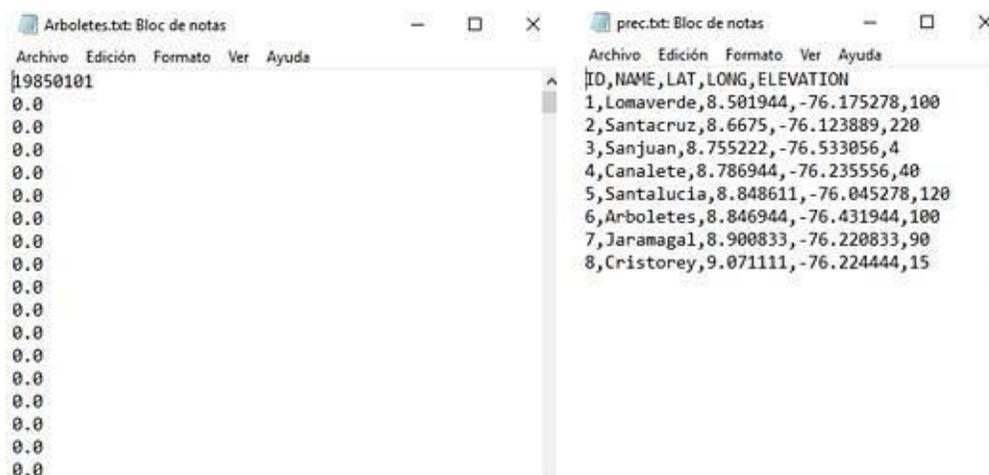


Figura 14. Formato de ingreso de datos de la precipitación. Fuente: Elaboración propia.

Para el ingreso de los datos de temperatura se necesitó crear una carpeta donde se debían tener archivos .txt para cada una de las estaciones, con las temperaturas mínimas y máximas diarias registradas desde 1985 hasta 2015 (separadas por una coma), este programa discrimina los años por bisiestos y los meses con sus respectivos días completos. En esa misma carpeta se debe tener un archivo .txt con la información las estaciones (figura 15).

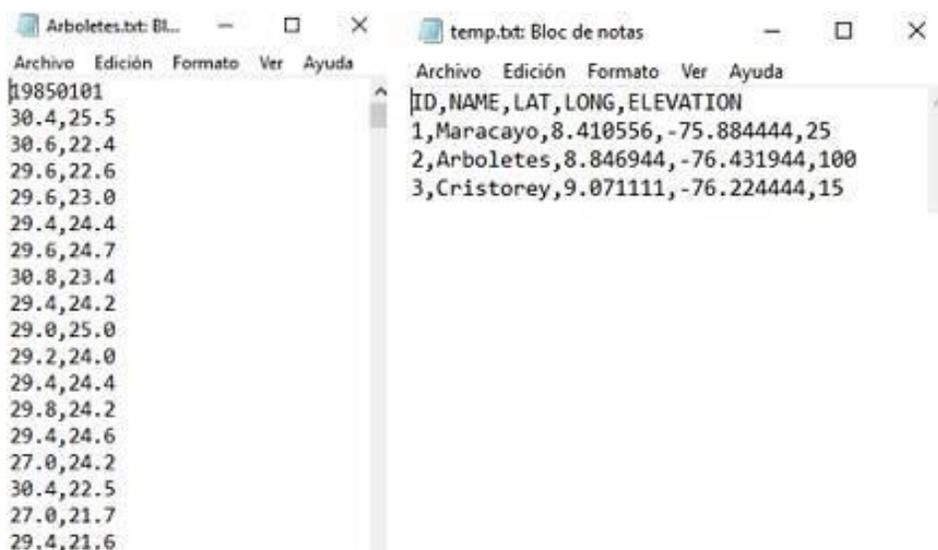


Figura 15. Formato de ingreso de datos de la temperatura. Fuente: Elaboración propia

En esta misma ventana, en la pestaña de *Rainfall Data*, se seleccionó la opción *Raingages* y se ingresa la dirección de ruta donde se encuentran guardados los TXT de precipitación y en la pestaña de *Temperature Data* se selecciona la opción de *Climate Station* y al igual que en la precipitación se ingresa la ruta donde se encuentra el TXT.

Luego que la anterior información estuvo debidamente procesada en el software, se procedió a realizar la simulación en la opción de SWAT *simulation*. Aquí se abrió una pestaña, en la cual se establecieron los datos de corrida del modelo, iniciando el 1/1/1995 hasta el 12/31/2015, con un tiempo de calentamiento de tres años, este tiempo de calentamiento corresponde a iteraciones y simulaciones tres años previos al rango de fechas estipulado para la simulación, con el objetivo de que el modelo presente un menor rango de error. Luego de que el programa termina la simulación, se va a la opción SWAT *Output*, en la que está disponible la simulación para exportar en un archivo de base de datos. Este procedimiento se realizó con la información de las capas de información de los años 1996, 2005, 2011 y 2015.

Cambios Hidrológicos ocasionados

La fase cuatro inicia una vez obtenidos los resultados de caudal de las simulaciones en el punto de monitoreo para un periodo de tiempo seleccionado y para las configuraciones pasadas del uso del suelo de la cuenca. En esta fase se analizaron los datos resultantes de las modelaciones realizadas en la fase 3; con base en esto, se definieron los tres escenarios, en los cuales se identificaron los cambios hidrológicos ocasionados en la cuenca hidrográfica.

Para definir los escenarios en los cuales se determinaron los cambios hidrológicos ocasionados, fue necesario realizar un análisis estadístico basado en el coeficiente R^2 , el cual devuelve el cuadrado del coeficiente del momento de correlación del producto Pearson de los datos, permitiendo comparar la semejanza de los datos resultantes de la modelación con los datos reales obtenidos del Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del río Canalete y que se representó en una gráfica mensual multianual (**figura 16**).

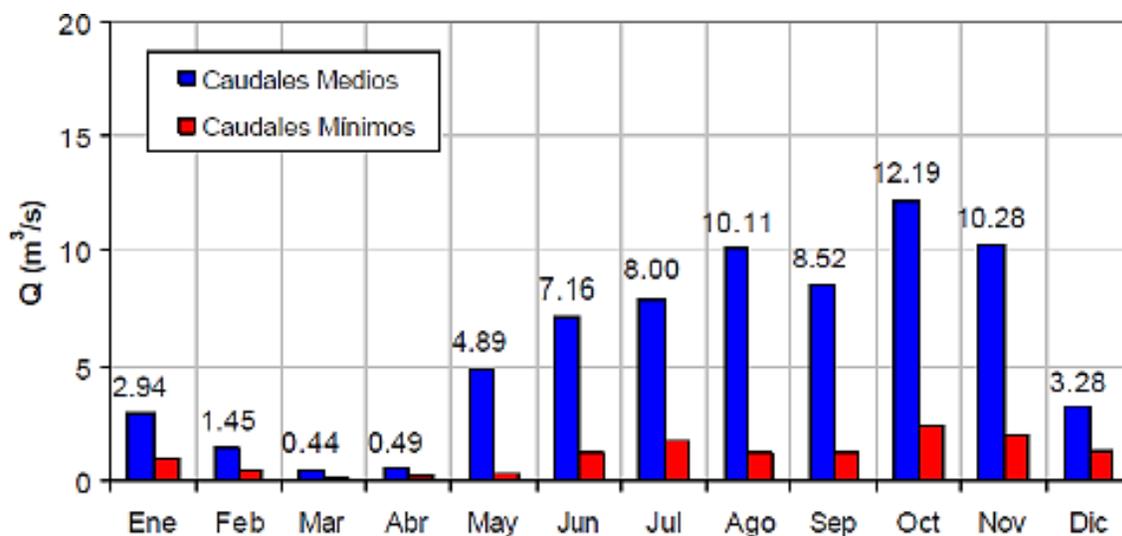


Figura 16. Caudal promedio mensual multianual del río Canalete. Fuente:(CVS, 2005)

De esta manera, se obtuvieron las gráficas para el año 1996, 2001, 2005, 2011 y 2015 (figura 17).

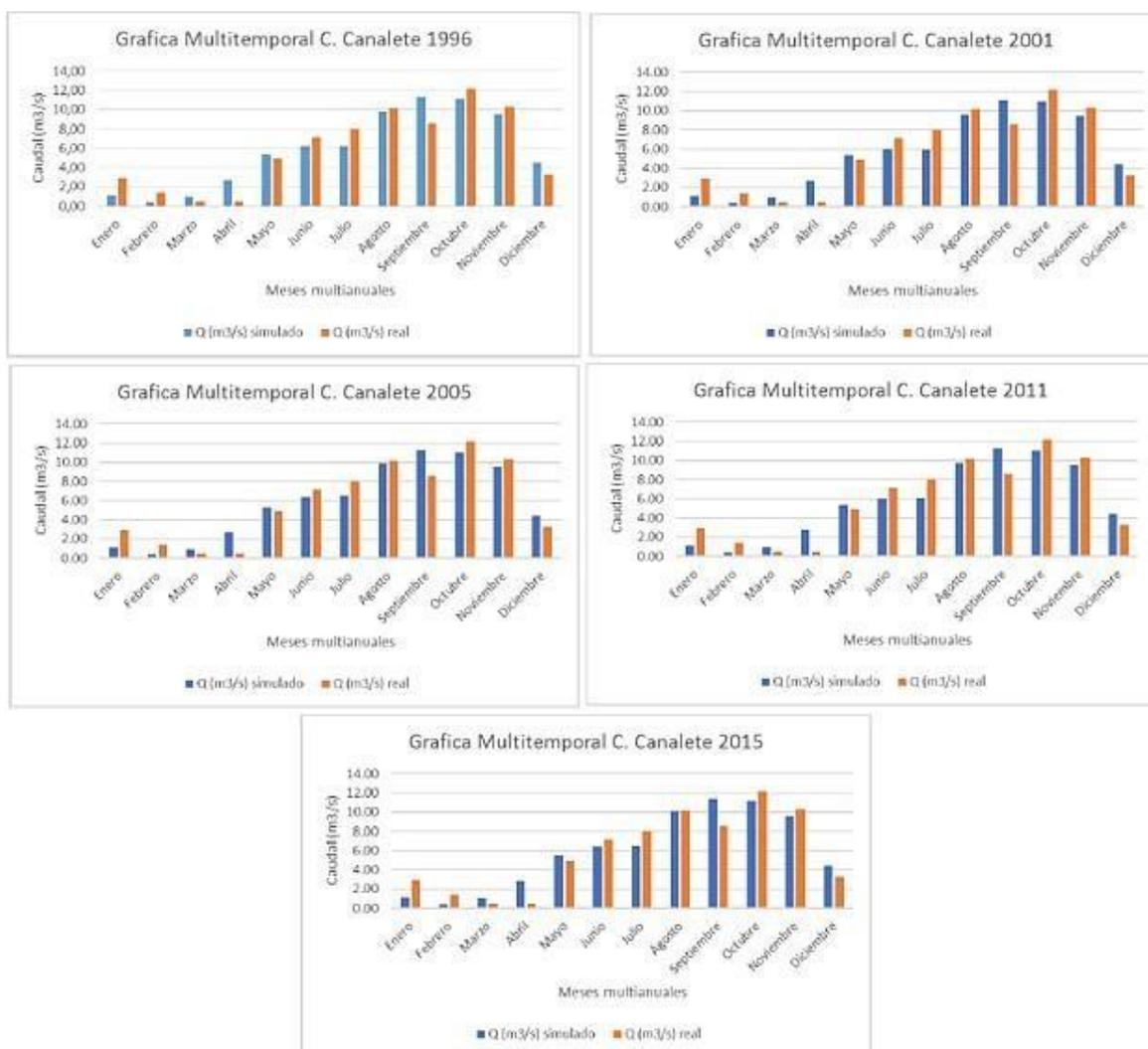


Figura 17. Gráficas multitemporales de la cuenca del río Canalete. Fuente: (CVS, 2005)

Adicionalmente, se pudo establecer que los valores de R^2 para cada capa simulada, son respectivamente para cada año de 0.8649, 0.8606, 0.8758, 0.8612 y 0.8673, estos valores representan una semejanza de los caudales simulados con los reales. Ahora bien, teniendo en cuenta este coeficiente, los escenarios que se seleccionaron para identificar y determinar los cambios hidrológicos ocasionados en la cuenca hidrográfica, fueron las configuraciones pasadas de uso del suelo correspondientes a 1996, 2005 y 2015, las cuales en su análisis estadístico arrojaron un cuadrado de coeficiente de correlación más cercanos a 1, lo que indicó que los datos de caudal simulado para estas configuraciones son los más semejantes y representativos con respecto a los datos de caudal real y a su vez corroboró la veracidad de los datos producto de la modelación.

Con relación al comportamiento del cambio del uso del suelo para los tres escenarios seleccionados, se construyeron los mapas mostrados en la **figura 18**.

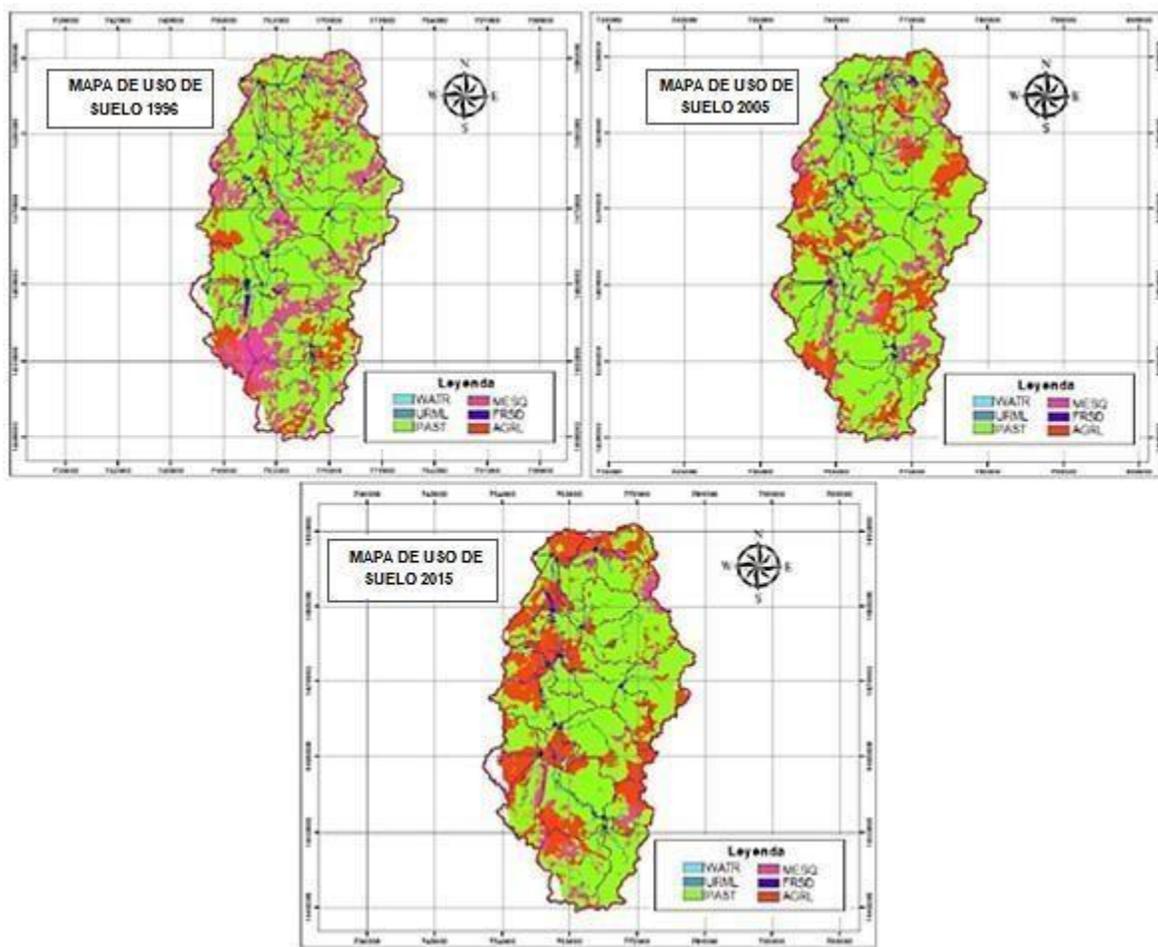


Figura 18. Evolución del cambio de uso de suelo en la cuenca del río Canalete. Fuente: Elaboración propia

En el primer gráfico prevalece el uso del suelo PAST, que corresponde a pastos, en el segundo gráfico la cobertura de uso de suelo que prevalece es PAST y AGRL, que corresponde a pasto y agricultura, mientras que en la tercera capa se encontró que prevalecen los usos del suelo de PAST y AGRL y un decaimiento de MESQ, que corresponde a la clasificación de arbustos, según la interpretación de la leyenda.

Una vez ingresados todos los datos o requerimientos de entrada, se realiza la simulación y se obtienen los caudales generados en la cuenca para las condiciones de los escenarios. Los datos de caudal que se analizaron y se compararon fueron los obtenidos en el punto de monitoreo, con los cuales se realizó un análisis gráfico multitemporal para visualizar el comportamiento hidrológico de la cuenca (**figura 19**).

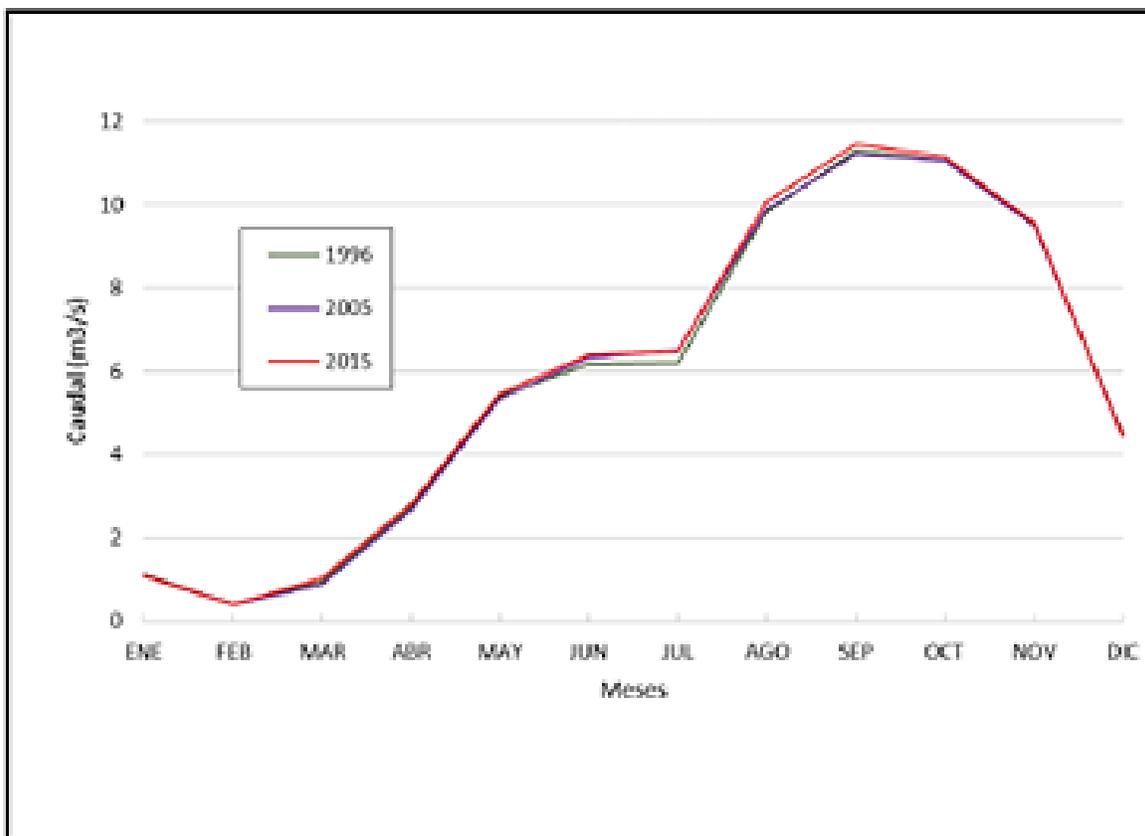


Figura 19. Caudales de los escenarios modelados multitemporalmente. Fuente: Elaboración propia

De la **figura 19** se concluye que las variaciones en épocas de caudales bajos no fueron representativas, ya que son muy similares para los tres escenarios y por tal motivo no fueron considerados en el análisis hidrológico; mientras que en las épocas de caudales de transición de bajos a altos y las épocas de caudales altos, sí fueron representativas, ya que se logró visualizar un aumento en los caudales mensuales multianuales de los escenarios.

Con la finalidad de relacionar las variables de cambio de uso de suelo e hidrológicas, se realizó una gráfica de caudales máximos diarios anuales, excluyendo los años donde se presentaron eventos climáticos como el del NIÑO y el de la NIÑA y así verificar su comportamiento (**figura 20**).

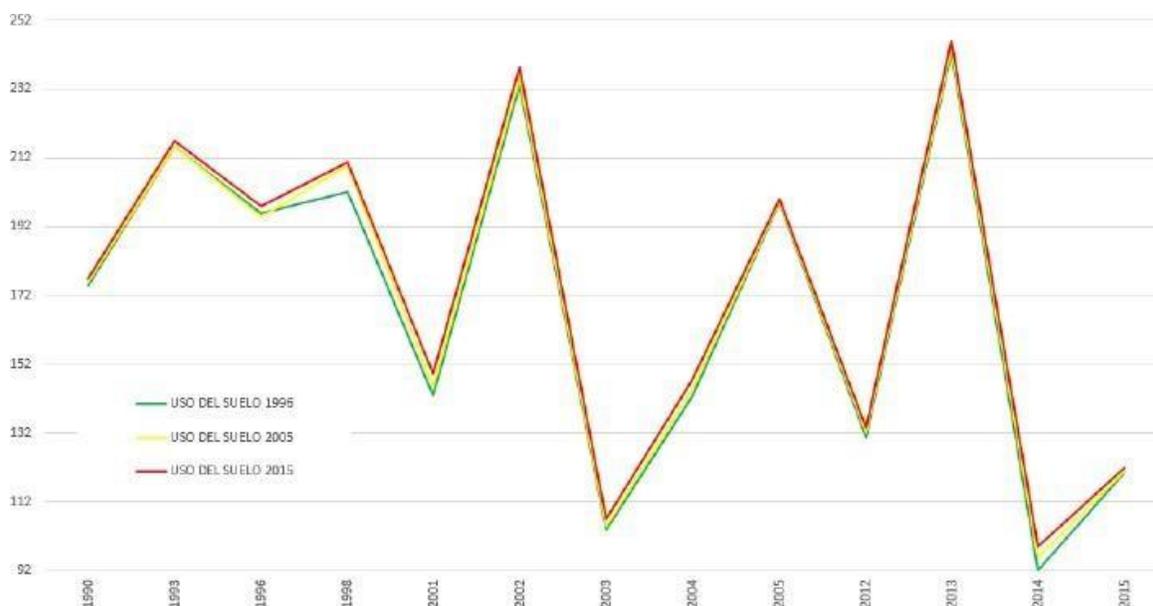


Figura 20. Caudales máximos diarios anuales de los escenarios modelados. Fuente: Elaboración propia

De la gráfica se pudo establecer que, para épocas de caudales de transición de bajos a altos y las épocas de caudales altos, hay un aumento de los caudales simulados si se comparan los caudales máximos diarios anuales producto de la simulación, entre cada configuración pasada de uso del suelo.

Ahora bien, si se comparan los resultados obtenidos en los tres escenarios a lo largo del periodo de estudio, donde la configuración de uso de suelo varía, se observan cambios en los caudales que se traducen en aumento de escorrentía superficial, demostrando de manera evidente que el cambio de uso de suelo es una de las variables determinantes en el cambio hidrológico de la cuenca.

Conclusiones

Los resultados obtenidos del procedimiento empleado para la evaluación del ciclo hidrológico de la cuenca, sugirieron una disminución de la cobertura de arbustos relacionado con el aumento de la cobertura de uso de suelo de pastos y la cobertura de uso de suelo de cultivos, por lo que la ausencia de cobertura arbórea por el cambio de la cobertura vegetal, la labranza continua y el pastoreo, ha impactado de manera significativa los caudales de escorrentía superficial, debido a que las copas de los arbustos, sus tallos, sus raíces y la hojarasca que generan, aumentan el tiempo de infiltración de las precipitaciones.

Este estudio de investigación evidenció que las alteraciones a la dinámica hidrológica de la cuenca, está atribuido al cambio de uso de suelo; esto se puede concluir ya que se registraron incrementos en los caudales después de realizar cambios en cuanto a las configuraciones pasadas de uso de suelo en los escenarios definidos, que muestran una disminución del área de arbustos y un aumento en los pastos y cultivos.

La realización de la simulación en diversos escenarios de configuración pasada de uso de suelo en la cuenca hidrográfica, dio la posibilidad de observar el comportamiento de la variable de interés y determinar que, para estos escenarios, la presencia de fenómenos climatológicos representaría un aumento de los caudales de escorrentía superficial de la cuenca hidrográfica, que se traducen en inundaciones de potencial riesgo para la comunidad.

A pesar de que los parámetros que necesita el modelo para realizar la simulación no fueron calibrados, ya que no se contó con disponibilidad de datos referencia de calibración, los resultados de caudales modelados fueron muy cercanos a la realidad, por lo que este ejercicio de un modelo sin calibración es un importante indicador de su funcionamiento en situaciones en donde se cuenta con poca disponibilidad y accesibilidad de datos de medición de caudales puntuales. Esta característica es una de las ventajas del modelo SWAT, ya que representa el ciclo hidrológico de una cuenca hidrográfica y permite tener un aproximado de los diferentes procesos que se estén desarrollando en ella sin una calibración previa.

Referencias

- Corporación Autónoma Regional de Los Valles del Sinú y del San Jorge. (2005). *Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica río Canalete*, pp. 12-77.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. (20 de abril del 2010). Swat: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. swat2005-tutorial-spanish. Retrieved 04 10, 2015, from Soil and Water Assessment Tool. "Swat". Recuperado de <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Goudie, A. (1990). *The human impact on the natural environment*. Oxford: Basil Blackwell.
- Gumindoga, W., Rientjes, T., Haile, A. T. y Dube, T. (2014). Predicting streamflow for land cover changes in the Upper Gilgel Abay River Basin, Ethiopia: A TOPMODEL based approach. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 76, 3-15. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706514000977>
- Hough, M. (1984). *City Form and Natural Processes*. London: Croom Helm Publishers.
- Maass, J. (1995). *Tropical deciduous forest conversion to pasture and agriculture. Seasonally dry tropical forests*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 399-422.
- Rawat, J., Biswas, V., Kumar, Manish., (2013). Changes in land use/cover using geospatial techniques: A case study of Ramnagar town area, district Nainital, Uttarakhand, India. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* 16, 111–117. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982313000069>

- Sahagian, D. (2000). Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution, *Global and Planetary Change*, 25, 39-48. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818100000205>
- Sharma, K. P., Vorosmarty, C. J. y Moore, B. (2000). Sensitivity of the Himalayan hydrology to land-use and climatic changes. *Climatic Change*, 47(1-2), 117-139. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1005668724203>
- Singh, P., Thakur, J., Kumar, S., Singh, U., (2012). Assessment of land use/land cover using Geospatial Techniques in a semiarid region of Madhya Pradesh, India. In: Thakur, Singh, Prasad, Gossel (Eds.), *Geospatial Techniques for Managing Environmental Resources*. Springer and Capital Publication, Heidelberg, Germany, pp. 152–163. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-1858-6_10
- Sylla, L., Xiong, D., Zhang, H.Y., Bangoura, S.T., (2012). A GIS technology and method to assess environmental problems from land use/cover changes: Conakry, Coyah and Dubreka region case study. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* 15, 31–38. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982311000378>
- Uribe, N. (2010). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Recuperado de <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Weng, Q. (2001). Modeling Urban Growth Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS. *Environmental Management*, N° 28, Vol. 6, p. 737-748. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs002670010258>
- YanYun, N., Xin, L., Jian, Z., XiaoLi, H., (2014). Impact of land use change on water resource allocation in the middle reaches of the Heihe River Basin in northwestern China. *J.Arid Land* 6 (3), 273–286. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s40333-013-0209-4>