

**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**

**LUISA NATHALIE HERNÁNDEZ CALDERÓN
JULIÁN ALEXANDER SALAMANCA CARVAJAL**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS
BOGOTÁ, D. C.
JUNIO DE 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.**

LUISA NATHALIE HERNÁNDEZ CALDERÓN

JULIÁN ALEXANDER SALAMANCA CARVAJAL

Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos

Asesor: JUAN SEBASTIÁN DE PLAZA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ, D. C.

JUNIO DE 2019



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Introducción	2
Generalidades del Trabajo de Grado	4
Línea de Investigación	4
Planteamiento del Problema.....	4
Antecedentes del problema	7
Pregunta de investigación	8
Justificación.....	8
Objetivos	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
Marcos de Referencia.....	10
Marco Conceptual	10
Marco Teórico	12
Modelación Hidrológica.....	12
Hidrología	13
Ciclo Hidrológico.....	15

Coberturas vegetales	17
Modelos hidrológicos.....	18
Marco Jurídico	24
Marco Geográfico	32
Marco Demográfico	33
Estado Del Arte	34
A nivel internacional	35
A nivel nacional	36
A nivel regional	37
A nivel local	38
Materiales y metodología.....	39
Fases de la investigación	39
Recopilación de información	41
Procesamiento y análisis de información.....	42
Análisis climatológico de la cuenca hidrográfica	55
Determinación de pendientes en la cuenca hidrográfica.....	64
Caracterización del suelo	65
Análisis de coberturas vegetales	67
Modelación hidrológica (SWAT)	75

Predicción del comportamiento hidrológico de la cuenca	81
Análisis de resultados.....	82
Relación del cambio de coberturas en los tres períodos analizados.....	82
Resultados de la modelación 2000–2002.....	86
Resultados de la modelación 2005 – 2009.....	86
Resultados de la modelación 2010 – 2012.....	88
Calibración del modelo hidrológico.....	89
Correlación de caudales simulados con la variación de la cobertura vegetal en la cuenca del río Sardinata	91
Análisis para el período 2000-2002	91
Conclusiones	103
Recomendaciones.....	106
Bibliografía	108

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Leyes en Colombia relacionadas con el tema objeto del presente estudio	24
Tabla 2. Decretos en Colombia relacionadas con el tema objeto del presente estudio.....	26
Tabla 3. Resoluciones en Colombia relacionadas con el tema de investigación	30
Tabla 4. Recolección de información necesaria para la modelación hidrológica y sus respectivas fuentes	41
Tabla 5. Zonificación hidrográfica de la cuenca del río Sardiata.....	45
Tabla 6. Área de la cuenca y subcuencas del río Sardiata.....	46
Tabla 7. Perímetro de las subcuencas de la cuenca del río Sardiata	46
Tabla 8. Cotas máximas y mínimas de las subcuencas de la cuenca del río Sardiata.....	47
Tabla 9. Datos de hipsometría de la cuenca del río Sardiata	50
Tabla 10. Estaciones del IDEAM seleccionadas para la modelación con SWAT	53
Tabla 11. Valores de temperatura media mensual multianual de la serie de datos 1981 - 2010	55
Tabla 12. Valores de temperatura máxima mensual multianual de la serie de datos 1981-2010	58
Tabla 13. Valores de temperatura mínima mensual multianual de la serie de datos 1981 - 2010	59
Tabla 14. Valores de precipitación media mensual multianual de la serie de datos 1981 - 2010	61
Tabla 15. Clasificación de pendientes considerada para el presente estudio	64

Tabla 16. Unidades cartográficas de suelo identificadas en la cuenca del río Sardinata	67
Tabla 17. Coberturas de la tierra en la cuenca del río Sardinata – periodo 2000 a 2002.....	70
Tabla 18. Coberturas de la tierra en la cuenca del río Sardinata – período 2005 a 2009.....	71
Tabla 19. Coberturas de la tierra en la cuenca del río Sardinata – periodo 2010 a 2012.....	73
Tabla 20. Parámetros de los suelos requeridos por SWAT.....	76
Tabla 21. Reclasificación de coberturas con SWAT.....	77
Tabla 22. Escorrentía generada por el modelo para el período de 2000 a 2002	92
Tabla 23. Escorrentía generada por el modelo para el período de 2005 a 2009 – Parte 1	95
Tabla 24. Escorrentía generada por el modelo para el período de 2005 a 2009 – Parte 2	96
Tabla 25. Escorrentía generada por el modelo para el período de 2010 a 2012	99
Tabla 26.....	¡Error! Marcador no definido.

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Marco conceptual.....	11
Figura 2. Localización general de la cuenca del río Sardinata.....	33
Figura 3. Marco metodológico.....	40
Figura 4. Subcuencas delimitadas en la cuenca del río Sardinata.....	44
Figura 5. Perfil longitudinal del cauce principal.....	50
Figura 6. Curva hipsométrica de la cuenca del río Sardinata.....	52
Figura 7. Estaciones hidrometeorológicas consideradas en el presente trabajo.....	54
Figura 8. Distribución media mensual multianual de la temperatura.	56

Figura 9. Distribución media mensual multianual de la temperatura.	56
Figura 10. Distribución espacial de la temperatura media en la cuenca del río Sardinata.	57
Figura 11. Distribución media mensual multianual de la temperatura máxima.	58
Figura 12. Distribución media mensual multianual de la temperatura mínima.	59
Figura 13. Distribución temporal de precipitación media mensual multianual.	62
Figura 14. Distribución espacial de precipitación media en la cuenca del río Sardinata.	63
Figura 15. Distribución espacial de pendientes en la cuenca del río Sardinata.	65
Figura 16. Unidades cartográficas de suelo en la cuenca del río Sardinata.	66
Figura 17. Coberturas de la tierra presentes en la cuenca del río Sardinata, período 2000 -2002.	69
Figura 18. Coberturas de la tierra presentes en la cuenca del río Sardinata, periodo 2005-2009.	72
Figura 19. Coberturas de la tierra presentes en la cuenca del río Sardinata, periodo 2010-2012.	74
Figura 20. Formato localización estaciones.	78
Figura 21. Formato de ingreso a SWAT de datos de las variables climáticas.	79
Figura 22. Variación de las coberturas de la tierra presentes en la cuenca del río Sardinata - 2000 a 2012.	83
Figura 23. Correlación de los datos observados vs. los obtenidos en la modelación para el período 2000 - 2002.	86
Figura 24. Correlación de los datos observados vs. los obtenidos en la modelación para el período 2005 - 2009.	87

Figura 25. Correlación de los datos observados vs. los obtenidos en la modelación para el período 2010 - 2012.....	88
Figura 26. Resultados de la calibración de caudales observados vs. los obtenidos en la modelación para el período 2005 - 2009.....	90
Figura 27. Relación de precipitación y escorrentía generada en el período 2000 a 2002.....	93
Figura 28. Escorrentía generada en el período 2005 a 2009.....	97
Figura 29. Escorrentía generada en el período 2010 a 2012.....	100
Figura 30. Variación de las coberturas de la tierra presentes en la cuenca del río Sardinata - 2000 a 2012.....	102

Resumen

En el presente estudio se verificó por medio de un análisis multitemporal los cambios presentados en la cobertura vegetal desde el año 2000 hasta el 2012 en la cuenca hidrográfica de Sardinata, posteriormente se realizó el procesamiento y modelación de datos hidrológicos determinando la influencia que ha tenido la variación de las coberturas en la generación de caudales pico de la misma. A partir de lo anterior, se identificó que si bien la escorrentía ha presentado un aumento en la cuenca la variación de las coberturas no es tan significativa para generar caudales pico.

Palabras clave: caudales pico, cobertura vegetal, cuenca hidrográfica, escorrentía y SWAT.

Abstract:

In the present study, the changes presented in the plant cover from 2000 to 2012 in the Sardinata river basin were verified through a multitemporal analysis, followed by the processing and modeling of hydrological data determining the influence that the variation of the land covers in the generation of peak flows of the same. From the above, it was identified that although the runoff has presented an increase in the basin, the variation of the coverage is not so significant to generate peak flows.

Keywords: Watershed, land cover, runoff, peak flows and hydrological modeling.

Introducción

La cobertura vegetal presente en una cuenca hidrográfica constituye un elemento importante en la regulación de caudales, ya que entre otras funciones controla la generación de inundaciones. Considerando lo anterior, es indispensable conservar y mantener las coberturas naturales; sin embargo, el desarrollo de actividades (con fines económicos en su mayoría) que implican la remoción de este recurso como la deforestación, representan una amenaza en la preservación de este recurso.

Es indispensable entender que la deforestación en cuencas hidrográficas genera daños tanto al ambiente como a la población aledaña, en este último caso se encuentran las pérdidas económicas, materiales o incluso pérdidas humanas.

En Colombia, el departamento de Norte de Santander se encuentra entre los 10 primeros departamentos con mayores tasas de deforestación, siendo Sardinata uno de los tres municipios que encabezan el reporte del departamento. La tala excesiva en Sardinata obedece al incremento en el establecimiento de cultivos ilícitos.

En línea con lo anterior, en Sardinata ya se han evidenciado efectos asociados con la deforestación en la cuenca del río Sardinata (área objeto de análisis del presente estudio), ya que el municipio se encuentra constantemente en el sistema de alertas tempranas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Con el presente trabajo se busca relacionar, por medio de un análisis multitemporal y el procesamiento y modelación de datos hidrológicos, los cambios presentados en la cobertura vegetal desde el año 2000 hasta el 2012 y la influencia que los mismos han tenido en la generación de caudales pico de la cuenca; asimismo, se busca predecir, a partir de los datos evaluados, la generación de caudales pico, con el fin de suministrar información relevante para el municipio y sus sistemas de alerta temprana.

Generalidades del Trabajo de Grado

Línea de Investigación

Considerando las líneas de investigación definidas para los trabajos de grado de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Católica de Colombia, el presente trabajo de grado se enmarca en la línea de investigación denominada «GESTIÓN Y TECNOLOGÍA PARA LA SUSTENTABILIDAD DE LAS COMUNIDADES», en especial para el subtema «Saneamiento de comunidades».

Planteamiento del Problema

La cobertura vegetal juega un papel importante en la conservación del ambiente, ya que entre otras funciones, mantiene la estabilidad hídrica debido a su participación en los componentes del ciclo del agua; asimismo, influye en los procesos de regulación de caudales en las cuencas hidrográficas, puesto que frena y dirige las corrientes hacia cursos de agua e incrementa la tasa de infiltración al suelo; a su vez, actúa como una «esponja» que retiene agua, liberándola luego en un tiempo paulatino. De ahí que incremente la estabilidad del suministro de agua, mitigando los niveles de inundación en una cuenca (Bennett, 1998).

Cabe señalar que la regulación del rendimiento hídrico en una cuenca hidrográfica dependerá del tipo, características y cantidad de cada cobertura vegetal presente. Considerando lo anterior, es indispensable conservar y mantener las coberturas naturales; sin embargo, en la actualidad y aun conociendo el importante papel que juega la vegetación en los procesos naturales del ambiente, la degradación y pérdida de la misma constituye uno de los panoramas más preocupantes a nivel

mundial. Actividades como la deforestación, entendida por DeFries et al. (2006) como la conversión directa y/o inducida de la cobertura bosque natural a otro tipo de cobertura de la tierra en un período de tiempo determinado. Esta acción de conversión se genera principalmente por la ejecución de actividades de origen antrópico, como la tala o quema de árboles realizada para el desarrollo de labores de ampliación de la barrera agrícola, minería ilegal, cultivos ilícitos, entre otros. Por tal razón, se generan múltiples efectos en la vegetación, así como la pérdida de biodiversidad, desertización, inundaciones, etc.

Para el caso de las cuencas hidrográficas, los efectos de la deforestación se resumen en la reducción de caudales medios y el aumento de los caudales extremos, lo que implica inundaciones y sequías (mayor intensidad y frecuencia) (Poveda & Mesa, 1995), es decir, un desbalance en la regulación hídrica.

Es indispensable entender la estrecha relación que existe entre la deforestación y la regulación hídrica de una cuenca, ya que al mantener un balance entre las dos se evitan efectos como las inundaciones, las cuales generan pérdidas económicas y afectaciones a las poblaciones aledañas a los cuerpos de agua o, en los casos más trágicos, generando la pérdida de vidas humanas.

Tal es el caso del más reciente desastre en Colombia, presentado en Mocoa–Putumayo durante la noche del 31 de marzo y la madrugada del 1 de abril de 2017, en el que según el reporte de situación Nro. 11 de la Cruz Roja Colombiana (2017), 323 personas fallecieron, 332 resultaron heridas y 5883 familias se registraron como damnificadas. Entre los diferentes factores que se consideran contribuyeron a la tragedia, se tienen las malas prácticas de los sectores productivos en las zonas ribereñas, que promueven procesos de erosión y afectaciones en el tiempo de respuesta

de la cuenca (Cárdenas, 2018), así como la deforestación en cercanías a las fuentes hídricas, construcción de viviendas y el cambio climático (El espectador, 2017).

Respecto al proceso de deforestación en Colombia, es pertinente mencionar que los índices a nivel nacional demuestran que Norte de Santander se encuentra entre los 10 primeros departamentos con las tasas de deforestación más altas en el país; los cambios en los bosques muestran que para el 2016, unas 14000 hectáreas de reserva forestal dejaron de existir por la intervención humana en este departamento, presentando grandes concentraciones de tala en los municipios de Tibú, El Tarra y Sardinata, en donde ya no se aprecia la capa verde que cubría toda la extensión montañosa (La Opinión, 2018).

Por lo tanto, una de las principales razones de la excesiva deforestación en el departamento es la tala indiscriminada para el establecimiento de cultivos ilícitos; de acuerdo con el informe de monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos del año 2016 de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC, 2016), Norte de Santander ocupó el tercer puesto de los departamentos con mayor crecimiento de cultivos de coca en el país, presentando el 17 % del total en ese año, del cual un 3 % corresponde al municipio de Sardinata (municipio objeto de análisis del estudio).

Como consecuencia de la deforestación y las condiciones geológicas en Sardinata, el municipio se mantiene constantemente en el sistema de alertas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), p.ej., en el mes de abril del año 2017 el municipio estuvo en alerta naranja debido a la tala indiscriminada que se realiza, por lo que se recalcó que Sardinata en

ese momento ocupaba el undécimo puesto en concentración de alertas tempranas por deforestación, específicamente con el 1.9 % (La Opinión , 2017).

Es aquí donde surge el interés por desarrollar el estudio sobre la cuenca del río Sardinata, que como se mencionó previamente, el fin es verificar los cambios presentados en la cobertura vegetal desde el año 2000 hasta el 2015, además de mostrar la influencia de este tipo de coberturas en la generación de caudales pico de la cuenca; asimismo, se busca predecir, a partir de los datos evaluados, la generación de caudales pico para así suministrar información relevante para el municipio y sus sistemas de alerta temprana.

Antecedentes del problema

En Colombia se han desarrollado estudios enfocados en analizar la influencia de la cobertura vegetal en la regulación hídrica de diferentes cuencas del país, con el fin de implementar acciones que contribuyan en la conservación de la vegetación. Así, evitar tragedias relacionadas con inundaciones, avalanchas, entre otras.

Para el caso de Sardinata, se realiza la revisión bibliográfica sobre estudios relacionados con los efectos hidrológicos de la deforestación en el municipio, evidenciando la inexistencia de los mismos. Sin embargo, el tema de cultivos ilícitos en Sardinata, asunto que está implícito en este estudio, ha sido abordado por diferentes entidades oficiales, privadas y educativas; como es el caso de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) en el marco del monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos en Colombia.

De la misma manera, en el año 2017 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Instituto Amazónico de Investigación Científica (SINCHI), la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GIZ), el IDEAM y la UNODC publicaron el documento *Coca y deforestación: Mensajes de acción para la planeación del desarrollo*, cuyo objetivo es transmitir información sobre la relación de los cultivos de coca con la degradación y deforestación del bosque, específicamente para las zonas de la Amazonía y el Catatumbo (GIZ, MADS, IDEAM, SINCHI, & UNODC, 2017, pág. 3).

En relación con lo anterior, Laura Camargo —en el año 2017— en su trabajo de grado titulado *Lineamientos para la gestión de la deforestación, generada por los cultivos ilícitos asociados al conflicto armado, en el municipio de Tibú, en el contexto del posconflicto*, desarrolló la relación entre la generación de cultivos ilícitos, deforestación y conflicto armado. El objetivo principal de su trabajo es el establecimiento de lineamientos enfocados a gestionar la deforestación generada en el municipio Tibú en Norte de Santander, incluyendo dentro de su análisis el municipio de Sardinata (Camargo Vargas, 2017) .

Pregunta de investigación

¿Cuál es la relación entre la variación de la cobertura vegetal de la cuenca Sardinata y la generación de caudales pico en la misma?

Justificación

Considerando que el municipio de Sardinata se encuentra constantemente en el sistema de alertas tempranas del IDEAM (por su alto riesgo de deslizamiento), específicamente por sus

condiciones geológicas y sus altas tasas de deforestación, con este estudio se busca aportar información que sustente los instrumentos de gestión del riesgo del municipio, a partir de un análisis multitemporal, en el cual se determine cómo la variación de las coberturas vegetales en la cuenca hidrográfica Sardinata, influye en la generación de caudales pico.

Sumado a lo anterior, el desarrollo del estudio pretende demostrar, a través del análisis de datos históricos del municipio, que la variación o pérdida de la cobertura vegetal en la cuenca hidrográfica es un hecho que genera consecuencias de tipo ambiental, económico y social, cuyos efectos a corto, mediano y largo plazo son alarmantes, un ejemplo de ello es el aumento de crecientes súbitas.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la influencia del cambio de cobertura vegetal en la generación de caudales pico de la cuenca Sardinata en el departamento de Norte de Santander–Colombia, realizando el análisis multitemporal de la variación de coberturas con el uso de sistemas de información geográfica.

Objetivos específicos

Determinar la variación de las coberturas vegetales presentes en la cuenca Sardinata, desde el año 2000 hasta el 2012 a partir del procesamiento y análisis de información cartográfica existente.

Realizar el estudio de balance hídrico y la caracterización hidrológica de la cuenca Sardinata a partir del procesamiento de datos, esto es, a partir de la precipitación, caudales, entre otros datos, así como las características morfométricas, con el fin de detectar la influencia de la variación de la cobertura vegetal presente en la cuenca Sardinata y su relación con la generación de caudales pico en la misma.

Pronosticar la generación y comportamiento de los caudales en la cuenca Sardinata, de acuerdo con los resultados de modelación obtenidos, con el fin de establecer la correlación entre el cambio de coberturas y la generación de caudales pico.

Marcos de Referencia

Marco Conceptual

A continuación, se presenta en la figura 1 el marco conceptual que enmarca los temas clave para el desarrollo del proyecto. Se expone como eje central la cuenca hidrográfica y las dimensiones que interactúan en esta, mostrando su participación en el ciclo hidrológico. Finalmente, el estudio se integra con la herramienta para la evaluación del suelo y el agua para una cuenca hidrográfica (SWAT), detallando los insumos, procesos y resultados que contempla SWAT (herramienta que constituye el modelo que será utilizado durante el desarrollo del proyecto).

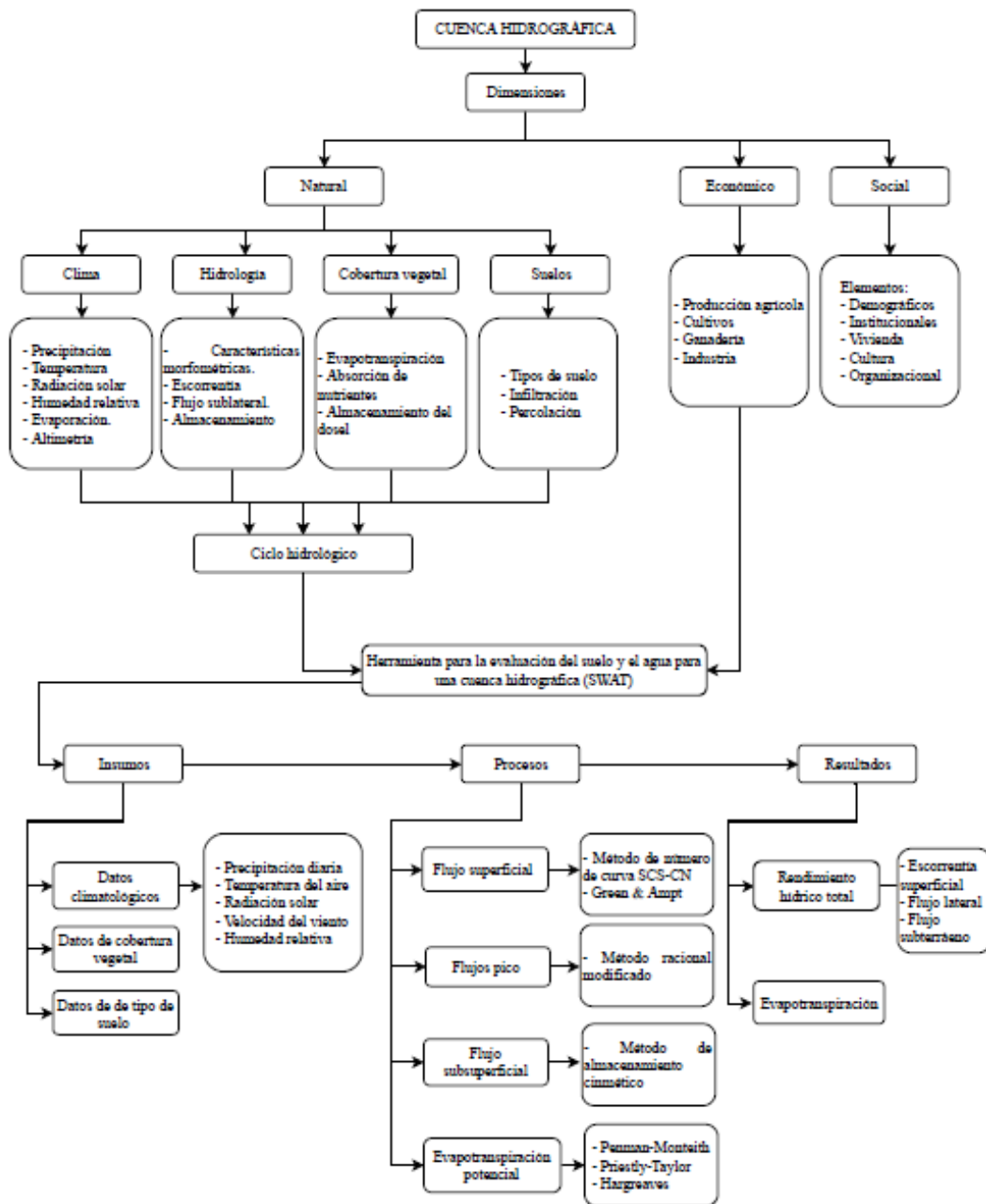


Figura 1. Marco conceptual. Fuente: Elaboración propia.

Marco Teórico

Modelación Hidrológica

El manejo de cuencas juega un papel importante en la protección del suelo y el agua (Nikolaidis, Bouraoui, & Bidoglio, 2013). El estado actual del clima bajo consideración de cambio climático, examina que son recurrentes los eventos meteorológicos extremos (temporadas de lluvias con tormentas más fuertes en menor tiempo y épocas secas con una duración más larga de lo normal). Esta situación respecto al cambio climático ha conllevado a que diversas ramas de la ingeniería se enfoquen, por un lado, en incrementar el control sobre las consecuencias resultantes de eventos extremos y, por otro lado, en buscar soluciones efectivas que ayuden a mitigar y establecer los efectos del cambio de diversos parámetros en las condiciones originales de las cuencas hidrográficas.

Además, el acelerado crecimiento de la población mundial, es directamente proporcional a la intensificación de las actividades de origen antrópico para suplir las necesidades de vivienda, producción de alimento, entretenimiento, entre otros. Dichas actividades llevadas a cabo por el hombre, han obligado a que las áreas con vegetación natural se vean reducidas, especialmente en zonas rurales, dicha reducción de la vegetación se debe principalmente al reemplazo por cultivos (lícitos e ilícitos) y pastizales para ganadería. Este cambio en la cobertura vegetal puede afectar la mayoría de los componentes del ciclo hidrológico, por ejemplo, con la variación de la evaporación altera la radiación neta, la velocidad del viento, el déficit de presión de vapor y la temperatura en la superficie. También se modifica la

escorrentía al incrementar la rugosidad hidráulica, la retención superficial y la tasa de infiltración de agua (Dabney, 1998).

A continuación, se proporcionan elementos básicos para el entendimiento de la modelación hidrológica.

Hidrología

La hidrología desde un punto de vista conceptual, se enfoca en el estudio del agua en la tierra (en todos sus estados sólido, líquido, gaseoso) presente en los diversos procesos del ciclo hidrológico, como lo son la precipitación, escorrentía, evapotranspiración, infiltración, etc. Como lo indican Serrano et al. (2005), existen condiciones específicas que establecen los diferentes regímenes hidrológicos que manejan las cuencas. Dichas características ambientales son, entre otras, el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones, litología, pendientes y la cobertura vegetal, que en conjunto tienen influencia en la cantidad del recurso hídrico disponible en las regiones.

Uno de los principales objetivos que persigue la hidrología es el estudio detallado del balance hidrológico en las cuencas, el cual permite evaluar de forma cuantitativa la disponibilidad del recurso hídrico y sus variaciones a través del tiempo, variaciones que obedecen a modificaciones que en gran medida pueden atribuirse a las actividades asociadas al hombre.

El balance hídrico establece que la diferencia entre las entradas y salidas de agua durante un período de tiempo específico en una cuenca, será igual al cambio del almacenamiento de

la misma durante dicho período; se podría considerar como la ecuación fundamental de la hidrología, que está basada en un balance de masas (Monsalve, 2014), ver ecuación (1):

$$I - O = \Delta s / \Delta t \quad (1)$$

Donde:

I = Entradas: precipitación, importaciones de agua, escorrentía superficial desde otras cuencas y aguas subterráneas desde otras cuencas.

O = Salidas: evaporación, transpiración, escorrentía superficial hacia otras cuencas, exportaciones de agua, aguas subterráneas hacia otras cuencas e infiltración.

Δs = Cambio de almacenamiento, almacenamiento de aguas subterráneas, almacenamiento por cambio de humedad del suelo.

Δt = Cambio de tiempo.

El estudio detallado del balance hídrico en una cuenca, establece acciones para un control, uso y proyección del recurso de una manera eficiente, permitiendo así, garantizar para un período de tiempo prolongado la disponibilidad del líquido vital. Por otro lado, proyecta acciones que mitigan en gran medida las afectaciones causadas a la población por eventos extremos, pues una correcta estimación de caudales pico (IPF) es decisiva para reducir las consecuencias de inundaciones repentinas, así como para el diseño de estructuras hidráulicas (Ding, Wallner, Müller, & Haberlandt, 2015).

Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico o ciclo del agua, es básicamente un modelo que describe el movimiento del agua en el planeta tierra, además contempla dicho elemento en sus diferentes estados (sólido, líquido, gaseoso). El movimiento mencionado anteriormente, sucede en las diferentes capas de la tierra y se desarrolla a través de diversos procesos como lo son la precipitación, evaporación, entre otros. A continuación, se describen algunos de los procesos que hacen parte del ciclo hidrológico.

Evaporación

Desde el punto de vista de la meteorología, corresponde al proceso físico en el cual el agua en estado líquido es transformada a su estado gaseoso, este proceso puede suceder en superficies de agua como lagos, mares o ríos, en agua retenida por la vegetación o incluso se puede generar evaporación a partir de actividad antrópicas. Entre los factores que influyen en la evaporación del agua de manera natural, se encuentra la radiación solar, presión de vapor, presión atmosférica, entre otros (NOAA, 2018).

Condensación

Este proceso es contrario al de la evaporación, pues en este, el vapor pasa de estado sólido a estado líquido. La condensación es llevada a cabo cuando la cantidad de vapor de agua en el aire incrementa de tal manera que supera el punto de saturación, formando rocío, neblina o nubes (NSIDC, 2018).

Precipitación

Se refiere a todas las formas de humedad emanadas de la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre, puede darse en forma de lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada (Monsalve Saénz, 1999).

Infiltración

Es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra. Tiene una relación muy cercana con la percolación, que es el movimiento del agua dentro del suelo. Si no existe percolación, no es posible que se continúe infiltrando agua en las capas superficiales del suelo (Linsley, Kholer, & Paulus, 1977).

Retención Superficial

Es la parte de la precipitación que no aparece como infiltración o no se alcanza a convertir en escorrentía superficial durante la tormenta o inmediatamente después de la misma. La retención superficial está compuesta por una porción de la lluvia que cae durante el principio de la tormenta que es depositada en la cobertura vegetal como intercepción y en las depresiones del terreno como almacenamiento superficial (Linsley, Kholer, & Paulus, 1977).

Escorrentía

Es la porción de la precipitación que ocurre en una zona y que circula sobre o debajo de la superficie terrestre, llegando a una corriente para ser drenada hasta la salida de una cuenca (Breña & Jacobo, 2006).

Coberturas vegetales

El estudio y determinación de los efectos del cambio de cobertura en los caudales generados por una cuenca, proporcionan las herramientas suficientes para analizar con una precisión aproximada los efectos de la reducción de la vegetación nativa en la generación de caudales de una cuenca específica. Así, establecer en qué momento dicho cambio puede ser crítico en la generación de caudales, teniendo implicaciones altamente dañinas para las poblaciones establecidas en las cuencas o aguas abajo de las mismas (Le Maitre, Kotzee, & O'Farrell, 2014).

Cobertura vegetal se le llama a la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, se incluyen las coberturas vegetales naturales (bosques naturales) y las inducidas que son resultado de la acción antrópica (cultivos). Las coberturas de la tierra proporcionan información fundamental para diversos procesos nacionales como los mapas de ecosistemas, conflictos de uso del territorio, ordenación de cuencas y del territorio, seguimiento a la deforestación de los bosques y los inventarios forestales, solo por citar algunos (IDEAM, 2010).

Existen diversas metodologías en cuanto a la clasificación de las coberturas vegetales, una de ellas es la metodología *CORINE (Coordination of Information on the Environmental) Land Cover*, que tiene como propósito la realización de un inventario homogéneo de cobertura de la superficie de la tierra a partir de imágenes de satélite asistida por computador y una posterior generación de una base de datos geográficos.

Modelos hidrológicos

Son representaciones simplificadas de sistemas reales complejos llamados prototipos — bajo forma física o matemática— que están representados por una expresión analítica.

Generalmente el sistema físico real que se representa es la cuenca hidrográfica y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático permitirá tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas al sistema y salidas a partir del mismo, para verificar si el modelo es representativo del prototipo.

La salida de los modelos hidrológicos varía dependiendo de las metas y objetivos del modelo. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escorrentía, mientras que otros están diseñados para ver las tormentas individuales (IDEAM, 2019).

La utilización de modelos hidrológicos es ampliamente aceptada para la toma de decisiones, pues con su uso normalmente se obtienen resultados aceptables en cuanto a las respuestas hidrológicas de las cuencas estudiadas. Considerando que existen diversos

modelos hidrológicos que contemplan diferentes parámetros y que los mismos se utilizan dependiendo de los resultados que se buscan obtener, a continuación, se describirán algunos modelos hidrológicos, entre los que se encuentran: *Soil and Water Assesment Tool (SWAT)*, *Annualized Agricultural Nonpoint Source model (AnnAGNPS)*, *Soil and Water Integrated Model (SWIM)* y *Storm Water Management Model (SWMM)*.

Soil Water Assesment Tool (SWAT)

Es un modelo para simular la calidad y cantidad de flujo superficial y subterráneo; además, predice el impacto ambiental del uso del suelo, estableciendo las prácticas de manejo y el cambio climático en cuencas complejas que tienen variedad de suelos, usos de tierra y por un prolongado período de tiempo; por lo tanto, el modelo no está diseñado para simular un único acontecimiento de flujo detallado (Neitsch, Arnold, & Kiniry, 2011).

Este modelo se basa en la ecuación básica de balance de agua, como se visualiza en la ecuación (2):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Donde:

SW_t = Contenido final de agua en el suelo (mm H₂O).

SW₀ = Contenido de agua en el suelo en el día i (mm H₂O).

t = Tiempo.

R_{day} = Precipitación en el día i (mm H_2O).

Q_{surf} = Escorrentía en el día i (mm H_2O).

E_a = Evapotranspiración en el día i (mm H_2O).

W_{seep} = Agua que entra en la zona no saturada del suelo en el día i (mm H_2O).

Q_{gw} = Caudal en el día I (mm H_2O).

Por otro lado, respecto a la simulación de la escorrentía superficial, el modelo usa el método del número de curva del Servicio de Conservación del Suelo (USDA Soil Conservation Service, 1972). El modelo del SCS-CN es un modelo empírico que no tiene en cuenta la intensidad y duración de las precipitaciones, sino únicamente su volumen. Sin embargo, el modelo SWAT permite introducir estas variables, prediciendo la infiltración con el método de Green & Ampt (Green & Ampt, 1911), modelo que considera los impactos de la intensidad de la lluvia y su duración en los procesos de infiltración (Abdelwahabab, Ricci, De Girolamo, & Gentile, 2018).

En cuanto a la predicción de caudales pico, este modelo utiliza una modificación del método racional, en la cual, la proporción de lluvia que se da en una subcuenca es estimada en función de la precipitación total diaria, utilizando un método estocástico y considerando el tiempo de concentración de la subcuenca a partir del modelo de Manning.

Por último, los aportes del flujo provenientes de las aguas subterráneas o flujo base, se contemplan dividiendo el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: el primero, un acuífero superficial inconfinado que contribuye al flujo base de los drenajes en el interior de

la cuenca; el segundo, un acuífero confinado que termina haciendo parte del flujo de los drenajes exteriores a la cuenca.

Annualized Agricultural Nonpoint Source model (AnnAGNPS)

Este modelo fue diseñado para simular cargas de contaminantes y así establecer los riesgos y la relación costo/beneficio de la inclusión de dichos contaminantes en cuencas de gran tamaño. Fue desarrollado con la finalidad de simular transporte de sedimentos y químicos a largo plazo en cuencas con un uso de suelo de agricultura que no han sido medidas. Como componentes básicos de modelación este modelo tiene por un lado la hidrología; por otro lado, tiene el transporte de sedimentos, nutrientes y pesticidas. En este marco nos enfocaremos principalmente en la descripción de las bases de modelación hidrológica, que es lo que se hará con los demás modelos (Bingner R. , Theurer, Yuan, & Taguas., 2018).

El AnnAGNPS incorpora el método del número curva del SCS para la simulación de la escorrentía diaria, para esto solo tiene en cuenta el volumen total de precipitación. Adicionalmente, los caudales picos instantáneos para el tiempo de concentración de la cuenca se calculan usando el método TR-55 del SCS. Otro proceso considerado por este modelo es el del flujo subsuperficial, que se estima utilizando la ecuación de Darcy.

Una limitación del modelo ANNAGNPS —en comparación con otros— es que no tiene en cuenta la simulación del flujo base, que es la contribución del flujo de aguas subterráneas en el caudal.

Soil and Water Integrated Model (SWIM)

Es un modelo para análisis del cambio climático y cambio del uso del suelo. Sirve para determinar los impactos en procesos hidrológicos, producción agrícola y calidad del agua a una escala regional (Krysanova & Wechsung, SWIM User Manual, 2000). El modelo se basa en dos modelos desarrollados anteriormente, el SWAT y el MATSALU, este último fue desarrollado en Estonia para la cuenca de la bahía de Matsalu, con el fin de evaluar diferentes escenarios de manejo para el control de la eutrofización en la bahía.

Con la combinación de los dos modelos, se trataron de conservar las mejores características y mantener las ventajas de estos; por lo tanto, el modelo está basado principalmente en SWAT agregando el esquema de disgregación espacial de MATSALU, además de ajustar el modelo para las condiciones europeas, donde la disponibilidad de datos es diferente.

El módulo de hidrología está compuesto por los siguientes procesos:

Escorrentía superficial: se estima usando una modificación del método del número de curva. La escorrentía superficial es pronosticada como una función no lineal de la precipitación y el coeficiente de retención. Esta depende del contenido de agua, el uso, el tipo y el manejo de los suelos. La modificación del método esencialmente reduce el empirismo del método original del número de curva.

Percolación: el flujo de agua a través de las capas de suelo en la zona radicular se determina de la misma manera que lo hace el SWAT.

Flujo subsuperficial lateral: se calcula al mismo tiempo con la percolación, es usado el modelo de almacenamiento cinemático de Sloan et al. (1983). El enfoque está basado en la ecuación de continuidad de masas en su forma de diferencias finitas con el perfil de suelo completo como volumen de control.

Evapotranspiración: la evapotranspiración potencial es calculada usando el método (Priestley & Taylor, 1972) que requiere datos de radiación solar y temperatura del aire como entradas. También es posible usar el método de Penman-Monteith (Monteith, 1965) si se poseen datos de velocidad del viento y humedad relativa. La evapotranspiración real es estimada siguiendo por separado el concepto de suelo y plantas.

Flujo subterráneo: este componente es el mismo que en SWAT. La percolación del perfil del suelo se asume como recarga del acuífero superficial. El flujo de retorno proveniente del acuífero contribuye directamente al caudal de salida de la cuenca.

Storm Water Management Model (SWMM)

Es un modelo usado para simulaciones de escorrentía en cuanto a cantidad y calidad de un único evento o, por el contrario, para un amplio periodo de tiempo, principalmente en áreas urbanas, a pesar de que existen muchas aplicaciones que pueden ser usadas para sistemas de drenaje en zonas rurales. Es usado para planeación, análisis y diseños relacionados con escorrentías producto de tormentas, como alcantarillados combinados, sanitarios, y otros sistemas de drenaje.

En cuanto a los procesos hidrológicos que considera, incluye reducción de escorrentía usando prácticas de infraestructura verde, variación en el tiempo de la precipitación y evaporación de agua superficial, procesos de intercepción e infiltración, percolación en las capas inferiores del suelo.

Marco Jurídico

En la Constitución Política de Colombia se define la planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, cuyo enfoque es garantizar el desarrollo sostenible, conservación, restauración o sustitución de los mismos. Respecto a la conservación y protección de las cuencas hidrográficas en el país, existen diferentes normas que hoy en día están enfocadas su ordenación y manejo.

A continuación, en la tabla 1 se relacionan las leyes en Colombia que son relevantes y pertinentes para la ejecución del presente estudio:

Tabla 1.
Leyes en Colombia relacionadas con el tema objeto del presente estudio

Norma	Fecha	Autoridad/Entidad que la expide	Tema
Ley 2 de 1959	16 de diciembre de 1959	Congreso de Colombia	Se establece el ordenamiento ambiental y se definen las «Zonas forestales protectoras» y «Bosques de interés general».

Norma	Fecha	Autoridad/Entidad que la expide	Tema
Ley 2811 de 1974	18 de diciembre de 1974	Presidencia de la República	Define el manejo de los recursos naturales renovables (uso y manejo de aguas, suelo, flora y fauna), a su vez, reglamenta el manejo y ordenamiento de las cuencas hidrográficas.
Ley 99 de 1993	22 de diciembre de 1993	Congreso de Colombia	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA).
Ley 373 de 1997	6 de junio de 1997	Congreso de Colombia	Establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
Ley 388 de 1997	18 de julio de 1997	Congreso de Colombia	Dicta normas de Ordenamiento del Territorio Municipal, en las cuales se debe tener en cuenta entre otros aspectos, la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales y la prevención de amenazas y riesgos naturales.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2 y tabla 3 se relacionan los decretos y resoluciones a nivel nacional que reúnen los requerimientos relacionados con manejo y ordenación de cuencas hidrográficas, definición de zonas protectoras forestales, entre otros temas relacionados con el presente estudio.

Tabla 2.
Decretos en Colombia relacionadas con el tema objeto del presente estudio

Norma	Fecha	Autoridad/Entidad que la expide	Tema
Decreto 2278 de 1953	1 de septiembre de 1953	Ministerio de Agricultura	Establece las zonas protectoras o de interés general, siendo las primeras, aquellas que están situadas en las cabeceras de las cuencas de los ríos, arroyos y quebradas.
Decreto 1449 de 1977	27 de junio de 1977	Presidencia de la República	Reglamenta parcialmente el inciso 1° del numeral 5° del artículo 56 de la Ley Nro. 135 de 1961 y el Decreto Ley 2811 de 1974, específicamente en el

Norma	Fecha	Autoridad/Entidad que la expide	Tema
			tema de franjas forestales protectoras.
Decreto 1541 de 1978	28 de julio de 1978	Ministerio de Agricultura	Reglamenta las normas relacionadas con el recurso agua en todos sus estados y comprende, entre otros aspectos, la regulación de ocupaciones de cauce y la conservación de las aguas y sus cauces,
Decreto 879 de 1998	13 de mayo de 1998	Ministerio de Desarrollo Económico	Reglamentan las disposiciones referentes al ordenamiento del territorio municipal y distrital, además de los planes de ordenamiento territorial.
Decreto 1996 de 1999	15 de octubre de 1999	Ministerio del Medio Ambiente hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Reglamenta los artículos 109 y 110 de la Ley 99 de 1993 sobre Reservas Naturales de la Sociedad Civil.

Norma	Fecha	Autoridad/Entidad que la expide	Tema
			Reglamenta la
Decreto 1200 de 2004	20 de abril de 2004	Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	planificación ambiental regional y la articulación entre diferentes instrumentos de planeación nacional.
Decreto 1323 de 2007	19 de abril de 2007	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Por el cual se crea el Sistema de información del recurso hídrico (SIRH).
Decreto 3600 de 2007	20 de septiembre de 2007	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Reglamenta las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones.
Decreto 2372 de 2010	1 de julio de 2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Reglamenta el Decreto Ley 2811 de

Norma	Fecha	Autoridad/Entidad que la expide	Tema
		<p>hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.</p>	<p>1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto-Ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones.</p> <p>Reglamenta parcialmente el artículo 64 del Decreto-Ley 2811</p>
Decreto 0303 de 2012	6 de febrero de 2012	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	<p>de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones.</p> <p>Reglamenta los instrumentos para la</p>
Decreto 1640 de 2012	2 de agosto de 2012	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	<p>planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos y se dictan otras disposiciones.</p>

Norma	Fecha	Autoridad/Entidad que la expide	Tema
Decreto 1076 de 2015	26 de mayo de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Decreto único reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.
Resoluciones en Colombia relacionadas con el tema de investigación

Norma	Fecha	Autoridad/Entidad que la expide	Tema
Resolución 104 de 2003	7 de julio de 2003	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.	Establece los criterios y parámetros para la clasificación y priorización de cuencas hidrográficas
Resolución 941 de 2009	26 de mayo de 2009	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Por la cual se crea el Subsistema de Información sobre Uso de Recursos Naturales Renovables (SIUR) y se adopta el Registro Único Ambiental (RUA).

Norma	Fecha	Autoridad/Entidad que la expide	Tema
Resolución 955 de 2012	21 de junio de 2012	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Adopta el Formato con su respectivo instructivo para el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico.
Resolución 0509 de 2013	21 de mayo de 2013	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Define los lineamientos para la conformación de los Consejos de Cuenca y su participación en las fases del Plan de Ordenación de la Cuenca y se dictan otras disposiciones.
Resolución 1907 de 2013	27 de diciembre de 2013	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Expide la Guía Técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.

Fuente: Elaboración propia.

Marco Geográfico

El área de análisis del presente estudio corresponde a la cuenca del río Sardinata, la cual se encuentra localizada en Norte de Santander - Colombia, específicamente en el municipio de Sardinata. La cuenca del río Sardinata tiene un área de 91515.96 ha, está conformada por las cuencas río Nuevo Presidente, río Tibú, quebrada La Don Juana y el río Sardinata, siendo este el drenaje principal, pues ocupa parte del territorio de los municipios de Villa Caro, Sardinata Lourdes, Bucarasica y en menor proporción El Zulia y Gramalote.

El río Sardinata atraviesa el municipio de sur a norte, nace en la laguna del Buey del Páramo de Guerreo a 3400 m s.n.m., tiene una longitud aproximada de 250 km hasta la desembocadura del Catatumbo y limita con los municipios de Villa Caro y Cáchira (Alcaldía Municipal de Sardinata, 2002). Durante su recorrido, este cuerpo de agua desemboca en Puerto Reyes hasta llegar al punto denominado «Tres Bocas», donde posteriormente continúa por territorio venezolano hasta ofrendar sus aguas en el Catatumbo.

A continuación, en la figura 2 se presenta la localización general de la cuenca del río Sardinata.

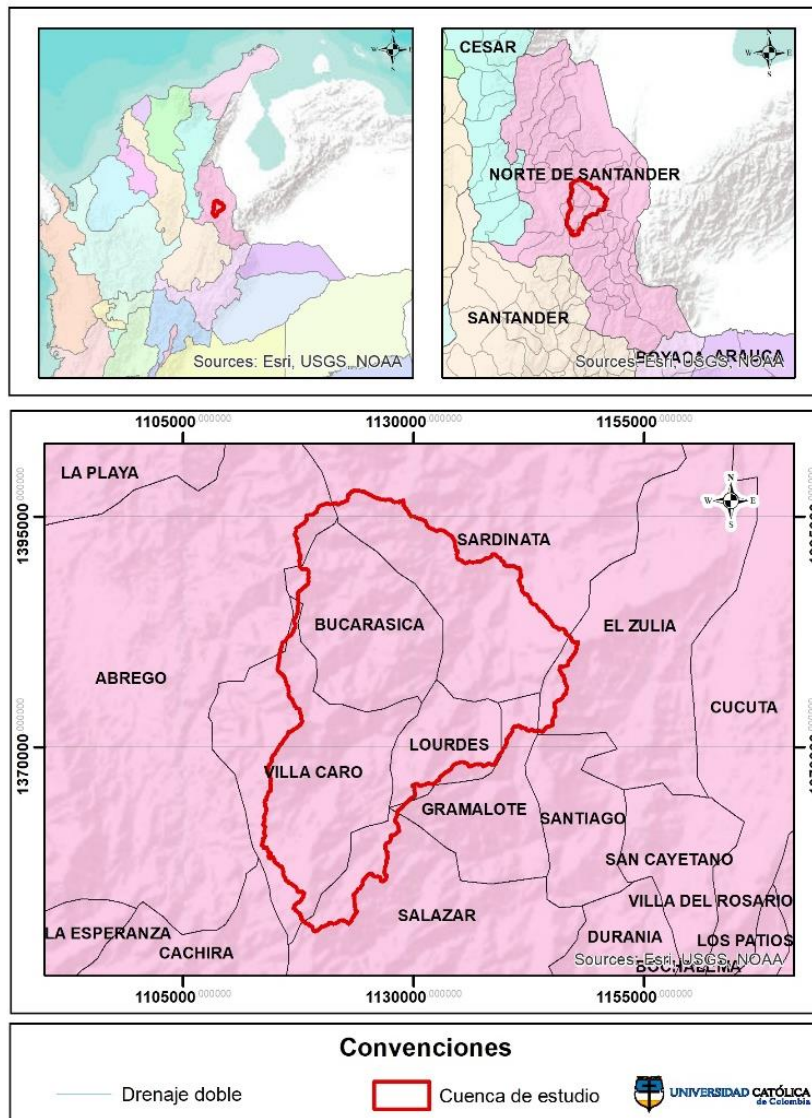


Figura 2. Localización general de la cuenca del río Sardinata. Fuente: Elaboración propia.

Marco Demográfico

El municipio de Sardinata, tiene una población aproximada de 22642 habitantes, el 40.7 % se encuentran en el área urbana y el 59.3 %, en el área rural (Plan de Desarrollo Municipal de Sardinata, 2016). La distribución según grupos etarios deja en evidencia que el grupo de

adultez (27 a 59 años) cuenta con el 33.7 % de la población; luego se encuentra el grupo de primera infancia (0 a 5 años) con 14.7 %; el grupo de adolescencia (12 - 17 años) tiene un porcentaje de 12.9 %; finalmente, el grupo con menor cantidad de habitantes es el de adulto mayor (mayor 60 años) con solo un 8.8 % (Plan de Desarrollo Municipal de Sardinata, 2016).

Según el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2005), los hogares en el municipio de Sardinata están conformados en promedio por 4,6 personas. Sardinata soporta su economía en la agricultura, ganadería, minería y en menor proporción la producción de madera y el sector piscícola (Alcaldía Municipal de Sardinata, 2002). Sin embargo, según la información del capítulo «Diagnóstico» (tomo II) del EOT (2002) del municipio «las condiciones de infraestructura vial y de servicios a nivel rural no permiten el desarrollo de ventajas competitivas de los productos, lo cual origina la desintegración y desarticulación de los asentamientos veredales y centros poblados» (pág. 7).

Estado Del Arte

Son diversas las investigaciones que se han realizado para analizar la relación e influencia de las coberturas vegetales en los diferentes procesos que se dan en una cuenca hidrográfica. En la mayoría de los casos se realizan análisis para diferentes períodos o escalas de tiempo, y se implementan herramientas de modelación que permiten predecir comportamientos a partir de datos históricos del área objeto de estudio. A continuación, se detallan algunos estudios relacionados con el tema objeto de análisis:

A nivel internacional

En la investigación realizada por Palamuleni, Ndomba y Annegarn (2011), los autores analizaron información desde 1989 a 2002 mediante el uso de la herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT), encontrando que el flujo del río Upper Shire en Malawi era variable y sensible a los cambios de cobertura, por ejemplo, para el año 2002, el área agrícola aumentó considerablemente, lo que influyó en la generación de picos de flujo más altos y tiempos de concentración menores.

En ese mismo año, en el sur de Filipinas, Santillan, Makinano y Paringit (2011) llegaron a una conclusión similar, en la que relacionaron directamente el cambio de cobertura del suelo con el aumento significativo de la escorrentía superficial, a partir del estudio realizado en la cuenca Taguibo en la isla de Mindanao mediante el análisis de imágenes Landsat MSS, ETM MSS y ETM durante 25 años y la parametrización de un modelo hidrológico basado en sistemas de información geográfica (SIG).

Un estudio más reciente realizado por Karamage et al. (2017) en Ruanda, rectifica los resultados obtenidos en las investigaciones mencionadas anteriormente; en este caso los autores utilizaron el modelo de extensión WetSpa para evaluar los cambios en la profundidad de la escorrentía en el país desde 1990 hasta 2016, obteniendo resultados que demuestran que el cambio en el uso de la tierra dio lugar a un aumento de la profundidad de escorrentía media nacional.

En general, los estudios detallados previamente recalcan la importancia del manejo, conservación y rehabilitación de las cuencas hidrográficas, así como una correcta gestión y planificación de las mismas.

A nivel nacional

En Colombia han sido varios los autores que han abordado el tema de coberturas vegetales y su influencia en el componente hidrológico, p. ej., Bernal y Prado (2015) analizaron las coberturas vegetales en la cuenca de la quebrada Granadillo mediante la interpretación de fotografías aéreas (desde 1993 a 2009) para verificar la influencia de las mismas en la generación de caudales de la cuenca mencionada, los resultados demuestran que pequeñas variaciones de cobertura vegetal en la cuenca tienen un impacto considerable en la generación de caudales.

Por otra parte, Garzón (2016) realizó una evaluación a través de un estudio multitemporal de seis (6) décadas mediante la interpretación de imágenes satelitales, sobre el cambio de la dinámica hidrológica del humedal Tibabuyes, ubicado en el sector de Suba en Bogotá D. C., encontrando que el cuerpo de agua ha sufrido drásticas modificaciones de cobertura a través del tiempo y, por ende, en sus condiciones hidrológicas, lo que ha generado una disminución y/o desaparición del espejo de agua.

Respecto a estudios enfocados a realizar comparaciones de diferentes tipos de coberturas y su influencia en los componentes hidrológicos, se destaca el del autor García (2007), quien evaluó la capacidad de regulación hídrica de las coberturas de *Cupressus lusitanica* (ciprés),

Eucalyptus globulus (eucalipto) y bosque nativo de la cuenca hidrográfica del río San Cristóbal en Bogotá D. C.

Entre los resultados obtenidos, se evidenció una mejor capacidad de mantener los caudales, con mayor uniformidad y con valores más sostenidos para la cobertura de bosque nativo, seguida del bosque ciprés; sin embargo, el autor aclara que se debe obtener mayor información de campo y relacionarla con otros aspectos característicos de cada cobertura, para poder obtener conclusiones más contundentes.

A su vez, los autores Patiño et al. (2007) evaluaron a partir de procedimientos estadísticos el efecto de diferentes coberturas vegetales sobre el rendimiento hídrico en cuencas hidrográficas de pequeña extensión, específicamente para la cuenca hidrográfica La Murciélago en Antioquia. La cuenca objeto de estudio, se encuentra cubierta por plantaciones forestales de *Pinus Patula*, *Cupressus lusitanica* y bosque natural, para las cuales se encontraron diferencias significativas, siendo la cobertura de bosque natural la que posee menor pendiente y, por lo tanto, un mayor efecto de regulación sobre el rendimiento hídrico.

A nivel regional

A nivel departamental se cuenta con el estudio publicado por Guerrero y Mendoza (2016), quienes determinaron mediante la metodología planteada por el IDEAM en la Resolución 865 del 2014, la oferta hídrica neta (532.170 m³/año) para la microcuenca El Guamal en Convención - Norte de Santander; a su vez, se concluye a partir de los análisis realizados que dicha oferta se encuentra en alto riesgo de reducción, debido a la alta tasa de deforestación

de la parte alta de la microcuenca y la zona de nacedero, además de la destrucción de la masa vegetal en la ronda hídrica.

A nivel local

De acuerdo con la consulta bibliográfica realizada, se encontró que Sardinata no cuenta con investigaciones o estudios relacionados con la influencia de las coberturas vegetales en los procesos hidrológicos, especialmente en cuencas hidrográficas.

Materiales y metodología

Fases de la investigación

A continuación, se detalla cada una de las fases desarrolladas para dar alcance a los objetivos planteados en el presente trabajo:

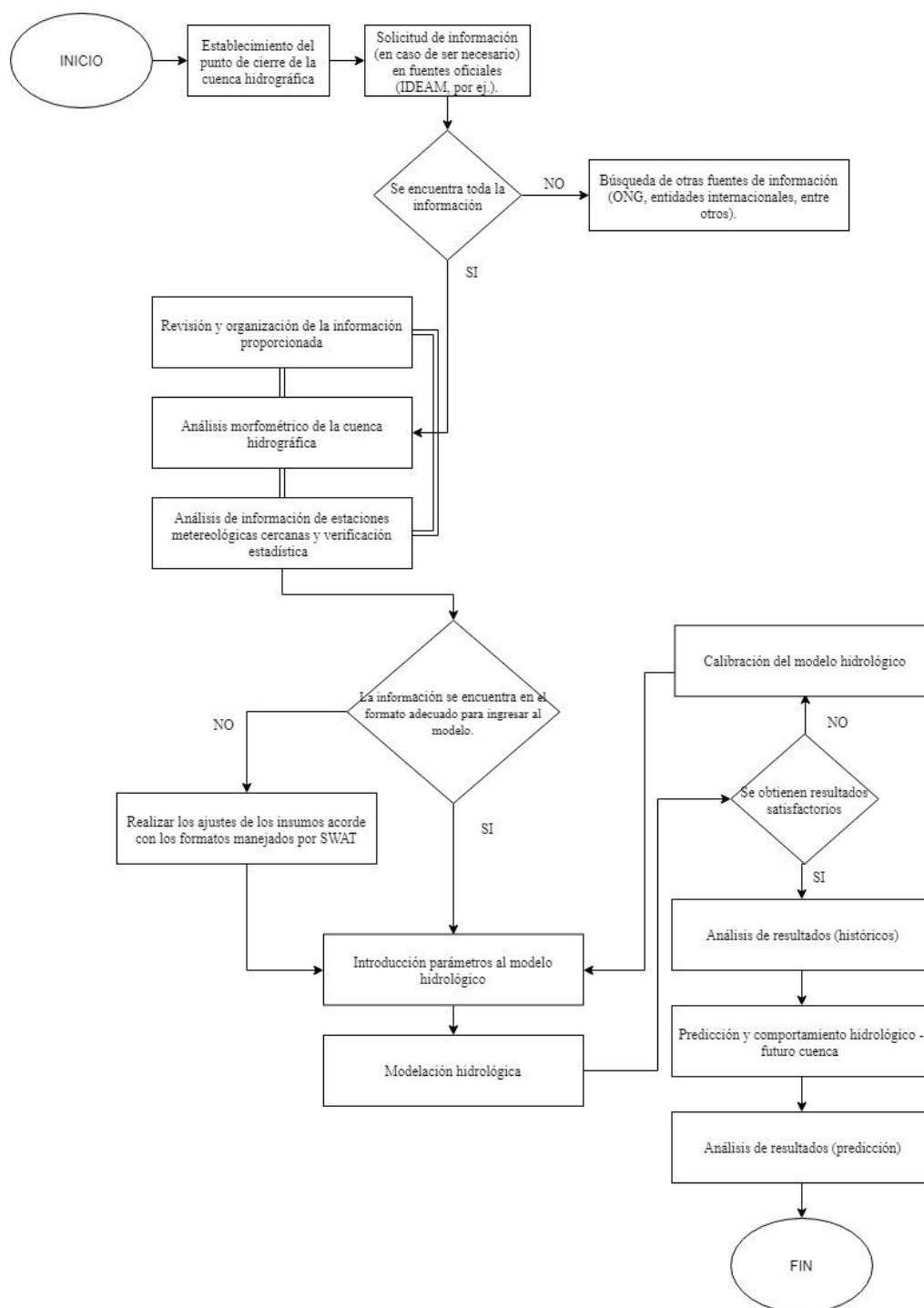


Figura 3. Marco metodológico. Fuente: Elaboración propia.

Recopilación de información

En esta etapa se realiza la búsqueda y recolección de información en diferentes fuentes, con el fin de obtener los insumos necesarios para el procesamiento y análisis de datos mediante la modelación con la herramienta SWAT. En la tabla 4 se relaciona la información requerida para la modelación, así como las fuentes consideradas en cada una:

Tabla 4.
Recolección de información necesaria para la modelación hidrológica y sus respectivas fuentes

Fuente	Información consultada
NASA Earth Data - Alos Palsar	Modelo digital de elevación (DEM) de resolución 12.5 x 12,5 m.
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)	Datos hidrometeorológicos de las estaciones identificadas en la zona de estudio.
Sistema de Información Ambiental	Mapas de coberturas de la tierra a escala 1:100.000 para los

Fuente	Información consultada
de Colombia (SIAC)	años 2000-2002, 2005-2009 y 2010- 2012.
Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)	Mapa de suelos del territorio colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Norte de Santander.

Fuente: Elaboración propia.

Procesamiento y análisis de información

Delimitación de la Cuenca hidrográfica

Considerando que la delimitación de una cuenca hidrográfica depende de la altitud o topografía del terreno, para el presente trabajo se utiliza como base el DEM disponible (resolución 12,5 x 12,5 m); asimismo, se considera un punto de cierre o control de la cuenca, que para el caso específico del área de estudio está asociado con la estación limnigráfica del IDEAM denominada «Puente Sardinata» con código 16037030 (ver tabla 10). Lo anterior, teniendo en cuenta que dicha estación corresponde al elemento fundamental para la calibración del modelo, pues aporta información real de caudales observados de la cuenca en ese punto, lo que permite que estos datos puedan ser comparados con los valores obtenidos en el modelo.

A continuación, en la figura 4 se presenta la delimitación de las 11 subcuencas definidas en la cuenca del río Sardinata, delimitada a partir del punto de cierre mencionado previamente. Asimismo, en la tabla 5 se presenta la clasificación hidrográfica de la cuenca y subcuencas de acuerdo con el documento de *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia* (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia , 2013).

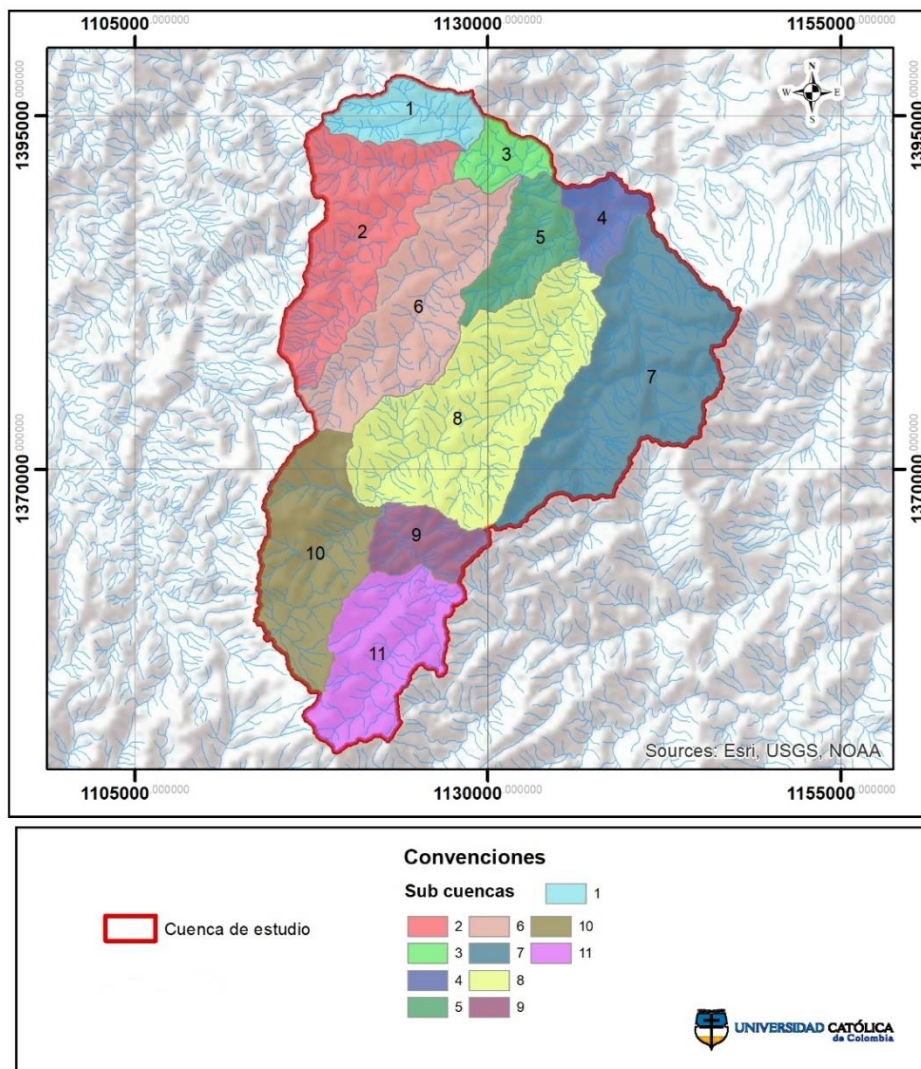


Figura 4. Subcuencas delimitadas en la cuenca del río Sardinata. Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.
Zonificación hidrográfica de la cuenca del río Sardinata

AH	Nombre área hidrográfica (AH)	ZH	Nombre zona hidrográfica (ZH)	SZH	Nombre subzona hidrográfica (SZH)
1	Caribe	16	Catatumbo	1603	Río Nuevo Presidente - Tres Bocas (Sardinata, Tibú)

Fuente: Elaboración propia.

Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica

Son diversos los factores que influyen en el comportamiento hidrológico de una cuenca, predominando la topografía del terreno y el clima de la zona de interés. A su vez, la morfometría y los índices asociados con la misma, permiten determinar la relación existente entre la forma del terreno y el comportamiento hidrológico de la cuenca. Considerando lo anterior, a continuación, se relaciona el análisis de factores morfométricos de la cuenca del río Sardinata y en algunos casos de las subcuencas de la misma:

Factores relacionados con el área

Área de la cuenca y subcuencas (A). El área total de la cuenca del río Sardinata es de 91,516.20 ha (915,16 km²), el 19.41 % está ocupada por la subcuenca 8 con 17766.21 ha, seguida por la subcuenca 7 que ocupa el 17.95 % (16427.96 ha) y la subcuenca 6 con el 12.84 % (11753.13 ha) del área total. La relación de áreas de cada una de las 11 subcuencas definidas se encuentra en la tabla 6.

Tabla 6.
Área de la cuenca y subcuencas del río Sardinata

Subcuenca	Área (ha)	Área (%)	Subcuenca	Área (ha)	Área (%)
1	3836.10	4.19	7	16427.96	17.95
2	11069.77	12.10	8	17766.21	19.41
3	2191.91	2.40	9	3280.52	3.58
4	2499.66	2.73	10	9976.48	10.90
5	4353.32	4.76	11	8361.13	9.14
6	11753.13	12.84	Total	91516.20	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Perímetro (P). El perímetro de la cuenca corresponde a la longitud de la envolvente del área total, el cual es de 209.93 km para la cuenca del río Sardinata. En la tabla 7 se relaciona el perímetro de cada una de las 11 subcuencas definidas.

Tabla 7.
Perímetro de las subcuencas de la cuenca del río Sardinata

Subcuenca	Perímetro (Km)	Subcuenca	Perímetro (Km)
1	39.18	7	92.63
2	77.68	8	84.6
3	29.45	9	34.2
4	32.48	10	68.38
5	45.05	11	60.8
6	79.40		

Fuente: Elaboración propia.

Factores de forma de la cuenca

Caída de la cuenca (Hc). La caída de la cuenca del río Sardinata, entendida como la diferencia entre la cota máxima y la mínima de la misma, corresponde a 3347 m s.n.m., tomando como el punto más alto la cota de 3608 m s.n.m. de las subcuencas 10 y 11, y como punto más bajo la cota 261 m s.n.m. de la subcuenca 7. En la tabla 8 se presentan las cotas mínimas y máximas de cada una de las 13 subcuencas definidas.

Tabla 8.
Cotas máximas y mínimas de las subcuencas de la cuenca del río Sardinata

Subcuenca	Elevación mínima (m s.n.m.)	Elevación máxima (m s.n.m.)	Subcuenca	Elevación mínima (m s.n.m.)	Elevación máxima (m s.n.m.)
1	931	2711	7	261	3245
2	931	2939	8	376	3280
3	715	2010	9	1421	3281
4	260	574	10	1426	3608
5	376	2618	11	1733	3608
6	715	3086			

Fuente: Elaboración propia.

Longitud de la cuenca (Lc₁). La longitud de la cuenca del río Sardinata, se entiende como la distancia medida a lo largo del cauce principal desde el punto de cierre definido hasta el límite de la misma, específicamente es de 63.27 km.

Ancho promedio de la cuenca (W). El ancho promedio de la cuenca del río Sardinata es la relación entre el área y la longitud axial de la misma, es decir, 14.46 km.

$$W = \frac{915.16 \text{ km}^2}{63.27 \text{ km}} = 14.46 \text{ km}$$

Factor de forma de la cuenca (Kf). Corresponde a la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud de la misma.

$$Hf = \frac{915.16 \text{ km}^2}{(63.27 \text{ km})^2} = 0.23$$

De acuerdo con el resultado obtenido, se determina que la cuenca del río Sardinata tiene una forma alargada y está menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño, pero con mayor factor de forma (Monsalve, 2014).

Coficiente de compacidad (Kc). Coeficiente relacionado con el tiempo de concentración de la cuenca. Este coeficiente se encuentra definido por el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la de la cuenca (Monsalve, 2014). En general se puede representar de la siguiente manera:

$$Kc = \frac{0.28P}{A^{\frac{1}{2}}}$$

$$Kc = \frac{0.28 (209.93 \text{ km})}{(915.16 \text{ km}^2)^{\frac{1}{2}}} = 1.94$$

Considerando el factor de forma obtenido para la cuenca del río Sardinata, esta se encuentra Kc clase IV, cuya forma rectangular oblonga y por su forma irregular presenta una menor tendencia a crecientes.

Índice de alargamiento (Ia). Este índice relaciona la longitud axial con el ancho máximo de la cuenca del río Sardinata, el cual corresponde a 2.03, por tratarse de un valor mayor a la unidad, indica que la cuenca es alargada.

$$Ia = \frac{63.27 \text{ km}}{31.19 \text{ km}} = 2.03$$

Factores del cauce principal

Longitud total del cauce (Lc). La longitud del cauce principal, es decir, del río Sardinata desde su punto más lejano hasta el punto de cierre de la cuenca es de 58,47 km. La diferencia con la longitud de la cuenca es tan sólo de 4.79 km, este indicador de importancia es el mismo en la cuenca, ya que abarca gran parte de la extensión de la misma.

Perfil longitudinal del cauce principal. El perfil longitudinal del cauce principal relaciona gráficamente la longitud del mismo con la altura sobre el nivel del mar. A continuación, en la figura 5 se presenta el perfil longitudinal del río Sardinata, cuyo punto de inicio corresponde a la parte más baja, es decir, el punto de cierre de la cuenca hasta el punto más lejano del río en la subcuenca 13.

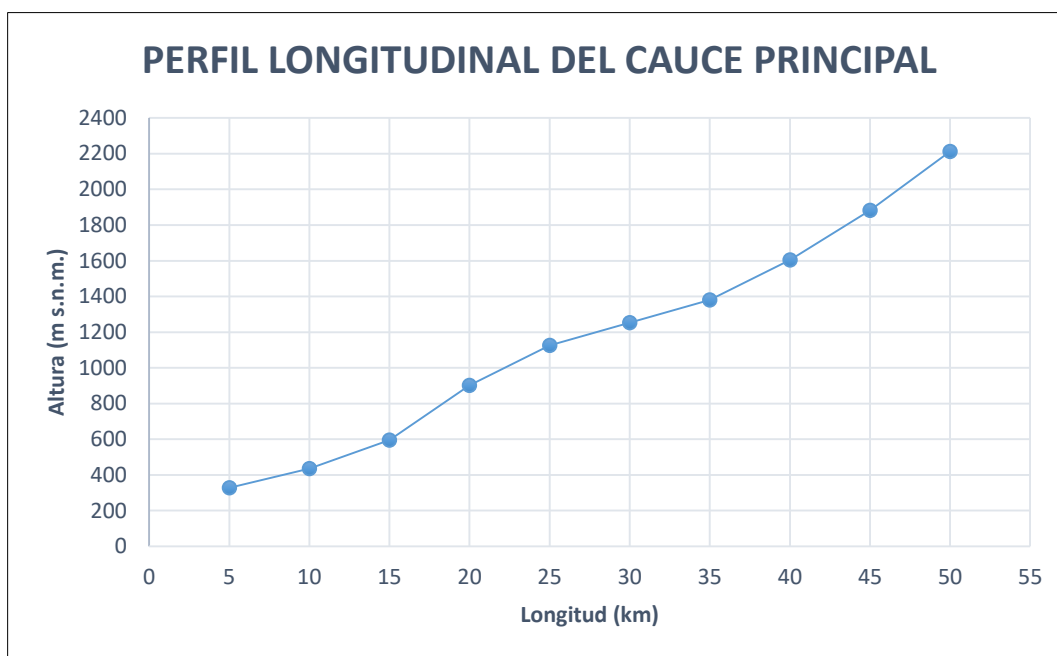


Figura 5. Perfil longitudinal del cauce principal. Fuente: Elaboración propia.

Factores de elevación

Curva hipsométrica. La curva hipsométrica representa gráficamente el porcentaje de área acumulado, igualado o excedido para una cota determinada, relacionando los valores de cotas o alturas de la cuenca (en las ordenadas) con el porcentaje del área acumulada (en las abscisas). En la tabla 9 y figura 6 se presentan los valores de hipsometría de la cuenca del río Sardinata.

Tabla 9.
Datos de hipsometría de la cuenca del río Sardinata

ID	Cotas		Altura promedio (m s.n.m.)	Área (km ²)	Área acumulada (km ²)	% Área acumulada
	Mín.	Máy.				
1	261	428	344.5	18.19	915.16	100.00
2	429	595	512	25.04	896.97	98.01
3	596	763	679.5	30.96	871.93	95.28

ID	Cotas		Altura promedio (m s.n.m.)	Área (km ²)	Área acumulada (km ²)	% Área acumulada
	Mín.	Máx.				
4	764	930	847	35.59	840.96	91.89
5	931	1097	1014	47.21	805.38	88.00
6	1098	1265	1181.5	50.05	758.17	82.85
7	1266	1432	1349	58.34	708.12	77.38
8	1433	1599	1516	61.88	649.77	71.00
9	1600	1767	1683.5	70.61	587.90	64.24
10	1768	1934	1851	80.83	517.28	56.52
11	1935	2101	2018	79.64	436.45	47.69
12	2102	2269	2185.5	74.07	356.82	38.99
13	2270	2436	2353	72.71	282.75	30.90
14	2437	2603	2520	58.29	210.04	22.95
15	2604	2771	2687.5	39.20	151.75	16.58
16	2772	2938	2855	33.54	112.54	12.30
17	2939	3105	3022	32.60	79.01	8.63
18	3106	3273	3189.5	22.09	46.41	5.07
19	3274	3440	3357	13.67	24.32	2.66
20	3441	3608	3524.5	10.65	10.65	1.16

Fuente: Elaboración propia.

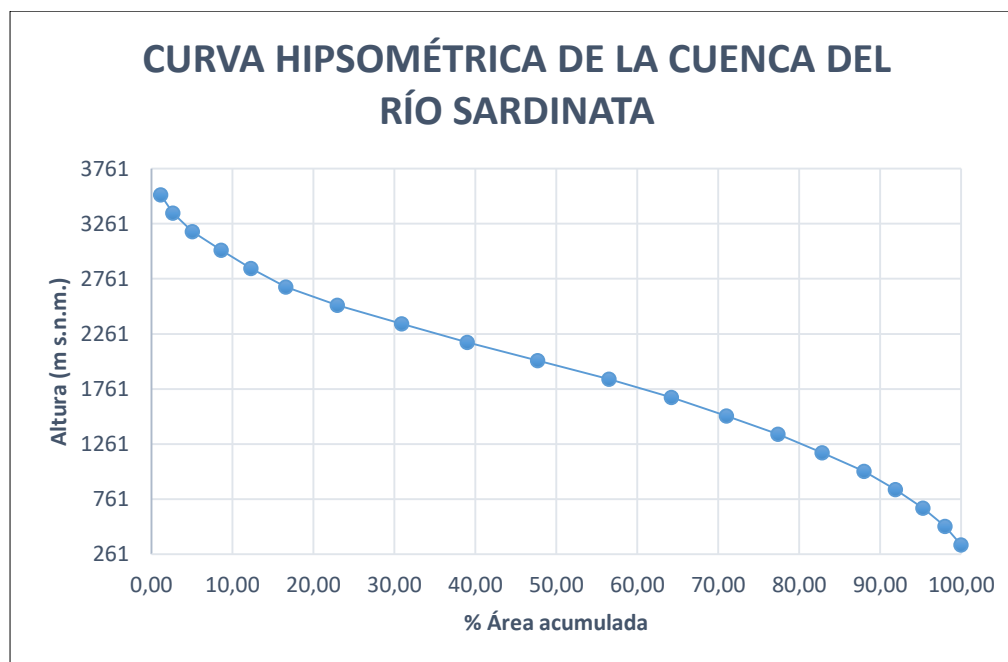


Figura 6. Curva hipsométrica de la cuenca del río Sardinata. Fuente: Elaboración propia.

Elevación media de la cuenca (Hm). Corresponde al promedio ponderado de las alturas presentes en la cuenca, además representa un dato importante de la misma, considerando la influencia que ejerce sobre la precipitación, las pérdidas de agua por evaporación y transpiración y, por ende, sobre el caudal medio de la cuenca. Para el caso de estudio, la cuenca del río Sardinata tiene una elevación media de 1935 m s.n.m.

Coefficiente de masividad (km). Es la relación entre la elevación media y la superficie de la cuenca, lo que, a su vez, está relacionado con la erosionabilidad de la misma. A continuación, se presenta el cálculo del coeficiente de masividad para la cuenca del río Sardinata:

$$Km = \frac{\text{Elevación media } m}{\text{Área de la cuenca } km^2}$$

$$Km = \frac{1.935 \text{ m s. n. m.}}{915.16 \text{ km}^2} = 2.11 \frac{m}{km^2}$$

Selección de estaciones meteorológicas

Para la modelación con la herramienta SWAT es indispensable contar con datos diarios de temperatura (máxima y mínima), precipitación, humedad relativa, brillo solar, velocidad del viento y caudales (para la calibración del modelo). Para lo anterior, se identifican y seleccionan las estaciones cercanas a la cuenca hidrográfica previamente delimitada, considerando la disponibilidad de datos en el período de análisis definido (2000 hasta 2012) y el estado de cada estación (activa o suspendida).

Las estaciones seleccionadas para la modelación con SWAT se relacionan en la tabla 10 y en la figura 7 se presenta la localización general de estas.

Tabla 10.
Estaciones del IDEAM seleccionadas para la modelación con SWAT

Código	Nombre	Categoría	Datos procesados
23195180	ESCUELA AGRÍCOLA CÁCHIRA	Climática Ordinaria	- Valores totales diarios de brillo solar (horas). - Valores totales diarios de temperatura máxima y mínima. - Valores totales diarios de precipitación (mm) - Valores medios diarios de humedad relativa (%)
16035030	SARDINATA		- Valores totales diarios de temperatura máxima y mínima. - Valores totales diarios de precipitación (mm). - Valores totales diarios de brillo solar (horas).
16055040	ABREGO CENTRO ADMO	Climática Principal	- Valores totales diarios de temperatura máxima y mínima. - Valores medios diarios de humedad relativa (%). - Valores medios diarios de velocidad del viento. - Valores totales diarios de brillo solar (horas).
16025030	SALAZAR		- Valores totales diarios de temperatura máxima y mínima. - Valores medios diarios de humedad relativa (%).
16040010	ALTO EL VENADO	Pluviométrica	Valores totales diarios de precipitación (mm).
16020010	GRAMALOTE	Pluviométrica	Valores totales diarios de precipitación (mm).
16030080	LOURDES	Pluviométrica	Valores totales diarios de precipitación (mm).
16030100	SAN JUAN	Pluviométrica	Valores totales diarios de precipitación (mm).

Código	Nombre	Categoría	Datos procesados
16030090	VILLA CARO	Pluviométrica	Valores totales diarios de precipitación (mm).
16037030	PTE SARDINATA	Limnigráfica	Valores medios diarios de caudales (m ³ /s).

Fuente: Elaboración propia.

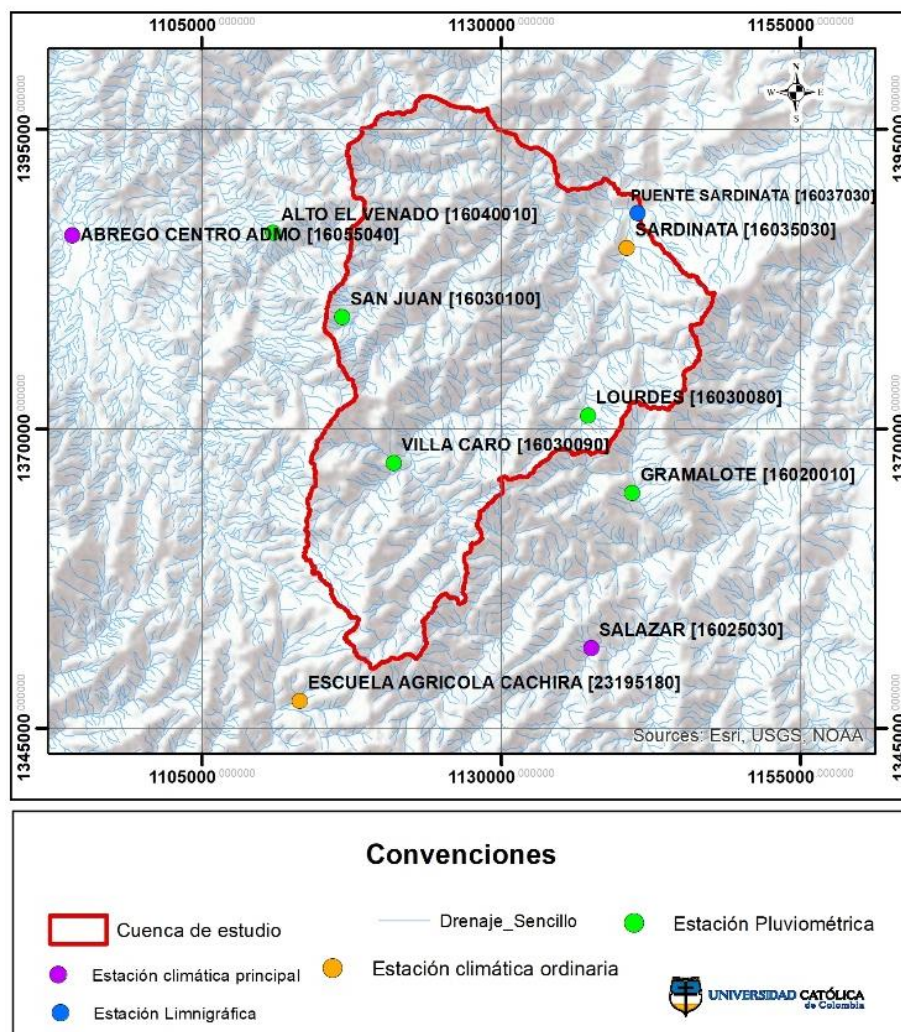


Figura 7. Estaciones hidrometeorológicas consideradas en el presente trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Análisis climatológico de la cuenca hidrográfica

A continuación, se presenta el análisis climatológico de la cuenca del río Sardinata realizado a partir de los datos históricos de las estaciones presentadas en la tabla 10; sin embargo, es válido aclarar que para este análisis se consideraron estaciones adicionales con el fin de contar con más datos de la zona (ver tabla 11 y tabla 14).

Temperatura

Temperatura media mensual multianual. En la tabla 11, se presenta el valor de la temperatura media mensual multianual, establecida bajo el análisis de la serie comprendida entre 1981 a 2010 a escala mensual, considerando para tal fin los registros de cinco (5) estaciones que cuentan con los datos de esta variable.

Como se mencionó, para este análisis se incluyó la estación «La Playa», a diferencia de las estaciones consideradas para la modelación con SWAT (ver tabla 10).

Tabla 11.
Valores de temperatura media mensual multianual de la serie de datos 1981 - 2010

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Abrego Centro Admo	20.1	20.5	21.0	21.2	21.3	21.3	21.3	21.3	21.0	20.9	20.7	20.3	20.9
Esc Agr Cachira	16.3	16.8	17.1	17.3	17.5	17.5	17.2	17.2	16.9	16.8	16.7	16.5	17.0
La Playa	18.6	19.2	19.8	20.3	20.5	20.5	20.7	20.6	20.1	19.8	19.4	18.9	19.9
Salazar	21.7	22.0	22.4	22.9	23.3	23.1	23.1	23.5	23.5	23.0	22.5	21.9	22.7
Sardinata	25.0	25.6	26.1	26.5	27.0	27.4	27.5	27.8	27.2	26.5	25.9	25.2	26.5
Promedio	20.3	20.8	21.3	21.6	21.9	21.9	22.0	22.1	21.8	21.4	21.1	20.5	21.4

Fuente: Elaboración propia.

La información anterior fue empleada para elaborar la figura 8, en la que se observa que la temperatura presenta un comportamiento uniforme durante todo el año en cada una de las estaciones.

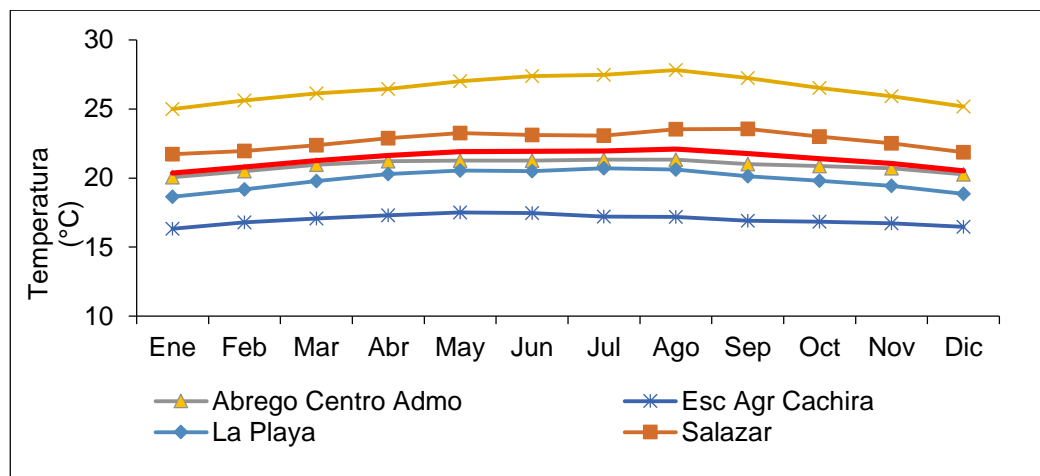


Figura 8. Distribución media mensual multianual de la temperatura. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, a partir de los datos de temperatura media mensual multianual se realiza la correlación de los mismos con la elevación de cada estación, obteniendo los resultados presentados en la figura 9:

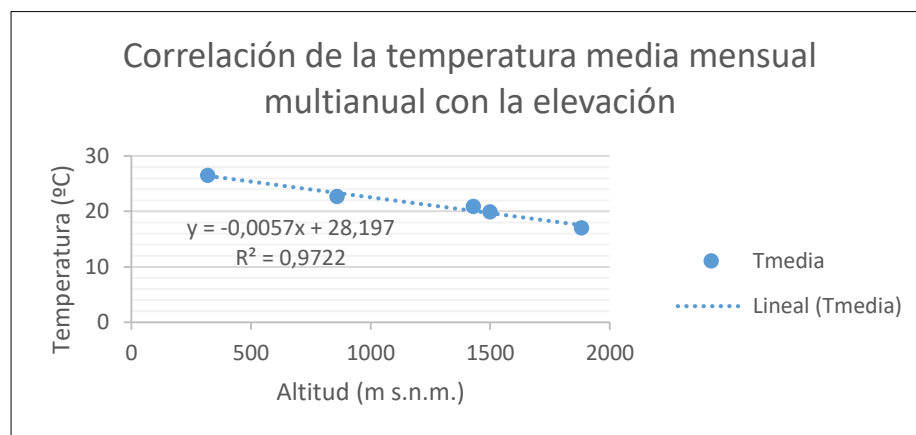


Figura 9. Distribución media mensual multianual de la temperatura. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación generada al relacionar la temperatura media mensual multianual de las cinco estaciones consideradas con la elevación de las mismas —donde Y, representa la temperatura y X la elevación en m s.n.m.— presenta un coeficiente de correlación de 0.9722, el cual puede ser considerado adecuado para describir la relación entre la temperatura y la elevación. Partiendo de la ecuación mencionada y el DEM de la zona. En la figura 10 se presenta la distribución espacial de la temperatura media en la cuenca del río Sardinata, junto con las isotermas respectivas.

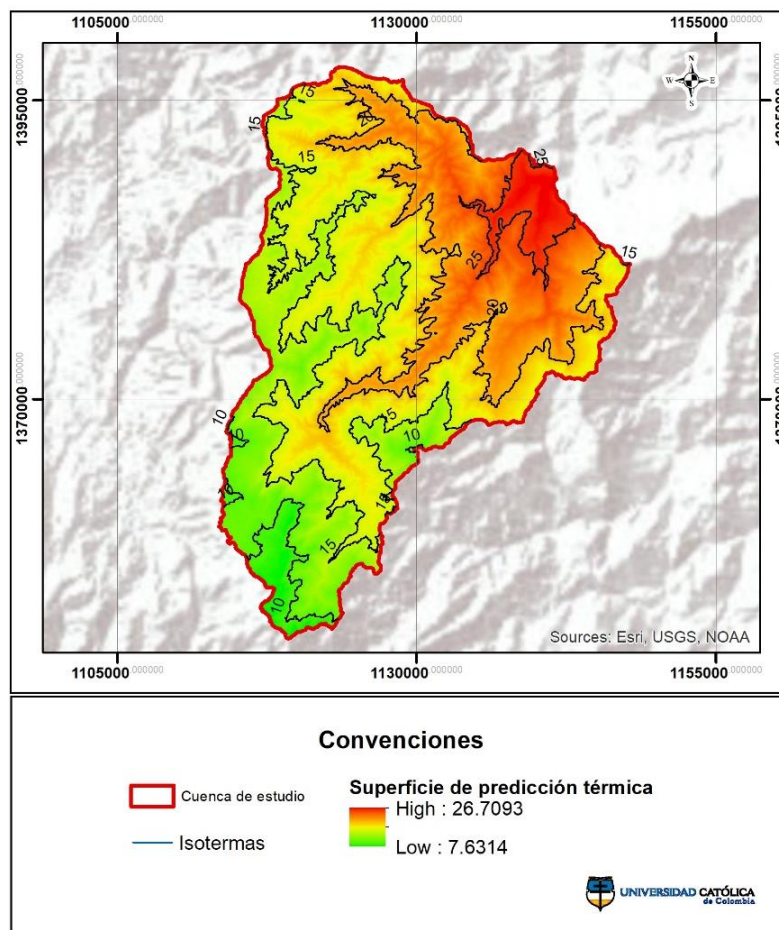


Figura 10. Distribución espacial de la temperatura media en la cuenca del río Sardinata. Fuente: Elaboración propia.

Temperatura máxima mensual multianual. En la

tabla 12 se muestra la distribución mensual multianual de los datos máximos de temperatura reportados por las estaciones seleccionadas, es decir, los datos máximos reportados por todas las estaciones en los años analizados. Estos valores permiten evidenciar que a lo sumo la temperatura podría alcanzar 34.3°C, correspondientes al máximo reportado por la estación Sardinata en el mes de agosto (ver figura 11).

Tabla 12.
Valores de temperatura máxima mensual multianual de la serie de datos 1981-2010

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Abrego Centro Admo	26.6	27.2	27.6	27.2	27.1	27.3	27.6	27.8	27.1	26.6	26.2	26.1	27.8
Esc Agr Cachira	22.4	22.8	22.6	22.3	22.3	22.3	22.3	22.5	22.0	21.5	21.4	22.0	22.8
La Playa	23.9	24.8	25.5	25.9	26.2	26.6	27.0	27.1	26.3	25.3	24.2	23.5	27.1
Salazar	26.3	26.5	26.7	27.4	28.3	28.2	28.5	29.3	29.2	28.1	27.1	26.3	29.3
Sardinata	30.0	30.9	31.0	31.5	32.7	33.5	33.8	34.3	33.5	32.1	30.9	29.7	34.3
Máximo	30.0	30.9	31.0	31.5	32.7	33.5	33.8	34.3	33.5	32.1	30.9	29.7	34.3

Fuente: Elaboración propia.

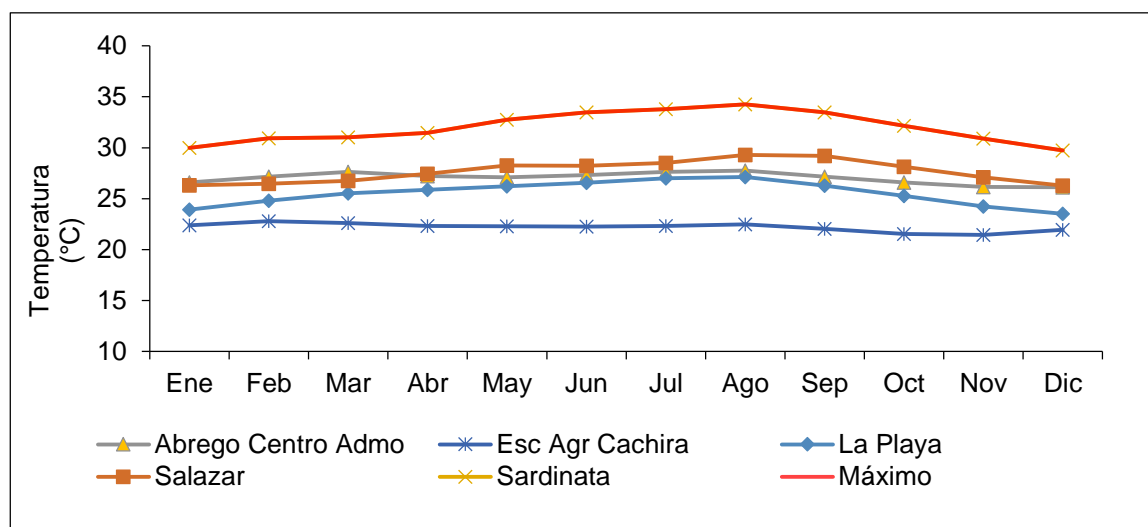


Figura 11. Distribución media mensual multianual de la temperatura máxima. Fuente: Elaboración propia.

Temperatura mínima mensual multianual. En la tabla 13 se muestra la distribución mensual multianual de los datos mínimos de temperatura reportados por las estaciones seleccionadas. Estos valores permiten evidenciar que el valor mínimo de temperatura que se podría alcanzar es de 10.5°C, que corresponde al mínimo reportado por la estación Escuela Agrícola Cáchira en el mes de enero, lo cual puede ser analizado en la figura 12.

Tabla 13.
Valores de temperatura mínima mensual multianual de la serie de datos 1981 - 2010

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Abrego Centro Admo	12.3	12.7	13.4	14.5	14.8	14.1	13.5	13.7	14.3	14.3	14.1	13.1	12.3
Esc Agr Cachira	10.5	11.1	11.7	13.0	13.4	13.2	12.7	12.6	12.6	12.9	12.5	11.3	10.5
La Playa	14.1	14.7	15.1	16.0	15.7	15.1	14.8	14.8	15.1	15.5	15.3	14.6	14.1
Salazar	17.8	18.0	18.6	19.3	19.1	18.6	18.2	18.5	18.5	18.4	18.3	17.8	17.8
Sardinata	20.1	20.8	21.4	21.9	21.7	21.4	21.3	21.4	21.3	21.3	21.2	20.8	20.1
Mínimo	10.5	11.1	11.7	13.0	13.4	13.2	12.7	12.6	12.6	12.9	12.5	11.3	10.5

Fuente: Elaboración propia.

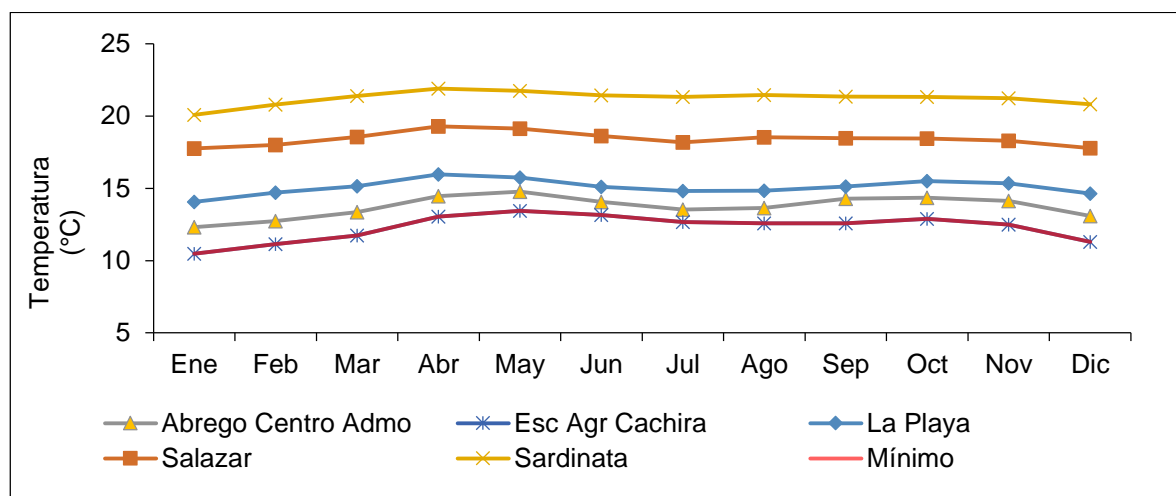


Figura 12. Distribución media mensual multianual de la temperatura mínima. Fuente: Elaboración propia.

Precipitación

Precipitación media mensual multianual. A partir del análisis de la serie comprendida entre 1981 a 2010, se logra establecer que el valor acumulado del promedio mensual multianual está entre 824.1 mm y 3139.9 mm anuales. Adicionalmente, se evidencia que el área en general presenta un régimen bimodal, con períodos de lluvia entre marzo a mayo y septiembre a noviembre. La estación con menores valores de precipitación media es Abrego centro administrativo, con un mínimo de 9.5 mm en enero; mientras que la máxima precipitación se da en la estación Salazar con un máximo de 444.4 mm en el mes de octubre.

Tabla 14.
Valores de precipitación media mensual multianual de la serie de datos 1981 - 2010

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Abrego Centro Admo	9.5	19.1	28.9	110.7	170.1	96.0	87.4	144.7	210.1	165.8	76.9	23.6	1142.8
Alto El Venado	22.9	26.9	37.0	135.4	173.1	55.9	44.7	114.2	222.7	286.6	157.5	49.6	1326.4
Bocatoma Rio Frio	16.1	25.6	48.7	147.4	223.2	87.6	102.9	159.5	245.6	230.7	123.3	33.4	1444.0
Maria La	32.4	52.4	99.4	259.7	272.5	133.1	104.0	177.4	295.9	321.3	204.3	67.3	2019.7
Arboledas	88.5	99.5	119.5	213.2	208.3	105.7	87.1	121.6	225.4	296.8	217.4	131.4	1914.5
Esc Agr Cáchira	26.1	32.4	58.1	105.6	123.1	60.0	53.5	73.6	140.9	167.0	109.2	39.7	989.2
Vega La	57.6	62.4	127.6	195.6	221.9	103.6	95.1	139.5	199.8	287.6	203.3	89.4	1783.3
Bocatoma Rio Zulia	86.6	60.9	100.0	153.2	153.5	66.5	88.5	101.7	126.2	213.4	218.5	124.7	1493.7
Gramalote	66.5	89.2	112.7	201.0	190.0	54.4	64.6	95.0	213.2	280.1	231.4	134.0	1732.0
Playa La	13.2	15.5	24.6	71.2	100.7	62.3	44.4	89.7	140.6	158.3	83.0	29.1	832.6
Lourdes	84.0	91.9	108.9	188.4	133.3	62.6	85.2	95.6	167.3	229.6	228.6	139.3	1614.6
Salazar	127.9	123.4	158.9	288.9	257.6	76.5	88.2	144.0	280.7	444.4	418.6	239.4	2648.4
Divisiones	105.4	118.2	181.3	252.5	303.3	217.8	232.0	299.6	359.4	414.0	386.5	294.1	3164.0
Sardinata	79.3	86.9	125.7	185.8	162.4	59.3	54.8	118.2	189.0	265.6	234.0	144.1	1705.0
San Juan	18.0	17.4	45.8	112.6	99.6	28.5	31.1	63.9	147.6	176.7	79.4	25.6	846.3
Villa Caro	37.4	50.1	55.2	125.3	116.6	41.4	54.5	73.1	144.1	185.9	153.8	70.1	1107.3
Promedio	54.5	60.7	89.5	171.6	181.8	82.0	82.4	125.7	206.8	257.7	195.4	102.2	1610.2

Fuente: Elaboración propia.

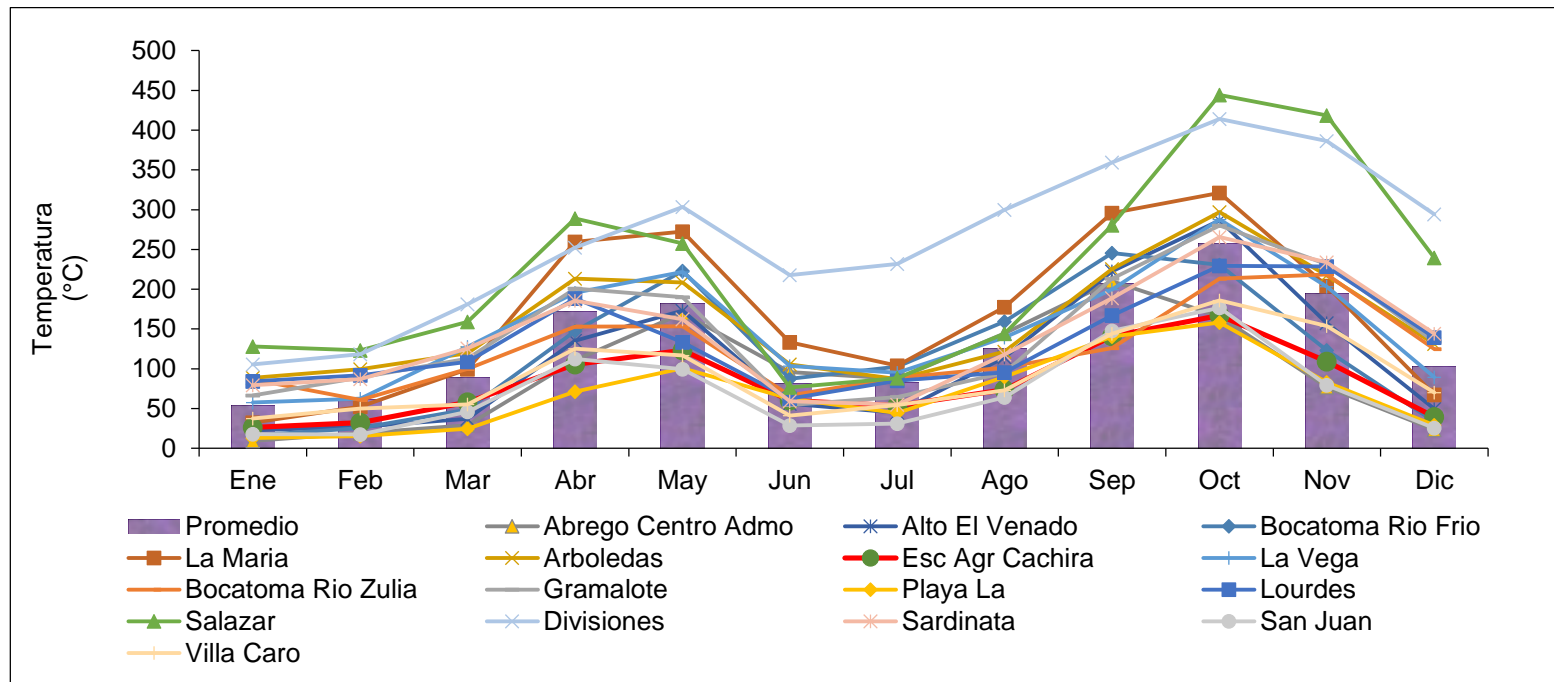


Figura 13. Distribución temporal de precipitación media mensual multianual. Fuente: Elaboración propia.

La figura 14 presenta las isoyetas de la cuenca del río Sardinata a partir de los valores de precipitación mensual multianual acumulada para el año, por cada estación. Con base en la mencionada figura se evidencia que dentro de la cuenca se presentan valores de precipitación entre 900 a 1700 mm al año.

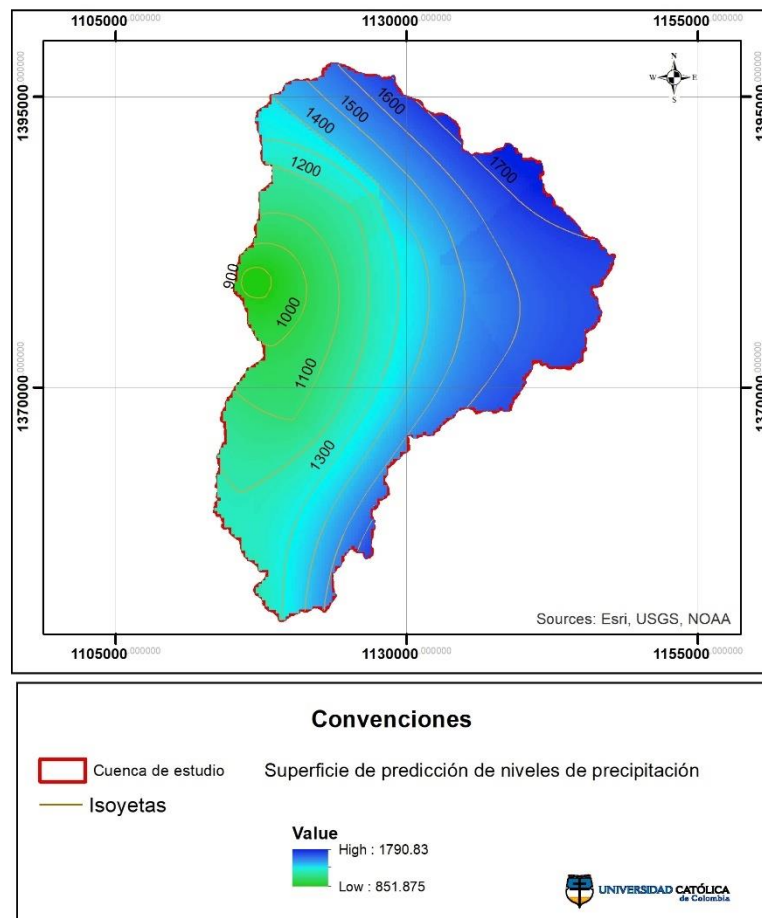


Figura 14. Distribución espacial de precipitación media en la cuenca del río Sardinata. Fuente: Elaboración propia.

Determinación de pendientes en la cuenca hidrográfica

La clasificación de pendientes para la cuenca del río Sardinata se realiza con base en los valores presentados en la tabla 15. Asimismo, en la figura 15 se presenta la distribución espacial de las pendientes, en la cual se puede observar que, en la zona de estudio, predominan las pendientes tipo III catalogadas como inclinadas.

Tabla 15.
Clasificación de pendientes considerada para el presente estudio

Clase	Rango de pendiente en %	Tipo de pendiente
I	0 a 12	Leve
II	12 a 25	Ondulado
III	25 a 50	Inclinado
IV	50 a 75	Escarpado
V	Mayores de 75	Muy escarpado

Fuente: Elaboración propia.

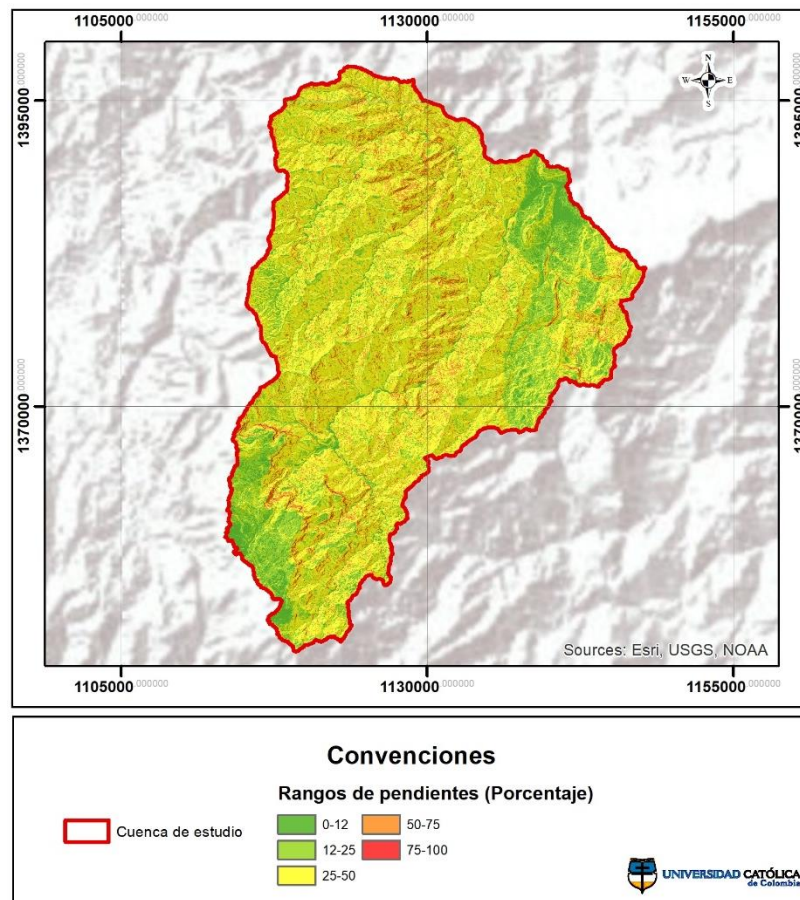


Figura 15. Distribución espacial de pendientes en la cuenca del río Sardinata. Fuente: Elaboración propia.

Caracterización del suelo

De acuerdo con el *Mapa de suelos del territorio colombiano* a escala 1:100.000, la cuenca del río Sardinata está conformada por 31 unidades cartográficas de suelos (ver tabla 16), distribuidas como se observa en la figura 16. De las unidades de suelo identificadas, es posible determinar que la unidad MKS con 20.33 % del área total predomina en la zona de estudio, seguida de las unidades MPT y MPC con 13.32 % y 11.51 % respectivamente.

Según el *Estudio General de Suelos del Departamento de Norte de Santander* (2004), la unidad MKS cuenta con clases de suelos superficiales, limitados por roca, bien drenados, con abundante material orgánico en superficie y una fertilidad muy baja. Por otra parte, la unidad MPT tiene clases de suelos moderadamente profundos, bien drenados y de textura franca arenosa, respecto a la unidad MPC, esta cuenta con suelos profundos, excesivamente drenados, de textura franco arenosa gravillosa. Ambas unidades presentan características de fertilidad natural baja.

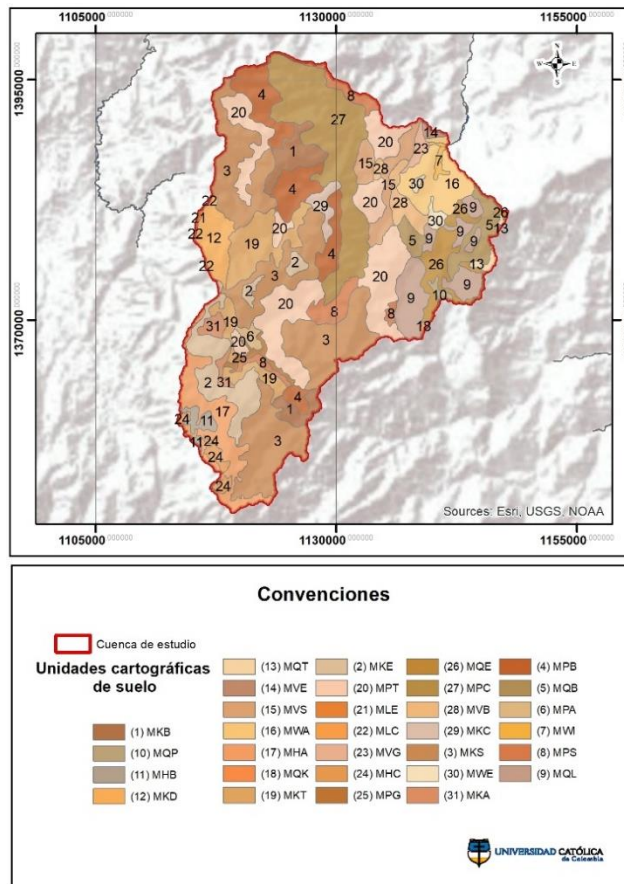


Figura 16. Unidades cartográficas de suelo en la cuenca del río Sardinata. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16.
Unidades cartográficas de suelo identificadas en la cuenca del río Sardinata

Unidad de suelo	Área (ha)	% Área	Unidad de suelo	Área (ha)	% Área
MHA	4151.50	4.54	MPS	2546.49	2.78
MHB	667.92	0.73	MPT	12191.48	13.32
MHC	826.82	0.90	MQB	2518.92	2.75
MKA	808.48	0.88	MQE	2692.39	2.94
MKB	2739.69	2.99	MQK	65.88	0.07
MKC	817.25	0.89	MQL	4344.13	4.75
MKD	2194.31	2.40	MQP	237.60	0.26
MKE	4310.84	4.71	MQT	287.07	0.31
MKS	18606.40	20.33	MVB	1421.29	1.55
MKT	4941.01	5.40	MVE	202.64	0.22
MLC	51.75	0.06	MVG	478.38	0.52
MLE	58.45	0.06	MVS	2421.71	2.65
MPA	413.78	0.45	MWA	3334.11	3.64
MPB	6261.56	6.84	MWE	480.82	0.53
MPC	10533.09	11.51	MWI	303.05	0.33
MPG	607.38	0.66	Total general	91516.20	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de coberturas vegetales

Como ya se mencionó, se cuenta con información de coberturas de la tierra de la cuenca del río Sardinata para tres temporalidades: 2000-2002, 2005-2009 y 2010-2012. A continuación, se relacionan las coberturas presentes en cada período, así como el área que cada una ocupa con el fin de identificar los posibles cambios que han presentado a través del tiempo.

Coberturas de la tierra 2000 a 2002. De acuerdo con el *Mapa de coberturas de la tierra* a escala 1:100.000 del SIAC, en el período de 2000 a 2002 la cuenca del río Sardinata contaba 13 tipos de cobertura de la tierra nivel 3 de Corine Land Cover. La cobertura mosaica de cultivos, pastos y espacios naturales es la que mayor área ocupaba en la cuenca con el 28 %, seguida por los mosaicos de pastos con espacios naturales y bosque denso, que ocupan el 20.20 % y 19.39 % respectivamente, del área total de la cuenca. En la figura 17 se presenta la distribución de las coberturas de la tierra para el período analizado y en la tabla 17 se relaciona el área que ocupa cada una así como el porcentaje respecto al área total de la cuenca.

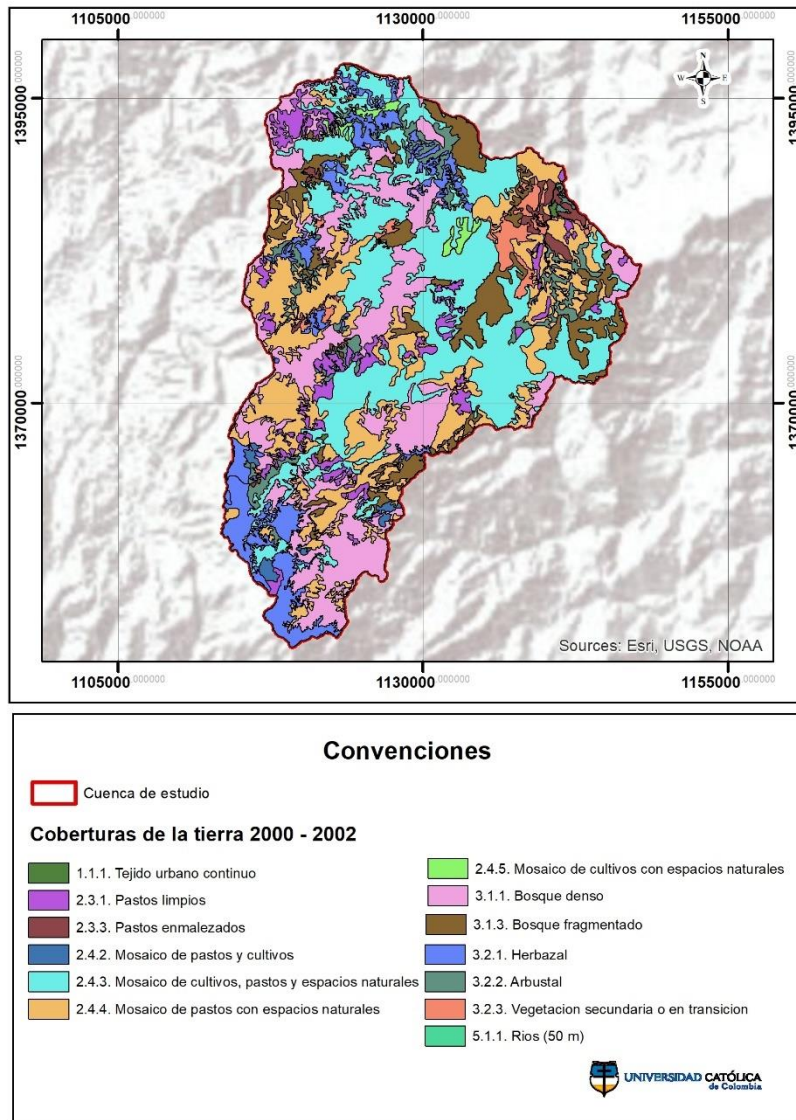


Figura 17. Coberturas de la tierra presentes en la cuenca del río Sardinata, período 2000 -2002. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17.
Coberturas de la tierra en la cuenca del río Sardinata – periodo 2000 a 2002

Cobertura de la tierra (nivel 3 Corine Land Cover)	Área (ha)	% Área
111 Tejido urbano continuo	99.26	0.11
231 Pastos limpios	4907.69	5.36
233 Pastos enmalezados	1165.89	1.27
242 Mosaico de pastos y cultivos	574.68	0.63
243 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	25626.13	28.00
244 Mosaico de pastos con espacios naturales	18482.69	20.20
245 Mosaico de cultivos con espacios naturales	806.24	0.88
311 Bosque denso	17743.11	19.39
313 Bosque fragmentado	8532.66	9.32
321 Herbazal	7225.02	7.89
322 Arbustal	4219.48	4.61
323 Vegetación secundaria o en transición	2081.77	2.27
511 Ríos (50 m)	51.59	0.06
Total general	91516.20	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Coberturas de la tierra 2005 a 2009. De acuerdo con el *Mapa de coberturas de la tierra* a escala 1:100.000 del SIAC, en el período de 2005 a 2009 la cuenca del río Sardinata contaba con 14 coberturas de la tierra, es decir, una más que en el período de 2000 a 2002, considerando que aparece la cobertura «plantación forestal» con 42.54 ha representadas en el 0.05 % del total del área de la cuenca. Ahora bien, en este rango de tiempo, siguen predominando los mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales con el 28.30 % del área total, seguidos de pastos limpios y bosque denso con 16.22 % y 15.19 %, respectivamente.

En la tabla 18 se relacionan las coberturas de la tierra identificadas y en la figura 18 se presenta la distribución de las mismas en la cuenca del río Sardinata.

Tabla 18.
Coberturas de la tierra en la cuenca del río Sardinata – período 2005 a 2009

Cobertura de la tierra (nivel 3 Corine Land Cover)	Área (ha)	% Área
111 Tejido urbano continuo	96.23	0.11
231 Pastos limpios	14841.25	16.22
233 Pastos enmalezados	2123.68	2.32
242 Mosaico de pastos y cultivos	582.98	0.64
243 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	25897.39	28.30
244 Mosaico de pastos con espacios naturales	12305.14	13.45
245 Mosaico de cultivos con espacios naturales	1734.39	1.90
311 Bosque denso	13901.96	15.19
313 Bosque fragmentado	9975.62	10.90
315 Plantación forestal	42.54	0.05
321 Herbazal	4897.31	5.35
322 Arbustal	1268.81	1.39
323 Vegetación secundaria o en transición	3797.31	4.15
511 Ríos (50 m)	51.59	0.06
Total general	91516.20	100.00

Fuente: Elaboración propia.

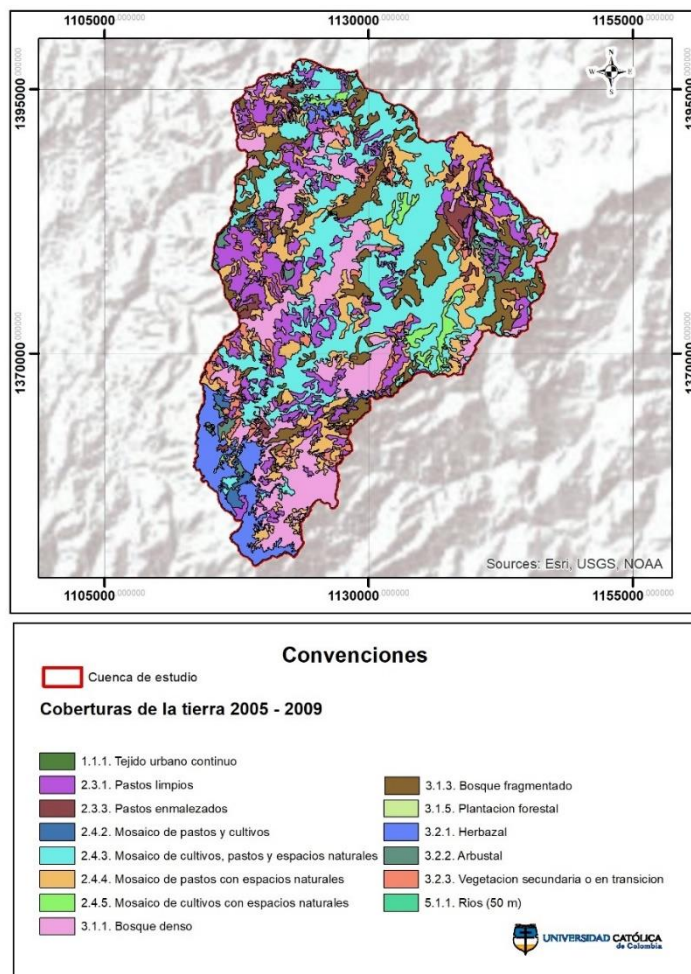


Figura 18. Coberturas de la tierra presentes en la cuenca del río Sardinata, periodo 2005-2009. Fuente: Elaboración propia.

Cobertura de la tierra 2010 a 2012 De acuerdo con el *Mapa de coberturas de la tierra* a escala 1:100.000 del SIAC, en el período de 2010 a 2012 la cuenca del río Sardinata contaba con 16 coberturas de la tierra, es decir, dos más que en el período de 2005 a 2009, considerando que aparecen las coberturas ocupando el 0.39 % y 0.02 % respectivamente, del área total de la cuenca.

Ahora bien, como en los dos períodos anteriores, los mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales siguen predominando en la cuenca con el 20.84 % del área total de la misma, seguidos por los pastos limpios con 19.80 % y el bosque denso con 14.73 %.

En la tabla 19 se relacionan las coberturas de la tierra identificadas y en la figura 19 se presenta la distribución de las mismas en la cuenca del río Sardinata.

Tabla 19.
Coberturas de la tierra en la cuenca del río Sardinata – periodo 2010 a 2012

Cobertura de la tierra (nivel 3 Corine Land Cover)	Área (ha)	Área (%)
111 Tejido urbano continuo	100.19	0.11
231 Pastos limpios	18119.93	19.80
233 Pastos enmalezados	3108.69	3.40
242 Mosaico de pastos y cultivos	1507.15	1.65
243 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	19069.49	20.84
244 Mosaico de pastos con espacios naturales	13003.89	14.21
245 Mosaico de cultivos con espacios naturales	1783.97	1.95
311 Bosque denso	13479.96	14.73
312 Bosque abierto	18.47	0.02
313 Bosque fragmentado	10133.15	11.07
314 Bosque de galería y ripario	355.36	0.39
315 Plantación forestal	51.06	0.06
321 Herbazal	4586.07	5.01
322 Arbustal	1209.54	1.32
323 Vegetación secundaria o en transición	4934.79	5.39

511 Ríos (50 m)

54.48

0.06

Total general**91516.20****100.00**

Fuente: Elaboración propia.

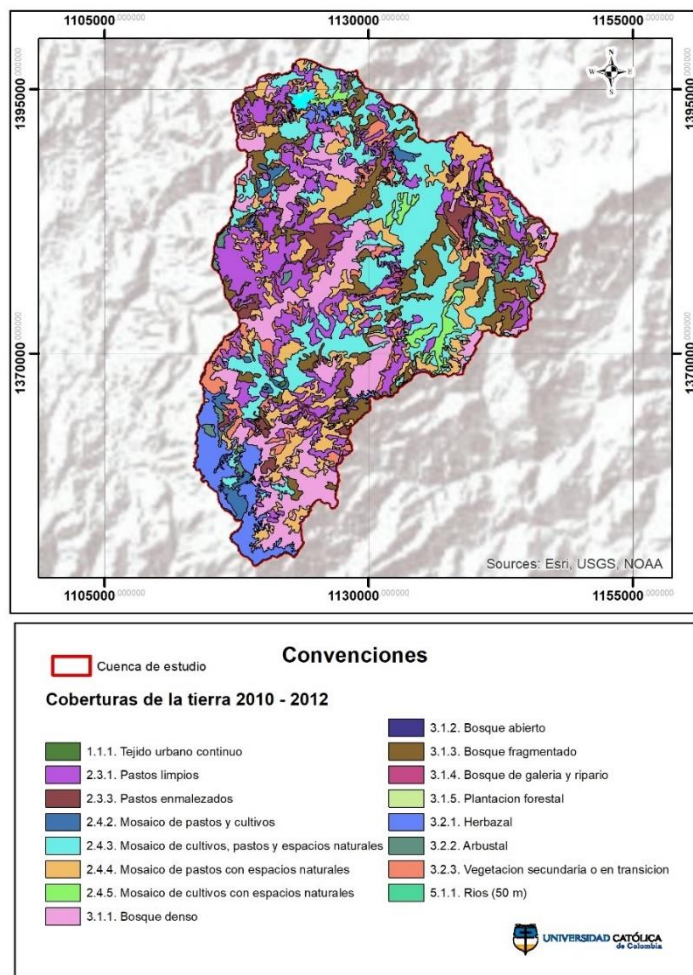


Figura 19. Coberturas de la tierra presentes en la cuenca del río Sardinata, periodo 2010-2012. Fuente: Elaboración propia.

Modelación hidrológica (SWAT)

En esta etapa se realiza el ingreso de insumos al modelo, los cuales corresponden a datos topográficos, de cobertura vegetal, tipo de suelo y datos climatológicos para que él mismo los procese a través de los diferentes métodos que utiliza (método de número de curva SCS-CN, método racional modificado, entre otros) y de esta manera obtener finalmente la información de interés como escurrimiento superficial.

Procesamiento de la información para ingresar a SWAT. Una vez se cuenta con la información requerida por el modelo, es necesario hacer un tratamiento de la misma para construir bases de datos que puedan ser procesadas por SWAT. A continuación, se describe el proceso realizado en cada tipo de información considerada en el presente trabajo.

Suelos. Partiendo de la información del *Mapa de suelos del territorio colombiano* a escala 1:100.000. Departamento: Norte de Santander —del cual se obtienen las unidades cartográficas presentes en la cuenca del río Sardinata— se realiza la búsqueda y cálculo (para algunos casos) de los 19 parámetros requeridos por SWAT para cada perfil de suelo identificado (ver tabla 20).

Tabla 20.
Parámetros de los suelos requeridos por SWAT

Parámetro	Descripción	Unidad	Rango
HYDGRP	Grupo hidrológico	-	A B C D
SOL_ZMX	Profundidad máxima de enraizamiento del perfil del suelo	mm	-
ANION_EXCL	Fración de porosidad (espacio vacío) de la cual se excluyen los aniones	fracción	0.01 - 1
SOL_CRK	Potencial de volumen de grieta del suelo	m ³ /m ³	0 - 1
TEXTURE	Textura	-	-
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa	mm	0 - 3500
SOL_BD	Densidad aparente	g/cm ³	-
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible	mm/mm	-
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada	mm/h	0 - 2000
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico	-	0.05 - 10
CLAY	Arcillas	%	-
SILT	Limos	%	-
SAND	Arenas	%	-
ROCK	Roca	%	-
SOL_ALB	Albedo de suelo húmedo	-	0 - 0.25
USLE_K	Ecuación de usus erodibilidad del suelo k factor	-	0 - 0.65
SOL_EC	Conductividad eléctrica	dS/m	-
SOL_CAL	Contenido de carbonato de calcio	%	-
SOL_PH	pH del suelo	Unidad de pH	3 - 10

Fuente: Elaboración propia.

Para la recopilación de los datos requeridos por SWAT, es importante contar con el *Estudio General de suelos del departamento de Norte de Santander* (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004), del cual se extraen datos como la textura, porcentaje de arcillas, arenas, limos y roca, contenido de carbonato de calcio, entre otros. Los datos que no se encuentran en el estudio de suelos del departamento, son calculados en algunos casos o en

otros se hallan por los rangos establecidos en la teoría, partiendo en la mayoría de los casos de la textura de cada perfil de suelo.

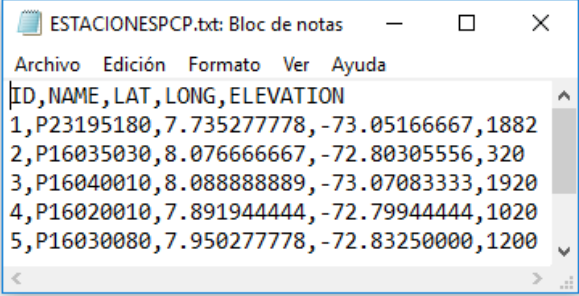
Coberturas de la tierra. Considerando que los *Mapas de coberturas de la tierra* a escala 1:100.000 para los años 2000-2002, 2005-2009 y 2010-2012 obtenidos del SIAC y considerados en el presente trabajo, se encuentran clasificados según la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, se hace necesario hacer una reclasificación de las mismas (ver tabla 21), ya que SWAT maneja otra metodología, considerando que se trata de un modelo de Estados Unidos.

Tabla 21.
Reclasificación de coberturas con SWAT

Corine Land Cover		SWAT	
COD	DESCRIPCIÓN NIVEL3	CÓD.	DESCRIPCIÓN
111	Tejido urbano continuo	URBN	Residencial
231	Pastos limpios	PAST	Pasto
233	Pastos enmalezados	RNGB	Maleza variada
242	Mosaico de pastos y cultivos	AGRL	Tierras agrícolas genéricas
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	AGRL	Tierras agrícolas genéricas
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	AGRL	Tierras agrícolas genéricas
245	Mosaico de cultivos con espacios naturales	AGRL	Tierras agrícolas genéricas
311	Bosque denso	FRSE	Bosque de hoja perenne (pinos y abetos)
312	Bosque abierto	FRSE	Bosque de hoja perenne (pinos y abetos)
313	Bosque fragmentado	FRST	Bosque mixto
314	Bosque de galería y ripario	FRSE	Bosque de hoja perenne (pinos y abetos)
315	Plantación forestal	FRSE	Bosque de hoja perenne (pinos y abetos)
321	Herbazal	RNGE	pastizales
322	Arbustal	FRST	Bosque mixto
323	Vegetación secundaria o en transición	RNGE	pastizales
333	Tierras desnudas y degradadas	BARR	Árido
511	Ríos (50 m)	WATR	agua

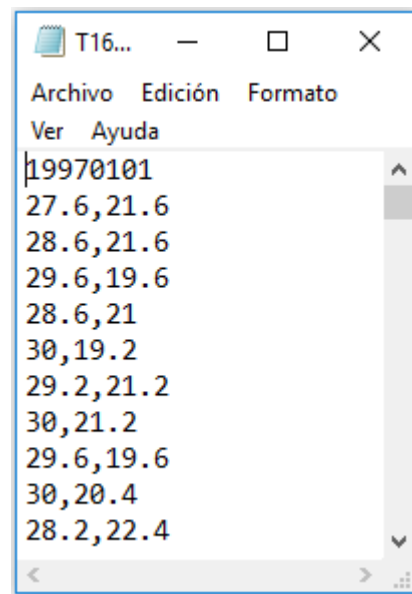
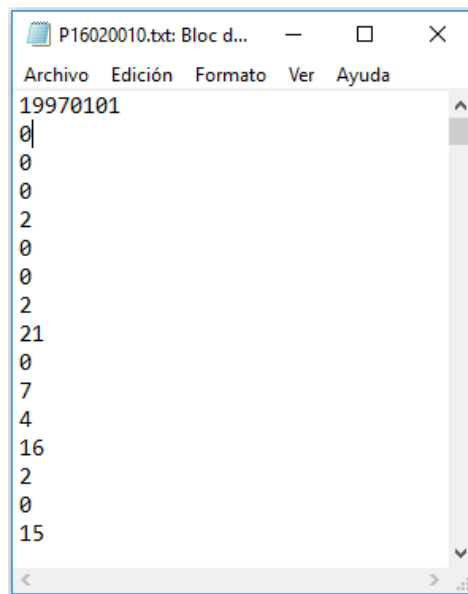
Fuente: Elaboración propia.

Clima. La herramienta de modelación SWAT requiere los datos climáticos en formatos específicos, considerando que la información suministrada por el IDEAM se encuentra en un formato diferente, se realiza un tratamiento de los mismos. Para lo anterior, se crean archivos txt con la estructura que se presenta en la figura 20 y figura 21, específicamente para las variables de temperatura, humedad relativa y precipitación —teniendo en cuenta que se cuenta con datos para las mismas. En el caso de las variables, radiación solar y velocidad del viento, es necesario realizar un cálculo estadístico —hallando desviación estándar y promedio.



```
ESTACIONESPCP.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
ID,NAME,LAT, LONG, ELEVATION
1,P23195180,7.735277778,-73.05166667,1882
2,P16035030,8.076666667,-72.80305556,320
3,P16040010,8.088888889,-73.07083333,1920
4,P16020010,7.891944444,-72.79944444,1020
5,P16030080,7.950277778,-72.83250000,1200
```

Figura 20. Formato localización estaciones. Fuente: Elaboración propia.



Ejemplo de arreglo de datos de precipitación, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.

Ejemplo de arreglo de datos de temperatura.

Figura 21. Formato de ingreso a SWAT de datos de las variables climáticas. Fuente: Elaboración propia.

En caso de existir datos faltantes, se ingresa a la herramienta de modelación un valor de «-99», a partir de esto, SWAT con el fin de completar las series de datos requiere información climatológica adicional como son valores mensuales multianuales de temperatura (máxima y mínima), precipitación, radiación solar, velocidad del viento y sus correspondientes desviaciones estándar, que se agregan a la base de datos del modelo, denominada «WGEN».

Pendientes. La clasificación de pendientes en SWAT, se puede efectuar con un dato medio —sólo para cuencas planas— o mediante rangos con un máximo de cinco clases. Para el presente estudio, se maneja la clasificación de pendientes presentada en la tabla 15, considerando que la cuenca del río Sardinata no es plana.

Modelación hidrológica con SWAT. Una vez procesada la información como la requiere SWAT, se establece el período para el cual se hace la simulación y se configura la frecuencia en la que se pretende obtener la información de salida, que, para el presente estudio, corresponde a datos de precipitación y esorrentía directa en períodos diarios.

Ahora bien, para el caso en particular del análisis de la cuenca del río Sardinata, se realiza la modelación para tres (3) escenarios de acuerdo con los períodos de coberturas analizados: 2000 – 2002, 2005 – 2009 y 2010 – 2012.

Calibración del modelo (SWAT). Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para los distintos períodos, la calibración del modelo se hace para la temporalidad comprendida entre los años 2005 al 2009 (con mejores resultados entre los caudales observados y los simulados). Adicionalmente, este período cuenta con la menor cantidad de datos faltantes de caudal de los tres considerados anteriormente.

Para llevar a cabo la calibración del modelo se hizo uso de la herramienta de calibración manual de SWAT, para lo cual es necesario organizar los datos diarios de caudal obtenidos de la estación Puente Sardinata, ubicada en la salida de la cuenca del río Sardinata y los resultados obtenidos de la modelación para la temporalidad seleccionada. En el caso específico de este estudio se hace la calibración con la variación de parámetros como la capacidad de almacenamiento del suelo, la conductividad hidráulica saturada del suelo, entre otros parámetros establecidos en la literatura que pueden influir considerablemente en la respuesta hidrológica de una cuenca.

Predicción del comportamiento hidrológico de la cuenca

Con el modelo calibrado y partiendo del análisis de los resultados de la modelación, se genera un patrón asociado a los cambios de cobertura vegetal con el fin de extrapolarlos (asumiendo que el cambio de cobertura a futuro será igual al evidenciado con los datos históricos o registrados) y, así, determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca con la influencia del cambio de la cobertura para dos escenarios. En el primero se proyecta que el cambio de coberturas avanza como lo ha venido haciendo durante los periodos estudiados, por otro lado, en el segundo escenario de predicción se considera la condición contraria, es decir, que las coberturas tienden a la distribución inicial de la cuenca.

Análisis de resultados

A continuación, se presenta el análisis de la variación de coberturas observado a partir de la información oficial de los mapas de coberturas a escala 1:100.000 del IDEAM, así como de los datos de caudal simulados frente a los observados. Todo lo anterior, para verificar si existe una influencia de la variación de las coberturas presentes en la cuenca del río Sardinata con el comportamiento hidrológico de la misma.

Relación del cambio de coberturas en los tres períodos analizados

En este numeral se realiza un análisis del cambio de las coberturas de la tierra que ha presentado el área de la cuenca del río Sardinata durante los tres períodos analizados, partiendo de la información oficial reportada por el IDEAM en los mapas de cobertura de la tierra (presentada en los numerales anteriores) y resaltando los cambios más notorios, los cuales se presentan a continuación en la figura 22.

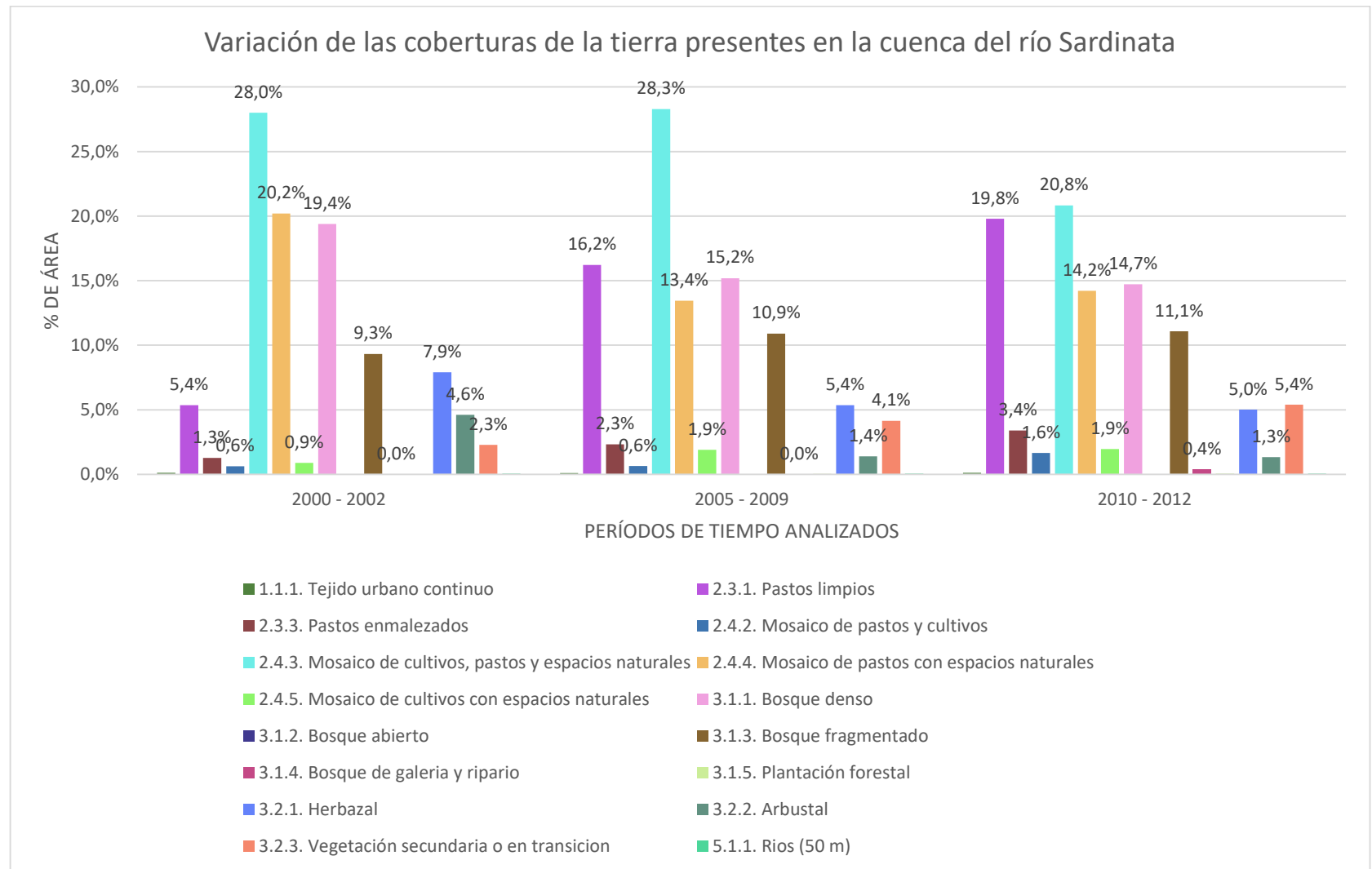


Figura 22. Variación de las coberturas de la tierra presentes en la cuenca del río Sardinata - 2000 a 2012. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los datos de coberturas de la tierra de cada período analizado, es posible evidenciar que todas han variado, ya sea porque presentan aumento o disminución. Por otra parte, es notorio que algunos tipos de cobertura no están presentes en los tres períodos analizados como el caso de la «3.1.5. Plantación forestal» que no se encontraba del 2000 a 2002 y apareció del 2005 a 2009, pasando de 13 coberturas de la tierra a 14 en el segundo período; asimismo, las coberturas «3.1.2. Bosque abierto» y «3.1.4 Bosque de galería y ripario» se encuentran sólo hasta el último período analizado (2010 – 2012), pasando de 14 a 16 coberturas de la tierra en el período de 2010 a 2012.

Por otra parte, la cobertura «2.3.1. Pastos limpios» es la que mayor cambio ha presentado, la cual pasó de ocupar el 5.36 % en el período de 2000 a 2002 a 19.80 % en el 2012, es decir, ha tenido un aumento de 14.44 %. Esta cobertura se caracteriza por contar con un porcentaje de pastizales mayor al 70 %, en esta se realizan generalmente prácticas de manejo como limpieza, enclavamiento y/o fertilización. Estas prácticas no permiten el desarrollo de otro tipo de coberturas; respecto a cultivos tienen un cubrimiento menor al 30 % de la unidad y se pueden encontrar zonas de pastos limpios sujetas a inundaciones temporales con área menor a 25 ha (IDEAM, 2010).

En el caso de la cobertura mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, aunque durante los tres períodos analizados mantuvo el primer lugar en área ocupada sobre el total de la cuenca, presenta una reducción en área del 7.16 % (pasando de 28 % a 20.84 %) a lo largo de los períodos analizados. Estas coberturas presentan una combinación de cultivos y pastos

que ocupan entre el 30 % y 70 % de la superficie total de la unidad y los espacios naturales están conformados por arbustales, bosque de galería y ripario, entre otros.

Respecto a la cobertura de bosque de galería y ripario, según el IDEAM (2010) «está constituida por vegetación arbórea ubicada en las márgenes de cursos de agua permanentes o temporales. Este tipo de cobertura está limitada por su amplitud, ya que bordea los cursos de agua y los drenajes naturales», sólo aparece hasta el período 2010 a 2012, lo que es inusual, considerando que en la zona se cuenta con drenajes asociados a este tipo de cobertura.

Es pertinente indicar que, si bien se tiene conocimiento de la presencia de cultivos ilícitos en la zona de estudio —teniendo en cuenta el soporte de la justificación del presente trabajo— en la información oficial consultada y considerada en el análisis de coberturas de la tierra, no se incluye en ninguno de los tres períodos la cobertura de nivel 3 (nivel considerado en el presente trabajo) «2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos» la cual, a su vez, contiene la cobertura nivel 4 «2.2.2.5. Coca» que según el IDEAM (2010) es una «cobertura denominada por el cultivo de coca (*Erythroxylum coca Lam.*), generalmente distribuido en parcelas pequeñas en zonas rurales alejadas de zonas urbanas, con frecuencia rodeadas de vegetación natural densa como bosques».

Resultados de la modelación 2000–2002

En la figura 23, se presenta la correlación de los datos observados con los datos simulados para el período de 2000 a 2002, en la cual se evidencia un comportamiento similar de los dos caudales (simulados y observados) en la mayoría del período analizado; sin embargo, hacia el final del 2002 se presenta una notoria diferencia entre los datos; asimismo, hay algunos picos en los valores.

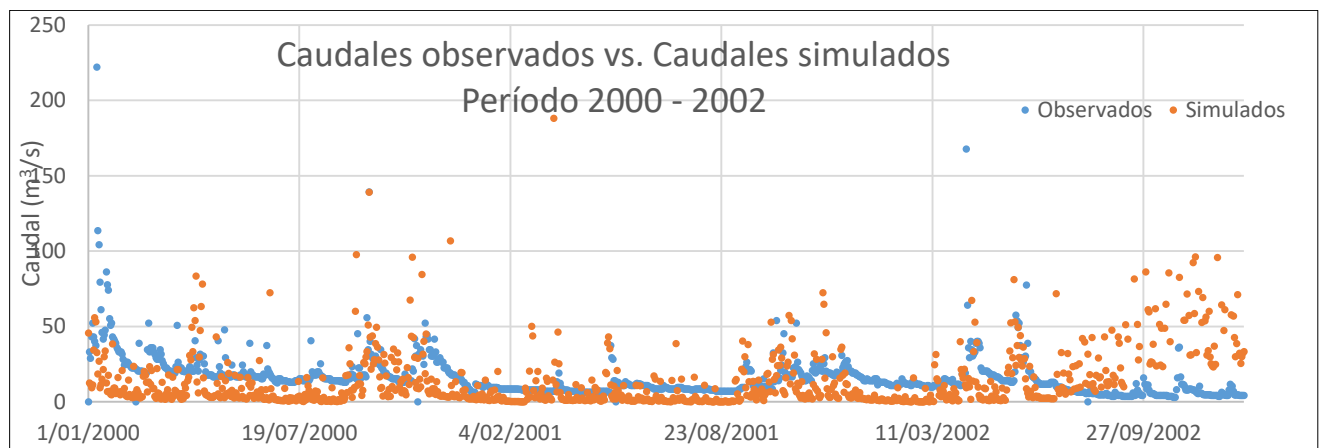


Figura 23. Correlación de los datos observados vs. los obtenidos en la modelación para el período 2000 - 2002. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la modelación 2005 – 2009

En la figura 24, se presenta la correlación de los datos observados con los datos simulados para el período de 2005 a 2009, en la cual se evidencia una mejoría en la tendencia de los datos respecto a la obtenida en el período anterior. Sin embargo, para este período también se presentan algunos picos en los que no coinciden ambos caudales (observados y simulados).

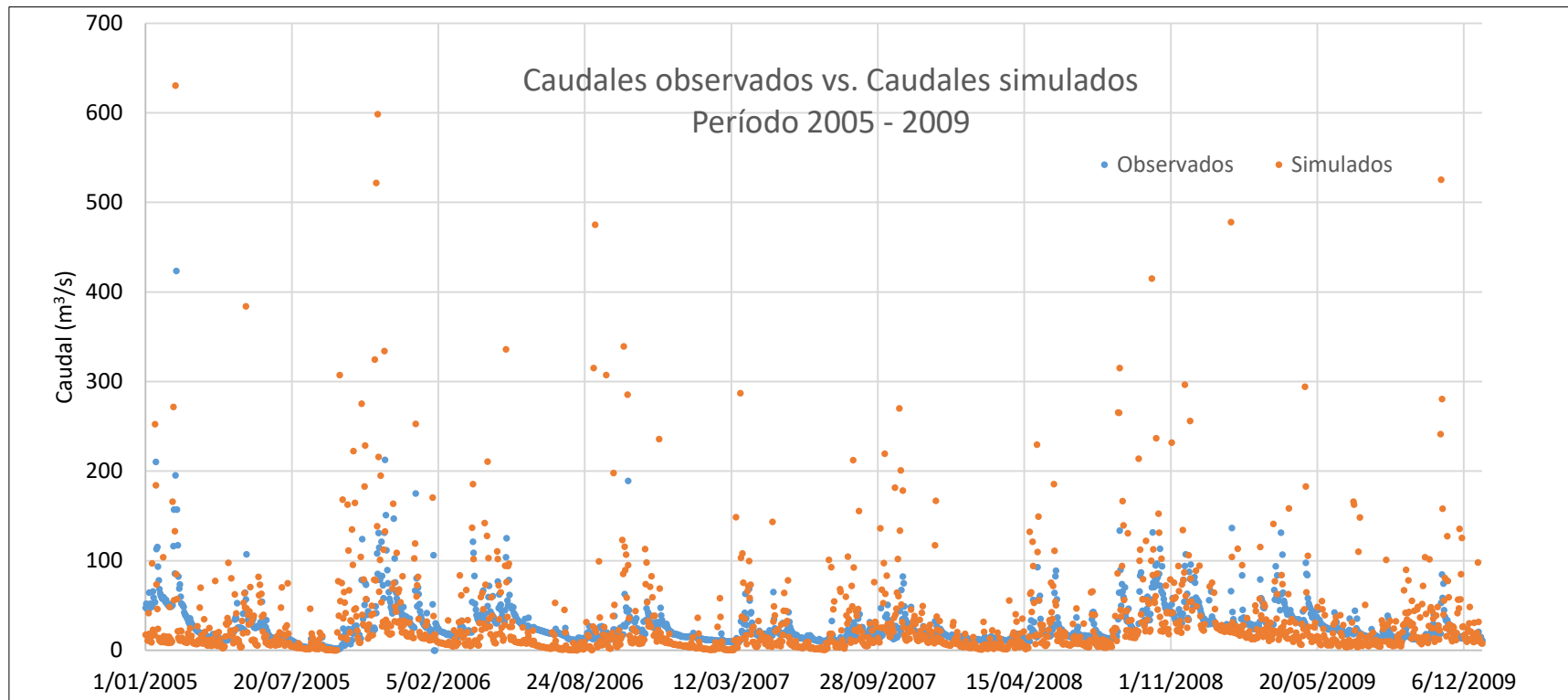


Figura 24. Correlación de los datos observados vs. los obtenidos en la modelación para el período 2005 - 2009. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la modelación 2010 – 2012

En la figura 25, se presenta la correlación de los datos observados con los datos simulados para el período de 2010 a 2012, en la cual se evidencia una mayor dispersión de los datos (a diferencia del período anterior). De las tres épocas analizadas, en esta se presentan mayores variaciones entre los caudales observados y los simulados por SWAT. Lo anterior, puede generarse posiblemente por los datos meteorológicos disponibles para este período.

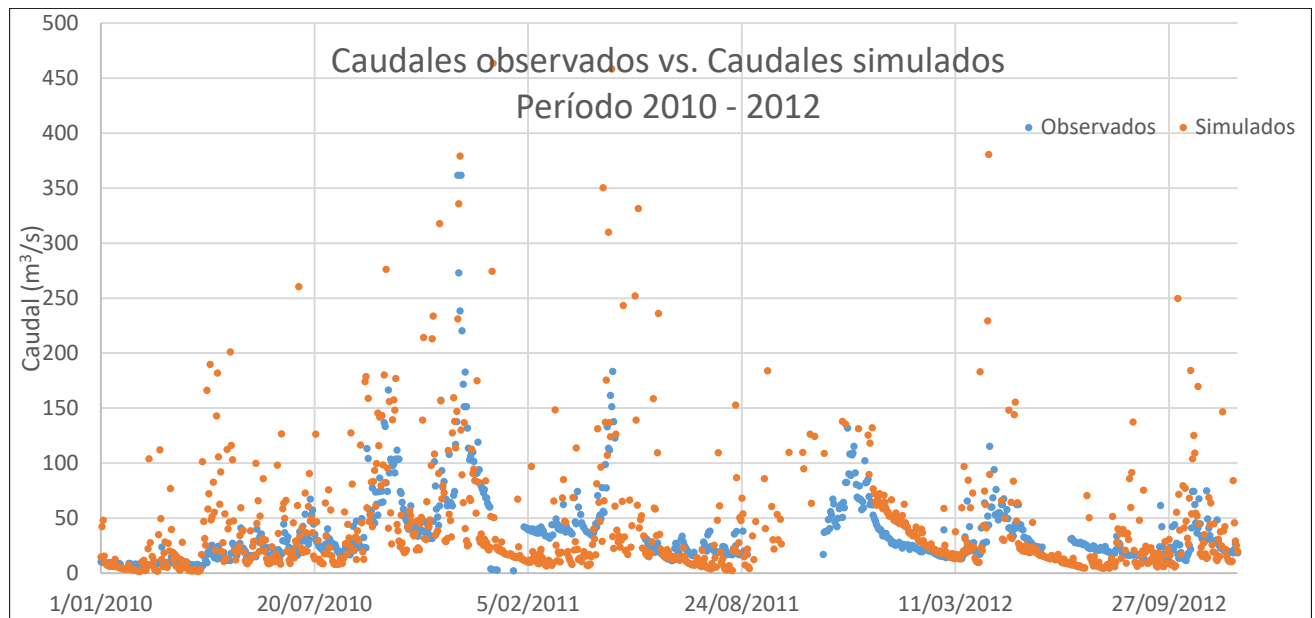


Figura 25. Correlación de los datos observados vs. los obtenidos en la modelación para el período 2010 - 2012. Fuente: Elaboración propia.

Calibración del modelo hidrológico

En la figura 26 se presentan los resultados de la calibración del modelo para el período comprendido entre 2005 a 2009, en el cual se observa que los picos que se presentaban al inicio de la temporalidad analizada, disminuyeron considerablemente, a diferencia de los picos del final del período que se mantuvieron; sin embargo, al hallar el coeficiente de bondad de Nash, se obtiene un valor «bueno», por lo que se decide continuar el análisis con este resultado.

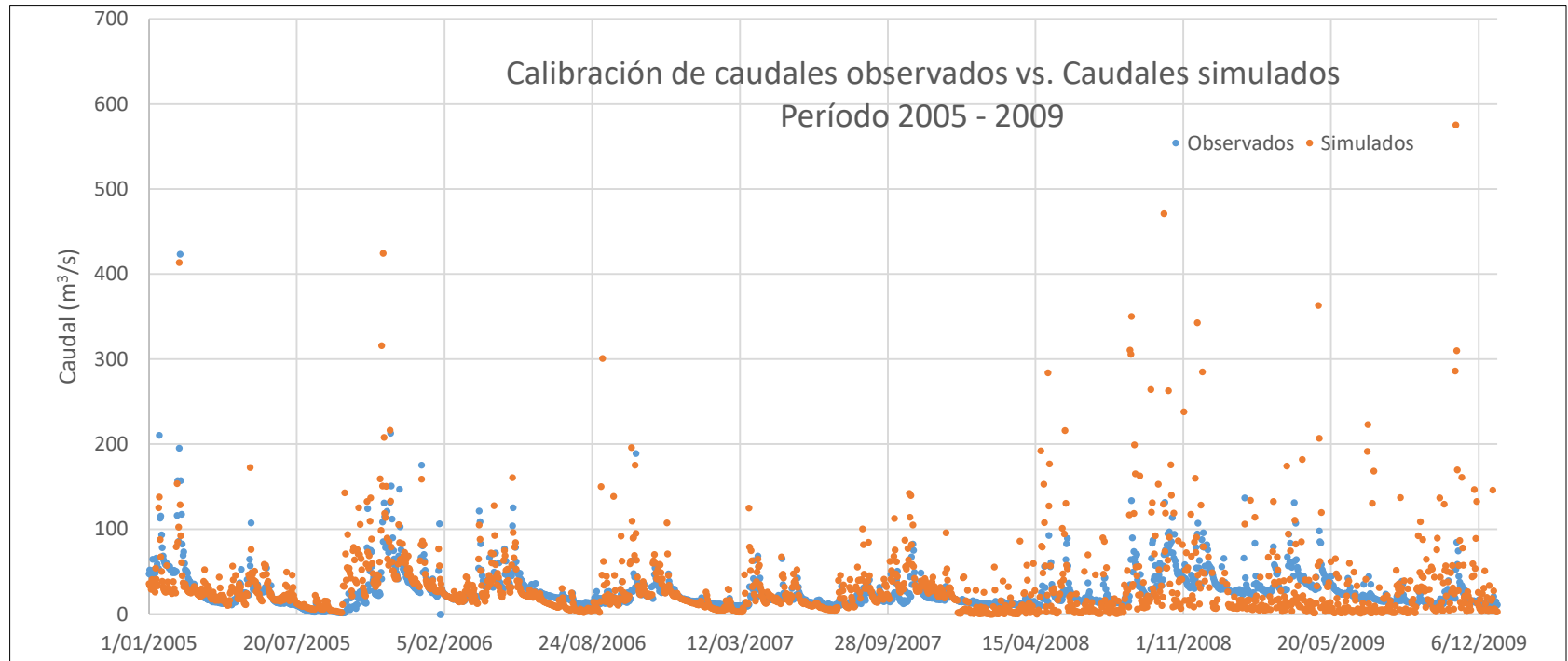


Figura 26. Resultados de la calibración de caudales observados vs. los obtenidos en la modelación para el período 2005 - 2009. Fuente: Elaboración propia.

Correlación de caudales simulados con la variación de la cobertura vegetal en la cuenca del río Sardinata

Considerando que el objetivo del presente trabajo consiste en verificar si la variación de las coberturas vegetales en la cuenca del río Sardinata, influye en la generación de caudales pico de la misma, es indispensable como primera medida, analizar la escorrentía generada y su relación con la precipitación en los períodos analizados, para de esta forma hacer la respectiva correlación con la información de coberturas vegetales de la zona de estudio.

Análisis para el período 2000-2002

De acuerdo con la información arrojada por el modelo (ver tabla 22), se tiene que para el período de 2000 a 2002 la escorrentía total fue de 3822.5 mm de un total de precipitación de 28781.85 mm, es decir, en promedio el porcentaje de escorrentía para este período es de 10.5 %. En la figura 27 se presenta la relación de la precipitación y escorrentía en cada uno de los años que comprenden el período analizado.

Considerando que el presente período es el primero de los tres analizados, no se hace un análisis de la escorrentía con la variación de las coberturas vegetales, teniendo en cuenta que este es el punto de partida, el número de curva CN_{II} calculado para este periodo es de 65.86.

Tabla 22.
Escorrentía generada por el modelo para el período de 2000 a 2002

Año	2000			2001			2002		
Mes	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía
Ene	807.2	80.8	13.4%	892.43	119.57	5.7%	492.76	28.29	5.74%
Feb	547.6	26.0	9.9%	888	88.14	10.8%	750.52	81.32	10.84%
Mar	448.4	32.7	12.6%	196.4	24.83	0.7%	74.4	0.52	0.70%
Abr	729.8	116.7	16.1%	683.4	109.89	2.4%	133.8	3.18	2.38%
May	751.0	33.6	1.5%	312.8	4.56	5.8%	661.2	38.62	5.84%
Jun	445.6	38.7	10.4%	877.6	91.63	12.7%	1327.4	169.19	12.75%
Jul	357.6	4.2	1.0%	367.4	3.79	23.4%	1665	389.78	23.41%
Ago	293.7	23.9	4.4%	379.2	16.55	15.8%	805.6	127.26	15.80%
Sep	2.366.0	470.8	2.3%	165	3.76	18.8%	1265.5	237.29	18.75%
Oct	1.098.1	156.0	12.0%	1031.4	123.94	13.1%	1064.75	139.97	13.15%
Nov	1.356.6	221.0	13.9%	1710.4	238.21	15.0%	1533.5	229.62	14.97%
Dic	518.7	86.1	14.4%	1015.87	145.87	15.1%	767.28	116.00	15.12%
Total	9720.26	1290.68		8519.88	970.75		10541.71	1561.05	
Promedio			9.33 %			11.62 %			11.62 %

Fuente: Elaboración propia.

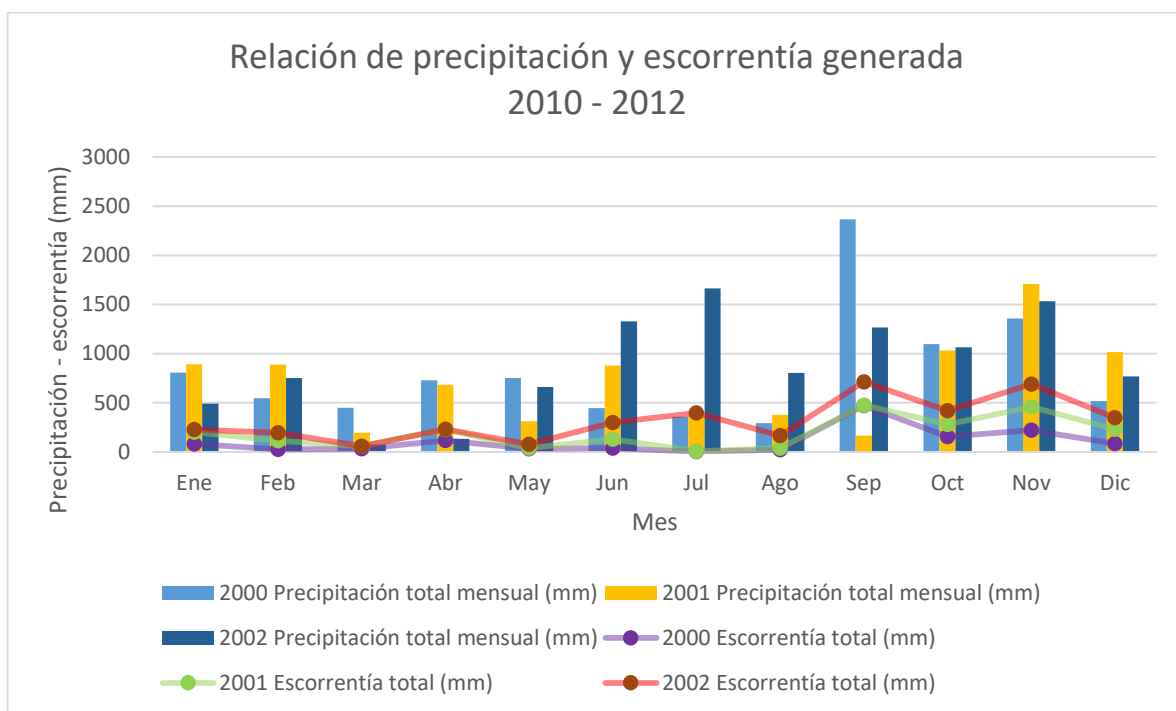


Figura 27. Relación de precipitación y escorrentía generada en el período 2000 a 2002. Fuente: Elaboración propia.

Análisis para el período 2005 a 2009

Según la información arrojada por el modelo (ver tabla 23 y tabla 24), se tiene que para el período de 2005 a 2009 la escorrentía total es de 9506.94 mm de un total de precipitación de 84318.84 mm, es decir, en promedio el porcentaje de escorrentía para este período es de 12.08 %, es decir, aumenta respecto a la temporalidad anterior. En la figura 28 se presenta la relación de la precipitación y escorrentía en cada uno de los años que comprenden el período analizado.

Respecto a la relación de la escorrentía generada con la variación de la cobertura, se evidencia que para este período hubo un aumento de los pastos limpios, pasando de 5.36 % a 16.22 %; además, hubo una disminución del bosque denso pasando del 19.39 % al 15.19 %. Lo anterior, tiene sentido con el aumento de la escorrentía, considerando que los bosques retienen la precipitación en la zona, pues cuentan con un número de curva menor al de los pastos, que son coberturas que presentan un aumento de casi el 11 %, por este motivo el número de curva CNII calculado para esta temporalidad aumento a 67.24.

Tabla 23.
Escorrentía generada por el modelo para el período de 2005 a 2009 – Parte 1

Año	2005			2006			2007		
Mes	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía
Ene	1054.00	185.90	17.64 %	1846.05	155.08	8.40 %	392.40	34.00	8.67 %
Feb	1563.40	247.09	15.80 %	1129.60	77.17	6.83 %	1473	168.4	11.43 %
Mar	655.20	88.25	13.47 %	132.40	21.45	16.20 %	293.80	42.90	14.60 %
Abr	1208.40	152.01	12.58 %	1605.00	398.20	24.81 %	363.80	55.00	15.12 %
May	1794.80	203.73	11.35 %	2269.80	90.50	3.99 %	1080.00	68.37	6.33 %
Jun	1387.40	147.62	10.64 %	1714.40	112.05	6.54 %	1364.60	39.89	2.92 %
Jul	808.20	71.60	8.86 %	282.80	39.27	13.89 %	1708.20	73.33	4.29 %
Ago	520.05	104.72	20.14 %	485.80	58.96	12.14 %	355.44	51.48	14.48 %
Sep	1503.00	167.31	11.13 %	562.74	53.79	9.56 %	632.40	85.47	13.52 %
Oct	3217.59	297.33	9.24 %	1877.40	347.38	18.50 %	2089.70	205.70	9.84 %
Nov	3679.20	644.26	17.51 %	2702.60	223.12	8.26 %	1298.80	117.37	9.04 %
Dic	1069.25	51.96	4.86 %	1575.60	106.73	6.77 %	3400.80	342.79	10.08 %
Total	18460.49	2361.78		16184.19	1683.71		14452.94	1284.71	
Promedio			12.77 %			11.32 %			10.03 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24.
Escorrentía generada por el modelo para el período de 2005 a 2009 – Parte 2

Año	2008			2009		
Mes	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía
Ene	1085.62	52.89	4.87 %	2337.57	265.20	11.35 %
Feb	666.66	76.18	11.43 %	769.00	106.62	13.87 %
Mar	1433	105.7	7.38 %	631.80	91.52	14.49 %
Abr	419.21	80.30	19.16 %	1487.60	264.22	17.76 %
May	422.71	82.72	19.57 %	1186.40	149.60	12.61 %
Jun	681.98	138.49	20.31 %	1988.60	219.56	11.04 %
Jul	1517.98	203.72	13.42 %	893.40	145.75	16.31 %
Ago	2106.11	161.56	7.67 %	6130.00	646.69	10.55 %
Sep	651.07	93.83	14.41 %	1550.20	149.16	9.62 %
Oct	922.64	108.24	11.73 %	1450.00	169.18	11.67 %
Nov	2586.10	268.83	10.40 %	2580.20	344.24	13.34 %
Dic	633.00	136.50	21.56 %	1090.38	116.05	10.64 %
Total	13126.07	1508.95		22095.16	2667.79	
Promedio			13.49 %			12.77 %

Fuente: Elaboración propia.

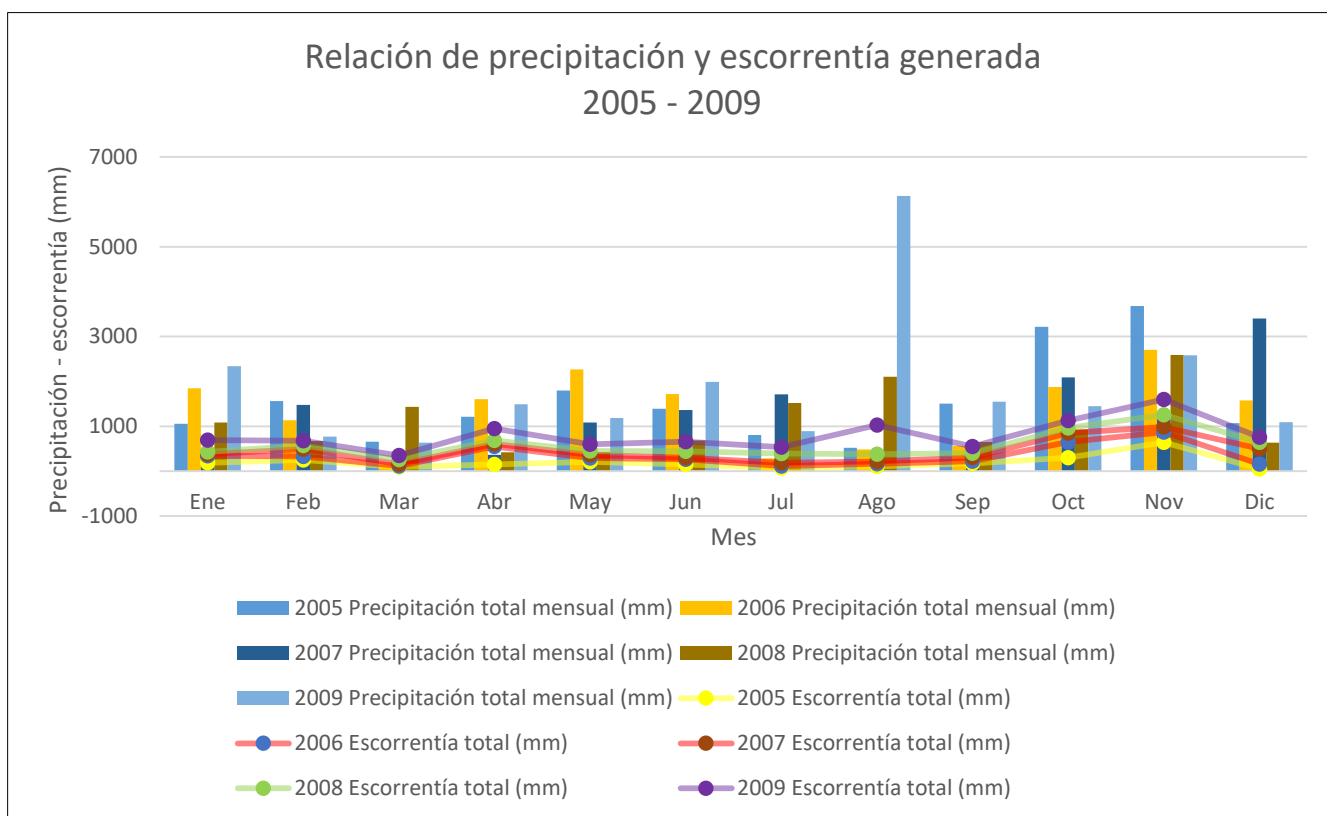


Figura 28. Escorrentía generada en el período 2005 a 2009. Fuente: Elaboración propia.

Análisis para el período 2010–2012

De acuerdo con la información arrojada por el modelo (ver tabla 25), se tiene que para el período de 2010 a 2012 la escorrentía total fue de 12517.85 mm de un total de precipitación de 68613.80 mm, es decir, en promedio el porcentaje de escorrentía para este período fue de 15.77 %, es decir, aumentó respecto a la temporalidad anterior. En la figura 29 se presenta la relación de la precipitación y escorrentía en cada uno de los años que comprenden el período analizado.

Respecto a la relación de la escorrentía generada con la variación de la cobertura, se evidencia que para este período hubo un cambio que sobresale respecto a los demás, que corresponde al aumento de los pastos limpios, los cuales pasaron de 16.22 % a 19.80 %. Lo anterior, tiene sentido con el aumento de la escorrentía, considerando que —como ya se mencionó— el número de curva CN_{II} para la cuenca en este periodo de tiempo aumento nuevamente a 67.86.

Tabla 25.
Escorrentía generada por el modelo para el período de 2010 a 2012

Año	2010			2011			2012		
Mes	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía	Precipitación total mensual (mm)	Escorrentía total (mm)	Porcentaje escorrentía
Ene	238.20	16.76	7.04%	1494.73	178.20	11.92%	1820.00	232.05	12.75%
Feb	627.40	53.31	8.50%	3611.10	681.81	18.88%	972.60	74.13	7.62%
Mar	725.20	25.59	3.53%	3540.00	902.20	25.49%	1157.80	151.10	13.05%
Abr	2571.00	352.84	13.72%	1097.60	152.77	13.92%	4824.50	698.30	14.47%
May	2061.00	209.68	10.17%	468.00	21.37	4.57%	1064.78	87.05	8.18%
Jun	1370.40	134.28	9.80%	1621.60	182.04	11.23%	1776.00	748.02	42.12%
Jul	1807.54	210.50	11.65%	2404.40	756.60	31.47%	1200.00	138.05	11.50%
Ago	2440.00	835.90	34.26%	2543.00	554.60	21.81%	323.87	21.30	6.58%
Sep	3520.00	585.83	16.64%	2595.08	568.88	21.92%	6807.00	1319.50	19.38%
Oct	2117.70	310.32	14.65%	3743.30	805.55	21.52%	1044.00	330.85	31.69%
Nov	2405.10	484.49	20.14%	1147.70	99.78	8.69%	1776.40	292.13	16.45%
Dic	880.80	195.34	22.18%	250.40	6.08	2.43%	565.60	100.71	17.81%
Total	20764.34	3414.81		24516.91	4909.87		23332.56	4193.17	
Promedio			14.36 %			16.15 %			16.80 %

Fuente: Elaboración propia.

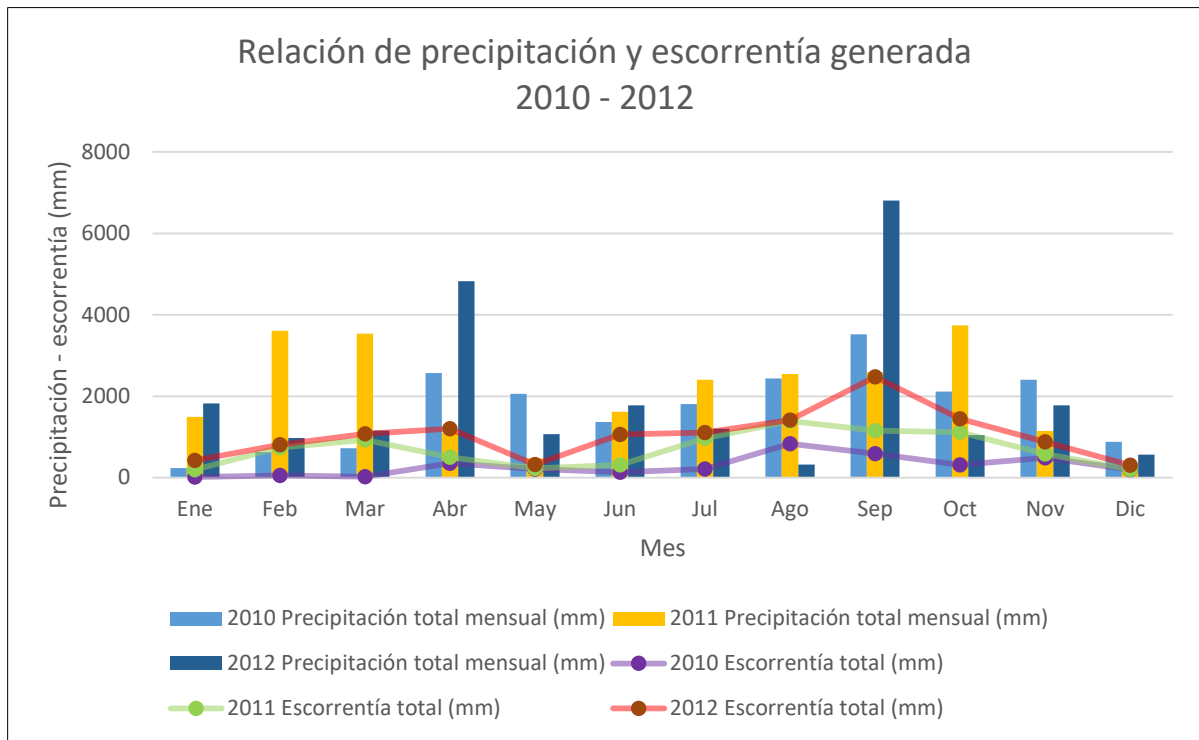


Figura 29. Escorrentía generada en el período 2010 a 2012. Fuente: Elaboración propia.

Análisis para los escenarios de predicción

Para la primera predicción (escenario según el histórico) se establecen unos porcentajes de cobertura que siguen la tendencia presentada entre el periodo 2000 a 2012, en donde las coberturas que han tenido un aumento en su área en dicha temporalidad se mantienen en aumento, y las coberturas que han disminuido continúan con dicha relación. Para este escenario se tienen unos porcentajes por cobertura como se muestra en la figura 30 (escenario 2030 – 2031 (1)), siendo la cobertura de mayor presencia los pastos limpios (38.2%), seguida por la vegetación secundaria de transición (11.9%).

Por otro lado, y con la final de establecer una condición en la cual se proyecta recuperar las coberturas de suelo que tenían mayor presencia en el principio del periodo de estudio (2000), se presenta el segundo escenario en el cual la cobertura con mayor presencia es la de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (31.7%), seguida por el mosaico de pastos con espacios naturales (22.3%) y bosque denso (22.4).

Para los dos escenarios mencionados anteriormente, se ha calculado el número de curva (CNII) y el porcentaje de esorrentía en relación con la precipitación, obteniendo unos valores de CNII de 70.35 para el primer escenario y 65.04 para el escenario 2, y unos porcentajes de esorrentía/precipitación de 18.03% y 10.01% correspondientemente, lo que evidencia una vez más la relación existente entre las coberturas del suelo y la respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica del río Sardinata.

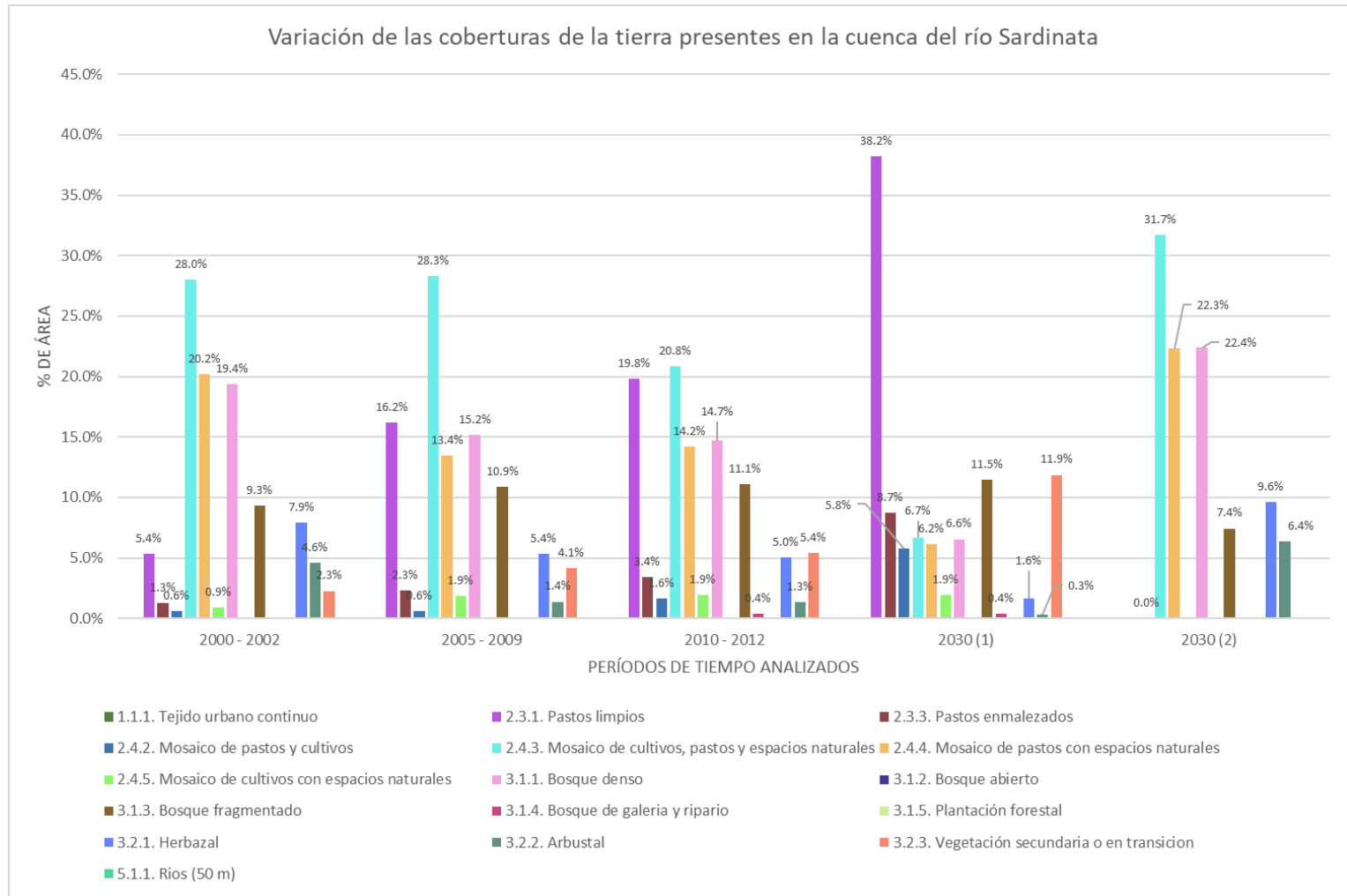


Figura 30. Variación de las coberturas en la cuenca del río Sardinata - 2000 a 2030. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Con la aplicación de la herramienta de modelación SWAT y el análisis multitemporal del cambio de las coberturas del suelo, se puede establecer que la variación de ciertos tipos de cobertura influye directamente en la generación de escorrentía en la cuenca y, por consiguiente, en el aumento de los caudales generados, ya que como lo indican los números de curva calculados para cada uno de los periodos estudiados y el porcentaje de precipitación generada, se evidencia que a un mayor número de curva se presentan mayores porcentajes de escorrentía generada.

Tabla 26.
Resumen escorrentía generada y número de curva de la cuenca

PERIODO	NÚMERO DE CURVA (CN_{II})	Escorrentía/Precipitación (%)
2000-2002	65.86	10.5
2005-2009	67.24	12.06
2010-2012	67.86	15.77
2030-2031	70.35	18.03
2030-2031	65.04	10.01

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, en la cuenca del río Sardinata los cambios de cobertura durante el período analizado no se consideran críticos, dado que no son suficientes para generar caudales picos extremos en la cuenca, sumado a las características propias de morfometría como es su forma alargada.

Se evidencia que entre los años 2000 a 2012 aparecen tres coberturas adicionales como lo son: «bosque de galería o ripario», «plantación forestal» y «bosque abierto», resultando para el último año un total de 16 coberturas. Por otro lado, las coberturas que sufrieron mayores cambios en cuanto a su distribución espacial en el período analizado fueron «pastos limpios»,

umentando de 5,36 % a 19,8 %; «mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales» que disminuyó en área un 7,16 % y, por último, la cobertura de «bosque denso» que se redujo en un 4,66 %.

No fue posible hacer un análisis o relación del aumento de cultivos ilícitos en la zona, con la respuesta hidrológica de la cuenca del río Sardinata, considerando que la información oficial de coberturas vegetales no contiene los cultivos permanentes, a los cuales se les asocia el cultivo de coca.

A partir de la recopilación y procesamiento de la información meteorológica, a través de la herramienta SWAT, se realizó el balance hídrico de la cuenca del río Sardinata para cada período analizado, encontrando que para el 2000 a 2002 la precipitación generada corresponde a 28781.85 mm de la cual el 10 % es escorrentía superficial, para el 2005 a 2009 la precipitación es 84318.84 mm, siendo el 12.08 % escorrentía superficial y por último, para el 2010 a 2012 la precipitación es de 68613.80 mm, de los cuales el 15.77 % corresponde a escorrentía. Con lo anterior es posible evidenciar un aumento en la generación de escorrentía superficial en la cuenca del río Sardinata con el cambio de coberturas presentado por un valor del 5.77 %.

Respecto a los escenarios de predicción planteados, se ha calculado el número de curva (CNII) y el porcentaje de escorrentía en relación con la precipitación, obteniendo para el primer escenario un valor de CNII de 70.35 y un porcentaje de escorrentía/precipitación de 18.03 %, dicho escenario se ha establecido con porcentajes de coberturas que siguen la

tendencia presentada entre el periodo 2000 a 2012. Por otro lado, se realiza la simulación de un segundo escenario, en el cual se proyecta recuperar las coberturas de suelo que tenían mayor presencia en el principio del periodo de estudio (2000), obteniendo un valor de CNII de 65.04 y un porcentaje de escorrentía/precipitación de 10.01 %, que evidencia una vez más la relación existente entre las coberturas del suelo y la respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica del río Sardinata.

Por último, para la calibración del modelo hidrológico se ha considerado el coeficiente de correlación de Nash-Sutcliffe que mide la variabilidad de las observaciones y que tan bien explicadas están dichas variaciones por el modelo, para el periodo 2005-2009, ya que ha sido el periodo que mejor se ajusta a los datos observados con un valor de 0.58 considerado según (Molnar, 2011) como un valor “bueno” para una calibración hidrológica.

Recomendaciones

Se recomienda realizar una revisión y actualización de la información oficial por parte de las entidades respectivas, con el fin de contar con datos más certeros y relacionados con la realidad de la zona. Lo anterior, debido a que se observaron ciertas incongruencias en la información, como en el caso de los mapas de coberturas de los tres períodos analizados, en los cuales no se encuentra la cobertura «2.2.2. Cultivos permanentes» —relacionada con los cultivos de coca, según la metodología Corine Land Cover. De acuerdo con la justificación del problema del presente trabajo (basado en informes de organizaciones no gubernamentales, cifras de institutos como el IDEAM y noticias) es evidente que en la zona existen este tipo de cultivos.

Sumado a lo anterior, se relaciona la información de suelos, la cual no es suficiente, considerando que, si bien existe el estudio de suelos del departamento de Norte de Santander (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004), este no se encuentra completo para todas las unidades cartográficas de la zona de estudio. Asimismo, sería de gran utilidad el mejoramiento y ampliación de las estaciones climatológicas del IDEAM en cuanto a la cantidad de parámetros medidos en la zona, ya que la deficiencia de los mismos evita se pueda realizar un análisis completo de las variables climatológicas necesarias para poder estimar el impacto de la deforestación en el lugar.

En caso de continuar con la investigación relacionada con la hidrología y cambio de coberturas en la cuenca del río Sardinata, es pertinente considerar las recomendaciones

anteriores, para contar con información actualizada y completa de la zona acorde con las condiciones de la cuenca hidrográfica y de esta forma lograr un mejor ajuste en los resultados de los modelos que se requiera emplear.

Bibliografía

- Abdelwahab, O., Ricci, G., De Girolamo, A., & Gentile, F. (2018). Modelling soil erosion in a Mediterranean watershed: Comparison between SWAT and AnnAGNPS models. *Environmental Research*, 366-376.
- Abdelwahabab, O., Ricci, G., De Girolamo, A., & Gentile, F. (2018). Modelling soil erosion in a Mediterranean watershed: Comparison between SWAT and AnnAGNPS models. *Environmental Research*, 363-376.
- Alcaldía Municipal de Sardinata. (2002). Esquema de Ordenamiento Territorial Sardinata Norte de Santander 2002. Sardinata , Norte de Santander , Colombia . Obtenido de Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental .
- Alcaldía Municipal de Sardinata. (2016). *Plan Municipal de Desarrollo* . Sardinata: Alcaldía Municipal de Sardinata.
- Arias, F. (2006). *El proyecto de investigación* . Caracas: Episteme.
- Bennett, A. (1998). *Enlazando el paisaje. El papel de los corredores y la conectividad en la conservación de la vida silvestre*. Gland, Suiza y Cambridge: IUCN.
- Bernal , S., & Prado, C. (2015). *Análisis de la influencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales de la cuenca de la quebrada Granadillo en los años 1993 y 2009 a partir de aerofotografías y cartografía del Insituto Geográfico Agustín Codazzi*. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia .
- Bingner, R., Theurer, F. D., & Yuan, Y. (2018). *AnnAGNPS Technical Processes Documentation Version 5.5* . Oxford: USDA-ARS, National Sedimentation Laboratory .

- Bingner, R., Theurer, F., Yuan, Y., & Taguas., E. (2018). *AnnAGNPS TECHNICAL PROCESSES Documentation version 5.5*. Oxford: USDA-ARS, National Sedimentation Laboratory.
- Breña, A., & Jacobo, M. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Camargo Vargas, L. (2017). *Lineamientos para la gestión de la deforestación, generada por los cultivos ilícitos asociados al conflicto armado, en el municipio de Tibú, en el contexto del posconflicto* . Bogotá D.C.: Universidad Pontificia Javeriana .
- Cárdenas, K. (2018). Análisis general de la gestión del riesgo por inundación en Colombia. *Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad CAS*, 7.
- Célleri, R., De Bièvre, B., & Ñiguez, V. (2012). Efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica de microcuencas de páramo. *Universidad de la Cuenca* , 23.
- Cheng, J., Huei, J., Mao, C., Yen, W., & Cheng, C. (2018). Cross-Analysis of Land and Runoff Variations in Response to Urbanization on Basin, Watershed, and City Scales with/without Green Infrastructures. *Water*, 18.
- Cheng, J., Lin, L., & Lu, H. (2001). Influencia de los bosques en los flujos de agua de las cuencas hidrográficas en Taiwán . *ELSEVIER*, 17.
- Constitución Política de Colombia* . (1991). Bogotá D.C.
- Cruz Roja Colombiana. (2017). *Emergencia Mocoa - Putumayo*. Bogotá D.C.: Cruz Roja Colombiana .
- Dabney, S. M. (1998). Cover crop impacts on watershed hydrology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 207-2013.

- DeFries, R., Achard, F., Brown, S., Herold, M., Murdiyaso, D., Schlamadinger, B., & De Souza Jr., C. (2006). *Reducing Greenhouse Gas Emissions from Deforestation in Developing Countries: Considerations for Monitoring and Measuring, Report of the Global Terrestrial Observing System (GTOS) number 46, GOF-C-GOLD report 2*. Roma: Global Terrestrial Observing System (GTOS) .
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2005). Censo General 2005. En D. A. Estadística, *Censo General 2005* (pág. 498). Bogotá D.C.
- Ding, J., Wallner, M., Müller, H., & Haberlandt, U. (2015). Estimation of instantaneous peak flows from maximum mean daily flows using the HBV hydrological model. *Hydrological Processes* , 1431-1448.
- El espectador. (1 de Abril de 2017). Causas y recomendaciones tras la avalancha en Mocoa . *Causas y recomendaciones tras la avalancha en Mocoa* , pág. 1.
- García, C. (2007). *Regulación hídrica bajo tres coberturas vegetales en la cuenca del río San Cristobal, Bogotá D.C.* Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Garzón, N. (2016). *Estudio Multitemporal para identificar los cambios en la cobertura vegetal del humedal de Tibabuyes*. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia .
- GIZ, MADS, IDEAM, SINCHI, & UNODC. (2017). *Coca y deforestación: Mensajes de acción para la planeación del desarrollo*. Bogotá D.C.: GIZ.
- Green, W., & Ampt , G. (1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* , 11-24.

Green, W., & Ampt, G. (1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences*, 11-24.

Guerrero, C., & Mendoza, C. (2016). *Determinación del índice de escasez de la microcuenca el Guamal abastecedora del acueducto del casco urbano en el Municipio de Convención Norte de Santander mediante la metodología lluvia - escorrentía planteada por el IDEAM en la Resolución 865 del 2004*. Ocaña: Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adoptada para Colombia escala 1:100.000*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (20 de Mayo de 2019). *IDEAM*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales . (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia .

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia . (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia*. Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia .

Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (07 de 11 de 2018). Obtenido de Preguntas frecuentes:

http://www2.igac.gov.co/igac_web/contenidos/plantilla_general_titulo_contenido.jsp?idMenu=212

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2004). Estudio General de Suelos del Departamento de Norte de Santander. En I. G. Codazzi, *Estudio General de Suelos del Departamento de Norte de Santander*. IGAC.
- Karamage, F., Zhang, C., Fang, X., Liu, T., Ndayisaba, F., Nahayo, L., . . . Baptiste, J. (2017). Modeling Rainfall-Runoff Response to Land Use and Land Cover Change in Rwanda (1990-2016). *Water*, 24.
- Krysanova, V., & Wechsung, F. (2000). *SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual*. Postdam: Postdam Institute for Climate Impact Research.
- Krysanova, V., & Wechsung, F. (2000). *SWIM User Manual*. Postdam: Postdam Institute for Climate Impact Research.
- La Opinión . (5 de abril de 2017). *Tres municipios de Norte de Santander están en alerta naranja* , pág. 1.
- La Opinión. (28 de abril de 2018). Excesiva deforestación causa alarma en Norte de Santander. *La Opinión*, pág. 1.
- Le Maitre, D. C., Kotzee, I. M., & O'Farrell, P. J. (2014). Impacts of land-cover change on the water flow regulation ecosystem service: Invasive alien plants, fire and their policy implications. *Land Use Policy*, 171-181.
- Le Maitre, D., Kotzee, I., & O'Farrell, P. (2014). Impacts of land-cover change on the water flow regulation ecosystem service; Invasve alien plants, fire and their policy implications. *Land Use Policy*, 171-181.
- Linsley, R., Kholer, M., & Paulus, J. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Bogotá: McGraw-Hill.

- Monsalve Saénz, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Monsalve, G. (2014). Hidrología. En M. Germán, *Hidrología en la ingeniería* (pág. 382). Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Monteith, J. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 205-234.
- Neitsch, S., Arnold, J., & Kiniry, J. (2011). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*. Temple, Texas: Texas A&M University.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2009). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Texas: Texas A&M University.
- Nikolaidis, N., Bouraoui, F., & Bidoglio, G. (2013). Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed. *Journal of Hydrology*, 129-138.
- NOAA, N. (15 de 11 de 2018). *Northwest River Forecast Center*. Obtenido de https://www.nwrfc.noaa.gov/info/water_cycle/hydrology.cgi
- NSIDC, N. (15 de 11 de 2018). *National Snow & Ice Data Center*. Obtenido de <https://nsidc.org/cryosphere/glossary/term/evaporation>
- Palamuleni, L., Ndomba, P., & Annegarn, H. (2011). Evaluating land cover change and its impact on hydrological regime in Upper Shire catchment, Malawi. *Springer Link*, 12.
- Patiño, J., León, J., Montes, A., & Hernández, L. (2007). Propuesta metodológica para comparar el efecto de diferentes coberturas vegetales en la regulación de caudales en cuencas hidrográficas. Aplicación en la microcuenca de la quebrada La Murciélago, Antioquia. *Avances en recursos hidráulicos*, 11.

- Poveda, G., & Mesa, O. (1995). Efectos hidrológicos de la deforestación . *Energetica 16*, 12.
- Priestley, C., & Taylor, R. (1972). On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* , 81-92.
- Santillan, J., Makinano, M., & Paringit, E. (2011). Integrated Landsat Image Analysis and Hydrologic Modeling to Detect Impacts of 25-Year Land-Cover Change on Surface Runoff in a Philippine Watershed. *Remote Sensing* , 22.
- Serrano , M., Regüés, D., Latron , J., Bono, M., Renault, L., & Romero , N. (2005). Respuesta hidrológica de una cuenca forestal en la montaña media pirenaica: el caso de San Salvador . *Universidad de La Rioja* , 17.
- Serrano Muela, M., Regües, D., Latron , J., Martí Bono, C., Lana-Renault , N., & Nadal Romero, E. (2005). Respuesta hidrológica de una cuenca forestal en la montaña media pirenaica: el caso de San Salvador. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 59-76.
- UNODC. (2016). *Monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos 2016*. Bogotá D.C.: Gobierno de Colombia.
- USDA Soil Conservation Service. (1972). *National Engineering Handbook*. Washington D.C: USDA Soil Conservation Service.
- Velásquez, S., & Jaramillo, A. (2009). Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé*, 12.
- Xiaobo, J., Huang, C.-h., & Ruan, F. (2008). Impacts of Land Cover Changes on Runoff and Sediment Iin the Cedar Creek Watershed, St. Joseph River, Indiana, United Satetes. *Spinger Link*, 10.