

Fecha de recibido: 16-05-2025  
Fecha de aceptado: 02-09-2025  
DOI: 10.22490/21456453.9883

# IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA: ESTUDIO DE CASO EN LA CUENCA DEL RÍO BACHÉ, HUILA (2004-2024)

## IMPACT OF LAND USE CHANGE ON SURFACE RUNOFF AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY: A CASE STUDY IN THE BACHÉ RIVER BASIN, HUILA (2004-2024)

Heider Fernando Losada Losada <sup>1</sup>  
Juan Guillermo Popayán-Hernández <sup>2</sup>

**Citación:** Losada Losada, H. F., Popayán-Hernández, J. G. (2026). Impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial y la conductividad hidráulica: estudio de caso en la cuenca del río Baché, Huila (2004-2024). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 267 – 294. <https://doi.org/10.22490/21456453.9883>

<sup>1</sup> Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Surcolombiana, Neiva, Huila, Colombia. [u20241223892@usco.edu.co](mailto:u20241223892@usco.edu.co)

<sup>2</sup> Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, Sede de La Paz, La Paz, Cesar, Colombia. [jgpopayanh@unal.edu.co](mailto:jgpopayanh@unal.edu.co)

## RESUMEN

**Contextualización:** El estudio analizó las variaciones de la escorrentía superficial en la cuenca del río Baché (Huila, Colombia), ocasionada por los cambios de uso del suelo en tres periodos (2004, 2014, 2024).

**Vacío de conocimiento:** Faltaban análisis integrados sobre cómo la conversión de bosque a agricultura afectaba la respuesta hidrológica en suelos volcánicos (andisoles e inceptisoles), a pesar de cubrir el 49,8 % de la cuenca.

**Objetivo:** Evaluar el impacto de los cambios en la cobertura vegetal sobre la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) y la escorrentía, utilizando modelos hidrológicos y datos satelitales.

**Metodología:** Procesamiento de imágenes Landsat (4/7/8, 30 m) en ArcGIS; digitalización de modelos digitales de elevación.

Se usó el modelado con HEC-HMS para generar escenarios hidrológicos y se calculó el  $K_s$  y análisis comparativo de caudales.

**Resultados:** Reducción progresiva de  $K_s$ : 2,1 mm/h (2004) a 1,59 mm/h (2024); aumento de la escorrentía: 899 m<sup>3</sup>/s (2004, 44,29% bosque) a 1619 m<sup>3</sup>/s (2024, 70,9% agricultura), con un mayor impacto en suelos volcánicos cercanos a la red de drenaje.

**Conclusiones:** La conversión forestal ha reducido la capacidad de retención de agua del suelo en un 47% en 20 años. El enfoque integrado de modelado SIG ha demostrado ser eficaz para evaluar los impactos hidrológicos, lo que pone de relieve la necesidad de políticas de conservación del suelo volcánico.

**Palabras clave:** cuenca hidrográfica, escorrentía, HEC-HMS, conductividad hidráulica, infiltración.

# ABSTRACT

**Contextualization:** The study analyzed surface runoff variations in the Baché River basin (Huila, Colombia) caused by land-use changes over three periods (2004, 2014, 2024).

**Knowledge gap:** Integrated analyses of how forest conversion to agriculture affected the hydrological response in volcanic soils (Andisols and Inceptisols) were lacking, despite covering 49.8% of the basin.

**Objective:** To evaluate the impact of changes in vegetation cover on hydraulic conductivity (Ks) and runoff, using hydrological models and satellite data.

**Methodology:** Landsat image processing (4/7/8, 30 m) in ArcGIS; digitalization of digital elevation models. HEC-HMS modeling was used to generate hydrological scenarios,

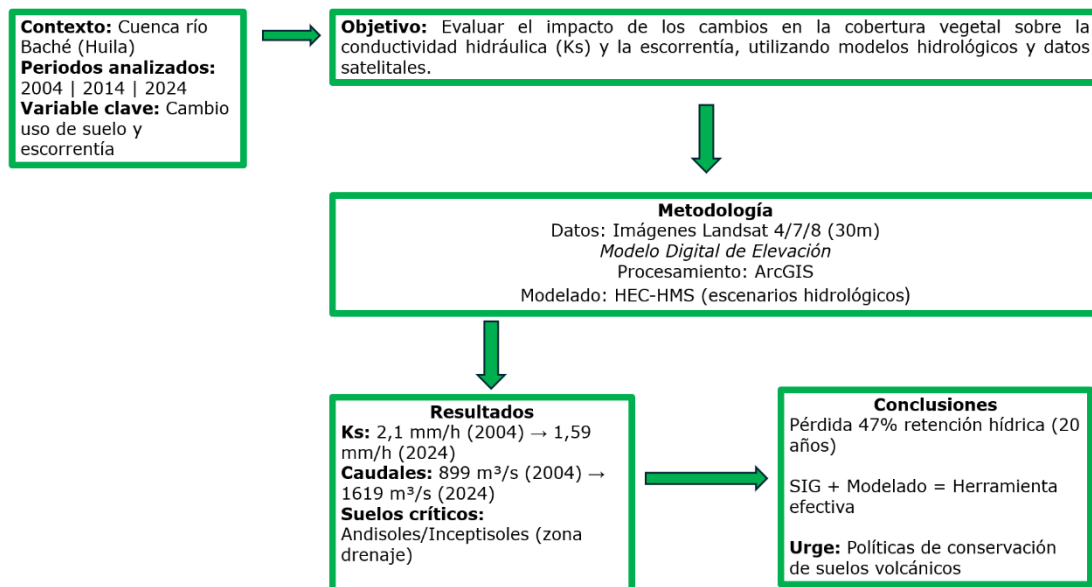
and Ks was calculated, and flow rates were compared.

**Results:** Progressive reduction in Ks: 2.1 mm/h (2004) to 1.59 mm/h (2024); Increase in runoff: 899 m<sup>3</sup>/s (2004, 44.29% forest) to 1619 m<sup>3</sup>/s (2024, 70.9% agriculture), with a greater impact on volcanic soils near the drainage network.

**Conclusions:** Forest conversion has reduced soil water retention capacity by 47% in 20 years. The integrated GIS modeling approach has proven effective in assessing hydrological impacts, highlighting the need for volcanic soil conservation policies.

**Keywords:** Watershed, runoff, HEC-HMS, hydraulic conductivity, infiltration.

# RESUMEN GRÁFICO



Fuente: elaboración propia.

## 1 INTRODUCCIÓN

La escorrentía superficial, definida como el agua de precipitación que circula sobre el terreno hacia los cauces fluviales, constituye un componente crítico del ciclo hidrológico, cuya magnitud y temporalidad están directamente influenciadas por el cambio de uso del suelo y las propiedades hidrofísicas del suelo, particularmente la conductividad hidráulica, que determina la capacidad de infiltración del agua en el subsuelo. A partir de 2014, el Programa Hidrológico Internacional (PHI) fue implementado para paliar el menoscabo de las fuentes hídricas en América, enfocándose en la gestión sostenible de bosques, tierras y recursos hídricos (Howland & Francois Le Coq, 2022). Esta iniciativa facilitó la reforestación de aproximadamente cinco millones de árboles

nativos en zonas de alto impacto hidrológico en América del Sur, con especial atención en países como Brasil, Colombia, Ecuador y Perú (Marrero et al., 2024; Ruiz-Agudelo & Gutiérrez-Bonilla, 2025). En Colombia, la adaptación de políticas públicas en materia ambiental se vio reforzada durante el Decenio de las Naciones Unidas para los Desiertos y la Lucha Contra la Desertificación (2010-2014), lo que impulsó iniciativas como los proyectos LADA y GLASOD, promovidos por la FAO para evaluar y mitigar la degradación de tierras (Clerici et al., 2019). Estas acciones resultaron en la reforestación de alrededor de 800 hectáreas en departamentos como Caquetá, Cauca, Chocó, Huila y Nariño, empleando técnicas orientadas a la conservación de ecosistemas estratégicos

frente a la variabilidad climática (Rojas-Ospina et al., 2024).

No obstante, las tendencias globales revelaron que los suelos enfrentaban una situación crítica debido a los efectos acelerados del cambio climático (Rodríguez-Espinosa et al., 2025), generando desequilibrios hídricos y alteraciones significativas en los regímenes hidrológicos. La degradación química, biológica y física de los suelos, particularmente en áreas agrícolas (Leal et al., 2023), se agravó por prácticas inadecuadas como el manejo incorrecto de pendientes y la labranza intensiva (Esquivel et al., 2018). La reducción de la conductividad hidráulica, consecuencia de la compactación y pérdida de materia orgánica, limita la infiltración y aumenta la escorrentía superficial, exacerbando la erosión y reduciendo la recarga de acuíferos. En el departamento del Huila, esta problemática se intensifica por las proyecciones climáticas del Ideam, que indican un incremento de aproximadamente 2 °C en la temperatura para 2040 y una reducción del 30 % en la disponibilidad de suelos aptos para agricultura (Gómez et al., 2023). Además, el Estudio Nacional del Agua (Cortes et al., 2022) evidenció la crítica situación hídrica de la región, con una oferta máxima de 549 m<sup>3</sup>/s y una oferta base de 213 m<sup>3</sup>/s en 2010, lo que refleja una presión creciente sobre los recursos hídricos (Cortés-Macías et al., 2022).

La cuenca del río Baché fue seleccionada como estudio de caso, debido a su importancia estratégica, económica y ambiental para el departamento del Huila. Con una superficie de 153 452,52 hectáreas, esta cuenca abastece de agua a municipios como Aipe, Neiva, Palermo, Santa María y Teruel,

sustentando actividades económicas clave como la agricultura y la ganadería (Burgos-Ayala et al., 2024). Además, alberga una alta diversidad de ecosistemas y su configuración hidrográfica, con un sistema de drenaje paralelo y ortogonal al cauce principal, la convierte en un modelo representativo para estudiar los impactos hidrológicos del cambio de uso del suelo. La cuenca está compuesta por tres subcuencas principales: río Baché (51,64 % del área), río Yaya (16,22 %) y río Tune (11,74 %), con un caudal base de aproximadamente 12 m<sup>3</sup>/s que desempeña un papel crucial en la regulación hídrica regional (Perdomo Moreno y Perdomo, 2004). La presencia predominante de andisoles e inceptisoles (49,8 % del área), suelos particularmente vulnerables a la degradación antropogénica, justifica su selección para evaluar cómo la transformación de coberturas vegetales altera los procesos hidrológicos.

En este sentido, la cuenca del río Baché presenta una génesis volcánica evidenciada por la predominancia de andisoles e inceptisoles (Perdomo Moreno y Perdomo, 2004), suelos derivados de cenizas volcánicas se caracterizan por su mineralogía dominada por alofanos y ferrihidritos, que confieren propiedades únicas como alta capacidad de retención de humedad, baja densidad aparente y elevada afinidad por fosfatos (Sadeghian et al., 2019). La estratigrafía volcánica de la región, compuesta principalmente por depósitos piroclásticos del Complejo Volcánico Nevado del Huila, ha determinado la configuración geomorfológica de la cuenca, con pendientes pronunciadas en el flanco occidental, donde se originan los principales afluentes en las estribaciones del cerro



Chiflón y del cerro Chiquito. Los andisoles, clasificados como *Typic Fulvudands* y *Typic Hapludands*, muestran secuencias estratigráficas con horizontes ándicos de espesor variable (>35 cm), mientras que los incepsisoles (principalmente *Typic Dystrudepts* y *Humic Dystrudepts*) presentan desarrollo incipiente de horizontes subsuperficiales, reflejando la naturaleza juvenil de los materiales parentales de origen volcánico (IGAC, 2016). Esta composición edáfica particular influye directamente en la dinámica hidrológica de la cuenca, moderando los procesos de infiltración-percolación y determinando los patrones de escorrentía superficial observados en los modelos de simulación (Guduru et al., 2022; Leal et al., 2023).

Considerando esta problemática, el objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial en la cuenca del río Baché durante el periodo 2004-2024, como consecuencia de las variaciones en las condiciones geomorfológicas e hidráulicas de-

rivadas de la expansión agrícola (Golubev et al., 2021). Para ello, se definieron dos objetivos específicos: (I) determinar el estado actual de la cuenca mediante el análisis de datos de precipitación y caudal para apoyar la planificación sostenible de los recursos hídricos, y (II) modelar los cambios hidrológicos en la escorrentía superficial resultantes de las transformaciones en la geomorfología del suelo y la cobertura vegetal. La modelación hidrológica se empleó como herramienta fundamental para abordar los desafíos en la gestión y conservación del agua (Guduru et al., 202), analizando las variaciones en la escorrentía superficial derivadas de las transformaciones en las condiciones geomorfológicas de los suelos y su cobertura en la cuenca del río Baché, contribuyendo así a la planificación sostenible del recurso hídrico en un contexto de crisis climática y variabilidad hídrica en el departamento del Huila (Arévalo-Hernández et al., 2024; Romero-Cuéllar et al., 2018).

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presenta el área de estudio y el diseño metodológico empleado en esta investigación.

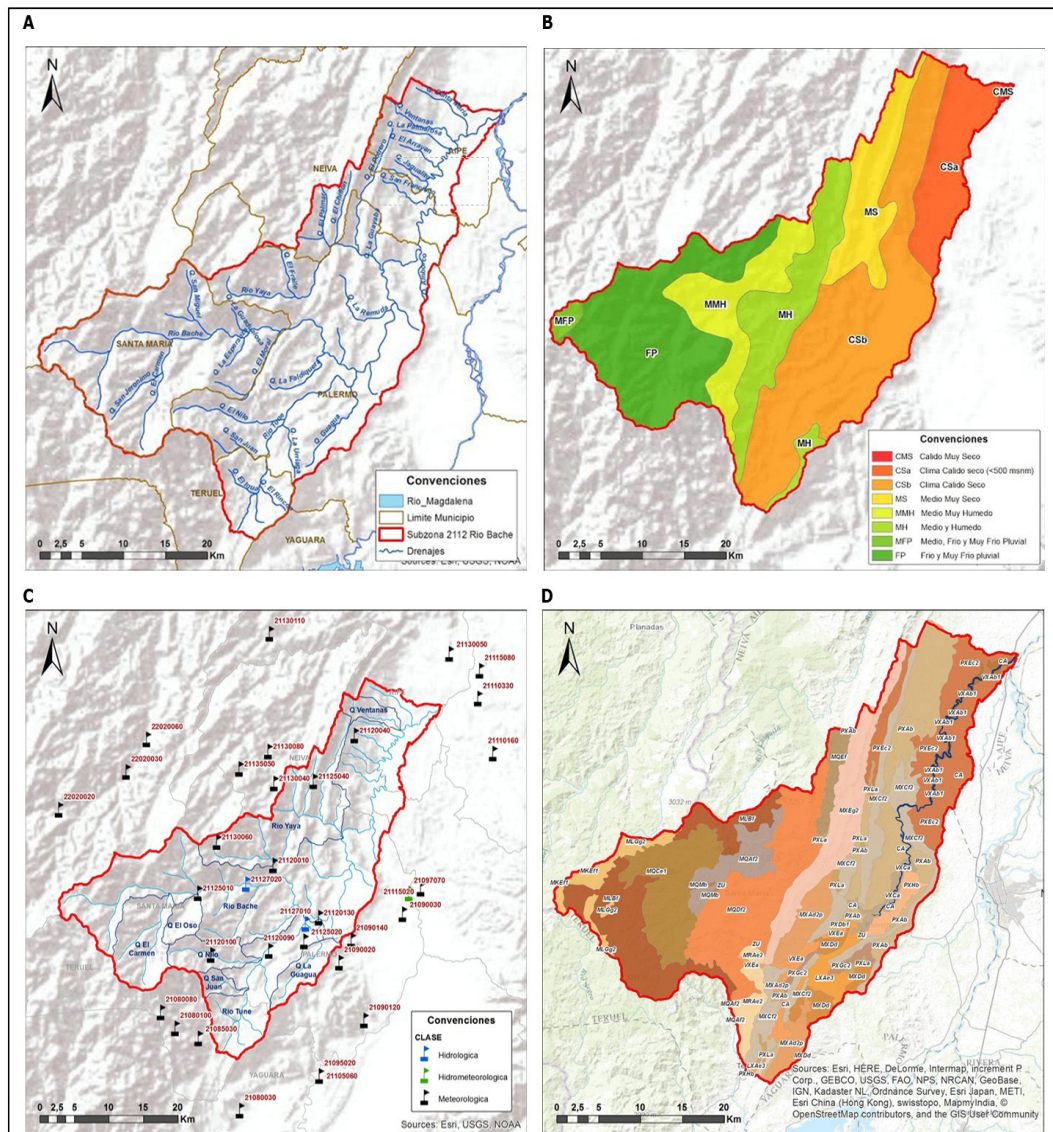
### Área de estudio

La cuenca del río Baché tiene una superficie total de 153 452,52 hectáreas, extendiéndose a través de varios municipios del departamento del Huila, Colombia, entre los cuales se incluyeron Aipe, Neiva, Palermo, Santa María y Teruel (Burgos-Ayala et al.,

2024). De acuerdo con información recopilada a partir del Sistema de Información Ambiental, esta zona fue fundamental para el equilibrio hídrico, tanto a nivel local como regional, ya que sostuvo los sectores de interés económico tales como la agricultura y la actividad ganadera (Camacho et al., 2018), las cuales dependieron significativamente de la disponibilidad de agua (Perdomo Moreno & Perdomo, 2004). Además, la cuenca albergó una amplia diversidad de ecosistemas, lo

que la posicionó como un área de gran importancia ecológica. En la figura 1 se ilustran la distribución geográfica y los límites muni-

cipales, resaltando los aspectos hidrológicos de la zona de estudio.



**Figura 1.** Caracterización de la cuenca del río Baché, (A) morfología de la cuenca, (B) clima de la cuenca, (C) estaciones meteorológicas de la cuenca y (D) caracterización de suelos de la cuenca

**Fuente:** elaboración propia.

Esta cuenca hidrográfica se caracteriza por presentar un sistema de drenaje con disposición paralela y ortogonal al curso fluvial

principal, el cual se origina en las estribaciones del cerro Chiflón y del cerro Chiquito, localizados en el flanco occidental, mientras

que en el sector oriental se desarrolla a partir de colinas suaves y elevaciones de baja pendiente. El cauce primordial sigue una trayectoria predominante en sentido meridional y nororiental, tal como se evidencia en los resultados consignados en la tabla 1. Este patrón de escurrimiento refleja la influencia de la geomorfología local, donde las formas

del terreno condicionan la red hidrográfica, generando una estructura ramificada con afluentes secundarios que convergen de manera perpendicular al eje principal del río.

Así, la red hidrográfica de la cuenca estuvo conformada por un conjunto de nueve afluentes, cuyas características se presentan en la tabla 1

**Tabla 1.**

Parámetros morfológicos de la cuenca del río Baché

Nombre del afluente	Perímetro (Km)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje de la Cuenca (%)
Río Baché	227,02	598,36	51,64
Río Yaya	87,75	187,91	16,22
Río Tune	78,59	136,01	11,74
Quebrada El Carmen	42,78	88,81	7,66
Quebrada Nilo	36,38	45,16	3,90
Quebrada La Guagua	33,16	38,22	3,30
Quebrada Ventanas	26,21	23,11	1,99
Quebrada El Oso	21,77	25,21	2,18
Quebrada San Juan	21,36	16,03	1,38

**Fuente:** elaboración propia.

El caudal del río Baché se calculó en aproximadamente 12 m<sup>3</sup>/s, valor que resultó altamente significativo para el departamento del Huila, destacando su papel crucial en la regulación hídrica de la zona. La cuenca del río Baché estuvo compuesta por tres subcuencas: la del río Yaya, que cubrió el 16,22 % del área; la del río Tune, con un 11,74 %, y la

del río Baché, que representó el 51,64 % de la superficie total, como se evidenció en la tabla 1.

## Metodología

A continuación, se presenta el diseño metodológico empleado para cumplir cada uno de los objetivos planteados en esta investigación.

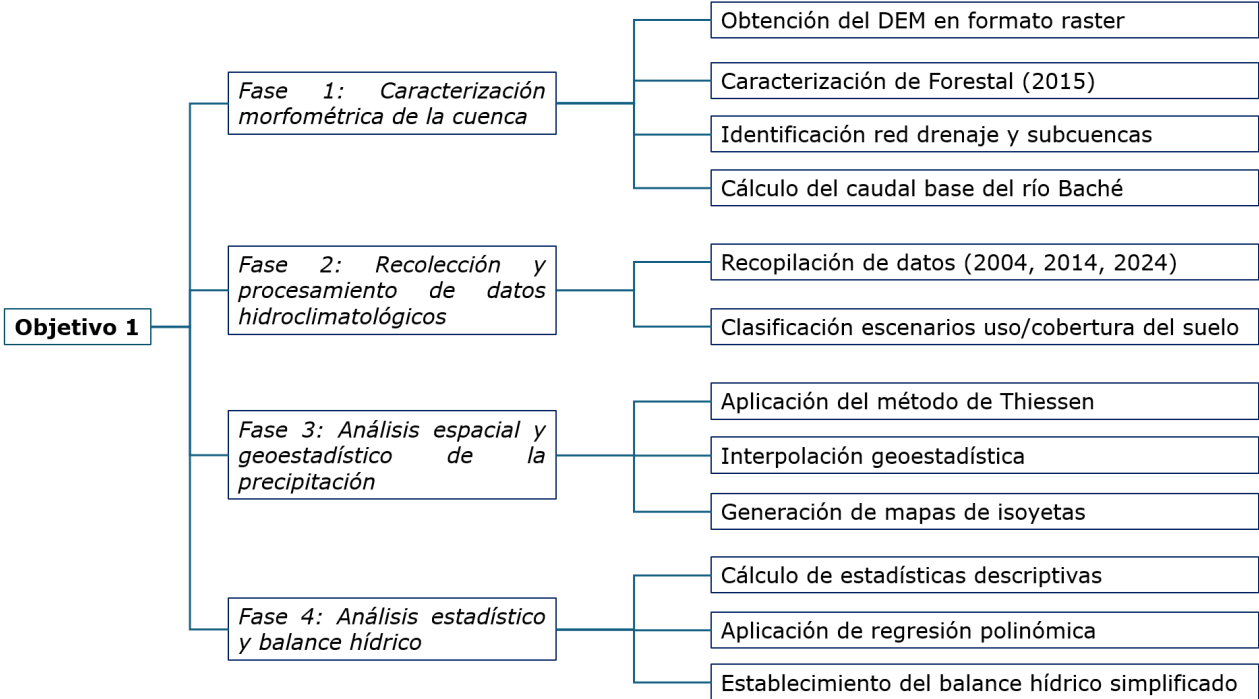


## Diseño metodológico objetivo 1: Determinación el estado actual de la cuenca del río Baché mediante el análisis de datos de precipitación

Para el primer objetivo específico (Determinar el estado actual de la cuenca del río Baché mediante el análisis de datos de precipitación y caudal) se ejecutó una metodología integral que combinó caracterización morfométrica y análisis hidroclimatológico. Inicialmente, se realizó una caracterización detallada con base en un modelo digital de elevación (DEM) en formato raster, siguiendo la metodología descrita por Forestal et al. (2015). Este análisis morfométrico permitió establecer que la cuenca presenta un sistema de drenaje con disposición paralela y ortogonal al curso fluvial principal, con origen en las estribaciones del cerro Chiflón y del cerro Chiquito. La red hidrográfica se conformó por nueve afluentes, destacándose tres subcuencas principales: río Baché (51,64% del área), río Yaya (16,22%) y río Tune (11,74%), según se evidencia en la tabla 1. El caudal base del río Baché se calculó en aproximadamente  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor de significativa importancia para la regulación hídrica regional.

Posteriormente, se recopilaron y procesaron datos hidroclimatológicos de las 24 estaciones meteorológicas del Ideam disponibles en la plataforma DHIME, abarcando series temporales de 2004 a 2024 y correspondientes a tres escenarios diferentes de usos y coberturas del suelo (Barrios-Perez et al., 2021). Para el análisis espacial de la precipitación, se aplicó el método de polígonos de Thiessen, considerando la distribución específica de las estaciones activas en cada escenario (17 en 2004, 14 en 2014 y 12 en 2024). Complementariamente, se emplearon técnicas de interpolación geoestadística mediante kriging y Nearest Neighbor para generar mapas de isoyetas con resolución de 100 m. El análisis estadístico *comprehensive* incluyó el cálculo de descriptores de tendencia central y dispersión, junto con la aplicación de regresión polinómica de quinto grado para identificar patrones no lineales en las series temporales. Este abordaje metodológico permitió establecer un balance hídrico robusto y simplificado, fundamental para la planificación sostenible de los recursos hídricos de la cuenca.

El diseño metodológico propuesto para este objetivo específico se presenta en la figura 2.



**Figura 2.** Diseño metodológico objetivo específico I

**Fuente:** elaboración propia.

### Diseño metodológico objetivo 2: Modelar los cambios hidrológicos en la escorrentía superficial resultantes de las transformaciones en la geomorfología del suelo y la cobertura vegetal en la cuenca

Para el segundo objetivo específico (Modelar los cambios hidrológicos en la escorrentía superficial resultantes de las transformaciones en la cobertura vegetal y propiedades del suelo) se implementó una estrategia de modelación hidrológica avanzada. Inicial-

mente, se procesaron imágenes satelitales Landsat (4, 7 y 8) de los años 2004, 2014 y 2024 con resolución espacial de 30 m y escala 1:100.000 (Barrios-Perez et al., 2021), mediante clasificación supervisada que definió seis categorías de uso del suelo según referencias del IGAC. Simultáneamente, la caracterización edáfica se basó en datos del Geoportal del IGAC (Tabla 2), identificando que los andisoles e inceptisoles representan el 49,8% de la cuenca (Perdomo Moreno y Perdomo, 2004).

**Tabla 2.**

Categorización de suelos en la cuenca del río Baché

Simbología IGAC	Orden	Subgrupo	Textura	Área (Ha)	Porc. Subg. (%)	Porc. Orden (%)
PXDb1	Al	Typic haplustalfts, typic haplustepts, typic argiustolls	Arena Arcilla	178,28	0,11	25,8
MKEf1	An	Typic fulvudands, typic udorthents, humic dystrodepts	Limo	29,74	0,02	
MLBf	An	Humic dystrodepts, typic udorthents, typic hapludands	Arena Limo	7296,13	4,42	
MQDf2	An	Typic hapludolls, entic hapludolls, lithic udorthents	Limo Arena	35197,75	21,30	
CA	Ca	Cuerpos de agua	Ca	8,43	0,01	0,005
LXAe3	En	Entic haplustolls, typic ustorthents, lithic ustorthents	Limo Arcilla	2495,96	1,51	10,18
MLGg2	En	Typic udorthents	Limo	6474,26	3,92	
MXCf2	En	Typic ustorthents, lithic haplustolls, typic haplustepts	Limo Arena	1573,57	0,95	
PXEc2	En	Lithic ustorthents, typic ustorthents	Limo Arena	6250,17	3,78	
VXAb1	En	Fluventic haplustepts, aquic haplustepts, aquic ustifluvents, aquic endoaquepts	Arena Limo	40,45	0,02	
MQAf2	In	Typic dystrodepts, typic udorthents	Limo Arcilla	17287,31	10,46	24,43
MQCe1	In	Humic dystrodepts, oxic dystrodepts, typic hapludands	Limo Arcilla	9418,97	5,70	
MQMb	In	Fluvaquentic eutrodepts, typic udifluvents, fluventic eutrodepts	Limo Arena	157,17	0,10	
MRAe2	In	Typic haplustepts, pachic haplustolls	Limo Arcilla	425,43	0,26	
MXDd	In	Humic haplustepts, ustic dystrodepts	Arena	10704,18	6,48	
PXAb	In	Typic haplustepts, fluventic haplustolls, typic ustifluvents	Limo Arcilla	546,81	0,33	

Simbología IGAC	Orden	Subgrupo	Textura	Área (Ha)	Porc. Subg. (%)	Porc. Orden (%)
PXGc2	In	Oxic haplustepts, typic dystustepts	Arcilla Limo	324,84	0,20	24,43
PXHb	In	Plinthic endoaquepts	Arcilla Limo	1516,77	0,92	
MXEg2	Mr	Afloramientos rocosos, lithic ustorthents	Arena	22805,25	13,82	13,80
MQEf	Mo	Typic hapludolls, entic hapludolls, lithic udorthents	Limo Arena	39598,18	23,96	23,97
MXAd2p	O	Typic haplustolls, typic haplustepts	Limo	2200,08	1,33	1,77
PXLa	O	Typic ustifluvents, fluventic haplustolls, typic haplustepts	Limo Arena	198,43	0,13	
VXCc	O	Typic fluvaquents, vertic haplustepts, fluventic haplustolls	Limo	383,84	0,23	
VXEa	O	Typic haplustolls, typic natrustalfs	Limo Arcilla	129,09	0,08	
ZU	Zu	Zonas urbanas	Zu	4,73	0,00	0,003

*Simbología, Al: alfisoles, An: Andisoles, Ca: cuerpos de agua, En: Entisoles, In: Inceptisoles, Mr: misceláneo rocoso, Mo: Molisoles, O: Oxisoles y Zu: zonas urbanas.*

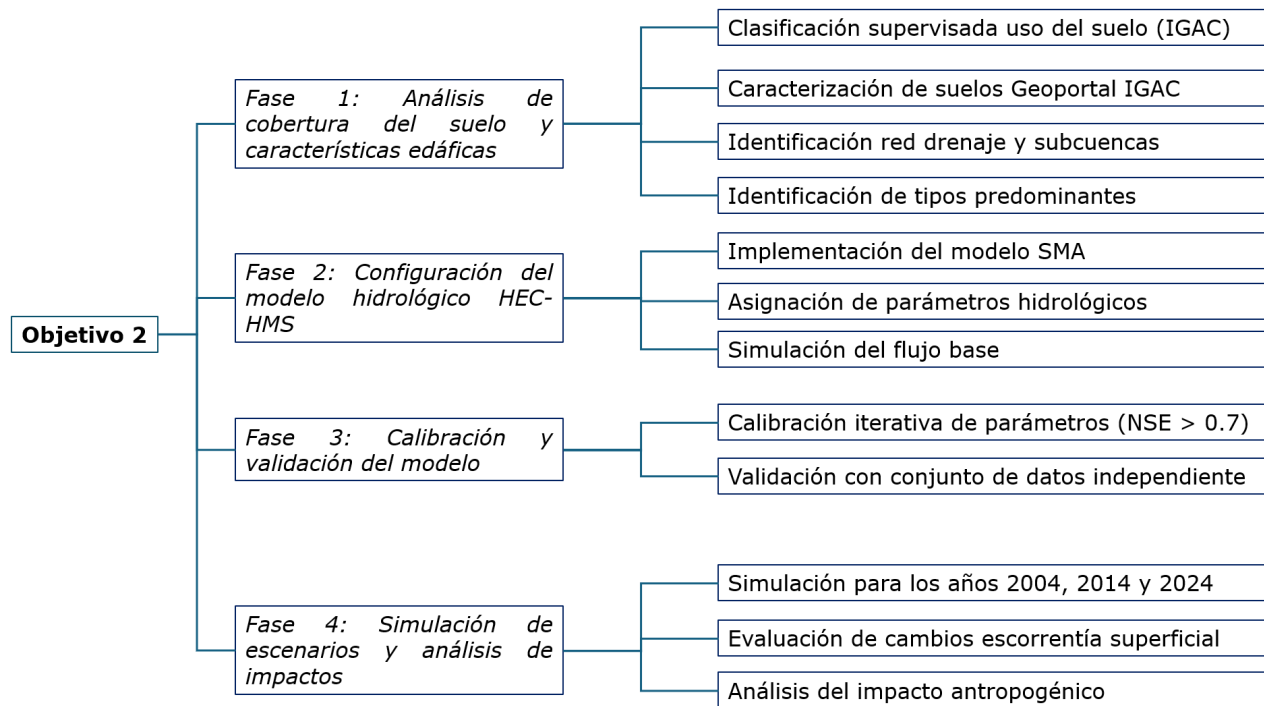
**Fuente:** elaboración propia.

El modelado hidrológico se implementó mediante el *software* HEC-HMS (Castro & Maidment, 2020), utilizando específicamente el modelo de humedad del suelo (SMA) en su versión semidistribuida (Halwatura & Najim, 2013; Lin et al., 2023). La parametrización del modelo incorporó valores de intercepción diferenciados por cobertura vegetal (9 mm para áreas forestales, 3 mm para pastizales), almacenamiento en depresiones (50,8 mm), propiedades edáficas según Sadeghian et al. (2019) - profundidad de

3 m, porosidad de 0,453, Grupo Hidrológico C - y datos de evapotranspiración mensual. La conductividad hidráulica saturada (Ks) se estableció en 2,5 mm/h para la infiltración máxima y 0,6 mm/h para la percolación. Para la simulación del flujo base se implementó el método del reservorio lineal integrado en el módulo SMA de HEC-HMS (Castro & Maidment, 2020; Uribe et al., 2020).

El diseño metodológico propuesto para este objetivo específico se presenta en la figura 3.





**Figura 3.** Diseño metodológico objetivo específico II

**Fuente:** elaboración propia.

Finalmente, en esta etapa del proceso, se realizó una calibración, ajustando iterativamente los parámetros hasta alcanzar valores de  $NSE > 0,7$  y errores menores al 20 %, tanto en caudal pico como en volumen (Kastali et al., 2022). Finalmente, se simularon tres escenarios temporales de cobertura (2004, 2014, 2024) para cuantificar las variaciones en la escorrentía superficial generadas por la modificación de usos del suelo (Camacho et al., 2018; Bernal Núñez et al., 2023). Este análisis permitió evaluar los cambios en el caudal pico (de  $899 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $1619 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y establecer la relación entre la reducción de la

conductividad hidráulica saturada (de 2,1 a  $1,59 \text{ mm/h}$ ) y el incremento de la escorrentía superficial (Guduru & Mohammed, 2024). La validación del modelo se realizó con un conjunto de datos independiente, asegurando la robustez predictiva del mismo. La aplicación del modelo HEC-HMS demostró ser esencial para evaluar el impacto de cambios antropogénicos en el ciclo hidrológico (Kastali et al., 2022), proporcionando información crítica para la gestión sostenible de recursos hídricos en zonas vulnerables a cambios ambientales (Bernal Núñez et al., 2023).

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los principales resultados encontrados en el de-

sarrollo de cada fase correspondiente al diseño metodológico.

## Resultados del objetivo I: Determinación del estado actual de la cuenca

### Fase 1: Caracterización morfométrica e hidrográfica

El análisis del DEM mediante la metodología de Forestal et al. (2015) permitió identificar que la cuenca del río Baché presenta un sistema de drenaje con disposición paralela y ortogonal al curso principal, conformado por nueve afluentes principales cuya configuración morfométrica se detalla en la tabla 1. Las subcuencas del río Baché (51,64%), río Yaya (16,22%) y río Tune (11,74%) con-

centran el 79,6% del área total, constituyendo las unidades hidrológicas dominantes. El caudal base se estimó en 12 m<sup>3</sup>/s, valor significativo para la regulación hídrica regional que evidencia la importancia estratégica de esta cuenca en el contexto departamental (Perdomo Moreno y Perdomo, 2004).

### Fase 2: Recolección y procesamiento de datos hidroclimatológicos

Se procesaron datos de las 24 estaciones del Ideam disponibles en la plataforma DHI-ME, identificando una reducción progresiva en la densidad de la red de monitoreo: 17 estaciones operativas en 2004, 14 en 2014 y solamente 12 en 2024 (Tabla 3).

**Tabla 3.**

Estaciones meteorológicas escenario abril de 2004, 2014 y 2024

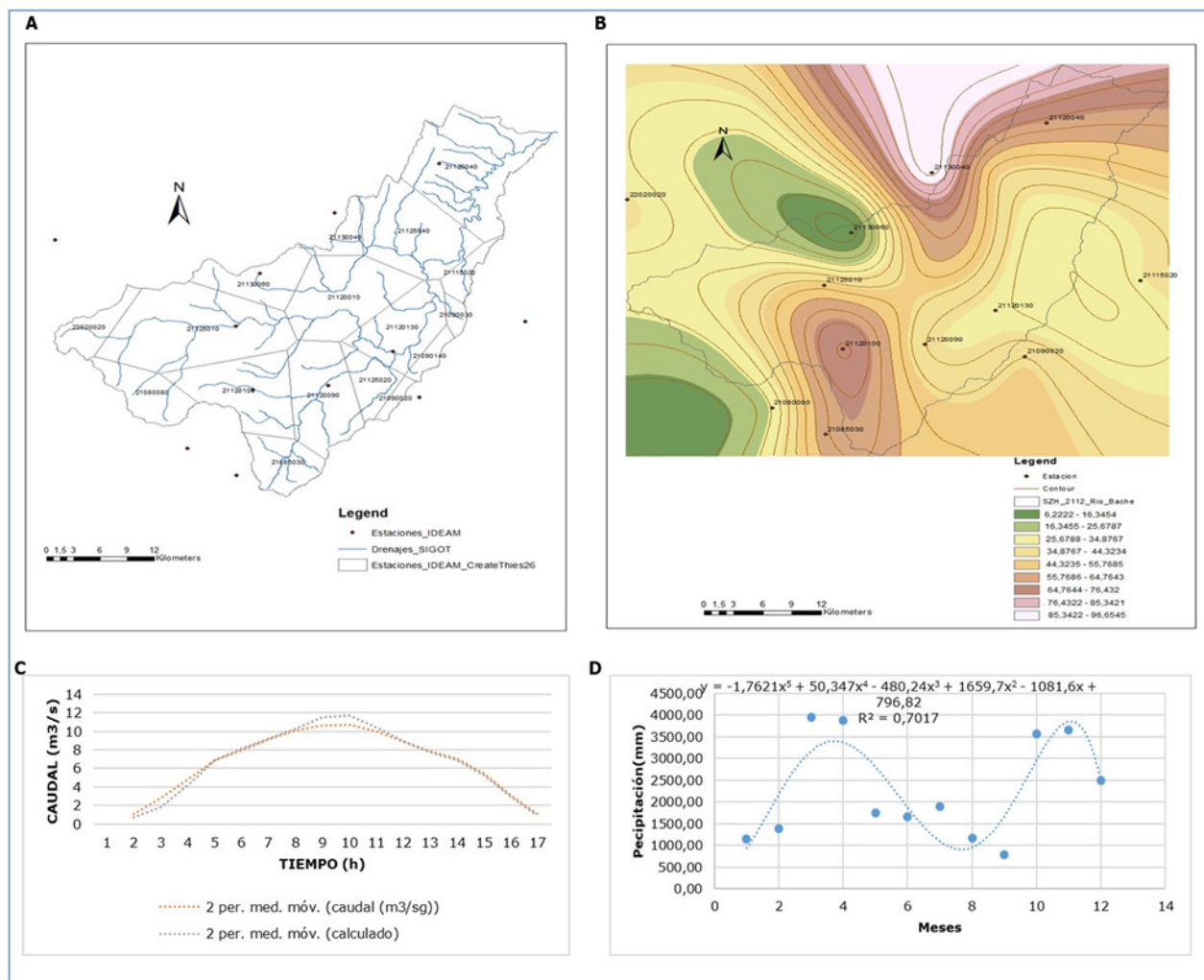
Ne	Nombre estación	Altitud (m s.n.m.)	Área 2004 (ha)	Área 2004 (%)	Área 2014 (ha)	Área 2014 (%)	Área 2024 (ha)	Área 2024 (%)
1***	La Mina	1800	5370,8	5,10	5370,8	5,1	5370,8	5,9
2***	El Totumo	700	8839,1	8,40	8839,1	8,4	8839,1	9,7
3*	El Cardo 2	480	1374,6	1,31	-	-	-	-
4**	Paraguay	1300	8922,7	8,47	10330,7	9,9	-	-
5***	Potrerito	850	15876,6	15,08	20374,7	19,5	20374,7	22,4
6***	El Volcán	1105	9923,8	9,43	9923,7	9,5	9923,7	10,9
7**	Palermo	550	2861,3	2,72	2861,5	2,7	-	-
8***	Rionegro	560	6362,0	6,04	7470	7,1	7470	8,2
9***	San Rafael	1030	4918,6	4,67	4918,7	4,7	4918,7	5,4

Ne	Nombre estación	Altitud (m s.n.m.)	Área 2004 (ha)	Área 2004 (%)	Área 2014 (ha)	Área 2014 (%)	Área 2024 (ha)	Área 2024 (%)
10*	Santa Cecilia	450	230,9	0,22	-	-	-	-
11***	El Cúcharo	620	845,6	0,80	1118,8	1	1118,8	1,2
12***	Apto Benito Salas	439	214,2	0,20	220,9	0,2	220,9	0,2
13***	Santa María	1300	16968,9	19,2	16988,3	18,2	16968,3	18,6
14***	El Carmen	2250	5217,2	4,96	5217,1	5	5217,1	22,4
15***	San Luis	1140	2203,2	2,09	7035,8	6,7	7035,8	7,7
16*	San Francisco	825	11638,5	11,05	-	-	-	-
17***	Peña Rica	1780	3521,2	3,34	3521,2	3,3	3521,2	3,8

**Nota:** ha: hectárea; %: porcentaje; m s.n.m.: metros sobre el nivel del mar;  
\*: 2004; \*\*:2014; \*\*\*:2024

**Fuente:** elaboración propia.

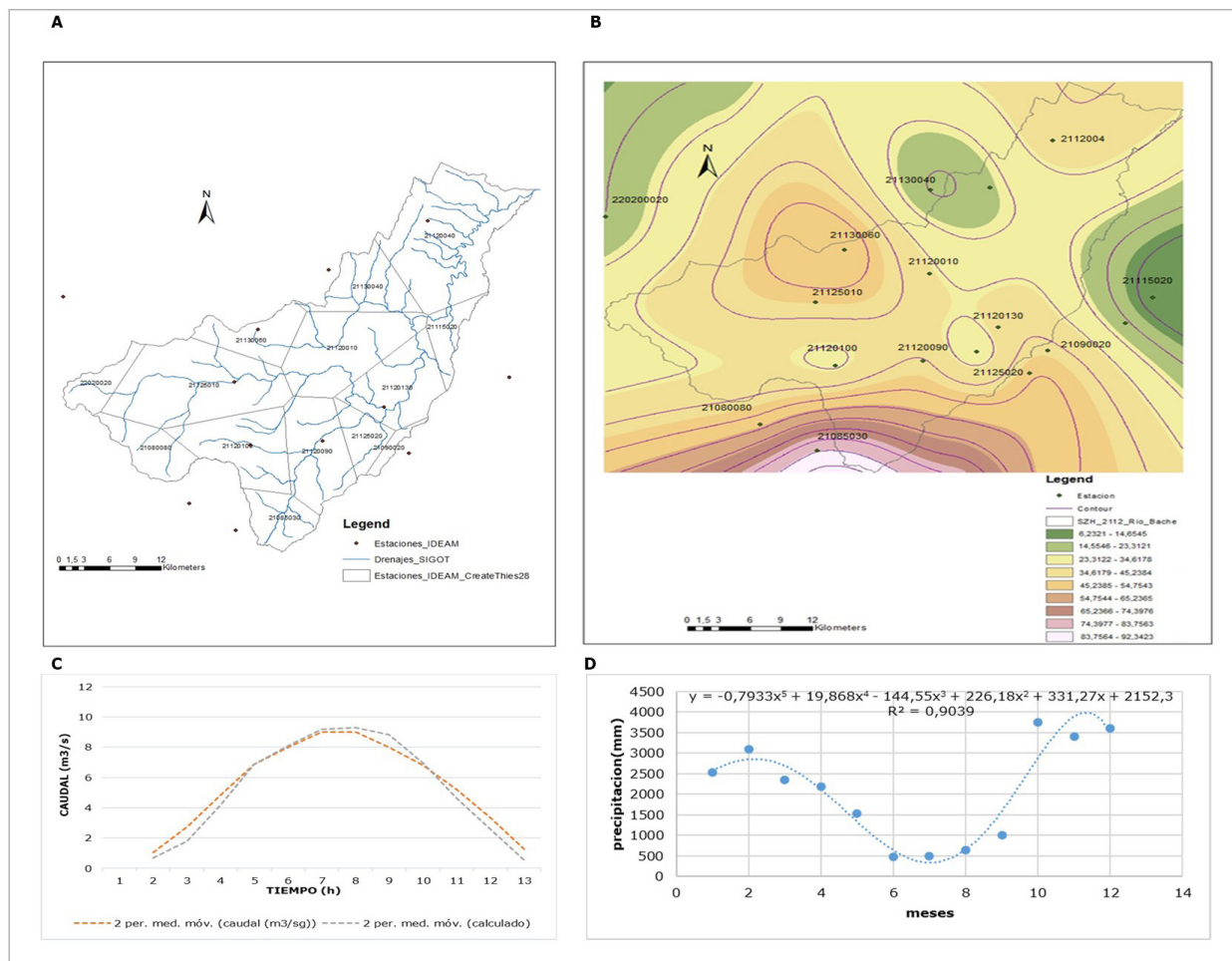
Este deterioro en la infraestructura de monitoreo representa una limitante significativa para la gestión hidrológica. La estación Santa María mostró la mayor influencia areal (19,2 % en 2004, 18,2 % en 2014, 18,65 % en 2024), mientras que la estación Benito Salas presentó la menor contribución (0,20 - 0,24 %), como se evidencia en la configuración de polígonos de Thiessen de las figuras 4, 5 y 6.



**Figura 4.** Calibración del año 2004, polígonos Thiessen(A), isohietas (B), hidrograma observado y calculado(C) y precipitación (D).

**Fuente:** elaboración propia.



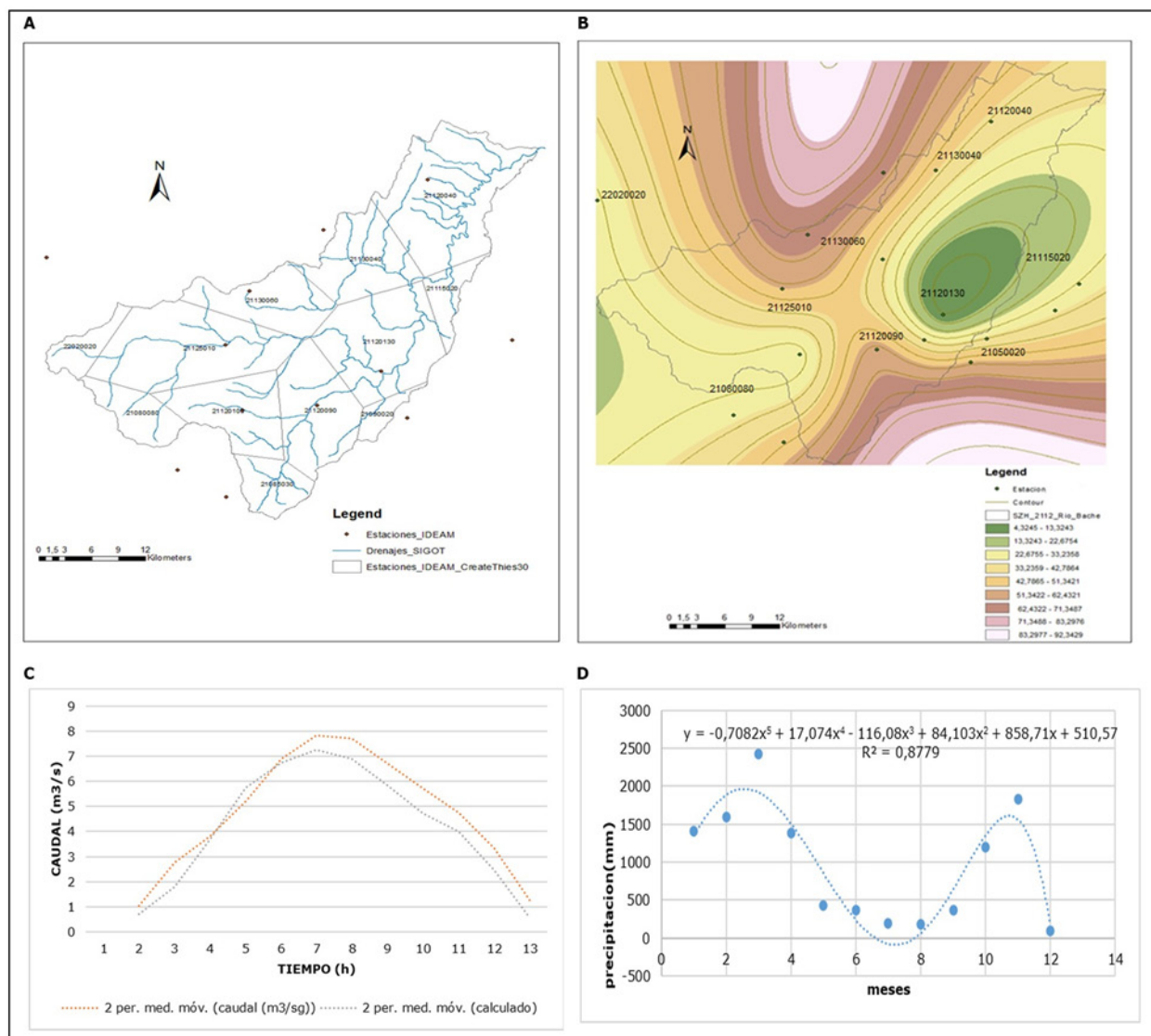


**Figura 5.** Calibración del año 2014, polígonos Thiessen(A), isohietas (B), hidrograma observado y calculado(C) y precipitación (D)

**Fuente:** elaboración propia.

El análisis hidrológico para el 2024 (Figura 6), ilustra la configuración espacial de 12 polígonos de Thiessen que representan la distribución de la precipitación en la cuenca. La estación meteorológica de Santa María resultó ser el principal punto de medición

de la precipitación, representando el 18,65 % de la precipitación total de la cuenca, mientras que la estación Benito Salas mostró la menor influencia, con una contribución de tan solo el 0,24 % a las mediciones de precipitación total.



**Figura 6.** Calibración del año 2024, polígonos Thiessen(A), isohietas (B), hidrograma observado y calculado(C) y precipitación (D).

**Fuente:** elaboración propia.

### Fase 3: Análisis espacial de la precipitación

La aplicación del método de Thiessen y técnicas de *kriging* ordinario implementadas en ArcGIS 10.5 permitió identificar patrones espaciales consistentes, con gradientes de precipitación nororiente-suroccidente en la mayoría de los eventos analizados. Los

eventos hidrológicos seleccionados (Tabla 4) mostraron precipitaciones entre 83 mm y 99 mm, con tiempos al pico de 58-68 horas, características típicas de sistemas convectivos de mesoescala. El coeficiente de escorrentía mostró una tendencia temporal creciente, variando de 0,13 (2004) a 0,18 (2024), lo que sugiere una alteración progresiva en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Tabla 4.

Parámetros de las tres tormentas estudiadas

Fecha	Precipitación (mm)	Caudal máx (m3/s)	Tiempo máx (h)	Escorrentamiento directo (mm)	C
Abril-29/2004	99	11,74	58	13,4	0,13
Oct-15/2014	83	10,47	65	13,5	0,16
Mar-25/2024	95	9,11	68	14,5	0,18

Simbología, c: coeficiente de escorrentía

Fuente: elaboración propia.

#### Fase 4: Análisis estadístico y balance hídrico

La implementación de regresión polinómica de quinto grado reveló tendencias no lineales estadísticamente significativas en los parámetros hidrológicos analizados. Los volúmenes de escorrentamiento directo representaron entre 45 % y 62 % del total precipitado, con coeficientes de escorrentía que

variaron de 0,28 a 0,41 en función de la humedad antecedente del suelo (AMC). Estos valores, consistentes con estudios previos en cuencas adyacentes, confirman la representatividad de los resultados obtenidos. El análisis del balance hídrico incorporó los datos de evapotranspiración mensual presentados en la tabla 5, mostrando la marcada estacionalidad que caracteriza el régimen hidrológico de la cuenca.

Tabla 5.

Porcentajes de evaporación-evapotranspiración en la cuenca del río Bache

MESES											
Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
0,63	0,59	0,43	0,57	0,59	0,78	1,20	1,48	0,99	0,9	0,88	0,86

Fuente: elaboración propia.

#### Resultados del objetivo II: Modelación de cambios hidrológicos

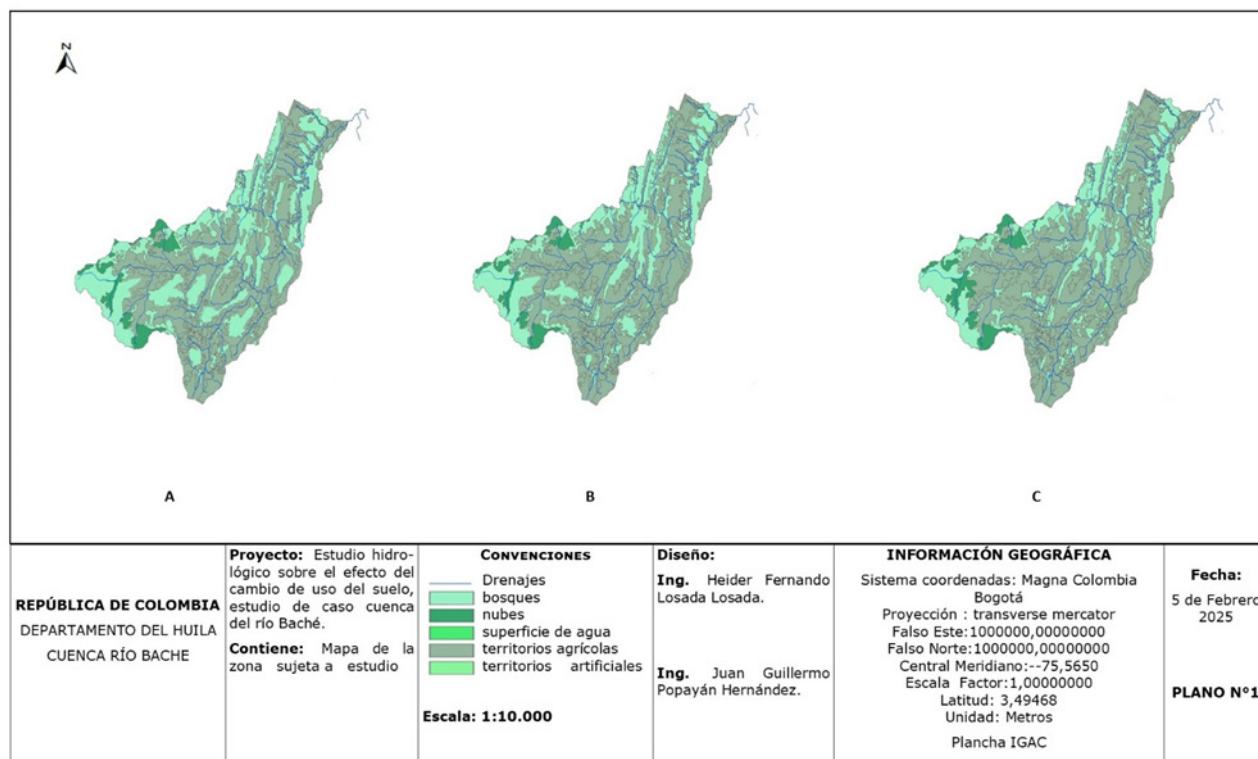
##### Fase 1: Análisis de cobertura del suelo

El procesamiento de imágenes Landsat 4, 7 y 8 mediante clasificación supervisada y co-

rrección radiométrica con algoritmo COST (Kastali et al., 2022) mostró una transformación dramática del paisaje: las áreas forestales se redujeron del 43,24 % al 29,81 %, mientras que las áreas agrícolas aumentaron del 60,28 % al 72,12 % (Tabla 6). Los cultivos transitorios mostraron la expansión más no-

table, pasando del 3,38 % al 21 % del área total. Estos cambios se visualizan claramente en los mapas de la figura 7, donde la progre-

siva sustitución de coberturas naturales por usos antrópicos resulta evidente entre 2004 y 2024.



**Figura 7.** Escenarios de uso del suelo para la cuenta del río Baché para los años 2004 (A), 2014 (B) y 2024(C).

**Fuente:** elaboración propia.

## Fase 2: Configuración del modelo HEC-HMS

La implementación del modelo SMA semidistribuido en HEC-HMS (Castro & Maidment, 2020; Halwatura & Najim, 2013) incorporó una parametrización detallada que incluyó valores de intercepción diferenciados por cobertura (9 mm para áreas forestales, 3 mm para pastizales), almacenamiento en depresiones de 50,8 mm coherente con la topografía suave de la cuenca, y propiedades edáficas específicas obtenidas

del Geoportal IGAC (porosidad 0,453, profundidad 3 m, Grupo Hidrológico C). Los parámetros de conductividad hidráulica se establecieron en 2,5 mm/h para infiltración máxima y 0,6 mm/h para percolación, reflejando las características de los suelos predominantes (Sadeghian et al., 2019).

## Fase 3: Calibración y validación

El proceso de calibración iterativa permitió alcanzar valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,71, con errores inferiores al 20 %, tanto en caudal pico como en



volumen de escorrentía. Los parámetros modificados durante la calibración (Tabla 6) mostraron ajustes particularmente significativos en conductividad hidráulica (KSAT

reducido de 220 a 0,42), porosidad (de 0,432 a 0,42) y composición textural (aumento del contenido de arcilla de 0,09 a 0,71).

**Tabla 6.**  
Parámetros modificados

Parámetro	Valor por defecto	Valor modificado
MAN	0,057	0,22
CV	0	1
KSAT	220	0,42
G	109	407
DIST	0,845	0,341
POR	0,432	0,42
PCT_CLAY	0,09	0,71
PCT_SILT	0,03	0,38
PCT_SAND	0,70	0,27
COH	0,002	0,006

*Simbología, MAN:* Valor que indica la rugosidad superficial en la cuenca según Manning; G: Media de la fuerza capilar, expresada en milímetros; POR: Capacidad de retención de agua en el suelo (volumen de poros por unidad de volumen total); SMAX: Nivel máximo de saturación posible en el medio poroso; CV: Medida de la dispersión de la conductividad hidráulica saturada (KS); PCT\_CL: Proporción de partículas de arcilla en el suelo (rango 0-1); PCT\_SI: Proporción de partículas de limo en el suelo (rango 0-1); PCT\_SAND: Proporción de partículas de arena en el suelo (rango 0-1); PCT\_CLAY: Igual que PCT\_CL, representa el contenido de arcilla; PCT\_SILT: Igual que PCT\_SI, representa el contenido de limo; DIST: Parámetro que describe la heterogeneidad en el tamaño de los poros; COH: Medida de la resistencia a la separación de partículas del suelo; KSAT: Velocidad máxima de infiltración de agua en el suelo, en condiciones de saturación (mm/h).

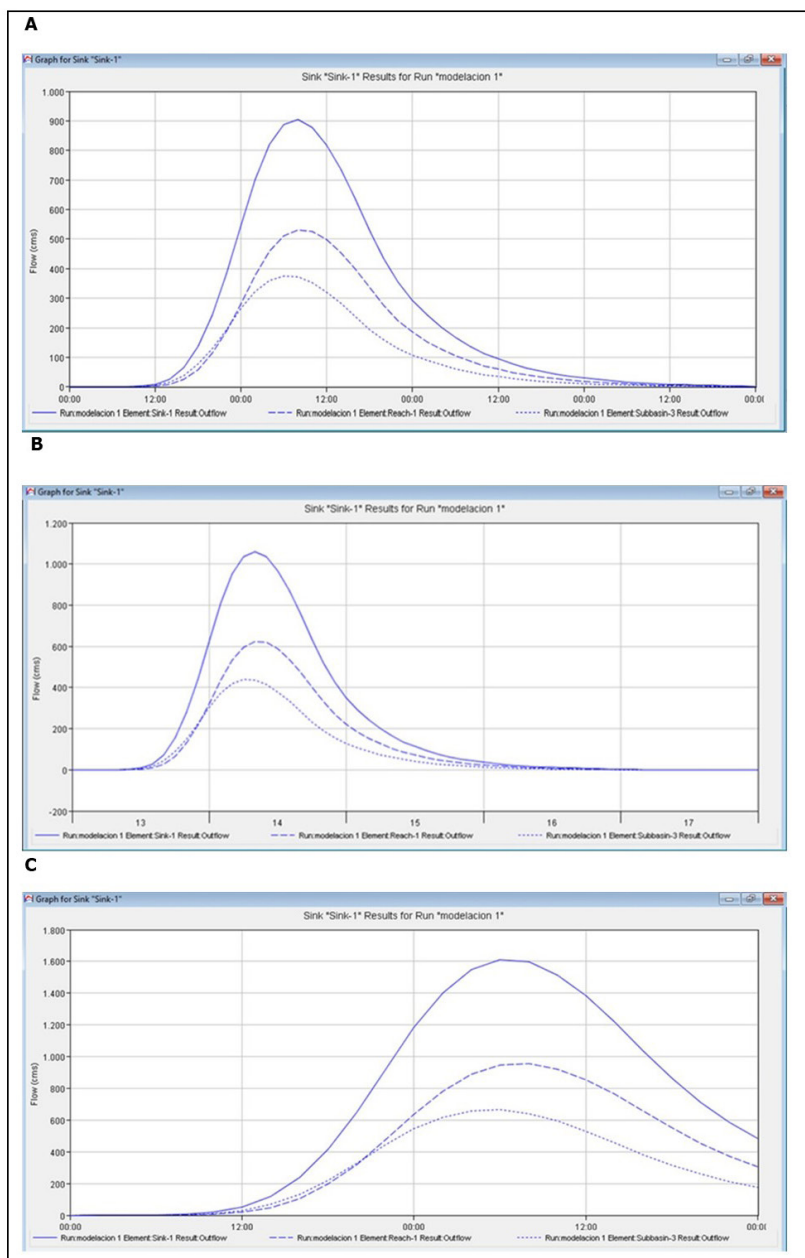
**Fuente:** elaboración propia.

Estos ajustes reflejan el deterioro físico de los suelos documentado en estudios previos (Leal et al., 2023) y validan la representatividad del modelo implementado.

## Fase 4: Simulación de escenarios y análisis de impactos

Las simulaciones para los tres escenarios temporales (Figura 8) mostraron un incre-

mento progresivo y estadísticamente significativo en los caudales pico: 897 m<sup>3</sup>/s (2004), 1110,76 m<sup>3</sup>/s (2014) y 1612 m<sup>3</sup>/s (2024).



**Figura 8.** Modelación de los escenarios 2004(A), 2014(B) y 2024(C)  
Fuente: elaboración propia.

Simultáneamente, la conductividad hidráulica saturada mostró una reducción consistente de 2,1 mm/h a 1,59 mm/h, evidenciando el deterioro de las propiedades hidrofísicas del suelo. Los parámetros hidrológicos promedio (Tabla 7) mostraron

variaciones menores en capacidad de intercepción (1,26-1,29 mm) y cobertura vegetal (28,47 % - 29,27 %), mientras que el coeficiente de Manning se mantuvo constante en 0,145 para los periodos 2014-2024.

**Tabla 7.**

Valores de la cuenca del río Baché

Cobertura	Int. (mm)	Cover. (%)	N (manning)	R
2004	1,29	28,47	0,149	0,76
2014	1,22	28,61	0,145	0,78
2024	1,26	29,27	0,145	0,78

*Simbología, R: Coeficiente de Nash Sutcliffe*

**Fuente:** elaboración propia.

La robustez del modelo HEC-HMS quedó demostrada mediante su capacidad para simular adecuadamente el comportamiento hidrológico en una cuenca de gran tamaño (>100,000 ha), capturando las complejas interacciones entre los cambios de cobertura vegetal y la respuesta hidrológica. Los resultados confirman que la expansión agrícola y la consecuente reducción de la cobertura forestal han alterado significativamente el régimen hidrológico de la cuenca, aumentando la escorrentía superficial y reduciendo la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo. Estos hallazgos tienen implicaciones críticas para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región, particularmente en el contexto de cambio climático y creciente presión antrópica (Bernal Núñez et al., 2023; Guduru et al., 2022).

La robustez del modelo HEC-HMS quedó demostrada mediante su capacidad para simular adecuadamente el comportamiento hidrológico en una cuenca de gran tamaño (>100,000 ha), capturando las complejas interacciones entre los cambios de cobertura vegetal y la respuesta hidrológica. Los resultados confirman que la expansión agrícola y la consecuente reducción de la cobertura forestal han alterado significativamente el régimen hidrológico de la cuenca, aumentando la escorrentía superficial y reduciendo la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo. Estos hallazgos tienen implicaciones críticas para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región, particularmente en el contexto de cambio climático y creciente presión antrópica (Bernal Núñez et al., 2023; Guduru et al., 2022).

## 4 CONCLUSIONES

Esta investigación demostró una disminución progresiva de la conductividad hidráulica saturada (Ks) de 2,1 mm/h (2004) a 1,79 mm/h (2014) y, finalmente, a 1,59 mm/h (2024), reducción directamente asociada a la expansión agrícola y la degradación de las propiedades físicas del suelo. Se observó

una reducción de 14,35 puntos porcentuales en la cobertura forestal total, afectando particularmente a los andisoles e inceptisoles derivados de cenizas volcánicas, los cuales representan el 50,19 % del área de la cuenca y mostraron especial vulnerabilidad al deterioro estructural bajo cultivos transitorios.

Estos cambios alteraron fundamentalmente las propiedades hidrológicas del suelo, reduciendo su capacidad de retención de humedad y acelerando significativamente los procesos de escorrentía superficial.

El modelo HEC-HMS calibrado reveló un aumento de aproximadamente 24 % en la escorrentía total de la cuenca y en los caudales máximos entre 2004 y 2014, con una tendencia ascendente continua hasta 2024. Esta respuesta hidrológica se correlacionó estrechamente con la conversión de la vegetación nativa a usos agrícolas, especialmente en los andisoles propensos a la erosión ubicados cerca de las redes de drenaje. El análisis de tormentas demostró que, en los escenarios actuales, la pérdida de cobertura vegetal y de permeabilidad del suelo ( $K_s$ ) genera picos de caudal que exceden la capacidad de retención de la cuenca.

La integración metodológica de HEC-HMS con SIG y técnicas de teledetección resultó efectiva para evaluar cuantitativamen-

te los impactos del cambio de uso del suelo sobre el régimen hidrológico, proporcionando herramientas confiables para la planificación sostenible de los recursos hídricos. Los hallazgos obtenidos cumplen satisfactoriamente con el objetivo general de evaluar el impacto del cambio de uso del suelo en la escorrentía superficial durante el periodo 2004-2024, así como con los objetivos específicos de determinar el estado actual de la cuenca y modelar los cambios hidrológicos resultantes de las transformaciones en la geomorfología y cobertura vegetal. Para investigaciones futuras se recomienda incorporar: 1) análisis ampliado de eventos hidrológicos extremos, 2) mediciones cuantitativas *in situ* de la erosión del suelo, y 3) modelado de escenarios de cambio climático. Estas aproximaciones mejorarán sustancialmente la capacidad predictiva para la gestión sostenible de cuencas en contextos de crecientes presiones antropogénicas y variabilidad climática.

## CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

**A**utor 1: recolección de datos escritura, análisis y edición.

**Autor 2:** escritura, corrección y análisis.

## FINANCIAMIENTO

**N**o aplica.

## USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

**D**e acuerdo con el documento *Lineamientos para el uso de la I.A en publi-*

*caciones con el Sello Editorial UNAD* emitido por Editorial Sello Editorial UNAD, los



autores manifiestan que en la revisión final de este artículo se usó la herramienta de IA de código abierto denominada DeepSeek (disponible en <https://www.deepseek.com/>), específicamente en el proceso de edición del texto; el uso de esta herramienta contribuyó a disminuir los errores gramaticales. Así

mismo, los autores manifiestan que esta herramienta de IA se usó responsablemente, sin incurrir en posibles vulneraciones de derechos de autor o plagio. Finalmente, se indica que se usó el gestor bibliográfico Mendeley para la consolidación de la sección de Literatura citada.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio Ciencias de la Información Geográfica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede de La Paz, por el

apoyo logístico y el préstamo de los equipos para el análisis de la información empleada en esta investigación.

## LITERATURA CITADA

Arévalo-Hernández, J. J., Medeiros de Oliveira, E., Araújo e Silva Ferraz, G., Polanía-Montiel, D. C., Liscano Solano, A. L. & Naves Silva, M. L. (2024). The delineation of management zones using soil quality indices for the cultivation of irrigated rice (*Oryza sativa* L.) in Huila, Colombia. *Geoderma Regional*, 39, e00886. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00886>

Barrios-Perez, C., Okada, K., Garcés Varón, G., Ramirez-Villegas, J., Rebolledo, M. C., & Prager, S. D. (2021). How does El Niño Southern Oscillation affect rice-producing environments in central Colombia? *Agricultural and Forest Me-*

*teorology*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108443>

Bernal Núñez, A. P. B., Gutiérrez-Montes, I., Hernández-Núñez, H. E., Gutiérrez Suárez, D. R., Gutiérrez García, G. A., Suárez, J. C., Casanoves, F., Flora, C. & Sibelet, N. (2023). Diverse farmer livelihoods increase resilience to climate variability in southern Colombia. *Land Use Policy*, 131, |106731. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106731>

Burgos-Ayala, A., Jiménez-Aceituno, A., Meacham, M., Rozas-Vásquez, D., Mancilla García, M., Rocha, J. & Rincón-Ruiz, A. (2024). Mapping ecosystem services in

- Colombia: Analysis of synergies, trade-offs and bundles in environmental management. *Ecosystem Services*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101608>
- Camacho, W. A., Camacho, W. A., & Uribe, D. A. (2018). Estimación de la huella hídrica azul y verde de la producción cafetera en ocho cuencas en el sur del Departamento del Huila. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 338-354. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2284>
- Castro, C. V. & Maidment, D. R. (2020). GIS preprocessing for rapid initialization of HEC-HMS hydrological basin models using web-based data services. *Environmental Modelling and Software*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104732>
- Clerici, N., Cote-Navarro, F., Escobedo, F. J., Rubiano, K. & Villegas, J. C. (2019). Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes. *Science of the Total Environment*, 685, 1181-1192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.275>
- Cortes, J., Castro, A., Arboleda, G., Sepulveda, V., Piragauta, N. & Higuera, O. (2022). Hydrogeological and hydrogeochemical evaluation of groundwaters and surface waters in potential coalbed methane areas in Colombia. *International Journal of Coal Geology*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.103937>
- Cortés-Macías, E. T., Fuentes López, C. , Gentile, P., Girón-Hernández, J. & Fuentes López, A. (2022). Impact of post-harvest treatments on physicochemical and sensory characteristics of coffee beans in Huila, Colombia. *Postharvest Biology and Technology*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111852>
- Esquivel, A., Llanos-Herrera, L., Agudelo, D., Prager, S. D., Fernandes, K., Rojas, A., Valencia, J. J. & Ramirez-Villegas, J. (2018). Predictability of seasonal precipitation across major crop growing areas in Colombia. *Climate Services*, 12, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.09.001>
- Golubev, V., McCarter, C. & Whittington, P. (2021). Ecohydrological implications of the variability of soil hydrophysical properties between two Sphagnum moss microforms and the impact of different sample heights. *Journal of Hydrology*, 603(part B). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126956>
- Gómez, D., Aristizábal, E., García, E. F., Marín, D., Valencia, S. & Vásquez, M. (2023). Landslides forecasting using satellite rainfall estimations and machine learning in the Colombian Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 125, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104293>
- Guduru, J. U., Jilo, N. B., Rabba, Z. A. & Namara, W. G. (2022). Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki river watershed, rift valley basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104743>

- Guduru, J. U. & Mohammed, A. S. (2024). Hydrological modeling using HEC-HMS model, case of Tikur Wuha River Basin, Rift Valley River Basin, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 17, 101017 <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101017>
- Halwatura, D. & Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling and Software*, 46, 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>
- Howland, F. & Francois Le Coq, J. (2022). Disaster risk management, or adaptation to climate change? The elaboration of climate policies related to agriculture in Colombia. *Geoforum*, 131, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.02.012>
- IGAC. (2016). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Huila. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://metadatos.icde.gov.co/geonetwork/srv/api/records/14145393>
- Kastali, A., Zeroual, A., Zeroual, S. & Hamitouche, Y. (2022). Auto-calibration of HEC-HMS Model for Historic Flood Event under Rating Curve Uncertainty. Case Study: Allala Watershed, Algeria. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(1), 482-493. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1051-4>
- Leal, J., Avila, E. A., Darghan, A. E. & Lobo, D. (2023). Spatial modeling of infiltration and its relationship with surface coverage of rock fragments and porosity in soils of an andean micro-watershed in Tolima (Colombia). *Geoderma Regional*, 33, e00637. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00637>
- Lin, Q., Lin, B., Zhang, D., Wu, J. & Chen, X. (2023). HMS-REST v1.0: A plugin for the HEC-HMS model to provide RESTful services. *Environmental Modelling and Software*, 170, 105860. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105860>
- Marrero, V., Baena, D., Berrío-Giraldo, L., Villegas-Palacio, C., Berrouet, L. & Ez-zine-De-Blas, D. (2024). Complexity of sustainable trajectories of a socioecological system. An application of the wayfinder guide in the tropical andes (Colombia). *Environmental Science and Policy*, 156, 103747. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103747>
- Perdomo Moreno, H. y Perdomo, L. J. (2004). Cuencas hidrográficas estratégicas para el desarrollo de la irrigación y otros proyectos hidráulicos en el Departamento del Huila. *Ingeniería y Región*, 3, 66-73. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432312&info=resumen&idioma=SPA>
- Rodriguez-Espinosa, C. A., Valencia, C. F., Ramirez, C. G. & Valencia, C. D. (2025). Dynamic effect of climate change on flood damage cost in the Andean region of Colombia using an ARDL-ECM model and climate change projections. *Sustainable Cities and Society*, 125, 106309. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106309>
- Rojas-Ospina, A., Zuñiga-Collazos, A. & Castillo-Palacio, M. (2024). Factors influencing environmental sustainability performance: A study applied to coffee

- crops in Colombia. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(3), 100361 <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100361>
- Romero-Cuéllar, J., Buitrago-Vargas, A., Quintero-Ruiz, T. & Francés, F. (2018). Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia. *Ribagua*, 5(1), 63-78. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1454574>
- Ruiz-Agudelo, C. A. & Gutiérrez-Bonilla, F. de P. (2025). The natural capital of the Colombian Caribbean Basins. Evidence of rapid anthropic transformation. *Sustainable Futures*, 9, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100524>
- Sadeghian, S., Alarcon, V. F., Díaz-Poveda, V., Lince-Salazar, L. A. & Rey-Sandoval, J. C. (2019). Fertilidad del suelo y manejo de la nutrición. *En Centro Nacional de Investigaciones de Café* (Ed.), Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila, 80-105. [https://doi.org/10.38141/10791/0005\\_4](https://doi.org/10.38141/10791/0005_4)
- Uribe, N., Srinivasan, R., Corzo, G., Arango, D. & Solomatine, D. (2020). Spatio-temporal critical source area patterns of runoff pollution from agricultural practices in the Colombian Andes. *Ecological Engineering*, 149, 105810. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105810>
- Vargas, W. (2015). Una breve descripción de la vegetación, con especial énfasis en las pioneras intermedias de los bosques secos de la Jagua, en la cuenca alta del Río Magdalena en el Huila. *Colombia Forestal*, 18(1), 47-70. <https://doi.org/10.14483/UDISTRITAL.JOUR.COLOMB.FOR.2015.1.A03>

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



#### Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.