



Informe Estado de la Nación 2025

Investigación

Evaluación del impacto hidrológico de escenarios futuros de uso del suelo en Costa Rica

Investigadores:

Vladimir González-Gamboa, PEN
Rudy Muñoz Jiménez
Adolfo Quesada-Román, Escuela de Geografía-UCR
Hugo Hidalgo, Cigefi-UCR
Erick Alfaro, Cigefi-UCR
José Umaña-Ortiz, PRIAS-CeNAT
Esteban Montenegro-Hernández, PRIAS-CeNAT
Luis Eduardo Quesada Hernández
Cornelia Miller Granados

San José | 2025



631.4
EV92e

Evaluación del impacto hidrológico de escenarios futuros de uso del suelo en Costa Rica / Vladimir González-Gamboa...[et al.]. -- San José, C.R. : PEN, 2025.

1 recurso en línea (48 páginas): archivos de texto PDF, 2950 KB

ISBN 978-9930-654-50-7

Investigación para el Informe Estado de la Nación 2025 (no. 31)

1. CONSERVACIÓN DE SUELOS. 2. COBERTURA VEGETAL. 3. CULTIVOS DE COBERTURA. 4. EROSIÓN DE SUELOS. 5. COSTA RICA. I. González-Gamboa, Vladimir. II. Muñoz Jiménez, Rudy. III. Quesada-Román, Adolfo. IV. Hidalgo, Hugo. V. Alfaro, Erick. VI. Umaña-Ortiz, José. VII. Montenegro-Hernández, Esteban. VIII. Quesada Hernández, Luis Eduardo. IX. Miller Granados, Cornelia. X. Título.



Información de las personas autoras:

Vladimir González-Gamboa. <https://orcid.org/0009-0000-5283-8989>

Rudy Muñoz Jiménez. <https://orcid.org/0009-0006-2256-508X>

Adolfo Quesada-Román. <https://orcid.org/0000-0001-6601-5254>

Hugo Hidalgo. <https://orcid.org/0000-0003-4638-0742>

Eric Alfaro. <https://orcid.org/0000-0001-9278-5017>

José Umaña-Ortiz. <https://orcid.org/0000-0002-3677-920X>

Esteban Montenegro-Hernández. <https://orcid.org/0009-0006-0098-2739>

Luis Eduardo Quesada Hernández. <https://orcid.org/0000-0001-7322-4820>

Cornelia Miller Granados. <https://orcid.org/0000-0002-9460-626X>

Esta obra se comparte bajo la licencia

**Reconocimiento – No Comercial – Compartir Igual
(CC-BY-NC-SA)**



Permite usar una obra para crear otra obra o contenido, modificando o no la obra original, siempre que se cite al autor, la obra resultante se comparta bajo el mismo tipo de licencia y no tenga fines comerciales

Indice

Descargo de responsabilidad	4
Resumen	4
Palabras clave	5
Hallazgos relevantes.....	5
Introducción.....	6
Metodología.....	8
Caso de la cuenca del río Matina.....	9
Cambios de uso del suelo	10
Modelo SWAT+	13
Resultados.....	19
Resultados de predicción de uso del suelo al 2045.....	19
Resultados del modelo SWAT	29
Comportamiento de variables climáticas	29
<i>Tendencia del caudal</i>	32
Discusión y conclusiones.....	38
Referencias bibliográficas.....	43
Anexo.....	48

Descargo de responsabilidad

Esta investigación se realizó para el *Informe Estado de la Nación (2025)*. El contenido es responsabilidad exclusiva de su autor, y las cifras pueden no coincidir con las consignadas en el capítulo respectivo, debido a revisiones posteriores. En caso de encontrarse diferencia entre ambas fuentes, prevalecen las publicadas en el Informe.

Resumen

Este estudio emplea el modelo hidrológico SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus) para evaluar el impacto del cambio de uso del suelo sobre la dinámica hidrológica de la cuenca del río Matina, en la vertiente atlántica de Costa Rica. Se comparan dos escenarios contrastantes de uso del suelo: el actual (año 2021) y uno proyectado para el año 2045, manteniendo constantes las condiciones climáticas históricas. Esta estrategia metodológica permite aislar los efectos atribuibles exclusivamente a las transformaciones en la cobertura terrestre.

La simulación se basa en datos geoespaciales validados y proyecciones de uso del suelo generadas mediante modelos de aprendizaje automático. Los resultados muestran una disminución general del caudal superficial en el escenario 2045, atribuida a un aumento en el bosque que incrementa la evapotranspiración real (ET_{real}) y reduce la escorrentía superficial. Asimismo, se identificaron subcuencas donde estos cambios son espacialmente más intensos, lo que ofrece evidencia útil para la gestión diferenciada del recurso hídrico.

El análisis de las transiciones de uso del suelo revela patrones complejos y contrastantes. Por un lado, se observa una recuperación progresiva de bosque en zonas de pastos degradados, lo que favorece procesos de regeneración ecológica. Por otro, se identifican presiones crecientes sobre el paisaje, como la expansión de cultivos intensivos (probablemente piña y banano) y de infraestructura urbana, concentradas en la zona norte y noreste de la cuenca. Este patrón espacial de cambio, si bien muestra dinámicas de restauración, también implica riesgos para la conectividad ecológica y la sostenibilidad hidrológica del territorio.

La aplicación de SWAT+ en este contexto demuestra su utilidad como herramienta de modelación espacialmente explícita para anticipar respuestas hidrológicas ante distintas configuraciones del paisaje. Los hallazgos contribuyen al diseño de políticas de ordenamiento territorial basadas en criterios de sostenibilidad hídrica, resiliencia ecológica y mitigación de riesgos en cuencas vulnerables al cambio ambiental.

Palabras clave

Cambio de uso del suelo, simulación de escenarios, modelación hidrológica, Swat+

Hallazgos relevantes

- La conversión de pasto a cultivo aumenta de forma sostenida hasta 2035 (máximo de 10.251 ha), seguida de una leve reducción hacia 2045.
- La transición de bosque a cultivo reaparece en 2045 (8.305 ha), luego de haber desaparecido en 2035.
- Aumenta la conversión de cultivo a bosque (máximo en 2045 con 6.001 ha), lo que sugiere procesos de regeneración o restauración ecológica.
- El cambio de pasto a bosque mantiene una tendencia constante, indicando recuperación vegetal en zonas degradadas.
- Preocupa el crecimiento de pasto a infraestructura, alcanzando 6.948 ha en 2035, reflejando presión urbana o de obras públicas.
- Se registran pequeñas áreas de cambio de bosque a infraestructura (0.711 ha) y de cultivo a infraestructura (0.162 ha), con efectos potencialmente irreversibles sobre la conectividad ecológica.
- Reducción del caudal superficial: La comparación entre los escenarios de 2021 y 2045 revela una disminución generalizada del caudal superficial (Q_{real}), atribuida al aumento proyectado del bosque y su efecto en la evapotranspiración.
- Incremento en la evapotranspiración real: El escenario 2045 muestra valores más altos de ET_{real} , como resultado de la reconversión de áreas de pastos y cultivos hacia coberturas forestales, las cuales presentan mayor demanda hídrica.
- Distribución espacial diferenciada: Las subcuencas altas (13–20) concentran los mayores valores de caudal en ambos escenarios, mientras que las subcuencas bajas presentan

menor caudal y cambios más limitados en cobertura, lo que sugiere patrones hidrológicos contrastantes dentro de la cuenca.

- Importancia de la reconversión forestal: Las subcuencas con mayor recuperación forestal (especialmente la 13, 10 y 5) presentan los cambios más marcados en la dinámica hidrológica, lo que resalta el rol de la vegetación como regulador del ciclo del agua.
- Validez del enfoque metodológico: Al mantener constantes las condiciones climáticas, se logró aislar el efecto del cambio de uso del suelo, generando evidencia sólida para orientar políticas de planificación territorial y gestión hídrica basada en escenarios.

Introducción

El cambio en el uso y cobertura del suelo representa uno de los principales motores de transformación del medio ambiente, con efectos profundos sobre los ciclos hidrológicos, la calidad del agua y la disponibilidad de recursos hídricos a escala regional (Foley et al., 2005; Lambin y Geist, 2006). En contextos de creciente presión sobre los ecosistemas, la capacidad de anticipar escenarios futuros de ocupación del territorio se vuelve fundamental para la formulación de políticas de ordenamiento territorial y manejo integrado de cuencas hidrográficas (Verburg et al., 2013).

La modelación prospectiva de cambios de uso del suelo permite explorar las consecuencias ambientales de distintos caminos del desarrollo, ya sea a partir de tendencias observadas o de decisiones políticas proyectadas. En particular, estos enfoques han demostrado ser esenciales para anticipar alteraciones en la escorrentía superficial, la recarga de acuíferos, la erosión de suelos o la disponibilidad estacional de agua (Hurkmans et al., 2009).

El uso de modelos hidrológicos espacialmente explícitos, como SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus), ha cobrado relevancia por su capacidad de integrar datos geoespaciales, condiciones climáticas y escenarios de uso del suelo para simular procesos a largo plazo en cuencas hidrográficas (Arnold et al., 2012; Bieger et al., 2017). SWAT+ permite descomponer el paisaje en unidades hidrológicas homogéneas y simular procesos clave como la evapotranspiración, la infiltración, la percolación, el flujo lateral, la escorrentía y el

transporte de sedimentos, con lo cual se convierte en una herramienta robusta para evaluar impactos bajo condiciones cambiantes.

Diversos estudios han aplicado modelos como SWAT para proyectar los efectos de cambios de cobertura vegetal, urbanización o expansión agrícola en la hidrología de cuencas hidrográficas. Por ejemplo, Lin et al. (2007) mostraron cómo la expansión urbana en cuencas subtropicales incrementa la escorrentía y reduce la recarga subterránea. Adicionalmente, la restauración, ya sea natural o asistida, tiende a disminuir la escorrentía superficial, mejorar la infiltración y estabilizar el caudal base. Un estudio en una cuenca del Caatinga (Brasil) utilizando SWAT demostró aumentos en la recarga y almacenamiento del agua en suelo de entre 9 % y 28 %, junto con una reducción notable en el rendimiento hídrico superficial tras escenarios de reforestación (Fontes Júnior y Montenegro, 2019).

Una práctica común en estos estudios consiste en mantener las condiciones climáticas constantes al simular escenarios futuros de uso del suelo, lo que permite aislar los efectos del cambio antrópico en la cobertura terrestre (Ghaffari et al., 2010; Sun et al., 2018). Esta estrategia metodológica es especialmente útil para informar decisiones de planificación territorial, ya que ofrece evidencia clara sobre las consecuencias potenciales de las políticas de uso del suelo, independientemente de la variabilidad climática.

Además, esta combinación es relevante ya que la planificación territorial sostenible requiere herramientas capaces de anticipar los impactos ambientales de posibles cambios en el paisaje. En este contexto, el modelo hidrológico SWAT+ se posiciona como una herramienta robusta para evaluar la respuesta hidrológica de cuencas hidrográficas ante distintos escenarios de uso del suelo, gracias a su capacidad de simular procesos a largo plazo con base en datos espacialmente distribuidos.

Dado que estudios previos realizados por el PEN/PRIAS (González et al., 2021. González et al., 2024) han evidenciado que desde 1986 Costa Rica ha experimentado un cambio constante en el uso del suelo —caracterizado por el aumento del área dedicada a cultivos y expansión urbana, así como una dinámica de pérdida y recuperación de bosque— en regiones con alta exposición a inundaciones, surge la necesidad de proyectar el posible impacto hidrológico de

estas transformaciones. Esta proyección resulta particularmente relevante en cuencas hidrográficas que han sido identificadas por su vulnerabilidad ante eventos extremos como inundaciones como es el caso de la cuenca del río Matina.

En este contexto, el presente estudio combina datos históricos validados de clima, relieve y suelo con escenarios proyectados de uso del suelo, modelados mediante técnicas de simulación territorial, para evaluar su impacto en la dinámica hidrológica de una cuenca en Costa Rica. Al emplear SWAT+ como plataforma de simulación, se busca aportar evidencia cuantitativa que apoye procesos de gestión sostenible del territorio y de los recursos hídricos en el mediano y largo plazo.

Metodología

En este estudio, se emplea SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus) para comparar el comportamiento hidrológico de una cuenca ante dos escenarios de uso del suelo: (1) el uso del suelo año 2021 y (2) un escenario proyectado al 2045, generado a partir de modelos de simulación territorial. Estos escenarios se analizan bajo idénticas condiciones climáticas históricas, lo cual permite aislar el efecto del cambio de uso del suelo en variables clave como escorrentía, caudal mensual, infiltración o recarga subterránea. Para desarrollar este ejercicio se planteó aplicarlo a la cuenca del río Matina.

Esta estrategia metodológica ofrece dos beneficios principales:

- Evaluación prospectiva del impacto del cambio de uso del suelo, lo que permite prever riesgos como incremento en escorrentía superficial o reducción de disponibilidad hídrica estacional.
- Apoyo a la toma de decisiones, al proporcionar evidencia científica sobre posibles consecuencias hidrológicas de políticas territoriales o cambios en cobertura vegetal.

Dado que los datos climáticos diarios históricos ya están disponibles y validados, y que la proyección de uso del suelo a 30 años se generó con base en escenarios plausibles, la combinación de estos insumos en SWAT+ constituye una simulación válida y científicamente sólida.

Caso de la cuenca del río Matina

La cuenca del río Matina fue seleccionada como área de estudio por una combinación de factores hidrológicos, geográficos y de relevancia socioambiental que la convierten en un caso representativo y estratégicamente importante para el análisis de los impactos del cambio de uso del suelo sobre la dinámica hidrológica.

En primer lugar, se trata de una cuenca ubicada en la vertiente atlántica de Costa Rica, una de las regiones con mayor pluviosidad del país, lo que la hace particularmente sensible a variaciones en la cobertura del suelo que puedan afectar la escorrentía, la infiltración y el caudal. Estudios previos del Programa Estado de la Nación (González et al., 2021; 2024) han señalado la cuenca del Matina como una de las zonas con mayor exposición a eventos de inundación, debido tanto a sus características geomorfológicas como al patrón de ocupación del territorio.

En segundo lugar, la cuenca del Matina ha experimentado cambios notables en el uso del suelo durante las últimas décadas, incluyendo expansión de áreas agroindustriales, transformación de pastizales y dinámicas de deforestación y reforestación. Esta variabilidad histórica y proyección futura de uso del suelo la convierte en un laboratorio ideal para simular y anticipar los efectos hidrológicos de escenarios de reconversión territorial.

Además, la cuenca posee información geoespacial y climática disponible, validada y compatible con los requerimientos del modelo SWAT+, lo que facilita su implementación técnica. A diferencia de otras cuencas de características similares, Matina cuenta con una estructura hidrológica suficientemente compleja —pero no sobredimensionada— que permite simular procesos clave (escorrentía, evapotranspiración (ET), infiltración) con alta resolución sin requerir procesamiento computacional excesivo.

Finalmente, el objetivo del estudio es modelar cambios de uso del suelo y proyectar su impacto basándonos en el modelo hidrometeorológico SWAT+. Este estudio mantiene el clima constante a lo largo del período simulado, con el fin de aislar el efecto del cambio en el uso del suelo sobre el sistema hidrológico.

Por último, la selección de esta cuenca responde también a un criterio estratégico: sus condiciones y dinámica territorial reflejan patrones comunes en otras cuencas costarricenses, lo que hace que los hallazgos del presente estudio puedan ser extrapolados o considerados como referencia para otras regiones del país que enfrentan retos similares en términos de gestión del recurso hídrico y ordenamiento territorial.

Cambios de uso del suelo

Los escenarios de uso del suelo fueron desarrollados mediante un modelo de clasificación supervisada utilizando Random Forest (Belgiu y Drăguț, 2016), entrenado con series temporales de cobertura obtenidas de datos REDD+ para el periodo 1986–2021. Esta metodología permitió generar una proyección del uso del suelo a 30 años, basada en las transiciones históricas observadas y en variables explicativas relacionadas con la accesibilidad, altitud, pendientes y proximidad a centros urbanos y cuerpos de agua (Breiman, 2001; Giri, 2016).

Esta investigación tiene la particularidad de que sobre las capas de uso del suelo se desarrolla una predicción al 2030, 2035, 2040, 2045 basado en 12 capas clasificadas por el proyecto REDD+. Estas capas corresponden a los años: 1986, 1992, 1998, 2001, 2006, 2008, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019, y 2021 (cuadro 1).

Estas clasificaciones de uso de suelo se realizaron utilizando un enfoque riguroso, transparente y replicable (Córdoba, 2023). El proceso se fundamentó en el análisis de imágenes satelitales de alta resolución (PlanetScope, Sentinel-2 y Landsat 8) por medio de herramientas geoespaciales, definiendo seis categorías de uso principales: Bosque, uso agropecuario, plantación forestal, infraestructura urbana, cuerpo de agua y otros usos (basadas en la guía *Corine Land Cover*). El cuadro 1 muestra la distribución porcentual de las distintas categorías de uso en los años de estudio.

Cuadro 1
Distribución porcentual de categorías de uso en clasificaciones REDD+

Año	1986	1992	1998	2001	2006	2008	2011	2013	2015	2017	2019	2021
Cobertura												
forestal	57,2	61,6	60,69	60,31	44,7	59,61	60,48	62,02	62,09	61,98	60,9	61,77
Pasto	26	25,15	25,2	25,22	31,9	25,85	25,58	24,52	23,72	24,37	25,4	24,66
Cultivo	11,34	10,48	10,9	11,15	21,1	11,08	10,88	10,35	10,13	10,3	10,2	10,32
Infraestructura												
ctura	0,51	0,59	0,69	0,76	2,3	0,84	1,81	0,92	1,88	1,16	1,3	1,06
Datos faltantes												
faltantes	4,95	2,18	2,52	2,56	0	2,62	1,25	2,19	2,18	2,19	2,2	2,19

Fuente: Elaboración propia con datos de FONAFIFO et al., 2021.

En la investigación desarrollada por REDD+ la metodología se basa en la fotointerpretación visual asistida por SIG, comparando imágenes satelitales de alta resolución como PlanetScope y Sentinel-2 con mapas de años anteriores. Esta técnica es más manual, pero muy efectiva en contextos montañosos, tropicales, y variados como los paisajes costarricenses.

A modo de resumen, la información base de uso de suelo proviene de la iniciativa REDD+, que ha generado una serie de productos cartográficos en formato ráster que representan la evolución de la cobertura y uso del suelo en Costa Rica desde 1986 hasta 2021 (Córdoba, 2023). Estos archivos, desarrollados bajo los lineamientos del Sistema Nacional de Monitoreo de la Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE), ofrecen una visión detallada y estandarizada de los cambios en el paisaje costarricense a lo largo de más de tres décadas (cuadro 1).

Cada archivo ráster corresponde a un año específico (1986, 1992, 1998, 2001, 2005, 2008, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 y 2021) y clasifica el territorio nacional en diversas categorías de uso como bosques, pastos, cultivos, áreas urbanas, cuerpos de agua, entre otros. De esta manera, la información de uso de suelo de cada año fue recortada para la cuenca hidrográfica, resultando en archivos ráster de la cuenca, que fueron la base para la predicción (mapa 1).

El primer paso para la predicción de uso de suelo fue la definición del área de estudio. Para esto se escogió la cuenca hidrográfica con alta presencia de zonas de inundación basadas en la delimitación de la Comisión Nacional de Emergencias y la priorización realizada por González et al. (2023), que se muestra en el mapa 1, que a la vez cuenta con una diversidad en el paisaje, i.e. que incluya zonas de edificaciones, cultivos y bosque.

Mapa 1
Cuenca hidrográfica de interés



Fuente: Elaboración propia con datos de ICE-CENIGA (2008).

Modelos de predicción de uso de suelo

Los modelos de predicción de uso del suelo son herramientas que permiten anticipar cómo se modificará el uso del suelo en el futuro, considerando el comportamiento que ha tenido esta variable en el pasado. Se revisaron tres enfoques para la proyección del uso del suelo: (i) la clase modal histórica, que asigna a cada píxel el uso más frecuente en el tiempo; (ii) el modelo CA-Markov, que combina probabilidades de transición con la influencia espacial de los píxeles vecinos (Sang et al., 2011); y (iii) el algoritmo Random Forest, basado en árboles de decisión. Este último fue seleccionado por su mayor precisión predictiva reportada en la literatura (Belgiu y Drăguț, 2016).

El modelo Random Forest fue el que ofreció más ventajas frente a los otros dos modelos indicados, especialmente en términos de precisión y capacidad para capturar relaciones complejas entre categorías de uso. Por esta razón, fue utilizado para definir, para cada cuenca hidrográfica mostrada en a Figura 1, la predicción de uso para el periodo mencionado, utilizando en el software R.

Posterior a la aplicación del modelo de predicción, utilizando la herramienta *Raster calculator* del software ArcGIS Pro, se aplicó una fórmula condicional que mantiene todos los pixeles que en algún año fueron categorizados como “Infraestructura” en la misma categoría en el resultado final; debido a que por lo general dicha categoría no pierde área, sino que tiende a mantenerse estable o crecer.

Como resultado final, se obtuvieron 5 archivos ráster correspondientes a la predicción de uso del suelo para cada año de predicción. Estos archivos contienen 6 categorías, a saber:

- Cobertura forestal
- Pasto
- Cultivo
- Infraestructura
- Cuerpo de agua
- Datos faltantes

Modelo SWAT+

Datos de entrada del modelo

Para el Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) se usó un archivo ráster con un tamaño de pixel de 30x30 metros del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Las propiedades físico-químicas de los suelos fueron definidas a partir de información de calicatas del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. Estas incluyen datos de textura, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica, contenido de carbono orgánico y pH. Los datos meteorológicos fueron extraídos de diversas fuentes: precipitación y temperatura provienen de la base de datos CHIRPS CHIRTS

(Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data; Funk et al., 2015); la radiación solar se obtuvieron de productos satelitales de la NASA POWER; y los datos de caudales medios mensuales fueron proporcionados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), y por el proyecto que actualmente ejecuta el PEN sobre estimaciones de caudales mensuales históricos basado en más de 40 cuencas a nivel nacional utilizando los datos del ICE (Rodríguez, 2023).

Configuración y ejecución del modelo SWAT+

El modelo se estructuró a partir de la delimitación de subcuencas y unidades de respuesta hidrológica (HRU), definidas mediante combinaciones únicas de tipo de suelo, uso del suelo y pendiente. El periodo de simulación abarca desde 1989-2021, manteniendo constantes las condiciones climáticas observadas para evaluar únicamente los efectos del cambio en el uso del suelo.

El modelo fue ejecutado en el entorno de cálculo de alto rendimiento KABRE, utilizando la versión SWAT+ rev. 61.0.2.11 (SWAT Development Team, 2025) controlada desde Python mediante la librería pySWATPlus (Saló y Llorente, 2023) y siguiendo la estructura de datos de SWAT+ Editor v3.0 (Blackland et al., 2024). El proceso se automatizó a través de scripts personalizados que garantizan la ejecución secuencial, el registro de logs y la integridad de los archivos de entrada y salida. Adicionalmente, se utilizó QSWAT v1.2 (Dilek et al., 2017) en el entorno QGIS 3.16 (QGIS Development Team, 2021) para la delimitación automática de cuencas hidrográficas y la generación de redes de drenaje y subcuencas a partir del modelo digital de elevación (DEM).

VARIABLES HIDROLÓGICAS EVALUADAS

Las variables evaluadas incluyen escurrimiento superficial, caudal total (real), y evapotranspiración. Estas variables permiten identificar áreas críticas en términos de disponibilidad hídrica, posibles zonas de recarga acuífera y regiones vulnerables a eventos extremos como sequías o inundaciones. Se sigue la metodología propuesta por Neitsch et al. (2011) para la interpretación de salidas y validación del modelo, complementada con análisis espaciales en sistemas de información geográfica (SIG).

Cálculo de variables

En esta sección se describen las fórmulas y procedimientos utilizados para estimar las principales variables hidrológicas analizadas en el estudio, específicamente la evapotranspiración, caudal mensual y la escorrentía real. Estas estimaciones se realizaron a escala mensual y a nivel de unidad de respuesta hidrológica (HRU), integrando datos climáticos observados, propiedades del suelo y coberturas del uso del suelo. Las expresiones utilizadas corresponden a modelos empíricos ampliamente validados en estudios hidrológicos en regiones tropicales, adaptados a la disponibilidad de datos y a las características del área de estudio.

Evapotranspiración

La evapotranspiración real mensual (ET_{real}) se estimó en dos etapas. Primero, se calculó la evapotranspiración potencial (ET_0) utilizando el método de Hargreaves-Samani (Hargreaves y Samani, 1985), una fórmula empírica ampliamente empleada en contextos con datos climáticos limitados. Esta fórmula estima ET_0 a partir de la temperatura del aire y la radiación solar observada, de acuerdo con:

$$ET_0 = 0.0023 (T_{med} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$$

Donde:

ET_0 : evapotranspiración potencial (mm/día)

$T_{med}, T_{max}, T_{min}$: temperaturas media, máxima y mínima mensuales (°C)

R_a : radiación solar observada (MJ/m²/día)

Posteriormente, se estimó la evapotranspiración real (ET_{real}) ajustando la ET_0 mediante coeficientes específicos para cada combinación de cobertura de uso del suelo y tipo de suelo. Estos coeficientes reflejan la capacidad de cada cobertura para limitar o permitir la evapotranspiración efectiva en condiciones reales de campo. Así, se obtiene una estimación más realista de la cantidad de agua efectivamente transferida a la atmósfera desde cada HRU (Unidad de Respuesta Hidrológica).

Escorrentía

La escorrentía real se estimó de forma mensual para cada unidad de respuesta hidrológica (HRU), combinando el tipo de cobertura del suelo y el tipo de suelo mediante un modelo empírico simplificado basado en coeficientes de escorrentía. La estimación se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{HRU} = C_{us,soil} \cdot (P - ET_{real})$$

Donde:

Q_{HRU} : escorrentía real estimada para una HRU (mm)

$C_{us,soil}$: coeficiente de escorrentía específico según la combinación de uso del suelo y tipo de suelo

P : precipitación mensual (mm)

ET_{real} : evapotranspiración mensual estimada (mm)

Los coeficientes de escorrentía utilizados en este estudio fueron definidos a partir de una revisión combinada de literatura científica y documentos técnicos especializados en hidrología y conservación de suelos, con énfasis en contextos tropicales. La tabla completa de valores empleados se presenta en el Anexo 1. Las siguientes fuentes respaldan la selección de coeficientes:

- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. Proporciona rangos típicos de coeficientes de escorrentía para distintos tipos de cobertura del suelo.
- USDA Natural Resources Conservation Service. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds* (Technical Release 55, TR-55). Presenta curvas de escorrentía y parámetros asociados a grupos hidrológicos de suelo.

- Bonell, M., & Bruijnzeel, L. A. (Eds.). (2005). *Forests, Water and People in the Humid Tropics*. Cambridge University Press. Describe cómo coberturas forestales y suelos tropicales, como los Andisoles, tienden a reducir la escorrentía superficial.
- Molina-Ramírez, J., & Sánchez-Murillo, R. (2012). Evaluación hidrológica de diferentes coberturas vegetales. *Revista Geológica de América Central*, (47), 87–106. Proporciona datos empíricos para condiciones específicas de Costa Rica.
- FAO. (2003). *Manual on Water Harvesting*. Land and Water Development Division. Incluye rangos de coeficientes de escorrentía diferenciados por tipo de cobertura vegetal y suelo.

Caudal

El caudal mensual estimado se obtuvo a partir de la escorrentía generada en cada unidad de respuesta hidrológica (HRU), ponderada según su área. Se presenta en forma de lámina de agua equivalente (mm), calculada como:

$$Q_{real} = \frac{1}{A_{total}} \sum_{i=1}^N Q_{HRU,i} \cdot A_i$$

Donde:

$Q_{HRU,i}$: escorrentía (mm) en la HRU i

A_i : área de la HRU i (ha)

A_{total} : área total de la cuenca (ha)

N : número de HRUs

Finalmente, el Cuadro 2, muestra los insumos utilizados:

Cuadro 2

Datos utilizados por el SWAT+

Insumo	Descripción	Fuente
Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés)	Archivo ráster que indica, para cada pixel, la altitud. Tamaño de pixel: 30 * 30 m.	SNIT, 2024
Uso de suelo	Archivo ráster generado a partir de imágenes satelitales, por medio de una clasificación supervisada. Contiene 5 categorías: 1: Cobertura forestal 2: Pasto 3: Cultivo 4: Infraestructura 5: Cuerpo de agua Tamaño de pixel: 30 * 30 m.	REDD+, 2021, FONAFIFO et al., 2021.
Tipo de suelo	Archivo ráster generado a partir de la interpolación de datos de tipo de suelo. Las categorías varían según la ubicación geográfica. Tamaño de pixel: 30 * 30 m.	CIA-UCR, 2019
Precipitación	Archivo .txt con información diaria de precipitación en mm.	CHIRPS, 2025
Temperatura	Archivo .txt con información diaria de temperatura en °C.	NASA POWER, 2025
Radiación solar	Archivo .txt con información promedio mensual de radiación solar en MJ/m ² /día.	NASA POWER, 2025
Caudal	Archivo .txt con información mensual de caudal en m ³ /s, proveniente de una herramienta especializada de estimación de caudal.	ICE, 2023; Rodríguez, 2023

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

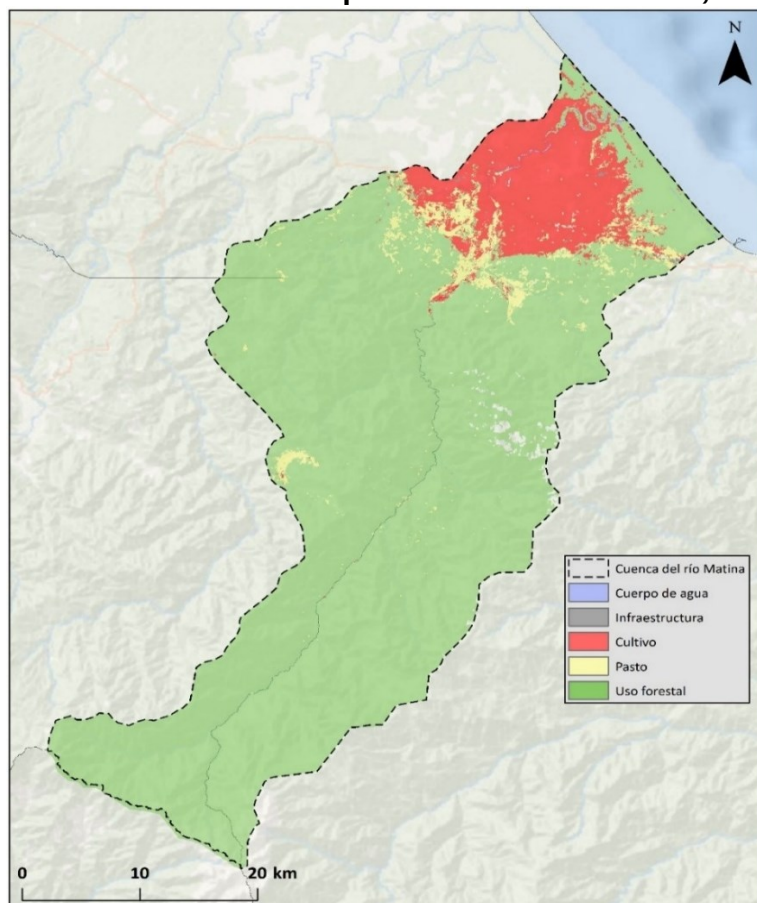
Resultados de predicción de uso del suelo al 2045

Cuenca del río Matina

La principal característica apreciable en el mapa 2 es la estabilidad que se presentó en todas las categorías de uso del suelo. Para el 2021, el bosque cubría un 85,33% de la cuenca, abarcando principalmente la parte sur de la misma, que coincide con Áreas Silvestres Protegidas en terrenos abruptos. Los cultivos de banano constituyen la segunda categoría más amplia, con un 10,8% de la cuenca mientras que los pastos, ubicados alrededor de los cultivos existentes, abarcan el 3,5%. La infraestructura es muy reducida y se ubica en los tres principales centros de población (Batán, Matina y Estrada).

Mapa 2

Predicción de uso de suelo para la cuenca del río Matina, 2045

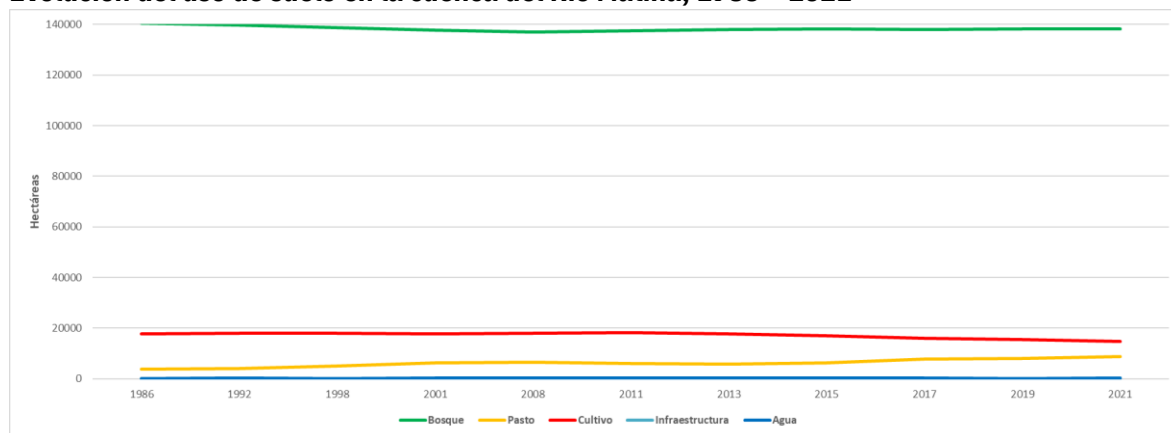


Fuente: Elaboración propia con datos de FONAFIFO et al., 2021. Coordenadas de la cuenca: norte: 10,277882, -83,320835, oeste: 10,160054, -83,402168, sur: 9,529286, -83,468729, este: 10,030001, -83,211287.

Con base en esta información y utilizando el modelo de predicción de uso de suelo Random Forest, se aproximó la distribución para los años 2030, 2035, 2040 y 2045; obteniendo los resultados mostrados en la Gráfico 1.

Gráfico 1

Evolución del uso de suelo en la cuenca del Río Matina, 1986 – 2021



Fuente: Elaboración propia con datos de FONAFIFO et al., 2021.

Hasta el 2021 se observaba una tendencia de pérdida de áreas de cultivos y ganancia de pastos, mientras que el bosque se mantenía relativamente constante, tal y como lo muestra en el gráfico 1. Las predicciones hechas para el período 2021 – 2045, muestran un comportamiento similar a los datos mostrados en el gráfico 2. El aspecto más notorio es una disminución considerable de la cobertura de pastos, en beneficio de cultivos y bosque para el 2045.

El Cuadro 3 muestra los valores absolutos de cada categoría en el período de estudio. Con base en las predicciones hechas se observa en el cuadro 3 que el uso forestal desde el 2021 y para el 2030, 2035 y 2040 disminuye entre 700 y 900 hectáreas aproximadamente, mientras que para el 2045 el volvería a recuperarse por encima de las 138.000 hectáreas. En el caso de cultivos la predicción del 2045 presenta un repunte en detrimento de los pastos. Esta expansión agrícola ocurre principalmente en la parte Norte de la cuenca, como se muestra el mapa 2, donde el área roja se extiende de manera evidente, invadiendo zonas previamente ocupadas por pasto y en menor medida por bosque.

Cuadro 3

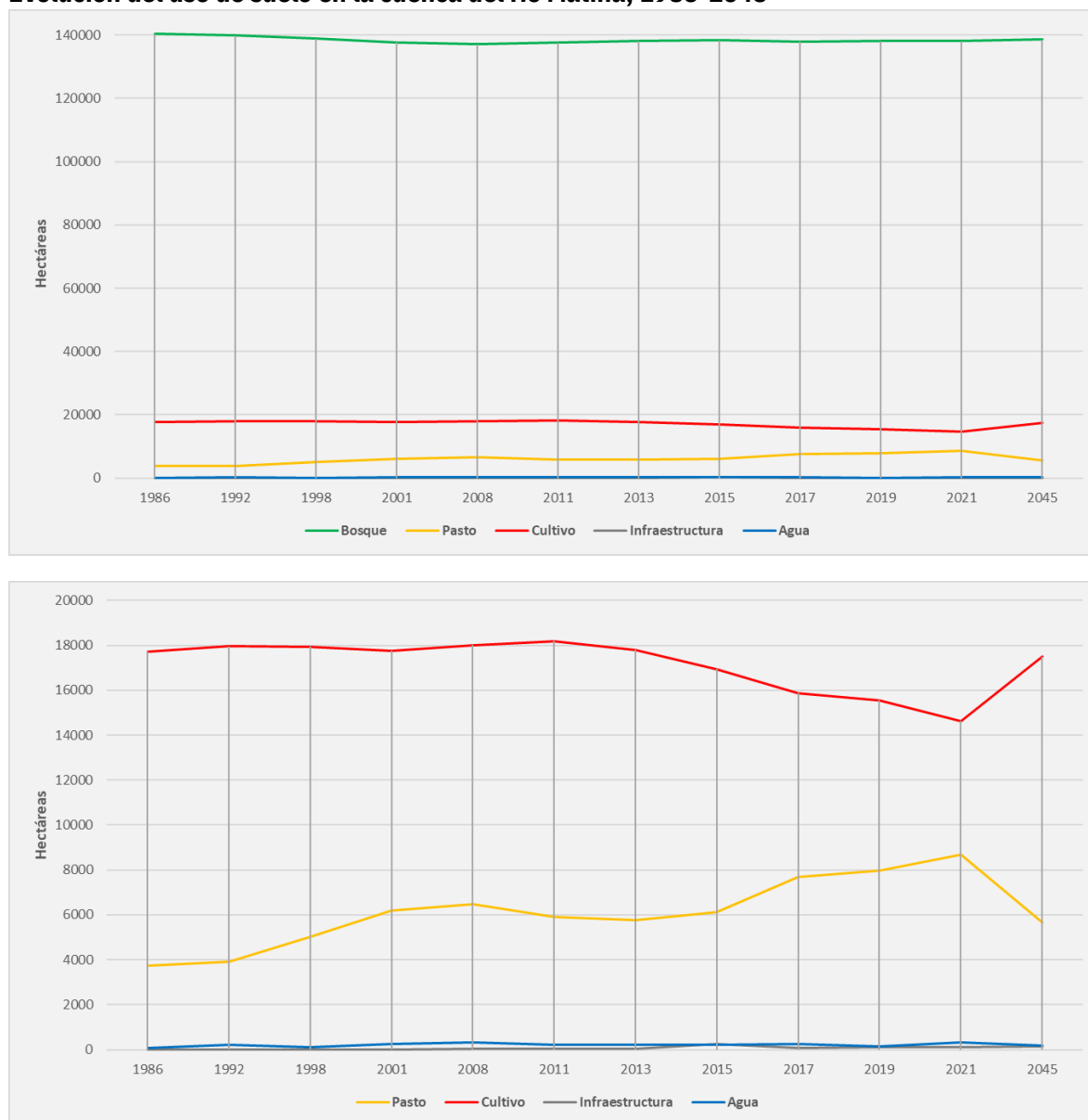
Evolución del uso de suelo en la cuenca del Río Matina, 1986 – 2045

Año	Bosque (ha)	Pasto (ha)	Cultivo (ha)	Infraestructura (ha)	Agua (ha)
1986	140357,3	3725,6	17727,8	0,0	89,6
1992	139809,5	3899,9	17959,0	2,5	229,5
1998	138819,7	5005,4	17945,1	6,5	123,8
2001	137701,4	6178,0	17753,5	15,1	252,5
2008	137046,9	6492,5	18010,3	27,3	323,5
2011	137571,8	5892,8	18187,7	28,7	219,3
Año	Bosque (ha)	Pasto (ha)	Cultivo (ha)	Infraestructura (ha)	Agua (ha)
2013	138049,7	5784,1	17802,6	33,6	230,3
2015	138325,8	6138,2	16946,9	271,1	218,4
2017	137989,3	7701,4	15871,4	91,3	247,1
2019	138127,1	7985,1	15555,5	95,9	136,8
2021	138148,1	8174,6	14637,6	117,9	319,2
Predicciones					
2030	137376,1	6001,1	15321,2	157,4	271,1
2035	137212,3	6441,1	15020,2	173,2	280,0
2040	137048,6	6881,1	14719,3	188,9	289,0
2045	138549,4	5656,5	14418,3	204,7	298,0

Fuente: Elaboración propia con datos de FONAFIFO et al., 2021.

Gráfico 2

Evolución del uso de suelo en la cuenca del río Matina, 1986-2045



Fuente: Elaboración propia con datos de FONAFIFO et al., 2021.

La cuenca del río Matina muestra una tendencia general de estabilidad en el uso forestal. La predicción del 2045 presenta un repunte de los cultivos en detrimento de los pastos. Esta expansión agrícola ocurre principalmente en la parte norte de la cuenca hidrográfica, como se muestra en el mapa 2, donde el área roja de Cultivo se extiende de manera evidente, invadiendo zonas previamente ocupadas por pasto y en menor medida por bosque.

A continuación, se analiza la evolución proyectada de las categorías de uso del suelo en la cuenca del río Matina para los años 2025, 2030, 2035 y 2045. Este análisis permite identificar las transiciones más significativas entre coberturas, proporcionando una perspectiva temporal sobre la dinámica territorial. El objetivo es detectar patrones de transformación relevantes que puedan informar decisiones futuras de planificación y manejo del territorio.

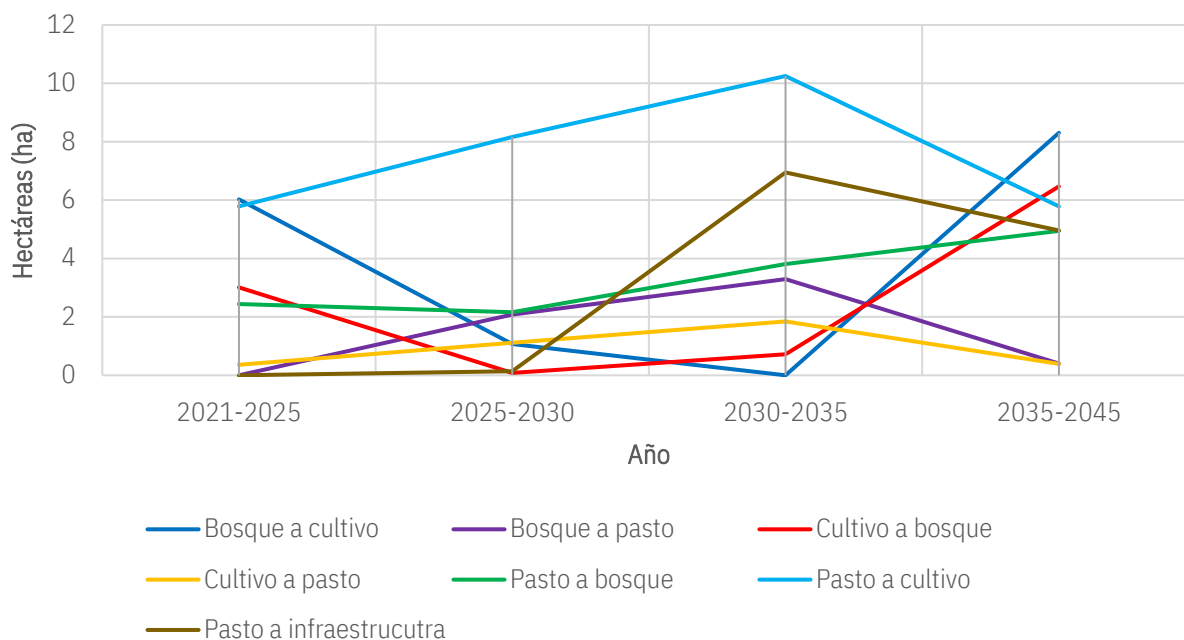
El siguiente cuadro muestra los cambios de categoría de uso de suelo en el período indicado anteriormente.

Cuadro 4
Cambios de uso de suelo, 2025 – 2045

Tipo de cambio	2025 (ha)	2030 (ha)	2035 (ha)	2045 (ha)
Bosque a cultivo	6,021	1,071	0	8,305
Bosque a pasto	0	2,079	3,294	0,4
Cultivo a bosque	3,006	0,081	0,72	6,469
Cultivo a pasto	0,36	1,116	1,845	0,39
Pasto a bosque	2,437	2,16	3,807	4,947
Pasto a cultivo	5,787	8,163	10,251	5,787
Pasto a infraestructura	0	0,135	6,948	4,96

Fuente: Elaboración con datos de FONAFIFO et al., 2021.

Gráfico 3
Cambios de uso de suelo, 2025 – 2045



Fuente: Elaboración propia con datos de FONAFIFO et al., 2021.

El Cuadro 4 y el gráfico 3 permiten identificar con claridad las principales transiciones entre categorías de uso del suelo proyectadas para los años 2025, 2030, 2035 y 2045 en la cuenca del río Matina. Las tendencias revelan dinámicas significativas, especialmente en los usos vinculados a la actividad agrícola y la expansión de infraestructura. Además, muestra una tendencia neta positiva de recuperación de bosque hacia el 2045.

Entre los cambios más destacados se encuentra la transición de pasto a cultivo, la cual muestra un crecimiento sostenido desde 2025, alcanzando su punto máximo en 2035 (10 251 ha), seguido de una reducción en 2045. Esta tendencia sugiere una intensificación agrícola sobre áreas previamente dedicadas al pastoreo, probablemente impulsada por la expansión de monocultivos o cultivos comerciales. También resulta significativa la conversión de bosque a cultivo, que si bien desaparece en 2035, presenta un nuevo repunte importante en 2045 (8 305 ha), lo cual podría reflejar una creciente presión sobre zonas boscosas, particularmente en áreas no protegidas o con menor pendiente.

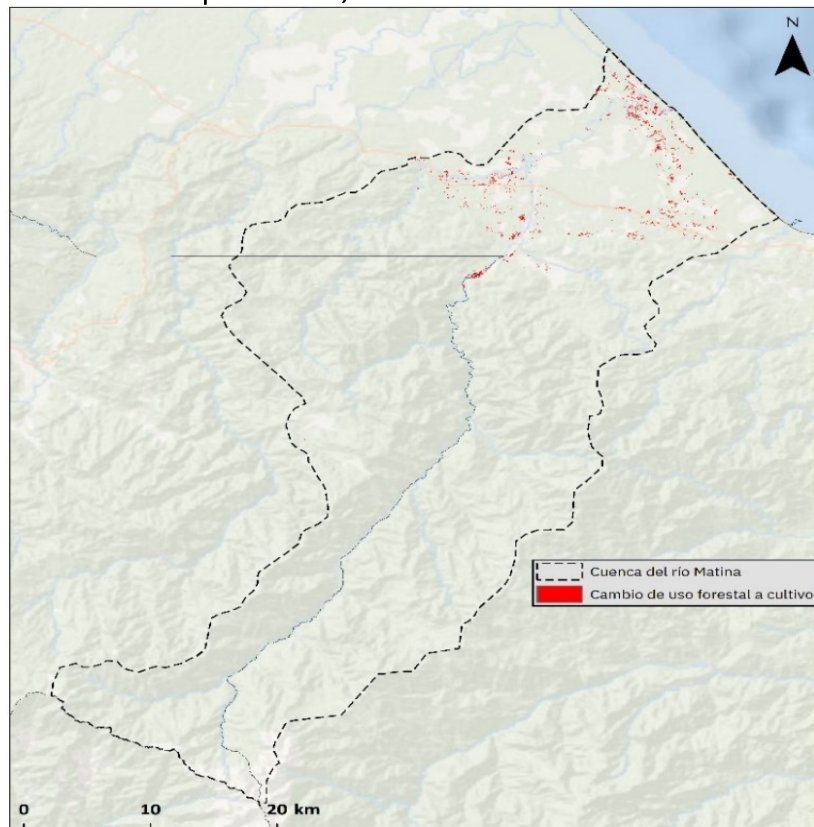
En contraste, se observa un incremento progresivo en la transición de cultivo a bosque, alcanzando su valor más alto en 2045 (6 001 ha), lo que podría indicar procesos de abandono de tierras agrícolas, regeneración natural o iniciativas de restauración ecológica. Asimismo, el cambio de pasto a bosque mantiene una tendencia relativamente estable a lo largo del período, sugiriendo una recuperación vegetal en zonas previamente degradadas por el uso ganadero.

Un patrón particularmente preocupante es el aumento en la conversión de pasto a infraestructura, que pasa de ser prácticamente inexistente en 2025 a 6 948 ha en 2035, y 4 960 ha en 2045. Este comportamiento sugiere una expansión urbana o de obras públicas en áreas tradicionalmente rurales, lo que plantea retos importantes en términos de ordenamiento territorial, conectividad ecológica y gestión del riesgo.

Adicionalmente, existen dos tipos de cambio que no se reflejan visualmente en el cuadro 4 ni en la gráfica, pero que revisten relevancia por su impacto irreversible: la conversión de bosque a infraestructura, con 0,711 ha entre 2030 y 2035, y la de cultivo a infraestructura, con 0,162 ha en el mismo período. Aunque sus magnitudes son menores, estos cambios pueden generar fragmentación del paisaje y afectaciones importantes en zonas ecológicamente sensibles.

En conjunto, los resultados reflejan una dinámica compleja, en la que coexisten procesos de expansión agrícola, pérdida y recuperación de cobertura boscosa, y un incipiente pero creciente proceso de urbanización. A continuación, se presenta la distribución espacial de los principales cambios en el uso del suelo entre 2021 y 2045, iniciando con la conversión de bosque a cultivo (mapa 3).

Mapa 3
Cambios de bosque a cultivo, 2021 – 2045



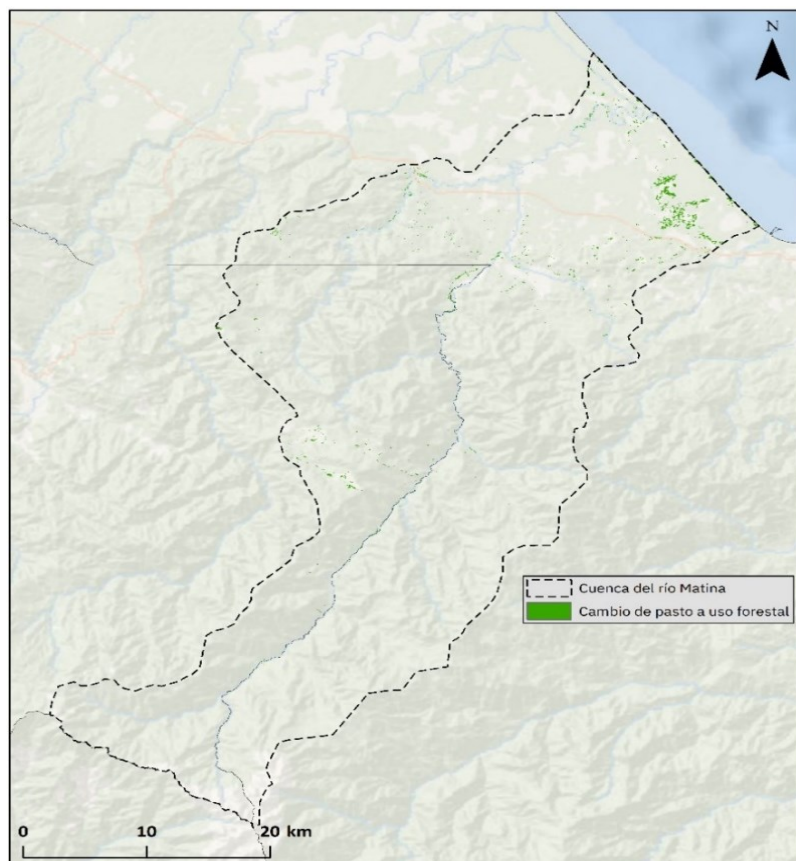
Fuente: Elaboración propia con datos de FONAFIFO et al., 2021.

En términos espaciales, se observa que la gran mayoría de los cambios se ubican en la porción norte y noreste de la cuenca, especialmente en áreas cercanas a la costa caribeña. Esta concentración sugiere que los procesos de deforestación para uso agrícola están ocurriendo predominantemente en zonas de baja altitud, cercanas a centros poblados, vías de comunicación y terrenos de topografía más accesible, lo cual facilita las actividades agroindustriales.

Asimismo, se identifican focos secundarios de cambio en el centro-norte de la cuenca, donde los parches de color rojo en el mapa 3 indican procesos de conversión más dispersos pero persistentes. En contraste, la zona sur de la cuenca —caracterizada por una topografía más montañosa, una mayor cobertura boscosa, y la presencia de áreas protegidas y territorios indígenas— muestra muy poca o ninguna actividad de transformación de bosque a cultivo. Este patrón refuerza la función de conservación ecológica que cumple dicha región.

En conjunto, esta distribución espacial revela un proceso de fragmentación creciente en la parte baja de la cuenca, con implicaciones negativas para la conectividad ecológica, la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos clave.

Mapa 4
Cambios de pasto a bosque, 2021 – 2045

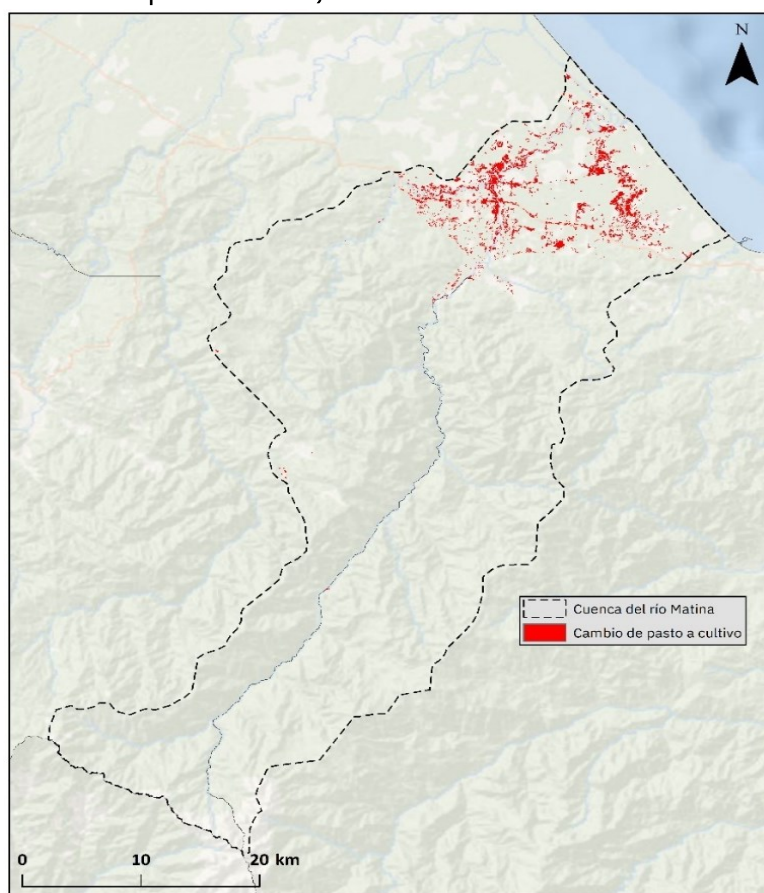


Fuente: Elaboración propia con datos de FONAFIFO et al., 2021.

En términos de distribución espacial, los cambios más notorios se localizan en la franja noreste de la cuenca, cerca de la costa y en las áreas bajas, donde se identifican agrupamientos significativos de parches verdes (mapa 4). Esto podría estar asociado a zonas anteriormente utilizadas para actividades ganaderas o agrícolas extensivas que han sido abandonadas o restauradas. Esta concentración costera también puede indicar una influencia positiva de corredores ecológicos costeros o de áreas protegidas cercanas que favorecen la regeneración forestal natural o inducida.

En conjunto, este análisis espacial revela una tendencia positiva hacia la recuperación forestal dentro de la cuenca del río Matina, aunque de forma desigual. Las zonas más impactadas por la conversión de pasto a bosque coinciden con áreas de baja altitud y mayor accesibilidad, mientras que otras regiones de la cuenca muestran una cobertura más estable o sin intervención visible. Esta información es fundamental para la planificación territorial, ya que permite identificar zonas prioritarias para continuar con esfuerzos de conservación, así como monitorear el impacto de políticas ambientales implementadas en la región.

Mapa 5
Cambios de pasto a cultivo, 2021 – 2045



Fuente: Elaboración propia con datos de FONAFIFO et al., 2021.

La concentración de cambios en esta zona sugiere una intensa presión agrícola sobre el paisaje, vinculada a la expansión de cultivos de alto valor comercial, como la piña y el banano. La densidad y continuidad de los parches rojos observados en el mapa 5 reflejan procesos de conversión intensiva, donde amplias superficies de pasto han sido sustituidas por cultivos

permanentes. Este patrón puede generar impactos significativos sobre el funcionamiento ecológico de la cuenca, particularmente en lo que respecta a la alteración de flujos hidrológicos, pérdida de cobertura vegetal y disminución de la resiliencia ecosistémica.

Estos procesos se concentran, en su mayoría, en zonas de baja altitud y pendiente suave, condiciones que facilitan la mecanización agrícola y la expansión de monocultivos a gran escala. En contraste, el sector central y sur de la cuenca muestra una presencia prácticamente nula de cambios de uso de pasto a cultivo, lo que sugiere un uso del suelo más estable, posiblemente asociado a restricciones topográficas, presencia de bosque, o menor aptitud agrícola.

Desde una perspectiva de planificación territorial y gestión ambiental, este patrón de cambio representa un riesgo importante para la sostenibilidad de la cuenca. La conversión masiva de pastizales a cultivos intensivos puede reducir la capacidad de infiltración del suelo, aumentar la escorrentía superficial, fragmentar hábitats y comprometer servicios ecosistémicos clave, como la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad.

Resultados del modelo SWAT

Comportamiento de variables climáticas

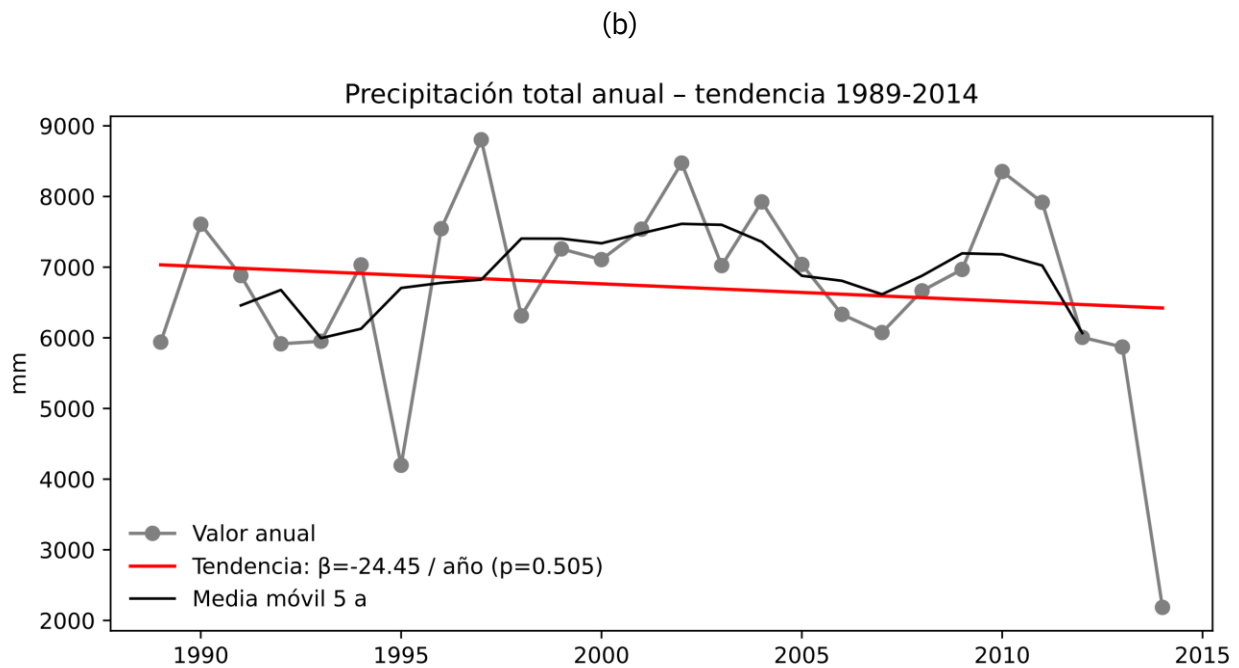
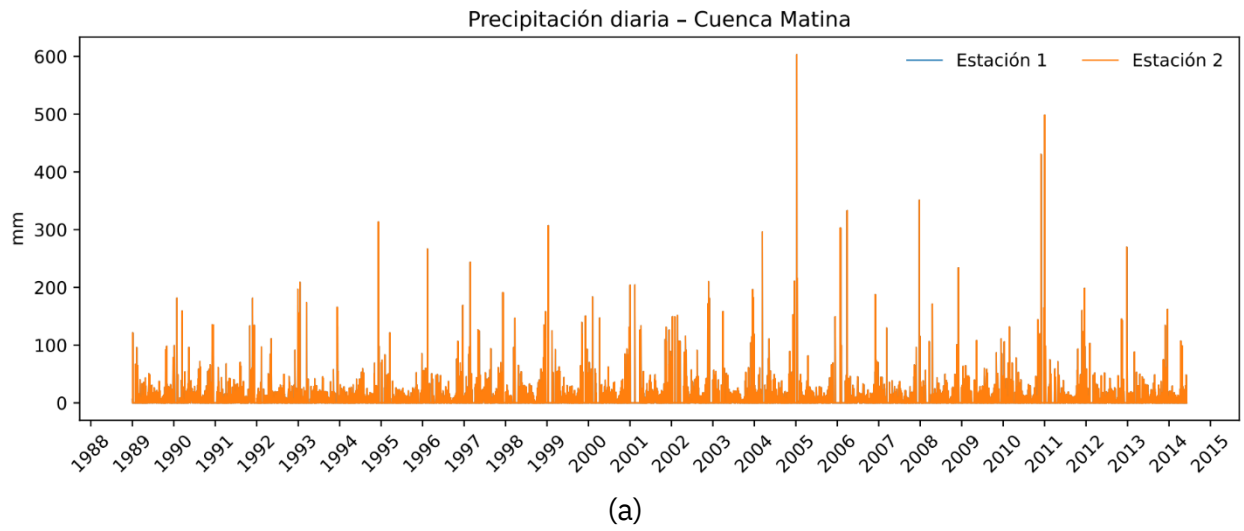
Esta sección presenta el análisis temporal de las principales variables climáticas que inciden en el balance hidrológico de la cuenca, específicamente la precipitación y la temperatura. Se examinan sus tendencias entre 1989 y 2014 con el fin de identificar posibles patrones de cambio climático que puedan influir en la disponibilidad hídrica y en la dinámica del escurrimiento superficial.

Precipitación

El gráfico 4 presenta en (a) la precipitación diaria y en (b) su tendencia anual entre 1989 y 2014. Se observa un aumento en la intensidad de eventos de lluvia a partir del año 2004, con más días con picos más altos. No obstante, como se muestra en (b), la tendencia general indica una disminución en la precipitación anual, con una pendiente de $-24,45$ mm por año. Esta tendencia no es estadísticamente significativa ($p = 0,505$), por lo que no se puede afirmar con

evidencia suficiente que exista una reducción sistemática de la precipitación en el periodo analizado.

Gráfico 4
Precipitación y su tendencia

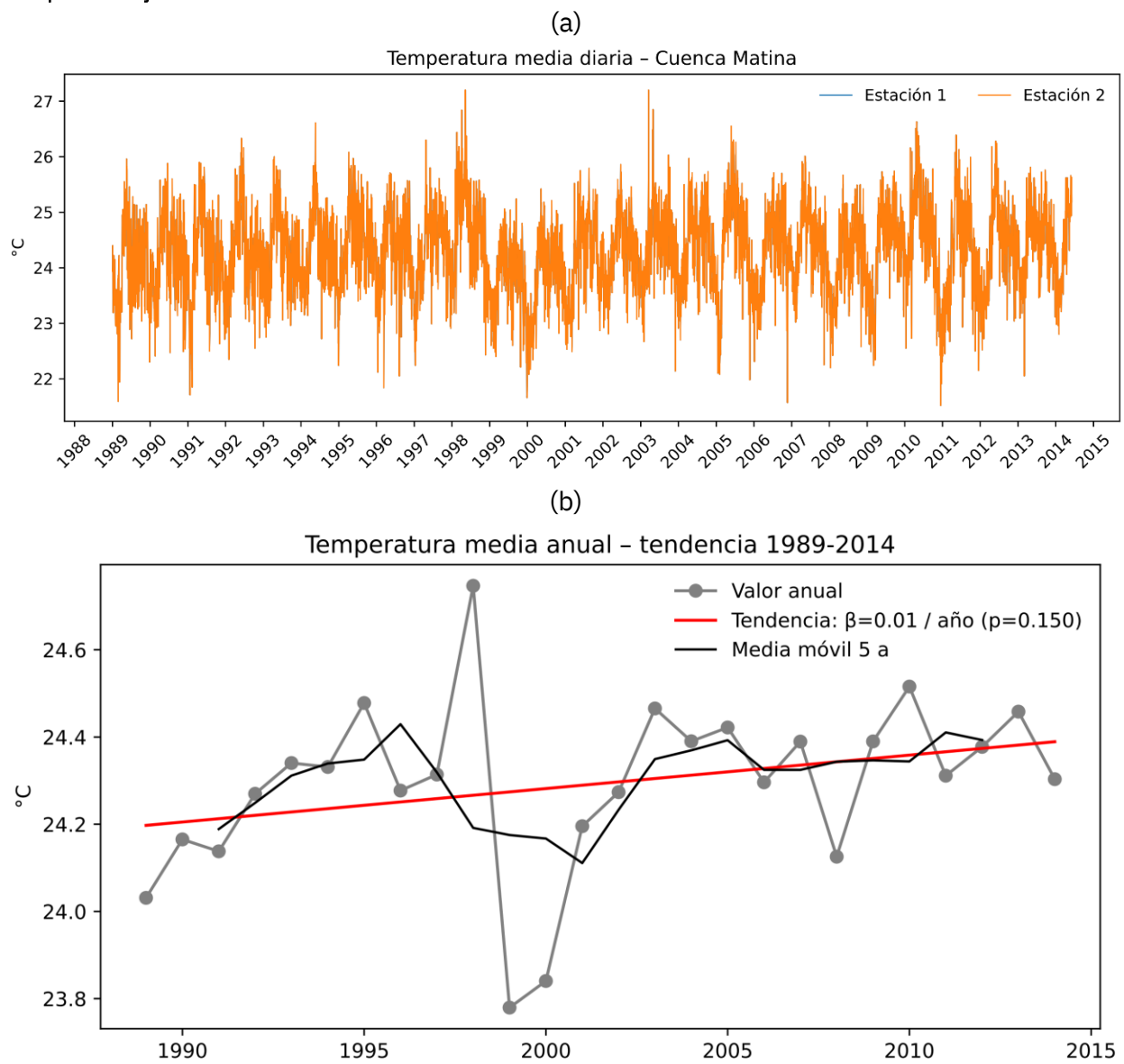


Fuente: Elaboración propia con datos de CHIRPS, 2025.

Temperatura

En el caso de la temperatura, el gráfico 5 (a) sugiere una ligera tendencia al aumento a lo largo del tiempo. Esta se confirma en (b), donde se observa una pendiente positiva de 0,01 °C por año. Sin embargo, la tendencia no es estadísticamente significativa ($p = 0,150$), por lo que no se puede afirmar con certeza un aumento sostenido de la temperatura durante el periodo analizado.

Gráfico 5
Temperatura y su tendencia



Fuente: Elaboración propia con datos de NASA POWER, 2025.

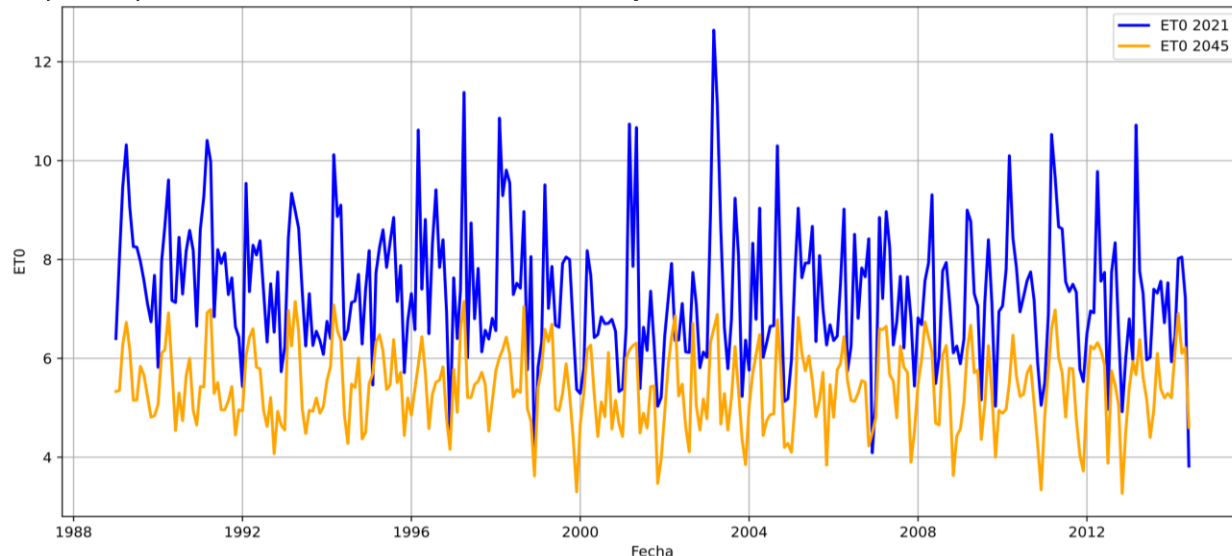
Tendencia del caudal

Con el objetivo de analizar la influencia del cambio de uso del suelo sobre el caudal, se mantuvieron constantes las demás variables del sistema: clima, tipo de suelo, elevación y radiación solar. Esta estrategia permite aislar el efecto específico del uso del suelo en la dinámica hidrológica.

Tal como se detalló previamente, las proyecciones muestran una pérdida inicial de bosque acompañada por un aumento en áreas de cultivo y pasto, seguida de una reversión parcial de esta tendencia hacia el año 2045. Estos cambios afectan de forma significativa procesos clave del ciclo hidrológico, como la escorrentía y la evapotranspiración. A continuación, se presenta una comparación entre los escenarios de uso del suelo correspondientes a los años 2021 y 2045, con énfasis en los efectos observados sobre la evapotranspiración y el caudal.

Una de las variables clave en el análisis hidrológico es la evapotranspiración real (ET_{real}), estimada a partir de la evapotranspiración potencial (ET_0) ajustada según el tipo de cobertura y suelo en cada HRU. Como se muestra en el gráfico 6, los valores de ET_{real} son mayores en el escenario proyectado para 2045 en comparación con el año 2021. Esta diferencia se explica en parte por la reconversión de áreas de pastos hacia coberturas forestales, las cuales presentan una mayor capacidad de evapotranspiración bajo condiciones similares de radiación y temperatura.

Gráfico 6
Evapotranspiración real mensual (ET_{real}) en mm 2021 y 2045

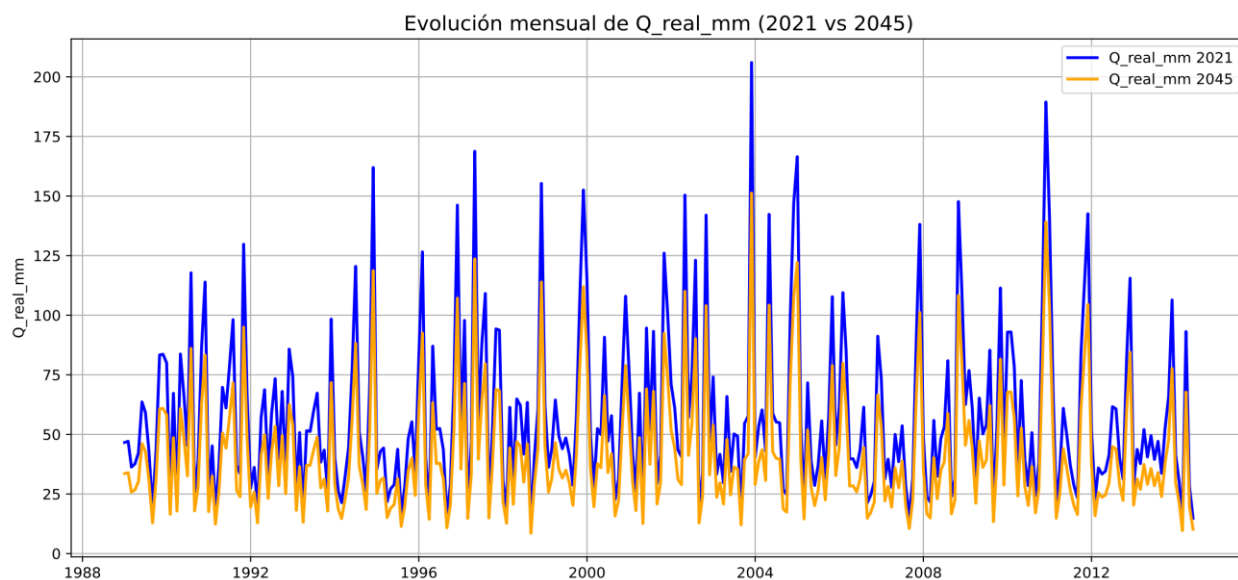


Fuente: Elaboración propia con datos de NASA POWER, 2025.

El gráfico 7 muestra la evolución del caudal superficial estimado (Q_{real} , en mm) para los escenarios de 2021 y 2045. Se observa una reducción del caudal en el escenario futuro, lo cual es coherente con la mayor proporción de bosque proyectada. Esta transición implica una mayor demanda evaporativa por parte de la vegetación, lo que incrementa la evapotranspiración real, disminuye la escorrentía superficial y, en consecuencia, reduce el caudal generado. Estos resultados evidencian el efecto regulador del bosque sobre el régimen hidrológico de la cuenca.

Gráfico 7

Caudal mensual (Q_{real}) en mm 2021 y 2045



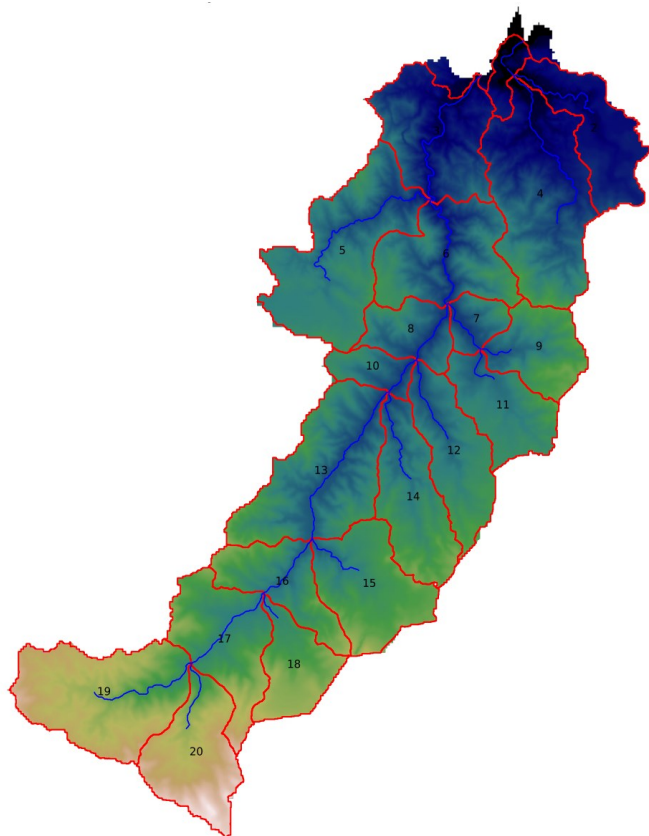
Fuente: Elaboración propia con datos de NASA POWER, 2025; CHIRPS, 2025.

Distribución espacial de los cambios en caudal

Con el fin de identificar espacialmente las zonas con mayor variación en el caudal asociada al cambio de uso del suelo, se delimitaron 69 HRUs y 20 subcuencas dentro del área de estudio. Esta segmentación territorial permite analizar con mayor detalle los impactos hidrológicos a escala local y facilita la toma de decisiones para una gestión más eficiente del recurso hídrico. Para facilitar la presentación de resultados usaremos la división de subcuenca, tal y como muestra el mapa 6.

Mapa 6

Subcuencas identificadas en la cuenca del río Matina



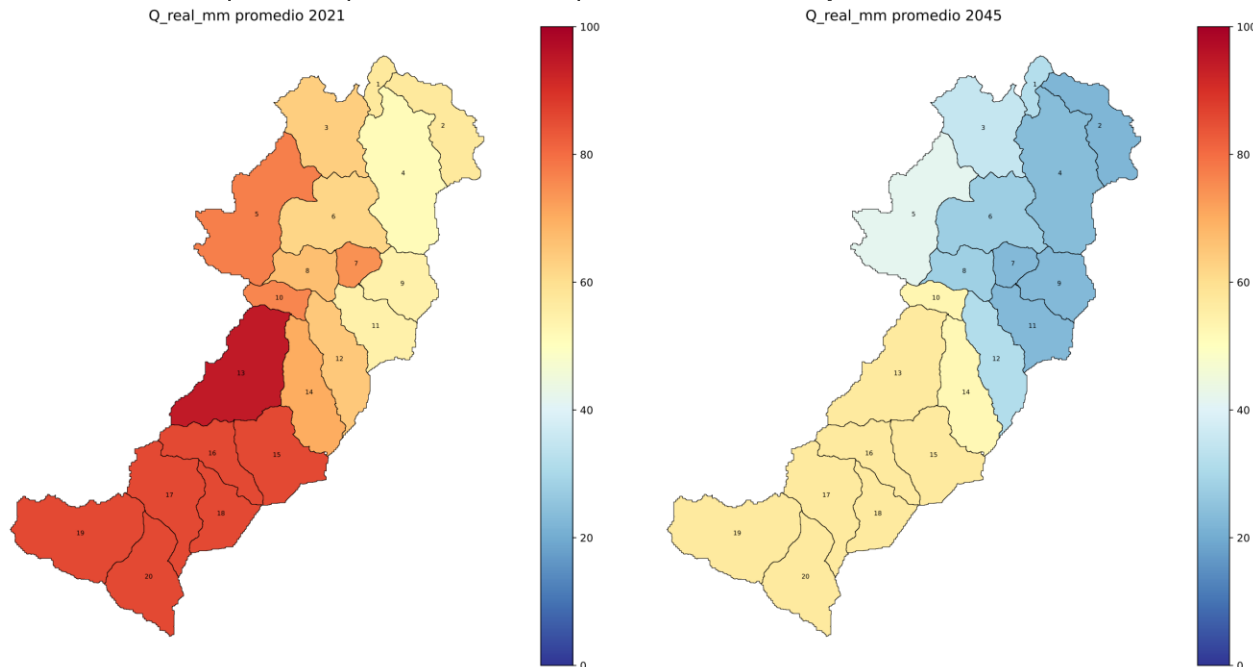
Fuente: Elaboración propia con datos de NASA POWER, 2025; CHIRPS, 2025; ICE, 2023; Rodríguez, 2023; SNIT, 2024.

Tal como se muestra en el mapa 7, las subcuencas 13 a 20 concentran las mayores cantidades de caudal generado, lo cual coincide con las zonas altas de la cuenca, donde típicamente se registran mayores niveles de precipitación. En contraste, las zonas bajas presentan una mayor proporción de áreas dedicadas a agricultura e infraestructura.

Al comparar los escenarios de 2021 y 2045, se observa una disminución generalizada del caudal en todas las subcuencas. El cambio más significativo se presenta en la subcuenca 13, ubicada en las proximidades del poblado Grano de Oro, donde se evidencian transformaciones relevantes en el uso del suelo.

Mapa 7

Q_{real} en mm mensual promedio por subcuenca comparando el año 2021 y el 2045



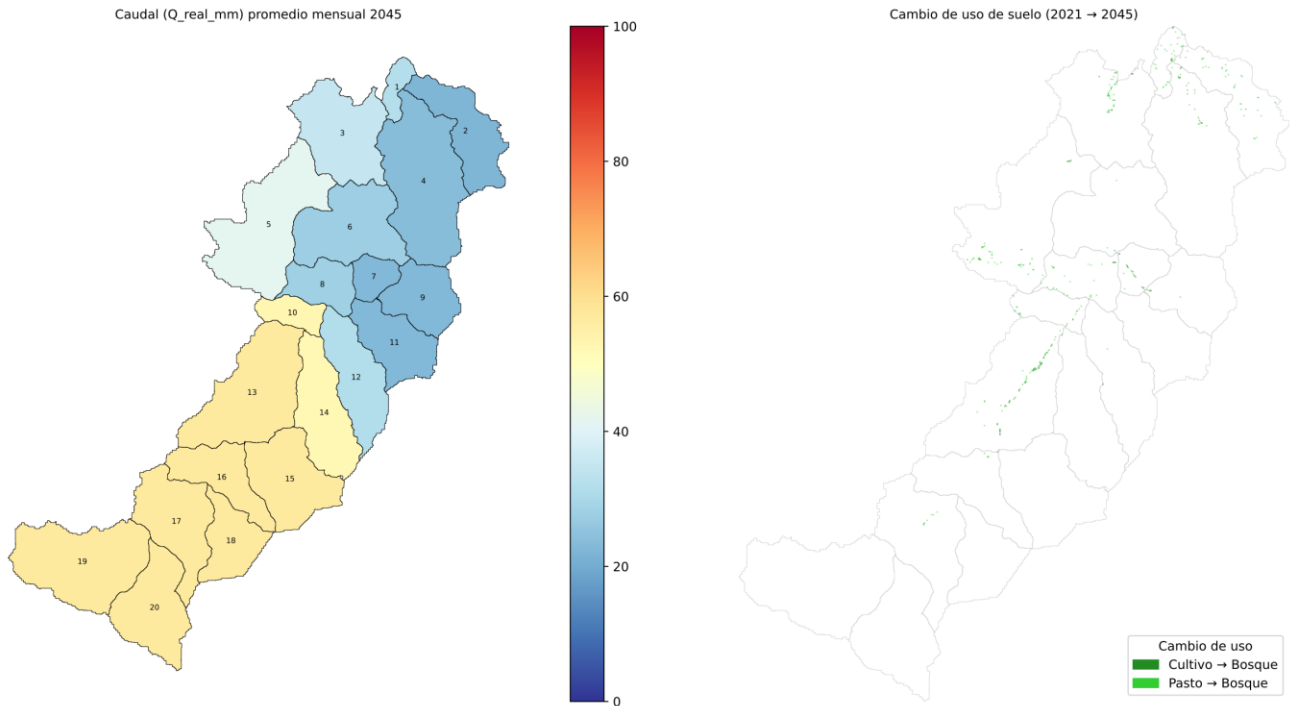
Fuente: Elaboración propia con datos de NASA POWER, 2025; CHIRPS, 2025; ICE, 2023; Rodríguez, 2023; SNIT, 2024; FONAFIFO et al., 2021.

Para validar el resultado anterior, y retomando parte de los hallazgos presentados en la sección de cambio de uso del suelo, el mapa 8 muestra que las subcuencas 13, 10 y 5 proyectan una reconversión significativa de áreas de pasto y cultivo hacia bosque entre 2021 y 2045. Esto implica una mayor retención hídrica y un aumento de la evapotranspiración en esas zonas, lo que contribuye a la reducción del caudal observado.

Adicionalmente, en las subcuencas bajas (1, 2 y 3), también se proyecta una recuperación parcial de bosque a partir de áreas anteriormente destinadas a pastos, lo que refuerza la tendencia general de disminución del caudal en toda la cuenca.

Mapa 8

Q_{real} en mm mensual promedio por subcuenca comparando el año 2021 y el 2045 y cambios de uso del suelo de pastos y cultivo a bosque



Fuente: Elaboración propia con datos de NASA POWER, 2025; CHIRPS, 2025; ICE, 2023; Rodríguez, 2023; SNIT, 2024; FONAFIFO et al., 2021.

En las subcuencas bajas (1 a 4), se observa una menor reducción del caudal entre 2021 y 2045, lo cual coincide con una mayor presencia de zonas de cultivo y áreas urbanas. En contraste, en las subcuencas altas, como la 5, 10, 13 y 20, la disminución del caudal es más significativa, lo que se asocia con una mayor cobertura forestal. Esta relación se evidencia en el cuadro 5.

Cuadro 5

Reducción de caudal en las principales subcuencas, en m³/ha

Subcuenca	Rebaja de caudal entre 2021-2045, m ³ /ha
1	539
2	549
3	597
4	490
5	730

Subcuenca	Rebaja de caudal entre 2021-2045, m ³ /ha
10	707
13	886
20	800

Fuente: Elaboración propia con datos de NASA POWER, 2025; CHIRPS, 2025; ICE, 2023; Rodríguez, 2023; SNIT, 2024; FONAFIFO et al., 2021.

Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos para la cuenca del río Matina entre 2021 y 2045 reflejan una dinámica compleja de uso del suelo, donde convergen procesos de intensificación agrícola, regeneración ecológica y expansión urbanística. Este patrón no solo confirma las tendencias ya observadas en estudios previos sobre la presión del cambio de uso del suelo en regiones tropicales (Lambin y Geist, 2006; Verburg et al., 2013), sino que evidencia una marcada heterogeneidad espacial que debe considerarse en los procesos de planificación y gestión territorial.

Uno de los hallazgos más relevantes es la significativa conversión de áreas de pasto a cultivo, que alcanza su punto máximo hacia 2035. Este proceso puede interpretarse como una intensificación agroindustrial en las zonas más accesibles y de baja altitud de la cuenca, probablemente asociada al cultivo de piña y banano, dos de los principales productos de exportación del país. Estudios como el de Aide et al. (2013), han advertido que dicha intensificación, cuando ocurre sin planificación adecuada, puede comprometer la calidad del

suelo, alterar los flujos hidrológicos y aumentar la vulnerabilidad a eventos extremos como inundaciones.

La transformación de bosque a cultivo, en partes bajas de la cuenca, observada con mayor fuerza hacia 2045, resulta preocupante por su carácter regresivo en términos de conservación. Si bien algunos de estos cambios podrían estar vinculados a tierras sin protección legal, su impacto acumulado puede afectar negativamente la conectividad ecológica y los servicios ecosistémicos que ofrece la cobertura boscosa, como la regulación hídrica, el control de la erosión y la provisión de hábitat (Bonell y Bruijnzeel, 2005; Chaplin-Kramer et al., 2015).

En contraste, la regeneración natural de bosque a partir de tierras previamente usadas para agricultura o pastoreo, especialmente hacia 2045, representa un signo alentador. Este proceso podría explicarse por el abandono de tierras marginales, la recuperación natural de ecosistemas o incluso la implementación de políticas de restauración activa (Chazdon, 2014). La transición constante de pasto a bosque en diversas partes de la cuenca refuerza esta interpretación, aunque su impacto positivo dependerá de la escala, continuidad y conectividad de dichos procesos de restauración.

La marcada concentración de cambios en la franja norte y noreste de la cuenca sugiere un desequilibrio territorial estructural. Mientras el sur de la cuenca (subcuencas de las 17 a la 20) —caracterizado por su topografía accidentada y presencia de áreas protegidas y territorios indígenas— permanece relativamente estable, las zonas más planas y accesibles enfrentan una creciente fragmentación del paisaje. Este patrón es consistente con hallazgos en otras regiones tropicales, donde la expansión agrícola y urbana se concentra en zonas de fácil acceso, amplificando los riesgos ambientales (Laurance et al., 2014).

Los resultados de este estudio reafirman que el cambio en el uso y cobertura del suelo es un factor clave en la modificación del ciclo hidrológico, particularmente en regiones tropicales con alta variabilidad ambiental y presión antrópica. Al simular escenarios contrastantes de uso del suelo para los años 2021 y 2045 en la cuenca del río Matina, y mantener constantes las condiciones climáticas, edáficas y topográficas, fue posible aislar y cuantificar el efecto hidrológico atribuible exclusivamente a las transformaciones territoriales.

Los hallazgos muestran que una recuperación de bosque proyectada hacia 2045 genera una reducción en el caudal superficial (Q_{real}) respecto al escenario 2021. Esta reducción está asociada a un aumento en la evapotranspiración real (ET_{real}), consecuencia de la mayor capacidad de las coberturas forestales para retener y transpirar agua, en comparación con pastos y cultivos. Este patrón ha sido documentado en múltiples estudios (Bruijnzeel, 2004; Ilstedt et al., 2016), donde se demuestra que los bosques tropicales actúan como reguladores del flujo hídrico, reduciendo el escurrimiento superficial y aumentando la infiltración.

La disminución del caudal en escenarios de reforestación también ha sido reportada por Zhang et al. (2001), quienes cuantificaron reducciones del orden del 20–40% en cuencas reforestadas, dependiendo del tipo de cobertura y condiciones climáticas. En el caso del presente estudio, la reducción del caudal en subcuencas como la 13 fue particularmente marcada, coincidiendo con zonas de reconversión intensa de pastos a bosques. Esta coherencia entre cambio de uso y respuesta hidrológica respalda la validez del enfoque metodológico adoptado.

Una limitación reconocida de este tipo de análisis es que no se incorpora la variabilidad climática futura. Sin embargo, como señalan Sun et al. (2013) y Ghaffari et al. (2010), mantener constantes las condiciones climáticas permite aislar con claridad los efectos atribuibles exclusivamente al cambio de uso del suelo. Este enfoque resulta particularmente útil en contextos de planificación territorial con presión antrópica creciente y disponibilidad limitada de proyecciones climáticas confiables.

Adicionalmente, la restauración, ya sea natural o asistida, tiende a disminuir la escorrentía superficial, mejorar la infiltración y estabilizar el caudal base. Esto ha sido documentado mediante modelaciones hidrológicas con SWAT en contextos tropicales, incluyendo un estudio que reportó una reducción del caudal de aproximadamente un 19 % tras reforestación en una cuenca modelada (Machado et al., 2017).

La distribución espacial de los efectos también ofrece elementos clave para la gestión. Subcuencas altas (13–20) presentan los mayores valores de caudal en ambos escenarios, lo que se relaciona con mayores niveles de precipitación y menor intervención antrópica, un

patrón similar al observado en estudios de regiones montañosas tropicales como los Andes (Buytaert et al., 2006) y el sudeste asiático. Además, estudios recientes señalan que la reforestación tropical puede aportar beneficios climáticos e hidrológicos más allá del secuestro de carbono, incluyendo mejoras en la regulación del flujo hídrico y la resiliencia ecosistémica (Locatelli et al., 2015).

En resumen, los resultados del modelo SWAT+ revelan una disminución general del caudal superficial entre los escenarios de 2021 y 2045, atribuible principalmente a más áreas de bosque en áreas altas de la cuenca. Sin embargo, este patrón hidrológico promedio oculta contrastes espaciales importantes: mientras en las zonas montañosas del sur y suroeste se observa una recuperación forestal significativa, que favorece procesos de infiltración y regulación hídrica, en las áreas bajas del norte y noreste predomina la conversión de pastos a cultivos comerciales, lo cual incrementa la escorrentía superficial y reduce la capacidad de retención hídrica del paisaje. Esta dualidad espacial sugiere que los efectos del cambio de uso del suelo sobre el caudal no son uniformes y deben interpretarse en función de la heterogeneidad topográfica, ecológica y productiva de la cuenca.

En síntesis, este estudio proporciona evidencia de que la recuperación forestal proyectada en la cuenca del río Matina podría tener efectos positivos sobre la regulación hídrica, reduciendo los caudales máximos y, potencialmente, el riesgo de inundaciones. Sin embargo, también implica una disminución en la disponibilidad de agua superficial en ciertos sectores, lo cual deberá ser considerado en futuras estrategias de asignación y manejo del recurso. Estos hallazgos respaldan la necesidad de políticas públicas que promuevan el ordenamiento territorial basado en criterios de sostenibilidad hídrica y resiliencia ecosistémica.

Finalmente, el análisis proyectado de la cuenca del río Matina evidencia tanto riesgos como oportunidades. Si bien persisten amenazas como la intensificación agrícola y la expansión urbana desregulada, también se presentan procesos de regeneración que podrían consolidarse mediante políticas de incentivo, restauración y gobernanza participativa. El uso de herramientas como SWAT+ y modelos de cambio de uso del suelo ofrece una base sólida para

sustentar decisiones territoriales que promuevan un desarrollo más equilibrado, resiliente y ecológicamente sostenible.

Agradecimientos:

EA y HH agradecen a los siguientes proyectos de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica: C4226 (Ecosalud), UCR C5067, C2103, C3991 (UCREA), A4906 (PESCTMA) y B0-810, además del apoyo parcial mediante una subvención otorgada por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC, por sus siglas en inglés), Ottawa, Canadá, y el Consejo Superior Universitario Centroamericano (CSUCA-SICA) al proyecto de la Red Centroamericana de Ciencias sobre Cambio Climático (RC4) (CR-66, C4468, SIA 0054-23; las opiniones expresadas en este documento no representan necesariamente las del IDRC, el CSUCA ni su Junta de Gobernadores).

Referencias bibliográficas

- Aide, T. M., Clark, M. L., Grau, H. R., López-Carr, D., Levy, M. A., Redo, D., ... & Muñiz, M. (2013). Deforestation and reforestation of Latin America and the Caribbean (2001–2010). *Biotropica*, 45(2), 262–271. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00908.x>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Zehnder, A. J. B. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508.
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., & Allen, P. M. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115–130. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>
- Blackland et al. (2024). *SWAT+ Editor (version 3.0)* [Computer software]. In *SWAT+ Installation & Help*. <https://swatpluseditor.readthedocs.io>
- Bonell, M., & Bruijnzeel, L. A. (Eds.). (2005). *Forests, water and people in the humid tropics: Past, present and future hydrological research for integrated land and water management*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535666>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5–32.
- Bruijnzeel, L. A. (2004). *Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?* *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185–228.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA-UCR). (2019). *Base de datos de calicatas de suelos de Costa Rica* [Conjunto de datos]. Universidad de Costa Rica.

- Chaplin-Kramer, R., Sharp, R. P., Mandle, L., Sim, S., Johnson, J. A., Butnar, I., ... & Daily, G. C. (2015). Spatial patterns of agricultural expansion determine impacts on biodiversity and carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24), 7402–7407. <https://doi.org/10.1073/pnas.1406485112>
- Chazdon, R. L. (2014). *Second growth: The promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation*. University of Chicago Press. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226118109.001.0001>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Climate Hazards Group. (2025). *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)* [Conjunto de datos]. University of California, Santa Barbara. <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- Córdoba, J. (2023). Informe final del mapa de cobertura y uso de la tierra 2021 de la serie histórica de Costa Rica Secretaria REDD+. Fideicomiso 544-FONAFIFO-BNCR-Proyecto REDD.
- Dilek, F. B., Arnold, J. G., Srinivasan, R., & Ghebremichael, L. T. (2017). *QSWAT: A QGIS interface for SWAT watershed delineation and HRU analysis* [Computer software]. Texas A&M AgriLife Research. Disponible en: <https://swat.tamu.edu/software/qswat/>
- FAO. (2003). *Manual on water harvesting*. Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., et al. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- FONAFIFO, SINAC & CONAGEBIO. (2021). *Coberturas y cambios de uso del suelo para Costa Rica (1989–2021)* [Imágenes geoespaciales]. Programa REDD+, Gobierno de Costa Rica. <https://www.reddcr.go.cr>
- Fontes Júnior, R., & Montenegro, A. (2019). *Impact of land use change on the water balance in a representative watershed in the semiarid of the State of Pernambuco using the SWAT model*. *Engenharia Agrícola*, 39(1), 110–117. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n1p110-117/2019>

- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J., & Verdin, A. (2015). *The Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS): A new environmental record for monitoring extremes*. **Scientific Data**, **2**, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Ghaffari, G., Keesstra, S., Ghodousi, J., & Ahmadi, H. (2010). SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Iran. *Hydrological Processes*, *24*(7), 892–903. <https://doi.org/10.1002/hyp.7530>
- Giri, C. (2016). *Remote sensing of land use and land cover: Principles and applications*. CRC Press.
- González, V.; Muñoz, R.; Vargas, C. y Durán, E. (2021). Descripción de cambios de uso del suelo en Costa Rica: 1986 – 2019. Ponencia presentada como investigación base para el Informe Estado de la Nación 2021.
- González, V.; Muñoz, R.; Vargas, C. y Köpper, D. (2023). Diseño del índice de exposición a la amenaza natural de inundaciones: el caso de exposición de edificaciones. Ponencia presentada como investigación base para el Informe Estado de la Nación 2023.
- González, V.; Muñoz, R.; Umaña, J. y Miller, C. (2024). Implicaciones de cambios de cobertura del suelo para el caso de infraestructura, pastos, cultivos y bosque en cantones multiproductores y zonas expuestas a inundaciones: 1986-2023. Ponencia presentada como investigación base para el Informe Estado de la Nación 2024.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, *1*(2), 96–99.
- Hurkmans, R. T. W. L., Terink, W., Uijlenhoet, R., Moors, E. J., Jacob, D., & Troch, P. A. (2009). Effects of land use changes on streamflow generation in the Rhine basin. *Water Resource Research*, *45*(6). <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007574>
- Ilstedt, U., Bargués Tobella, A., Bazié, H. R., Bayala, J., Verbeeten, E., Nyberg, G., Sanou, J., Benegas, L., Murdiyarsa, D., Laudon, H., Sheil, D., & Malmer, A. (2016). Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific Reports*, *6*, 21930. <https://doi.org/10.1038/srep21930>

- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2023). *Datos históricos de caudales mensuales en cuencas hidrográficas de Costa Rica* [Conjunto de datos]. ICE.
- ICE-CENIGA (2008). *Capa de cuencas hidrográficas de Costa Rica*. Instituto Costarricense de Electricidad con modificaciones del CENIGA-MINAE.
https://www.snitcr.go.cr/Metadatos/full_metadata2?k=Y2FwYTo6Q0VOSUdBOjpdWVuY2FzX2hpZHJvZ3JhZmljYXM=
- Lambin, E. F., & Geist, H. J. (Eds.). (2006). *Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts*. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7>
- Laurance, W. F., et al. (2014). A global strategy for road building. *Nature*, 513(7517), 229–232.
<https://doi.org/10.1038/nature13717>
- Lin, Y. P., Hong, N. M., Wu, P. J., Wu, C. F., & Verburg, P. H. (2007). Impacts of land use change scenarios on hydrology and land use patterns in the Wu–Tu watershed in northern Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 80(1–2), 111–126.
- Locatelli, B., et al. (2015). *Tropical reforestation and climate change: Beyond carbon*. *Restoration Ecology*, 23(4), 337–343. <https://doi.org/10.1111/rec.12209>
- Machado, R. E. M., Ribeiro, L. C. L. J., & Lopes, M. (2017). *Does forest replacement increase water supply in watersheds? Analysis through hydrological simulation*. arXiv.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.08969>
- Molina-Ramírez, J., & Sánchez-Murillo, R. (2012). Evaluación hidrológica de diferentes coberturas vegetales. *Revista Geológica de América Central*, (47), 87–106.
- NASA Earth Explorer. (2024). Tomado de <https://earthexplorer.usgs.gov/> el 13 de noviembre del 2024.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation version 2009*.
- QGIS Development Team. (2021). *QGIS Geographic Information System (version 3.16)* [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org>

- Rodríguez García, D. (2023). *Modelo de machine learning para estimar caudales mensuales históricos en más de 40 cuencas a nivel nacional*. Programa Estado de la Nación.
- Saló, J., & Llorente, O. (2023). *pySWATPlus: A Python Interface for SWAT+ Model Calibration and Analysis* (v0.1.0) [Software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14889320>
- Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). (2024). *Modelo de elevación digital (DEM) de Costa Rica* [Conjunto de datos]. Instituto Geográfico Nacional.
<https://www.snitcr.go.cr>
- Sun, G., Caldwell, P. V., McNulty, S. G., Georgakakos, A. P., Arumugam, S., Cruise, J., McNider, R. T., Terando, A., Conrads, P. A., Feldt, J., Misra, V., Romolo, L., Rasmussen, T. C., & Marion, D. A. (2013). Impacts of climate change and variability on water resources in the Southeast USA. En K. T. Ingram, K. Dow, L. Carter, & J. Anderson (Eds.), *Climate of the Southeast United States: Variability, Change, Impacts, and Vulnerability* (pp. 210–236). Island Press. <https://doi.org/10.5822/978-1-61091-509-0>
- SWAT Development Team. (2025). *SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus), version 61.0.2.11* [Computer software].
- USDA Natural Resources Conservation Service. (1986). *Urban hydrology for small watersheds* (Technical Release 55, TR-55). U.S. Department of Agriculture.
- Verburg, P. H., Neumann, K., & Nol, L. (2011). Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Global Change Biology*, 17(2), 974–989.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x>
- Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2001). *Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale*. *Water Resources Research*, 37(3), 701–708.
<https://doi.org/10.1029/2000WR900325>

Anexo

Anexo 1

Completa de coeficientes de escorrentía

Uso del suelo	Tipo de suelo	$C_{us,soil}$
FRST (Bosque)	Andisol	0,05
FRST (Bosque)	Histosol	0,10
FRST (Bosque)	Inceptisol	0,08
PAST (Pasto)	Andisol	0,20
PAST (Pasto)	Entisol	0,25
PAST (Pasto)	Ultisol	0,30
AGRL (Agrícola)	Andisol	0,35
AGRL (Agrícola)	Inceptisol	0,40
AGRL (Agrícola)	Entisol	0,45
AGRL (Agrícola)	Ultisol	0,50
URBN (Urbano)	Entisol	0,70
URBN (Urbano)	Inceptisol	0,60
WATR (Agua)	Entisol	0,95

Nota: Los coeficientes fueron seleccionados para representar condiciones medias de escorrentía bajo clima tropical húmedo, en pendientes moderadas, y sin prácticas de conservación adicionales. El valor por defecto (para combinaciones no especificadas) fue 0,20.