

## Análisis de variables biofísicas y cambios en el uso de la tierra en la cuenca del río Urasca (1997-2020), Cartago, Costa Rica

*Analysis of biophysical variables and changes in land use in the Urasca River basin (1997-2020), Cartago, Costa Rica*

María Álvarez Jiménez , José Castro Solís 

Escuela de Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Universidad Nacional, Costa Rica

\*Autor al que se dirige la correspondencia: [maria.alvarez.jimenez@una.cr](mailto:maria.alvarez.jimenez@una.cr)

Recibido: 14 de mayo 2024 / Revisión: 13 de septiembre 2024 / Aceptado: 01 de junio 2025

### Resumen

El crecimiento demográfico acelerado, la expansión agrícola y el desarrollo turístico han incrementado la presión sobre los recursos naturales de la región, generando impactos directos en los manantiales y aumentando la importancia hídrica y ambiental del área de estudio. El objetivo de esta investigación fue analizar el estado de las variables biofísicas y los cambios en el uso del suelo en la cuenca del Urasca durante el período 1997-2020, mediante la aplicación de sistemas de información geográfica y el análisis de datos primarios y secundarios. La cuenca abarca una superficie de 5,4 km<sup>2</sup> y comprende ocho poblados, siendo Urasca el más representativo. El análisis de la distribución del uso del suelo reveló que más del 50% del área está cubierta por bosque, el 40% corresponde a actividades agrícolas, mientras que el porcentaje restante se distribuye entre cursos de agua, uso urbano y terrenos abiertos. Durante el período de estudio, la cobertura forestal experimentó un incremento del 1,8%, atribuido principalmente al establecimiento de áreas protegidas y plantaciones forestales en sectores específicos de la cuenca. Paralelamente, la superficie destinada a cultivos aumentó un 43%, mientras que las áreas de pastizales disminuyeron en un 37%. Los resultados proporcionaron una comprensión integral del estado actual de los recursos naturales y permitieron identificar características específicas del área que influyen en procesos hidrológicos clave como la infiltración del suelo y la recarga hídrica. Los hallazgos evidencian condiciones favorables para la implementación de sistemas sostenibles de manejo del territorio, lo que contribuiría significativamente a la prevención de la degradación ambiental en la cuenca.

Palabras clave: Análisis, variables biofísicas, cambio de uso, cuenca Urasca

### Abstract

Accelerated population growth, agricultural expansion and tourism development have increased pressure on the region's natural resources, generating direct impacts on the springs and increasing the water and environmental importance of the study area. The objective of this research was to analyze the status of biophysical variables and changes in land use in the Urasca watershed during the period 1997-2020, through the application of geographic information systems and the analysis of primary and secondary data. The basin covers an area of 5.4 km<sup>2</sup> and includes eight settlements, Urasca being the most representative. The analysis of land use distribution revealed that more than 50% of the area is covered by forest, 40% corresponds to agricultural activities, while the remaining percentage is distributed between watercourses, urban use and open land. During the study period, forest cover increased by 1.8%, mainly due to the establishment of protected areas and forest plantations in specific sectors of the basin. At the same time, the area under crops increased by 43%, while pasture areas decreased by 37%. The results provided a comprehensive understanding of the current state of natural resources and identified specific characteristics of the area that influence key hydrological processes such as soil infiltration and water recharge. The findings show favorable conditions for the implementation of sustainable land management systems, which would contribute significantly to the prevention of environmental degradation in the watershed.

Keywords: Analysis, biophysical variables, change of use, Urasca basin



## Introducción

El agua dulce constituye un recurso fundamental para la existencia humana, entrelazando las dimensiones social, económica y ambiental (Saucedo-Ramírez et al., 2022). Su accesibilidad y disponibilidad no solo tienen la capacidad de catalizar el progreso socioeconómico a nivel regional, sino también de restringirlo (United Nations, 2020).

La disponibilidad de agua en las cuencas puede disminuir debido al impacto del cambio climático y las transferencias de agua entre cuencas, necesarias para el crecimiento urbano (Abdulbaki et al., 2017; Törnqvist et al., 2014; Ye et al., 2018). En este contexto, los sistemas socioecológicos complejos de las cuencas hidrográficas incluyen procesos biofísicos, sociales y tecnológicos que interactúan con los servicios y funciones del ecosistema, factores estresantes y aspectos socioeconómicos (Berkes et al., 2003; Ostrom, 2009).

El análisis biofísico de una cuenca establece conexiones entre los campos físico, biótico, socioeconómico, cultural y administrativo, describiendo su estado actual y sus distintas componentes (Rodríguez Orduz, 2018). Esta caracterización facilita la planificación y el manejo adecuado de los recursos, ya que permite comprender las condiciones ecosistémicas predominantes, el modelo ocupacional del territorio y las consecuencias que esto conlleva para la cuenca. Una caracterización detallada que evalúe problemas y potencialidades para el uso de la tierra es necesaria para la aceptación general de la cuenca hidrográfica como unidad de planificación de actividades de desarrollo de recursos naturales (Walia et al., 2010).

El desarrollo agrícola y turístico de la cuenca del río Urasca, ubicada en la provincia de Cartago (-83.8027, 9.8478; -83.7605, 9.832), representa un caso de estudio relevante debido a la presión sobre los recursos, el aumento de la población y las afectaciones en manantiales cercanos que son abastecidos por el túnel para la ampliación de la planta hidroeléctrica de Cachí. Para determinar sus patrones de uso, resulta esencial comprender cómo ha cambiado el estado de los elementos biofísicos y el uso de la tierra entre 1997 y 2020 (Álvarez Jiménez et al., 2021).

Las decisiones relacionadas con el uso de la tierra pueden tener implicaciones significativas para el recurso hídrico, las personas, la economía y el medio ambiente, evidenciando las limitaciones de la cuenca hidrográfica World Water Assessment Programme (WWAP, 2018).

Los cambios en el uso de la tierra tienen un efecto directo sobre la calidad del agua, su disponibilidad y la producción agrícola dentro de las cuencas (Birhanu et al., 2022). Por tanto, la toma de decisiones en las acciones de cuenca, donde convergen el medio físico, las demandas y las acciones humanas, requiere conocimiento de las variables físicas involucradas y las relaciones causa-efecto que las conectan, con el fin de determinar la capacidad de producción y regeneración (Galván & Márquez, 2017).

En este contexto, la caracterización biofísica ayuda a comprender la cuenca y orienta la creación de medidas de mitigación para mejorar la administración participativa (Cobena Navarrete et al., 2022).

## Materiales y métodos

Para entender el estado actual y los problemas que enfrentan la cuenca, se recopilaron y examinaron variables biofísicas y los cambios en el uso de la tierra mediante un enfoque exploratorio de tipo mixto. Tanto una revisión detallada de la bibliografía como la recolección de datos en el campo respaldan la información obtenida.

### Ubicación geográfica

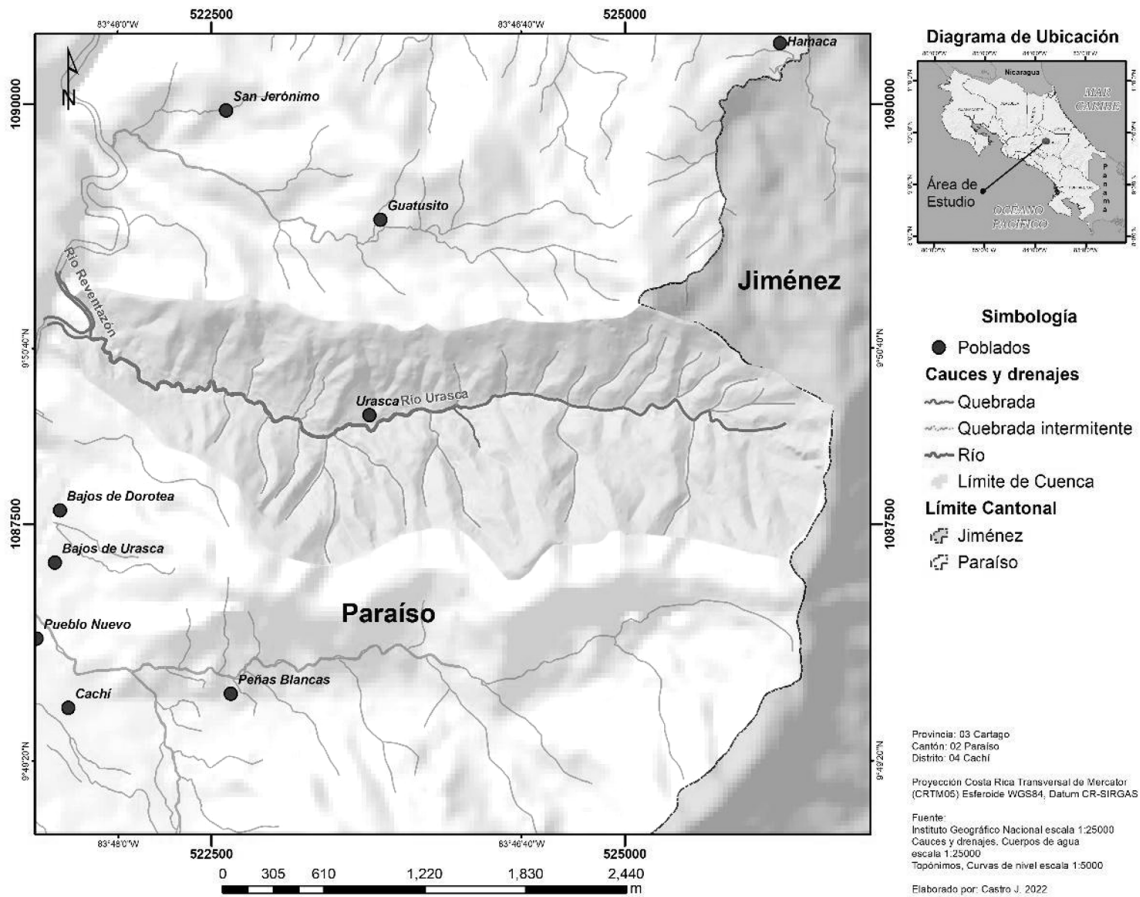
La zona de estudio se encuentra en la cuenca del río Urasca, situada en el distrito 4° Cachí del cantón de Paraíso en Cartago, Costa Rica (Figura 1) (Álvarez Jiménez et al., 2021). Limita al este por el Cerro Doán y al oeste el río Reventazón, se trata de una cuenca de tipo endorreica.

Con una extensión aproximada de 5.4 km<sup>2</sup>, y alberga poblaciones claves como Urasca, Cachí, Loaiza, San Miguel, San Jerónimo, Peñas Blancas y Volio. En las cercanías de esta región se encuentra la planta hidroeléctrica de Cachí, dedicada a la generación hidroeléctrica, y se destacan actividades principales como el cultivo de café y el turismo Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, 2009).

Para determinar las variables biofísicas y los cambios en el uso de la tierra entre 1997 y 2020, se recopiló información primaria en el campo para verificar el estado de los recursos, así como información secundaria. Esta información fue obtenida a lo largo del período de tres años de duración del proyecto de investigación

**Figura 1**

*Ubicación geográfica de la cuenca del río Urasca*



### Recolección de datos

La caracterización biofísica de la cuenca se basó en la metodología propuesta por Watler (2013), complementada con información primaria obtenida mediante trabajo de campo y datos secundarios de fuentes oficiales. Este enfoque integrado permitió establecer una línea base comprensiva para el análisis de las variables biofísicas y los cambios en el uso de la tierra.

Se realizaron visitas de campo sistemáticas para:

1. Validación de información cartográfica existente
2. Levantamiento de puntos de control GPS

3. Documentación fotográfica de usos de suelo representativos
4. Verificación de límites de unidades fisiográficas y geológicas

Se recopiló información de las siguientes fuentes:

- a. Instituto Meteorológico Nacional (IMN)
- b. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA)
- c. Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- d. Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC)
- e. Bases de datos cartográficas del Atlas Digital de Costa Rica

VARIABLES biofísicas analizadas, se determinaron diez variables biofísicas esenciales, organizadas en tres categorías principales:

### ***Variables climáticas e hidrológicas***

1. Características climáticas: Precipitación, temperatura, humedad relativa y evapotranspiración potencial
2. Hidrografía: Delimitación de cuencas, red de drenaje, densidad de drenaje y recursos hídricos subterráneos

### ***Variables geomorfológicas y edáficas***

1. Relieve: Accidentes geográficos y paisajes predominantes
2. Topografía y pendiente: Clasificación según gradiente topográfico
3. Geología y geomorfología: Unidades geológicas e información hidrogeológica
4. Tipo de suelo: Órdenes de suelo y características edáficas

### ***Variables ecológicas y de uso***

1. Uso de la tierra: Categorías de cobertura y uso actual
2. Amenazas naturales: Identificación de riesgos naturales y antrópicos
3. Zonas de vida: Clasificación según Holdridge
4. Biodiversidad: Riqueza específica y áreas protegidas

## **Procesamiento y análisis de datos**

### ***Datos climáticos***

Para las variables climáticas se calcularon:

1. Promedios mensuales y anuales para precipitación, temperatura y humedad relativa

### ***Clasificación de pendientes***

Se aplicó la siguiente clasificación topográfica:

1. Plano o casi plano: 0-3%
2. Ligeramente ondulado: 3-8%

3. Moderadamente ondulado: 8-15%
4. Ondulado: 15-30%
5. Fuertemente ondulado: 30-60%
6. Escarpado: 60-75%
7. Fuertemente escarpado: >75%

### ***Categorización altitudinal***

Las elevaciones se clasificaron en dos esquemas según la altitud máxima de la cuenca:

- (a) Cuencas <500 msnm: Intervalos de 50 m (0-50, 50-100, 100-150, etc.)
- (b) Cuencas >500 msnm: Intervalos de 100 m (0-100, 100-200, 200-300, etc.)

### ***Análisis temporal de cambios en el uso de la tierra***

Para evaluar los cambios en el uso de la tierra se implementó un análisis multitemporal mediante:

- (a) Interpretación de imágenes satelitales de diferentes períodos
- (b) Análisis de matrices de cambio para cuantificar transiciones
- (c) Cálculo de tasas de cambio anual para cada categoría de uso

### ***Generación de productos cartográficos***

Se elaboraron mapas temáticos para cada variable biofísica utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), incluyendo:

1. Mapa de precipitación
2. Mapa de cuencas, subcuencas y red de drenaje
3. Mapa fisiográfico
4. Mapa de pendientes
5. Mapa de unidades geológicas y formaciones
6. Mapa de órdenes de suelo
7. Mapa de uso de la tierra
8. Mapa de riesgo y vulnerabilidad
9. Mapa de zonas de vida

Los datos fueron sometidos a análisis estadístico descriptivo para determinar:

- (a) Distribución espacial de cada variable
- (b) Correlaciones entre variables biofísicas

- (c) Análisis de varianza para identificar diferencias significativas
- (d) Validación cruzada de resultados mediante verificación de campo

Esta metodología integrada permitió obtener una caracterización comprehensiva de la cuenca, proporcionando la base científica necesaria para análisis posteriores de sostenibilidad y gestión territorial.

### Procesamiento y análisis de información

Para el análisis geomorfométrico del terreno, se utilizó la combinación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y trabajo de campo. Se creó el Modelo Digital de Elevación (MDE) utilizando de base curvas de nivel a escala 1:5000 (Acuña Agüero, 2008), mientras que la red hídrica se delimitó a partir de la capa de cauce y drenaje a escala 1:25 000 (Acuña Agüero, 2014), utilizando la proyección geográfica oficial del país (Costa Rica Transversal de Mercator - CRTM05) con el datum CR-SIRGAS, ambas proporcionadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a través del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). La herramienta Topo to Raster (Hutchinson, 1988, 1989, 1996, 2000, 2011 y Hutchinson and Dowling, 1991) se empleó para la elaboración del MDE, utilizando bases de datos en formato shape (shp) y software especializado. Posteriormente, se modelaron los valores característicos del terreno a partir del MDT.

Para evaluar el cambio en el uso de la tierra durante el periodo 1997-2020, se digitalizaron áreas utilizando la fotointerpretación de la fotografía aérea del proyecto Terra del año 1997 a escala 1:40 000 con el objetivo de analizar elementos en la cuenca a partir de imágenes aéreas para identificar los tipos de usos o coberturas del suelo de la microcuenca y sus cambios. En 2020, se empleó una imagen satelital de Digital Globe para la digitalización de vectores poligonales, asignando a cada polígono una categoría específica. Se revisó la geometría y topología de todos los polígonos, y se incorporaron bases de datos existentes, como zonas de vida (Centro Científico Tropical, 1992), amenazas y riesgos (Comisión Nacional de Emergencias 2019), y unidades geológicas adaptadas de Sojo y colaboradores (2017) e (Instituto Geográfico Nacional- United States Geological Survey IGN-USGS, 1957).

## Resultados

### 1. Caracterización biofísica de la cuenca del río Urasca

#### *Condiciones climáticas e hidrológicas*

La cuenca del río Urasca presenta un régimen climático tropical con influencia caribeña, caracterizado por una precipitación anual que oscila entre 1,500 y 3,000 mm. El patrón de precipitación muestra una distribución bimodal con dos periodos húmedos (mayo-julio y agosto-noviembre) y dos periodos secos (diciembre-abril y julio). La temperatura media anual se mantiene entre 22-24°C, con una evapotranspiración de 1,100-1,200 mm anuales (Rojas et al., 2011).

La cuenca forma parte del sistema hidrográfico del río Reventazón, perteneciente a la subvertiente Caribe. El sistema de drenaje está constituido por el río principal y sus afluentes Pucáres, Páez, Loaiza, Oro, Zapote, Naranjo, Urasca, Guatuso, Birris, y las quebradas Hamaca y Honda (Instituto de Desarrollo Rural, 2016). El área presenta abundantes manantiales que abastecen tanto las necesidades domésticas como las actividades productivas locales, gestionados a través del acueducto municipal de Paraíso que atiende a 606 habitantes (Acueductos y Alcantarillado, 2020).

#### *Geomorfología y relieve*

El relieve de la cuenca se caracteriza por pendientes predominantemente onduladas a escarpadas, con inclinaciones entre 30% y 75%. Las elevaciones varían desde 910 msnm en las zonas cercanas a la desembocadura hasta más de 1,600 msnm en los cerros Doán y Urasca. Las áreas con pendientes menores (0-15%) representan una proporción mínima del territorio.

La configuración topográfica presenta relieves erosionados con taludes bien estructurados, especialmente en el sector de Urasca, donde las pendientes escarpadas (> 60%) generan condiciones de alta susceptibilidad a procesos erosivos en las zonas cultivadas con café (ICE, 2009).

## Geología y suelos

La cuenca presenta dos unidades geológicas principales: la Formación Aguacate y la Formación Doán. La Formación Aguacate está constituida por brechas volcánicas, tobas soldadas y lavas andesíticas a andesítico-basálticas, con intrusiones de diques basálticos (Castillo, 1969). Esta formación subyace discordantemente a las formaciones Terraba, Turrúcares y Coris.

La Formación Doán, con un espesor de 300-400 metros, sobreyace al Grupo Aguacate y se considera del período Plioceno (Berrangé, 1977; Escalante, 1966). Esta formación abarca las elevaciones prominentes entre 1,000-1,500 m en las montañas de Peñas Blancas, Urasca, Cerro Copal, Cerro Cruces, Cerro Congo, Cerro Lajas, Cerro Doán y Alto Velo de Novia.

Los suelos dominantes corresponden a ultisoles e inceptisoles, ambos con aptitud agrícola. Los inceptisoles, relativamente jóvenes y en desarrollo, predominan en ecosistemas forestales y zonas montañosas con pendientes abruptas. Los ultisoles, más antiguos y meteorizados, son característicos de las áreas cafetaleras, presentando coloración rojiza, textura arcillosa y acidez moderada, con alta susceptibilidad a la erosión bajo cultivos limpios (Castellanos González et al., 2021; Henríquez-Henríquez y Cabalceta Aguilar, 1999).

## Riesgos naturales y vulnerabilidad

La cuenca presenta alta vulnerabilidad a fenómenos de remoción en masa debido a la combinación de relieve escarpado (Figura 2), régimen pluviométrico intenso y características geológicas. Los aumentos de caudal generan inundaciones y deslizamientos, con arrastre de sedimentos de gran tamaño que afectan los asentamientos ribereños (CNE, 2009).

El área forma parte de la depresión Ujarrás, delimitada por las fallas Cachí, Urasca, Paraíso y Maravilla. Las fallas Cachí y Urasca se consideran inactivas, mientras que las fallas Paraíso y Maravilla presentan activación sin sismicidad asociada (Montero et al., 2016).

## Zonas de vida y biodiversidad

El sector presenta cuatro zonas de vida según la clasificación de Holdridge: bosque húmedo premontano (Bh-P), bosque muy húmedo premontano (Bmh-P), bosque muy húmedo montano bajo (Bmh-MB) y bosque pluvial montano bajo (Bp-MB). La zona de vida predominante es el bosque húmedo premontano en el sector norte, donde se concentran las poblaciones.

La diversidad florística incluye especies como cedro amargo (*Cedrela odorata*), aguacatillo, sauce, cristóbal, nispero, zapote, robles, cedrillo, caobilla,

### Figura 2

Problemas de deslizamiento, cuenca del río Urasca, Cartago



gavilán y jaúl. La fauna comprende diversas especies de colibríes, anuros, mamíferos menores (ardilla, armadillo, tepezcuittle) y especies emblemáticas como el quetzal (*Pharomachrus mocinno*) (INDER, 2016).

El área forma parte del Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca (CBVCT), que mantiene la conectividad biológica y mejora la calidad de los servicios ecosistémicos (Luiza Amante, 2020). Durante 2021 se registraron tres contratos de Pago por Servicios Ambientales (PSA) cubriendo 0.926 km<sup>2</sup> en modalidades de Protección de Bosques y Regeneración Natural (J. Hernández, comunicación personal, 15 diciembre de 2021). que también contribuyen al aseguramiento del agua y protección de la biodiversidad de la cuenca. Para Siles Calvo y Freitas de Soares (2003) en la cuenca interactúan sistemas biofísicos los cuales reflejan estilos de manejos en cuanto al agua, flora, fauna y el suelo. Por ello, la caracterización es

importante porque se conoce el estado de los recursos para evidenciar que tan propensa a degradación pueda estar la cuenca del río Urasca.

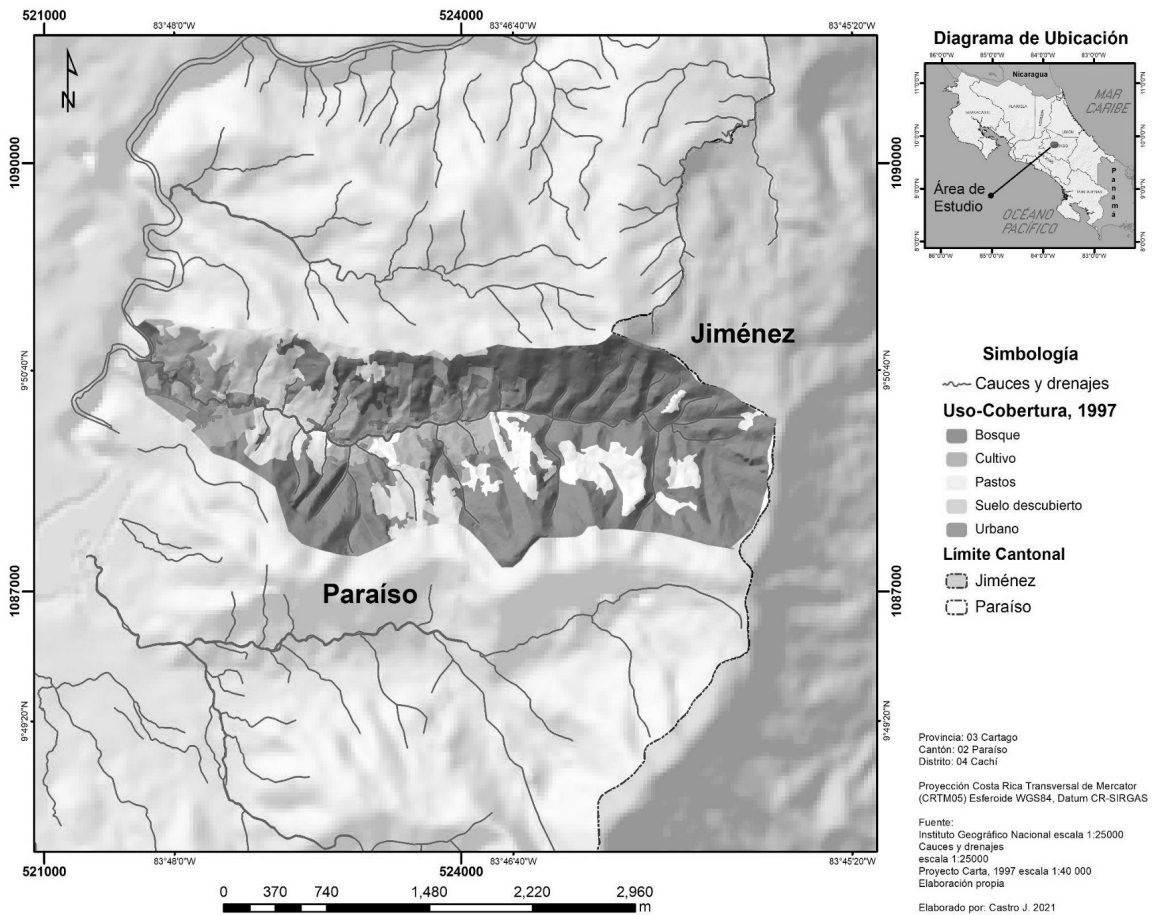
## 2. Análisis del cambio de uso del suelo (1997-2020)

### Distribución actual del uso del suelo

El análisis de la distribución del uso del suelo en la cuenca del río Urasca revela un patrón altamente heterogéneo (Figuras 3 y 4). La cobertura forestal domina el paisaje con más del 60% del área total, concentrándose principalmente en las zonas altas y medias de la cuenca. Las actividades agropecuarias ocupan aproximadamente el 40% del territorio, distribuidas preferentemente en las áreas bajas y de menor pendiente. (Tabla 1).

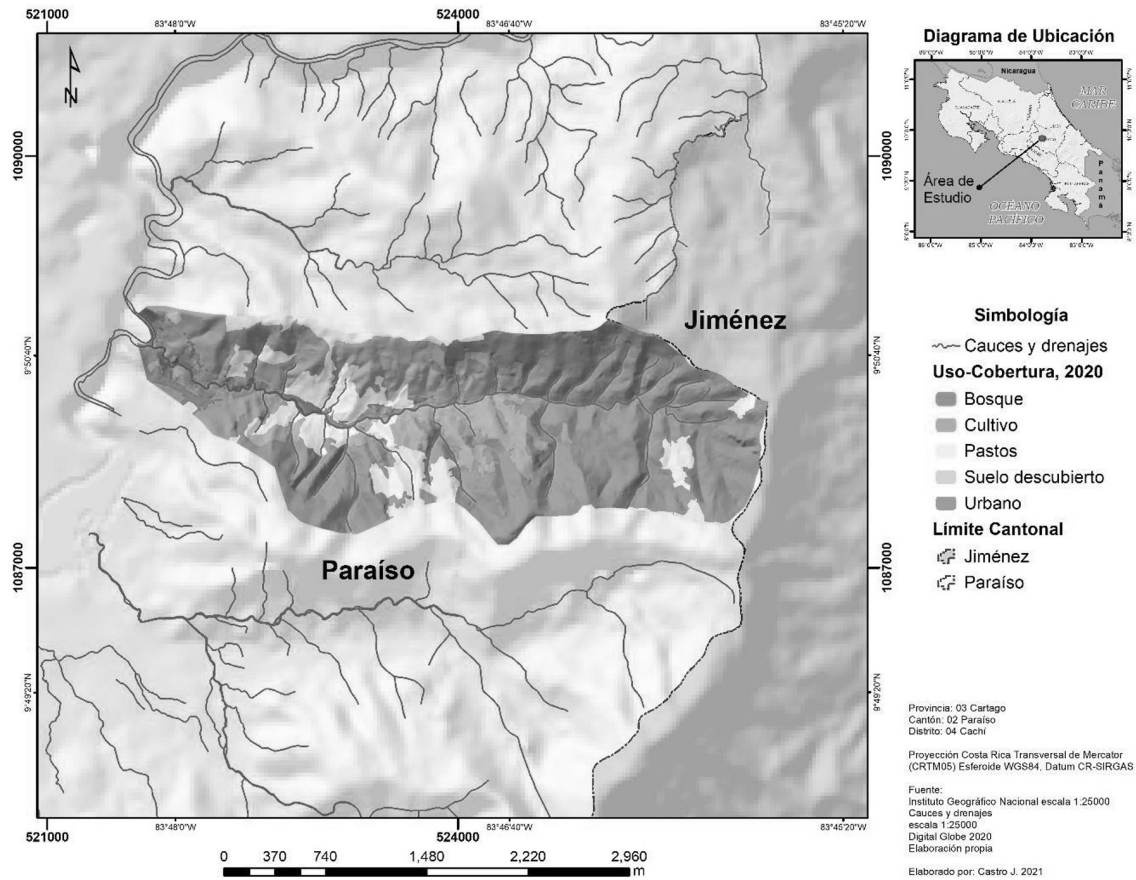
**Figura 3**

*Distribución del uso del suelo en la cuenca del río Urasca, 1997*



**Figura 4**

*Distribución del uso del suelo en la cuenca del río Urasca, 2020*



**Tabla 1**

*Cambios en el uso del suelo en la cuenca del río Urasca (1997-2020)*

Categoría de uso	1997		2020		Cambio
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
Bosque	328.39	61.3	334.35	62.4	+1.8
Cultivo	81.74	15.3	117.62	21.9	+43.9
Pastos	120.32	22.4	75.67	14.1	-37.1
Suelo descubierto	0.17	0.03	0.55	0.10	+223.5
Urbano	5.48	1.0	7.80	1.5	+42.3
Total	536.1	100	536.1	100	-

### *Dinámicas de cambio en el período de estudio*

El análisis temporal revela transformaciones significativas en el uso del suelo durante el período 1997-2020. La cobertura forestal experimentó un incremento moderado de 1.8%, alcanzando 334.35 ha en 2020. Este aumento se atribuye principalmente a la implementación de políticas de conservación, establecimiento de áreas protegidas y plantaciones forestales.

La categoría de cultivos mostró el mayor incremento relativo (+43.9%), expandiéndose de 81.74 ha a 117.62 ha. Los principales cultivos identificados incluyen café, ayote, chayote, plátano, chile dulce, cítricos y tomate. El cultivo de café presenta particular relevancia, con 22 productores manejando 21.25 ha en el área de Urasca, cifra superior a otras localidades del distrito como Peñas Blancas (32.55 ha) y San Jerónimo (21.55 ha).

Contrariamente, el uso destinado a pastos experimentó una reducción significativa (-37.1%), disminuyendo de 120.32 ha a 75.67 ha. Esta reducción se asocia con la conversión de tierras de pastoreo hacia otros usos, principalmente cultivos.

El suelo descubierto se refiere a un suelo sin cobertura vegetal, aunque representando una proporción mínima del área total, mostró el mayor incremento porcentual (+223.5%), atribuido a la variabilidad temporal entre períodos de cosecha y siembra. El uso urbano incrementó 42.3%, reflejando la dinámica poblacional y desarrollo urbano de la región.

### *Patrones espaciales de cambio*

Los cambios en el uso del suelo muestran patrones espaciales diferenciados según la altitud y pendiente. Las áreas altas y medias mantienen predominantemente la cobertura forestal, mientras que las zonas bajas concentran las actividades agropecuarias y el desarrollo urbano. Esta distribución refleja las limitaciones topográficas y la aptitud de los suelos para diferentes usos.

La transición más significativa corresponde a la conversión de pastizales a cultivos, especialmente en las áreas de menor pendiente con mejor accesibilidad. También se observaron transiciones bidireccionales entre bosques y pastizales, así como procesos de regeneración natural en áreas abandonadas. Según los estudios, la conversión de bosques en tierras de cultivo aumenta la producción de alimentos, pero al mismo tiempo reduce los servicios de regulación que ofre-

cían los bosques (Fedele et al., 2018; Foley et al., 2005; Rodríguez et al., 2006).

La dinámica del cambio en el uso de la tierra es constante y se debe a factores como el crecimiento de la sociedad, las influencias ambientales, las políticas de producción y los factores de mercado (Joyce, 2006; Mariye et al., 2022). Según los datos del Instituto del Café (2019), se cultivaron 478 hectáreas de café en Cachí entre 2017 y 2018, con Urasca con 21.25 hectáreas como la más grande.

### *Implicaciones para la gestión de la cuenca*

Los resultados evidencian una intensificación del uso agrícola, particularmente en el cultivo de café, que constituye la base económica local. Esta tendencia debe considerarse en el contexto de la vulnerabilidad del área a procesos erosivos, especialmente en las zonas de mayor pendiente donde se desarrolla la caficultura. Los procesos hidrológicos naturales pueden verse afectados por el abandono no planificado de tierras agrícolas, según Palacios-Cabrera y colaboradores (2022) Las tierras de cultivo han aumentado, lo que podría explicar la relación entre el aumento de la población de la región y la expansión de esta actividad.

La estabilidad de la cobertura forestal en las zonas altas es fundamental para la regulación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos. Los contratos de PSA implementados representan una estrategia efectiva para mantener esta cobertura y asegurar la provisión de agua para las comunidades locales. Según Cortés Granados (2011), la protección de la vegetación leñosa madura es crucial debido a los diferentes usos de la tierra, principalmente en las laderas. Esto se debe a que, si se elimina, se promoverían procesos masivos de remoción que tendrían un impacto en los terrenos frágiles donde se cultiva el café, especialmente en las zonas de mitad de ladera y piedemonte.

La expansión urbana, aunque limitada, requiere planificación considerando los riesgos naturales identificados y la necesidad de proteger las áreas de recarga hídrica y las zonas de alta biodiversidad.

## **Discusión**

El análisis del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Urasca durante el período 1997-2020 confirma las tendencias globales identificadas por Zerga y colaboradores. (2021), donde factores económicos y

sociales impulsan transformaciones territoriales significativas. Los resultados obtenidos corroboran los planteamientos de Çelebi y colaboradores (2014) respecto al impacto del cambio de uso del suelo en la calidad del agua, particularmente relevante en una cuenca que abastece a 606 habitantes y sostiene actividades agropecuarias diversificadas.

La intensificación agrícola documentada (+43.9% en cultivos) y la reducción de pastizales (-37.1%) reflejan las dinámicas descritas por Bonansea y colaboradores (2021) sobre los efectos de la actividad humana en los recursos de agua dulce. En el caso específico de Urasca, la expansión de la cafcultura en terrenos de pendiente pronunciada (30-75%) genera preocupaciones sobre la sostenibilidad hidrológica y la estabilidad de suelos, especialmente considerando la alta vulnerabilidad del área a procesos erosivos.

Los hallazgos de este estudio aportan evidencia empírica que respalda la importancia de evaluar el cambio de uso del suelo como herramienta fundamental para la planificación de cuencas, como sugieren Desta y Fetene (2020). La estabilidad relativa de la cobertura forestal (+1.8%) y la implementación de estrategias de conservación como los PSA demuestran que es posible conciliar el desarrollo económico con la protección de servicios ecosistémicos. Estos resultados posicionan a la cuenca del río Urasca como un caso de estudio valioso para el desarrollo de sistemas de gestión sostenible en cuencas montañosas tropicales, donde la integración de actividades productivas y conservación requiere enfoques adaptativos que consideren tanto las características biofísicas locales como las dinámicas socioeconómicas regionales.

## Conclusiones

La caracterización biofísica de la cuenca del río Urasca durante el período 1997-2020 muestra una situación de cambios con mucho dinamismo en la cuenca, y los resultados obtenidos evidencian un desarrollo económico local con la conservación de servicios ecosistémicos críticos, lo que posiciona a esta cuenca muy apta para la gestión sostenible del territorio.

La intensificación agrícola, manifestada en el incremento del 43.9% en áreas de cultivo y la reducción del 37.1% en pastizales, evidencia una transición hacia sistemas productivos más intensivos, particularmente en la cafcultura. Esta tendencia, aunque favorable para el desarrollo económico local, genera desafíos importantes considerando la vulnerabilidad del área a procesos ero-

sivos en las zonas de mayor pendiente (30-75%).

La estabilidad del uso forestal (incremento de 1.8%) constituye un hallazgo positivo, tomando en cuenta el establecimiento de áreas protegidas y la implementación de contratos de Pago por Servicios Ambientales, el cual es necesario para mantener la regulación hídrica y la provisión de agua para la población local.

Las características biofísicas identificadas, incluyendo la presencia de ultisoles e inceptisoles con aptitud agrícola, la diversidad de zonas de vida y la conectividad biológica a través del Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, confirman el potencial de la cuenca para implementar sistemas de manejo territorial sostenible. Sin embargo, la alta vulnerabilidad a fenómenos de remoción en masa y la presencia de fallas geológicas requieren consideración prioritaria en cualquier estrategia de planificación.

Los resultados obtenidos proporcionan la base científica necesaria para orientar la toma de decisiones en la gestión de cuencas, donde la integración de actividades productivas y conservación requiere enfoques adaptativos que consideren tanto las características biofísicas locales como las dinámicas socioeconómicas regionales.

## Agradecimientos

Este proyecto corresponde a los resultados del proyecto con el código 0114-19 de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, denominado Determinación de la recarga potencial acuífera bajo distintos usos de la tierra en la cuenca del río Urasca, cantón de Paraíso, Cartago para la sostenibilidad del recurso hídrico y constituye un resultado parcial del proyecto.

## Contribución de los autores

Coordinación, elaboración y revisión del Documento: MAJ, JCS

Diseño de la recolección de datos o del trabajo en campo: MAJ, JCS

Recolección o contribución de datos o realización del trabajo de campo: MAJ, JCS

Limpieza, sistematización, análisis o visualización de datos: MAJ, JCS

Participación en análisis: MAJ, JCS

## Materiales suplementarios

Este artículo no tiene archivos complementarios.

## Referencias

- Acuña Agüero, R. (2008). Metadatos. En *Curvas de nivel cada 10 metros 1:5000 Costa Rica*. Instituto Geográfico Nacional, Sistema Nacional de Información Territorial [https://www.snitcr.go.cr/Metadatos/full\\_metadata2?k=Y2FwYTo6SUdOXzU6OmN1cnZhc181MDAw](https://www.snitcr.go.cr/Metadatos/full_metadata2?k=Y2FwYTo6SUdOXzU6OmN1cnZhc181MDAw).
- Acuña Agüero, R. (2014). Metadatos. En *Costa Rica. Cauce y drenaje a escala 1:25000*. Instituto Geográfico Nacional, Sistema Nacional de Información Territorial. [https://www.snitcr.go.cr/Metadatos/full\\_metadata2?k=Y2FwYTo6SUdOXzU6OmN1cnZhc181MDAw](https://www.snitcr.go.cr/Metadatos/full_metadata2?k=Y2FwYTo6SUdOXzU6OmN1cnZhc181MDAw).
- Álvarez Jiménez, M., Ramírez Granados, P., Castro Solís, J., & Solís Torres, L. (2021). Áreas de recarga hídrica potencial en las microcuencas del distrito de Cachi, Cartago, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 13(2), Artículo e3683. <https://doi.org/10.22458/urj.v13i2.3683>
- Acueductos y Alcantarillado (AyA). (2020). *Informe anual: cobertura y calidad del agua para consumo humano suministrado por municipalidades y la ESPH en el 2020*. <https://dspaceaya.igniteonline.la/items/9d7d5c8d-9ea7-47f2-97a9-3fblaf0c1056>
- Abdulbaki, D., Al-Hindi, M., Yassine, A., & Abou Najm, M. (2017). *An optimization model for the allocation of water resources*. *Journal of Cleaner Production*, 164, 994–1006. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.024>
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (Eds.), (2003). *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press.
- Berrangé, J. P., & Whittaker, J. E. P. (1977). *Reconnaissance Geology of the Tapantí Quadrangle, Talamanca Cordillera, Costa Rica: Including Notes on Photogeological Maps of the Pejibaye, Vueltas, Cuericí, Savagre and San Isidro Quadrangles*. Institute of Geological Sciences, Cordillera, Costa Rica. -Institute of Geological Sciences, London. Report 37. - 72 pág.
- Birhanu, S. Y., Moges, M. A., Sinshaw, B. G., Tefera, A. K., Atinkut, H. B., Fenta, H. M., & Berihun, M. L. (2022). Hydrological modeling with respect to impact of land-use and land-cover change on hydrological process and sediment yield, Case study in Jedeb and Chemoga watersheds. *Energy Nexus*, 5, Artículo 100051. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100051>
- Bonanseña, M., Bazán, R., Germán, A., Ferral, A., Beltramone, G., Cossavella, A., & Pinotti, L. (2021). Assessing land use and land cover change in Los Molinos reservoir watershed and the effect on the reservoir water quality. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, 103243. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103243>
- Castillo, R., (1969). *Geología de los mapas básicos de Abra y parte de río Grande, Costa Rica. Informes técnicos y notas geológicas*. Ministerio de Industria y Comercio, Dirección de Geología, Minas y Petróleo.
- Castellanos González, L., Francisca González-Pedraza, A., & Capacho Mogollón, A. E. (2021). Caracterización de los suelos de seis municipios en Norte de Santander. *Inge CuC*, 17(1), 69-80. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.1.2021.06>
- Çelebi, A., Saarinen, T., Kløve, B., & Sengörür, B. (2014). Land use effects the surface water quality of some watersheds in north Finland and north Turkey. En *Sustainable watershed management* (pp. 191-192). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17433-40>
- Centro Científico Tropical. (1992). Capas de zonas de vida. Base de datos digitales.
- Cobeña Navarrete, H. M., Velásquez, F., Navarrete Álava, J., & Delgado, C. (2022). Caracterización biofísica de la microcuenca Sarampión, Manabí–Ecuador. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 16(2), 357-364.
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. (2019). Capa de Amenazas Naturales. Base de datos digitales.
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. (2009). Amenazas de origen natural cantón de Paraíso. [https://www.cne.go.cr/reduccion\\_riesgo/mapas\\_amenzas/](https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenzas/)

- mapas\_de\_amanaza/cartago/Paraiso%20-%20descripcion%20de%20amenazas.pdf
- Cortés Granados, V. (2011). Agroecología del agroecosistema café (*Coffea arabica*) y su relación con la erodabilidad de laderas en el Valle de Orosi, Cartago, Costa Rica. *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 37, 271-305. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15237016011>
- Desta, H., & Fetene, A. (2020). Land-use and land-cover change in Lake Ziway watershed of the Ethiopian Central Rift Valley Region and its environmental impacts. *Land use Policy*, 96, Artículo 104682. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104682>
- Escalante, G. (1966). Geología de la cuenca superior del río Reventazón, Costa Rica. *Publicaciones Geológicas del ICAITI*, 50, 59-70.
- Fedele, G., Locatelli, B., Djoudi, H., & Colloff, M. J., (2018). Reducing risks by transforming landscapes: Cross-scale effects of land-use changes on ecosystem services. *PLoS One* 13 (4), 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195895>
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Snyder, P. K., (2005). *Global consequences of land use. Science*, 309(5734), 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Galván Fernández, A., & Márquez García, A. Z. (2017). Descripción biofísica de la cuenca del río Coapa, Chiapas. *Hidrobiológica*, 16(2), 107-120.
- Henríquez-Henríquez, C., & Cabalceta-Aguilar, G. (1999). Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con enfoque agrícola Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. <http://www.infoagro.go.cr/Info regiones/RegionCentralOriental/Documents/Suelos/tipos%20de%20suelos%20CR.pdf>
- Hutchinson, M.F. (1988). Calculation of Hydrologically Sound Digital Elevation Models. Third International Symposium on Spatial Data Handling. 117-133.
- Hutchinson, M. F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211–232.
- Hutchinson, M.F.& Dowling, T. I. (1991). A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia, *Hydrological Processes* <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050105>
- Hutchinson, M. F. (1996). A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis. Consulte: [http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA\\_FE\\_CD-ROM/sf\\_papers/hutchinson\\_michael\\_dem/local.html](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/hutchinson_michael_dem/local.html).
- Hutchinson, M.F. y Gallant, J.C. (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape. En: J.P. Wilson y J.C. Gallant (eds) *Terrain Analysis*. Wiley, New York, pp. 29–50.
- Hutchinson, M.F., Xu, T. y Stein, J.A. (2011). Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. En: *Geomorphometry 2011*, editado por T. Hengel, I.S. Evans, J.P. Wilson y M. Gould, pp. 19–22. Redlands, California, EE. UU. Consulte: <http://geomorphometry.org/HutchinsonXu2011>.
- Instituto Costarricense de Electricidad. (2009). *Estudio de impacto ambiental proyecto de modernización y ampliación planta hidroeléctrica Cachí*. Expediente Administrativo D1-1382-2007, resolución No. 579-2088 SETENA. <https://www.eib.org/attachments/registers/53219893.pdf>
- Instituto de Desarrollo Rural (INDER). (2016). *Caracterización del territorio: Paraíso-Alvarado*. <https://www.inder.go.cr/istar/Caracterizacion-Territorio-Paraiso-Alvarado.pdf>
- Instituto del Café. (2019). Informe Final de Proyecto: *Actualización área cafetalera 2017-2018*. <http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/cicafe/documentos/Actualizacion-Area-Cafetalera-2017-2018.pdf>

- Joyce, A. T. (2006). Land use change in Costa Rica: As influenced by social, economic, political 1966-2006. Litografía e Imprenta LIL.
- Mariye, M., Jianhua, L., & Maryo, M. (2022). Land use and land cover change, and analysis of its drivers in Ojoje watershed, Southern Ethiopia. *Heliyon*, 8(4), Artículo e09267. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09267>.
- Montero, W., Linkimer, L., & Rojas, W. (2016). El sistema de falla Navarro: Desplazamientos izquierdos a lo largo del cinturón deformado del centro de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (55), 71-100. <https://doi.org/10.15517/rgac.v55i0.27062>
- Luiza Amante, B. (2020). *La conectividad funcional y los servicios ecosistémicos proporcionados por abejas en los agropaisajes del Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. [Eshttps://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9856/La\\_conectividad\\_funcional\\_y\\_los\\_servicios\\_ecosistemicos\\_proporcionados\\_por\\_abejas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9856/La_conectividad_funcional_y_los_servicios_ecosistemicos_proporcionados_por_abejas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ostrom, E., (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325, 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Palacios-Cabrera, T., Valdes-Abellan, J., Jodar-Abellan, A., & Rodrigo-Comino, J. (2022). Land-use changes and precipitation cycles to understand hydrodynamic responses in semiarid Mediterranean karstic watersheds. *Science of The Total Environment*, 819, Artículo 153182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153182>
- Patel, S. K., Verma, P., & Singh, G. S. (2019). Agricultural growth and land use land cover change in peri-urban India. *Environ. Monit. Assess*, 191(9), Artículo 600. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7736-1>
- Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos. (2018). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua.
- Rodríguez Orduz, D. A. (2018). *Caracterización biofísica y análisis de amenazas para la Cuenca del Río Monquirá como insumo en la fase de diagnóstico del Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA)* [Trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2509>
- Rodríguez, J. P., Beard, T.D., Bennett, E. M., Cumming, G. S., Cork, S. J., Agard, J., Dobson, A. P., & Peterson, G. D., (2006). Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology & Society*, 11(1), Artículo 28. <https://doi.org/10.5751/ES-01667-110128>
- Rojas, N., Alfaro, M., Solano, J., Araya, C., & Villalobos R. (2011). *Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica. Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico 2011*. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Instituto Meteorológico Nacional. <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EstudioCuencas/EstudioCuencas-cuencaRioReventazon.pdf>
- Saucedo-Ramírez, O. A., Mahlkecht, J., & González-Bravo, R. (2022). Optimization of water allocation networks in highly engineered basins: The case of Guandu River basin, Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 358, Artículo 131787. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131787>
- Siles Calvo, J., & de Soares, D. F. (2003). *La fuerza de la corriente: Gestión de cuencas hidrográficas con equidad de género*. Absoluto.
- Sojo, D., Denyer, P., Gazel, E., & Alvarado, G. (2017). Geología del cuadrante Tapantí (1: 50 000), Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (56), 83-116. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i56.29238>
- Törnqvist, R., Jarsjö, J., Pietroń, J., Bring, A., Rogberg, P., Asokan, S. M., & Destouni, G. (2014). Evolution of the hydro-climate system in the Lake Baikal basin. *Journal Hydrology*, 519(Part B), 1953-1962. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.074>
- United Nations. (2020). UN World Water Development Report 2020. Water and Climate Change.

- Watler R., W., Faustino M., J. & Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2013, 1 de julio-30 de septiembre). Curso internacional en línea de especialización en “Gestión integral de cuencas hidrográficas”: Construcción del Plan de Gestión de Cuencas Hidrográficas. (Unidad 2) [curso en línea]. CATIE.
- Walia, C. S., Singh, S. P., Dhankar, R. P., Ram, J., Kamble, K. H., & Katiyar, D. K. (2010). Watershed characterization and soil resource mapping for land use planning of Moolbari Watershed, Shimla District, Himachal Pradesh in Lesser Himalayas. *Current Science*, 98(2), 176-182.
- Zerga, B., Warkineh, B., Teketay, D., Woldetsadik, M., & Sahle, M. (2021). Land use and land cover changes driven by expansion of eucalypt plantations in the Western Gurage Watersheds, Central-south Ethiopia. *Trees, Forests and People*, 5, Artículo 100087. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100087>
- Ye, Q., Li, Y., Zhuo, L., Zhang, W., Xiong, W., Wang, C., & Wang, P. (2018). *Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: A case study for Beijing, China*. *Water Research*, 129, 264-276. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.036>