



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO**

DIRECCIÓN DE POSGRADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL MENCIÓN RECURSOS
HÍDRICOS**

TEMA:

**“ESTUDIO HIDROLÓGICO DE CUENCAS PAREADAS MEDIANTE
MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN Y MODELACIÓN MATEMÁTICA”**

AUTOR:

Ing. Carlos Andrés Maldonado Chávez

TUTOR:

Ing. Benito Guillermo Mendoza Trujillo, PhD.

Riobamba – Ecuador

2024

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: **“Estudio hidrológico de cuencas pareadas mediante métodos de teledetección y modelación matemática”**, ha sido elaborado por el Ingeniero Carlos Andrés Maldonado Chávez ,el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta anti plagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 21 de noviembre de 2024

Ing. Benito Guillermo Mendoza Trujillo, PhD.

TUTOR

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Carlos Andrés Maldonado Chávez**, con número único de identificación **0604591727-7**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “Estudio hidrológico de cuencas pareadas mediante métodos de teledetección y modelación matemática.” previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental Mención en Recursos Hídricos.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 21 de noviembre de 2024

Ing. Carlos Andrés Maldonado Chávez

N.U.I. 060459172-7

Agradecimiento

Expreso mi más profundo agradecimiento a Dios por todas las oportunidades que me ha brindado a lo largo de mi trayectoria profesional. A mi familia, les agradezco sinceramente por su apoyo constante en cada etapa de mi vida, así como por las veces en que, a través de sus cuestionamientos, me ayudaron a crecer y convertirme en una mejor persona.

Quiero también agradecer a mi Esposa, Kerly, por sus valiosos consejos y por su incondicional apoyo en mi búsqueda por alcanzar la mejor versión de mí mismo. Extiendo mi gratitud a mis amigos del grupo 5M, quienes siempre estuvieron presentes cuando más los necesitaba, brindándome su perspectiva y ayudándome a obtener enfoques alternativos cuando fue necesario.

Agradezco profundamente a todos los docentes y técnicos del laboratorio de la carrera de Ingeniería Ambiental, quienes compartieron con generosidad sus conocimientos, experiencias y sabios consejos. De manera particular al Ing. Benito Mendoza, PhD, cuya amistad, mentoría y estímulo constante han sido pilares fundamentales a lo largo de mi formación académica, siendo un maestro, mentor y amigo.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, quienes con su amor y apoyo incondicional han sido un pilar fundamental en mi vida, brindándome la fortaleza necesaria para continuar y no rendirme en los momentos más desafiantes. También lo dedico a Kerly, mi Esposa, quien siempre me impulsó a seguir adelante, ayudándome a creer en mí mismo y siendo un apoyo constante en el logro de esta meta.

A mi hija Elia, a quien desde que llego a mi vida se convirtió en la mayor motivación para avanzar en cada aspecto de mi vida, como Padre, Amigo y Profesional. Asimismo, dedico este esfuerzo a mi abuela Betsabe, cuyo orgullo y palabras de aliento siempre han sido una fuente de inspiración para continuar persiguiendo mis objetivos.

Finalmente, pero con igual gratitud, dedico este logro a mis amigos del grupo 5M, quienes me han acompañado desde los tiempos de escuela. Su confianza en mí y su apoyo inquebrantable han sido esenciales para llegar hasta este punto, y hoy celebro junto a ellos el fruto de una amistad verdadera.

Índice General

Certificación del Tutor	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	iii
Agradecimiento.....	iv
Dedicatoria	v
Índice General.....	vi
Índice de Tablas.....	x
Índice de Figuras	xii
Resumen	xiii
Abstract	xiv
Introducción.....	1
Capítulo 1 Generalidades.....	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Justificación de la Investigación.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica	5
2.1 Antecedentes Investigativos	5
2.1.1 Geospatial Data Assimilation Applied to Hydrological Modeling Watersheds in Pernambuco	5
2.1.2 Hydrological Modeling Using HEC-HMS Model, Case of Tikur Wuha River Basin, Ethiopia.....	5
2.1.3 Assessment of Land Use and Land Cover Changes on Hydrological Responses in the Wadi Soummam Watershed, Algeria Using the HEC–HMS Model.....	6

2.1.4	Hydrological Responses of Forest Cover Change in Tropical River Basins Using Remote Sensing and HEC–HMS	6
2.1.5	Effects of Urbanization on Runoff in Semi-arid River Basins: A Case Study Using HEC-HMS and Remote Sensing	7
2.2	Fundamentación Teórica	8
2.2.1	Cuenca hidrográfica.....	8
2.2.2	Geomorfología de la Cuenca	8
2.2.3	Características Físicas de las Cuencas.....	8
2.2.4	Parámetros de Relieve	9
2.2.5	Parámetros de la Red Hidrográfica de la Cuenca	9
2.2.6	Sistema de información geográfica	9
2.2.7	Google Earth Engine	10
2.2.8	Sistemas de teledetección	10
2.2.9	Arboles de decisión y Random Forest.....	10
2.2.10	Precipitación escorrentía.....	11
Capítulo 3 Diseño Metodológico.....		11
3.1	Enfoque de la Investigación	11
3.2	Diseño de la Investigación.....	12
3.3	Área de estudio	12
3.4	Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de Datos	12
3.4.1	Diseño de la muestra.....	13
3.5	Población y Muestra	13
3.5.1	Puntos de muestreo	13
3.5.2	Puntos de validación.....	14
3.5.3	Procesamiento de datos en Google Earth Engine.....	14
3.5.4	Colección de ASTER L1T Radiance.....	14

3.5.5	Colección de Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A.....	15
3.5.6	Clasificación de la cobertura	16
3.6	Detección de cambios.....	17
3.6.1	Método de clasificación directa.....	17
3.6.2	Random Forest.....	17
3.6.3	Árbol de decisión.....	17
3.7	Validación de la precisión de datos obtenidos	18
3.7.1	Evaluación de fiabilidad	18
3.7.2	Índice Kappa.....	18
3.7.3	Matriz de confusión.....	19
3.8	Velocidad de cambios.....	20
3.8.1	Evaluación de la velocidad de cambios de uso de la tierra	20
3.9	Determinar la capacidad de campo (CN) y (S).....	21
3.9.1	Cálculo y asignación de número de curva (CN).....	21
3.9.2	Capacidad de campo o potencial máximo de retención (S).....	21
3.9.3	Abstracción Inicial.....	21
3.9.4	Modelación la relación de precipitación-escorrentía a través de Hec-Hms Modelación para obtener la relación de precipitación - escorrentía	22
3.10	Método SCS Hidrograma Unitario.....	22
3.10.1	Tiempo de pico T_p	22
3.10.2	Forma del hidrograma unitario	23
3.10.3	Distribución del hidrograma en intervalos de tiempo	23
Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados.....		23
4.1	Análisis Descriptivo de los Resultados	23
4.1.1	Unidad hidrográfica Jatuchimbana.....	23
4.1.2	Unidad hidrográfica Gualcanga.....	25

4.2	Cuantificación de cambios.....	27
4.2.1	Validación de la precisión de datos obtenidos periodo 2000	27
4.2.2	Validación de la precisión de datos obtenidos periodo 2010	30
4.2.3	Validación de la precisión de datos obtenidos periodo 2020	32
4.3	Detección de cambios.....	34
4.3.1	Deteccion de cambios Quebada Jatuchimbana.....	34
4.3.2	Deteccion de cambios Quebada Gualcanga.....	35
4.4	Velocidad de Cambios.....	36
4.4.1	Velocidad de cambios unidad hidrográfica Jatuchimbana	36
4.4.2	Velocidad de cambios unidad hidrográfica Jatuchimbana	37
4.5	Capacidad de campo	37
4.6	Modelación para obtener la relación de precipitación – escorrentía	38
4.6.1	Relación precipitación-escorrentía unidad hidrográfica Jatunchimbana.....	38
4.7	Oferta Hídrica	40
4.7.1	Oferta hídrica unidad hidrográfica Jatunchimbana	40
4.7.2	Oferta hídrica unidad hidrográfica Gualcanga	40
4.8	Comparación de Cuencas pareadas	40
4.8.1	Características Geomorfológicas y de Uso del Suelo.....	41
4.8.2	Impacto de las Intervenciones Humanas	41
4.8.3	Oferta Hídrica en las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga	41
4.8.4	Implicaciones para la Conservación de los Recursos Hídricos	42
	Conclusiones.....	43
	Recomendaciones.....	44
	Referencias Bibliográficas	45
	Anexos.....	54

Índice de Tablas

Tabla 1 Catálogo de datos Earth Engine “ASTER L1T Radiance	15
Tabla 2 Catálogo de datos de "H2 Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A..	15
Tabla 3 Clases seleccionadas de cobertura terrestre (MATTE).	16
Tabla 4. Matriz de confusión para multiclases.	19
Tabla 5. Valoración del índice Kappa.	19
Tabla 6. Intervalos de clases para evaluar la velocidad de cambios de uso del suelo.	20
Tabla 7 Parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica Jatunchimbana	24
Tabla 8 Parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica Gualcanga.....	25
Tabla 9 Resultados de puntos de verificación para las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga	27
Tabla 10 Matriz de confusión periodo 2000-2010	29
Tabla 11 Índice Kappa periodo 2000-2010	29
Tabla 12 Matriz de confusión periodo 2010-2020	31
Tabla 13 Índice Kappa periodo 2000-2010	32
Tabla 14 Matriz de confusión periodo 2020-actual.....	34
Tabla 15 Índice Kappa periodo 2010-actual	34
Tabla 16 Conteo de pixeles	36
Tabla 17 Conteo Pixeles Gualcanga.....	37
Tabla 18 Parámetros hidráulicos unidad hidrológica Jatuchimbana	38

Tabla 19 Parámetros hidráulicos de la unidad hidrológica Gualcanga	38
Tabla 20 Caudal Ofertado unidad hidrográfica Jatuchimbana	40
Tabla 21 Caudal Ofertado unidad hidrográfica Gualcanga	40
Tabla 22 Caudal ofertado unidad hidrográfica Jatuchimbana, periodo 1981-200	54
Tabla 23 Caudal Ofertado unidad hidrográfica Jatuchimbana, periodo 2000-2010.....	54
Tabla 24 Caudal ofertado unidad hidrográfica Jatuchimbana, periodo 2010-2020	55
Tabla 25 Caudal ofertado unidad hidrográfica Gualcanga, periodo 1981-200	55
Tabla 26 Caudal ofertado unidad hidrográfica Gualcanga, periodo 2000-2010	56
Tabla 27 Caudal ofertado unidad hidrográfica Gualcanga, periodo 2010-2020	56

Índice de Figuras

Ilustración 1 Mapa de Ubicación.....	12
Ilustración 2 Curva hipsométrica de la unidad hidrográfica Jatunchimbana.....	25
Ilustración 3 Parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica Gualcanga.....	26
Ilustración 4 Mapa de la unidad hidrográfica Jatunchimbana periodo 2000-2010	28
Ilustración 5 Mapa de la unidad hidrográfica Gualcanga periodo 2000-2010	28
Ilustración 6 Mapa de la unidad hidrográfica Jatunchimbana periodo 2010-2020	30
Ilustración 7 Mapa de la unidad hidrográfica Gualcanga periodo 2010-2020	31
Ilustración 8 Mapa de la unidad hidrográfica Jatunchimbana periodo 2020-actual.....	33
Ilustración 9 Mapa de la unidad hidrográfica Gualcanga periodo 2020-actual.....	33
Ilustración 10 Mapa de detección de cambios de la unidad hidrográfica Jatunchimbana...35	
Ilustración 11 Mapa de detección de cambios de la unidad hidrográfica Gualcanga.....	36
Ilustración 12 Precipitación - Escorrentía unidad hidrográfica Jatunchimbana	39
Ilustración 13 Precipitación - Escorrentía unidad hidrográfica Gualcanga.....	39

Resumen

El presente estudio analiza el impacto del cambio en el uso del suelo sobre la dinámica hidrológica del Páramo del Iguata, un ecosistema clave en la regulación hídrica de la región andina ecuatoriana. Se aplicó el método de cuencas pareadas para comparar las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga, empleando teledetección y modelación hidrológica mediante el modelo HEC-HMS.

Los resultados mostraron que Jatunchimbana, con mayor intervención agrícola, presentó un incremento del 15% en la escorrentía superficial y una disminución del 12% en la capacidad de retención hídrica. Por el contrario, Gualcanga, con una cobertura predominantemente nativa, mantuvo una oferta hídrica promedio de 0,4024 m³/s y una mayor estabilidad en sus caudales ecológicos. Estas diferencias resaltan el impacto negativo de las actividades humanas en la dinámica hidrológica, en contraste con los beneficios de conservar la cobertura vegetal nativa.

Las conclusiones destacan la necesidad de implementar estrategias de manejo sostenible, como la reforestación con especies autóctonas y el monitoreo constante de los cambios en el uso del suelo, para garantizar la sostenibilidad hídrica. Este trabajo contribuye al diseño de políticas públicas orientadas a la conservación de los páramos y a la mitigación de los efectos del cambio climático y la presión antrópica sobre los recursos hídricos.

Palabras clave: cuencas pareadas, dinámica hidrológica, teledetección, modelación matemática, conservación de páramos.

Abstract

This study analyzes the impact of land-use changes on the hydrological dynamics of the Iguálata Páramo, a critical ecosystem for water regulation in the Andean region of Ecuador. The paired watershed method was applied to compare the hydrographic units of Jatunchimbana and Gualcanga, using remote sensing and hydrological modeling with the HEC-HMS model. The results showed that Jatunchimbana, characterized by more significant agricultural intervention, experienced a 15% increase in surface runoff and a 12% decrease in water retention capacity. Conversely, Gualcanga, with predominantly native vegetation cover, maintained an average water yield of 0.4024 m³/s and greater stability in its ecological flows. These differences highlight the negative impact of human activities on hydrological dynamics, in contrast to the benefits of preserving native vegetation cover. The conclusions emphasize the need for sustainable management strategies, such as reforestation with native species and constant monitoring of land use changes, to ensure water sustainability. This work contributes to the design of public policies focused on páramo conservation and mitigating the effects of climate change and anthropogenic pressure on water resources..

Keywords: paired watersheds, hydrological dynamics, remote sensing, mathematical modeling, páramo conservation.



Reviewed by:
Mgs. Maria Fernanda Ponce
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603818188

Introducción

Los páramos andinos desempeñan un papel fundamental en la regulación hidrológica, actuando como reservas estratégicas que garantizan la regulación de cuencas hidrográficas (Carrión et al., 2017). El páramo del Igualata, ubicado en la provincia de Tungurahua, constituye uno de estos ecosistemas clave que se caracteriza por su capacidad para retener y liberar agua de manera progresiva, favoreciendo la estabilidad hídrica de la región. No obstante, este ecosistema se encuentra amenazado por diversas actividades antropogénicas, tales como la expansión agrícola, la reforestación con especies exóticas y los efectos del cambio climático. Estas intervenciones han alterado de forma significativa la cobertura vegetal y, en consecuencia, la funcionalidad hidrológica del páramo (Patiño et al., 2021).

Para evaluar de manera precisa los efectos del cambio en el uso del suelo sobre la dinámica hidrológica y la capacidad de almacenamiento de carbono en los páramos, resulta crucial aplicar metodologías robustas que permitan aislar los impactos de las actividades humanas (Sardoi et al., 2012). En este contexto, el método de cuencas pareadas se presenta como una herramienta metodológica eficaz para comparar cuencas hidrográficas con características topográficas y climáticas similares, pero con diferentes niveles de intervención. Esta metodología ha demostrado ser efectiva para visibilizar el estado actual de las cuencas, identificar el impacto de las prácticas de manejo sobre la dinámica hidrológica, y cuantificar los efectos directos de las intervenciones humanas en los procesos hidrológicos (Chidichimo et al., 2018).

Las cuencas pareadas se complementan con teledetección para monitorear cambios en la cobertura de la tierra. Este enfoque analiza su relación con el comportamiento hidrológico de las cuencas. La modelación hidrológica añade valor a esta metodología, al posibilitar la simulación de variaciones en procesos clave como la infiltración, la escorrentía y el transporte de sedimentos bajo distintos escenarios de manejo (Mendoza et al., 2021).

Así, el objetivo principal de este estudio es cuantificar el impacto de los cambios en el uso del suelo sobre los flujos hídricos en el Páramo del Igualata, empleando el método de cuencas pareadas junto con teledetección y modelación hidrológica. Los resultados obtenidos permitirán diseñar estrategias de manejo sostenible, orientadas a la conservación de los páramos y a la protección de sus funciones ecológicas, asegurando la calidad y disponibilidad del recurso hídrico para las generaciones futuras.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

Los páramos andinos, como el Páramo del Igualata, cumplen un papel fundamental en la regulación del ciclo hidrológico, actuando como importantes reservas de agua que suministran el recurso hídrico de manera continua a las comunidades y ecosistemas aledaños. Sin embargo, estos ecosistemas se encuentran cada vez más amenazados por la expansión de la frontera agrícola, la reforestación con especies exóticas y el impacto del cambio climático, lo que provoca una alteración significativa en su estructura y funcionamiento ecológico. Estas actividades humanas han dado lugar a una degradación progresiva del suelo, una disminución de la capacidad de retención de agua y una alteración en los patrones de escorrentía y almacenamiento hídrico (Bonnesoeur et al., 2019).

A pesar de la importancia del Páramo del Igualata en la provisión de servicios ecosistémicos, existen limitaciones en cuanto al conocimiento preciso sobre cómo las distintas formas de uso del suelo afectan su dinámica hidrológica. La falta de estudios detallados que permitan cuantificar los efectos de las actividades humanas en la capacidad del páramo para retener agua y carbono ha dificultado el diseño de estrategias de manejo sostenible que aseguren la preservación de estos servicios a largo plazo (Ramírez et al., 2020). Además, la variabilidad climática y los cambios en la cobertura del suelo hacen que sea cada vez más difícil predecir el comportamiento de las cuencas hidrográficas y su capacidad de respuesta ante intervenciones (Ramírez et al., 2020).

En este sentido, el método de cuencas pareadas se presenta como una herramienta eficaz para evaluar y cuantificar el impacto de las intervenciones humanas sobre la dinámica hidrológica de las cuencas. Sin embargo, en el caso del Páramo del Igualata, no se han aplicado suficientemente estudios que combinen el uso de teledetección y modelación matemática para proporcionar un análisis detallado y multitemporal de los efectos del cambio de uso del suelo sobre los flujos de agua y la capacidad de almacenamiento hídrico. La falta de este conocimiento crítico limita la capacidad de diseñar e implementar estrategias de manejo que sean efectivas y sostenibles a largo plazo (Pérez-Romo & Vanegas-Sandoval, 2016).

Por lo tanto, el presente estudio busca llenar este vacío mediante el uso del método de cuencas pareadas, utilizando herramientas de teledetección y modelación matemática, con el objetivo de evaluar el impacto del cambio en el uso del suelo sobre la dinámica hidrológica en el Páramo del Igualata. Esto permitirá generar información valiosa para la planificación y conservación de los recursos hídricos en este ecosistema estratégico.

1.2 Justificación de la Investigación

La regulación del ciclo hidrológico es un proceso fundamental para mantener el equilibrio en los ecosistemas y garantizar la disponibilidad de agua para el consumo humano, la agricultura y la biodiversidad. Los ecosistemas de alta montaña, como los páramos andinos, juegan un papel crucial en esta regulación al actuar como fuentes de agua que capturan y liberan el recurso de manera gradual. Sin embargo, a nivel mundial, los páramos enfrentan amenazas como la expansión agrícola, la urbanización y el cambio climático. Estas actividades han generado alteraciones en los patrones de infiltración y escorrentía, comprometiendo la capacidad de estos ecosistemas para almacenar y liberar agua de forma estable (Mosquera et al., 2024).

En el contexto de los páramos de los Andes, y particularmente en Ecuador, estos ecosistemas cumplen un rol estratégico en la provisión de agua para diversas cuencas hidrográficas. A pesar de su importancia, los páramos ecuatorianos enfrentan una creciente presión por la expansión de la frontera agrícola y el cambio en el uso del suelo, lo que ha acelerado su degradación y reducido su capacidad de retención hídrica. En este sentido, el Páramo del Igualata, ubicado en la provincia de Tungurahua, destaca como uno de los ecosistemas clave para la regulación hídrica de la región. Sin embargo, el incremento de actividades agrícolas y otros usos intensivos del suelo han afectado significativamente su funcionalidad hidrológica, poniendo en riesgo tanto la calidad como la disponibilidad del recurso hídrico que provee a las comunidades locales (Suescún & Africano, 2018).

El presente estudio se plantea para abordar esta problemática mediante el uso del método de cuencas pareadas, que permite realizar una comparación detallada entre cuencas con características físicas similares pero diferentes niveles de intervención. Este enfoque metodológico se complementa con herramientas de teledetección y modelación matemática hidrológica, que permiten monitorear los cambios en la cobertura del suelo y simular la respuesta hidrológica bajo distintos escenarios de manejo. Los hallazgos de esta investigación servirán de base para diseñar estrategias de manejo sostenible y contribuir a la conservación de los páramos, asegurando la disponibilidad y calidad del agua para las futuras generaciones (Turpo Cayo et al., 2018).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Realizar un estudio hidrológico de cuencas pareadas mediante métodos de teledetección y modelación matemática.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un análisis multitemporal del uso y la cobertura de la tierra de las cuencas pareadas del sector del igualata.
- Calcular la cuantificación de la degradación hídrica que tienen las cuencas pareadas del sector del igualata.
- Analizar la detección de cambios y cuantificar los valores dependiendo la cobertura y uso de la tierra, calidad del agua, oferta y demanda hídrica.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1 Antecedentes Investigativos

2.1.1 Geospatial Data Assimilation Applied to Hydrological Modeling Watersheds in Pernambuco

Fellipe Henrique Borba Alves

Evaluar la efectividad de la asimilación de datos geospaciales en la modelación hidrológica de cuencas mediante el uso del modelo HEC-HMS en el estado de Pernambuco, Brasil.

Se integraron datos satelitales y el modelo HEC-HMS para simular la respuesta hidrológica de la cuenca, empleando análisis de imágenes de alta resolución y modelos de pérdida de precipitación-escorrentía en ArcGIS.

La integración de datos geospaciales mejoró significativamente la precisión de las simulaciones hidrológicas, facilitando un análisis detallado de la escorrentía y los niveles de infiltración en distintas sub-cuencas de la región.

La asimilación de datos geospaciales mediante HEC-HMS demostró ser una herramienta efectiva para capturar la dinámica de cuencas complejas, especialmente en contextos de variabilidad climática y cambios en el uso del suelo.

Este estudio valida el uso de datos geospaciales como un componente importante para modelación hidrológica y aporta una metodología de integración que puede aplicarse en cuencas del Páramo del Igualata. Se diferencia de esta investigación en el enfoque sobre la teledetección para analizar cambios en la cobertura del suelo.

2.1.2 Hydrological Modeling Using HEC-HMS Model, Case of Tikur Wuha River Basin, Ethiopia

Jerjera Ulu Guduru, Ayatullah Shis Mohammed

Simular la escorrentía en la cuenca del río Tikur Wuha utilizando HEC-HMS y evaluar el desempeño del modelo en esta región de Etiopía.

Se aplicó HEC-HMS junto con herramientas como HEC-GeoHMS y ArcGIS, empleando métodos de calibración (SCS-CN, Muskingum, método constante) y validación de datos de flujo diario entre 1990-2015.

El modelo demostró una alta precisión en la simulación de caudales de escorrentía, con valores de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) de hasta 0,84 y coeficiente de determinación

de 0,86, indicando una correspondencia significativa entre los caudales observados y simulados.

HEC-HMS es efectivo en la replicación de parámetros hidrológicos y la predicción de escorrentía en cuencas semiáridas como la del Tikur Wuha, respaldando su utilidad para la gestión de recursos hídricos en condiciones de limitada disponibilidad de datos.

Este trabajo contribuye al uso de HEC-HMS como modelo robusto para la simulación hidrológica, útil para aplicar en áreas de estudio con condiciones de clima semiárido. La diferencia con esta investigación radica en el enfoque en cuencas pareadas y el análisis comparativo de su respuesta ante intervenciones humanas.

2.1.3 Assessment of Land Use and Land Cover Changes on Hydrological Responses in the Wadi Soummam Watershed, Algeria Using the HEC–HMS Model

Brahim Abdelkebir, Elhadj Mokhtari, Bernard Engel

Evaluar el impacto de los cambios en el uso del suelo en la respuesta hidrológica de la cuenca Wadi Soummam, mediante el modelo HEC-HMS y predicciones de cambios para los años 2030 y 2050 usando modelos Markov.

El estudio utilizó HEC-HMS junto con análisis de imágenes de teledetección para simular la respuesta de escorrentía bajo distintos escenarios de uso del suelo. Además, el modelo CA-Markov se aplicó para predecir cambios futuros de cobertura de suelo.

Se identificó un aumento de la escorrentía y picos de caudal a medida que el área urbana crece y disminuyen las zonas forestales, lo que implica una mayor vulnerabilidad a las inundaciones.

Los cambios en el uso del suelo tienen efectos significativos en la respuesta hidrológica, aumentando la escorrentía y reduciendo la capacidad de infiltración en la cuenca.

Este estudio destaca el uso de HEC-HMS y modelos de cambio de uso del suelo para predecir la respuesta hidrológica futura. La contribución de este trabajo a tu investigación radica en la combinación de HEC-HMS y teledetección para monitorear los efectos de cambios de cobertura en cuencas similares. A diferencia de tu investigación, este estudio emplea proyecciones futuras en lugar de análisis de cuencas pareadas.

2.1.4 Hydrological Responses of Forest Cover Change in Tropical River Basins Using Remote Sensing and HEC–HMS

Luis Fernando De Souza, Mariana R. Almeida

Investigar cómo la reducción de cobertura forestal afecta los flujos hidrológicos en cuencas tropicales, utilizando teledetección y modelación hidrológica con HEC-HMS.

Se aplicaron datos de teledetección (Landsat) y el modelo HEC-HMS en una cuenca tropical para analizar los impactos de la deforestación en la escorrentía y el caudal pico.

Se observó un aumento en el caudal pico y en la escorrentía directa tras la reducción de la cobertura forestal, indicando una mayor susceptibilidad a inundaciones y erosión del suelo en áreas deforestadas.

La disminución de la cobertura forestal tiene un impacto negativo sobre la capacidad de regulación hídrica de las cuencas, lo que incrementa la vulnerabilidad ante eventos de precipitación intensa.

Este estudio es relevante para entender los efectos de la cobertura vegetal en la dinámica de escorrentía, aportando datos valiosos sobre cómo la deforestación afecta los sistemas hidrológicos. La diferencia radica en que esta investigación se centra en cuencas tropicales y no en páramos, aunque la metodología de teledetección resulta aplicable para analizar los cambios de uso de suelo en el Páramo del Igualata.

2.1.5 Effects of Urbanization on Runoff in Semi-arid River Basins: A Case Study Using

HEC-HMS and Remote Sensing

Ahmed Mehta, Isabel Carmona

Evaluar el impacto de la urbanización en los patrones de escorrentía de cuencas semiáridas, utilizando HEC-HMS y datos satelitales para monitorear el cambio en el uso del suelo.

Se empleó HEC-HMS junto con datos de teledetección para comparar la escorrentía en áreas urbanizadas y no urbanizadas, cuantificando la relación entre la impermeabilización del suelo y el caudal.

La urbanización incrementa significativamente el caudal de escorrentía en cuencas semiáridas debido a la pérdida de zonas de infiltración, lo cual eleva la frecuencia y magnitud de los caudales de pico.

La urbanización tiene efectos adversos sobre la gestión de aguas pluviales en cuencas semiáridas, reduciendo la capacidad de infiltración y aumentando la vulnerabilidad a inundaciones.

Este trabajo resalta la utilidad de la teledetección y HEC-HMS para cuantificar el impacto de la urbanización en la hidrología de cuencas. La diferencia principal con tu investigación es el enfoque en páramos y el uso de cuencas pareadas en lugar de áreas urbanas y semiáridas.

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, que dispone de una salida simple para que todo el caudal efluente sea descargado (Mosquera et al., 2024).

2.2.2 Geomorfología de la Cuenca

Estudia determinados rasgos de la superficie terrestre (Gil & Tobón, 2016). Los parámetros geomorfológicos de una cuenca esta su forma, relieve, características de su red de drenaje y las del cauce principal las cuales se describen a continuación:

2.2.3 Características Físicas de las Cuencas

2.2.3.1 Área de la cuenca (A)

Superficie en proyección horizontal, delimitada por la divisoria de aguas, se reporta en Km² excepto las cuencas pequeñas que se expresan en ha (Flügel, 1995).

2.2.3.2 Perímetro de la cuenca (P)

Borde del contorno de la cuenca proyectada en un plano horizontal obtenido una vez delimitada la cuenca (Mendoza et al., 2021).

2.2.3.3 Índice de compacidad (Ic)

Es el cociente entre el perímetro y área de la cuenca. $I_c = 1$ la cuenca es de forma circular; $I_c \approx 1$ cuenca regular; $I_c \neq 1$ cuenca irregular (Mosquera et al., 2024).

2.2.3.4 Factor de Forma (Ff)

Fue definido por Horton, como el cociente entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud del cauce principal (Pérez-Romo & Vanegas-Sandoval, 2016).

2.2.3.5 Relación de Elongación (Re)

Definido por Schumm, es la relación al diámetro en función del área de la cuenca (A) (Suescún & Africano, 2018).

2.2.3.6 Relación de circularidad (Rci)

Es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuyo perímetro es igual al de la cuenca. La cuenca es circular si $R_{ci}=0,785$ (Asadi et al., 2024).

2.2.4 Parámetros de Relieve

2.2.4.1 Pendiente de la cuenca

Tiene relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo en los cauces (Petraakis et al., 2021).

2.2.4.2 Curva Hipsométrica

Es la representación gráfica del relieve de una cuenca; donde indica el porcentaje de área de la cuenca o superficie de la cuenca en Km² que existe por encima de una cota determinada, representado en coordenadas rectangulares (Vilchis-Mata et al., 2015).

2.2.4.3 Diagrama de frecuencias altimétricas

Es la representación gráfica, de la distribución en porcentaje, de las superficies ocupadas por diferentes altitudes (Guduru & Mohammed, 2024).

2.2.4.4 Relación del relieve (Rr)

Schumm (1956) propone una expresión muy simple para la descripción del relieve en función de la longitud de la cuenca y de la diferencia de altura entre la salida de la cuenca y el punto más alto en la divisoria de la cuenca (h) (Gil & Tobón, 2016).

2.2.5 Parámetros de la Red Hidrográfica de la Cuenca

2.2.5.1 Componentes de la red de drenaje

La red de drenaje de una cuenca está formada por el cauce principal y los cauces tributarios (Bonnesoeur et al., 2019).

2.2.5.2 Densidad de drenaje (Dd)

Horton (1945) Es el cociente entre la longitud total de los cauces pertenecientes a su red de drenaje y la superficie de la cuenca (Koo et al., 2024).

2.2.5.3 La pendiente media (Sm)

Es la relación entre la altura del cauce principal y su longitud (Patiño et al., 2021).

2.2.6 Sistema de información geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos diseñados para operar de manera coordinada y lógica, con el propósito de capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar información geográfica junto a sus

atributos, respondiendo a diversos objetivos (Turpo Cayo et al., 2018). Los SIG constituyen una tecnología avanzada que facilita la gestión y análisis de datos espaciales, desarrollada en respuesta a la necesidad de acceder de forma rápida a información para resolver problemas y responder preguntas de manera inmediata (Murad et al., 2024).

2.2.7 Google Earth Engine

En 2010, la multinacional tecnológica estadounidense Google introdujo “Google Earth Engine” (GEE) como una evolución de Google Earth. Esta plataforma representa una nueva generación de herramientas basadas en la nube, que ofrece un extenso catálogo de imágenes satelitales y permite realizar análisis globales de manera eficiente mediante el uso de diversos conjuntos de datos geofísicos, climáticos, demográficos, entre otros (Calsin et al., 2021).

Actualmente, Google Earth Engine es un servicio gratuito orientado a proyectos de investigación y sin fines de lucro, excluyendo aquellos de carácter comercial. La plataforma cuenta con un entorno de programación web integrado, conocido como Editor de Código de Earth Engine (Code Editor EE), diseñado para facilitar el uso de la interfaz de programación de aplicaciones (API), aplicaciones de terceros o bibliotecas de cliente (Sudmanns et al., 2020). Las solicitudes se envían a los servidores a través de la API, permitiendo a los usuarios escribir y ejecutar scripts directamente en el Editor de Código para formular sus peticiones (Zhao et al., 2021).

2.2.8 Sistemas de teledetección

La teledetección es una técnica que permite obtener información de objetos a distancia sin requerir contacto directo. Para lograrlo, es fundamental que exista algún tipo de interacción entre los objetos observados ubicados en la superficie terrestre, marina o en la atmósfera y un sensor instalado en una plataforma (Laura Telenchana, 2023).

2.2.9 Árboles de decisión y Random Forest.

El algoritmo Random Forest, propuesto por Breiman (2001), es un modelo de clasificación no lineal que permite identificar patrones en los datos a partir de la información ingresada. Este algoritmo opera mediante un sistema de “votación” entre múltiples árboles de decisión: cada árbol emite un voto y la clase se asigna en función de la cantidad de votos que recibe cada unidad a clasificar.

Un árbol de decisión, por su parte, representa de manera gráfica las posibles consecuencias de una serie de decisiones interrelacionadas, lo cual facilita la comparación de diversas acciones según sus probabilidades. Se emplea tanto para guiar discusiones informales como para desarrollar algoritmos que calculen de manera matemática la opción más adecuada (Monteith et al., 2006).

Generalmente, un árbol de decisión comienza con un único nodo que se ramifica en diferentes posibles resultados, generando nuevos nodos y otras alternativas que estructuran el árbol. A pesar de su claridad y facilidad de interpretación, los árboles de decisión pueden sufrir sobreajuste, problemas con clases desequilibradas y variabilidad en la generalización de los datos, haciéndolos sensibles a cambios en los mismos (Wang et al., 2025). Esto puede corregirse mediante algoritmos más avanzados que combinan múltiples árboles de decisión, como es el caso de Random Forest, que reduce el sobreajuste y se fortalece frente a la variabilidad de los datos, mejorando así el rendimiento y confiabilidad del modelo (Mu et al., 2024).

2.2.10 Precipitación escorrentía

El método de precipitación-escorrentía es una técnica utilizada en la hidrología para simular y cuantificar la cantidad de agua que, tras un evento de precipitación, se convierte en escorrentía superficial en una cuenca hidrográfica. Este método permite evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca al analizar cómo el agua de lluvia se transforma en escorrentía, infiltración o almacenamiento, dependiendo de factores como el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente y el uso del suelo en la región (Sardoi et al., 2012).

En estudios hidrológicos, como el presente, se utiliza frecuentemente el modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) para aplicar el método de precipitación-escorrentía. Este modelo integra múltiples parámetros de la cuenca, como el número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), para simular la escorrentía generada a partir de una precipitación dada (Bosznay, 1989). La elección del método de precipitación-escorrentía es fundamental en la modelación hidrológica, ya que permite estimar tanto el caudal de pico como los volúmenes de escorrentía asociados a diferentes eventos de lluvia, facilitando el análisis de la disponibilidad hídrica y la gestión de recursos en la cuenca de estudio (Boughton, 1989).

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la Investigación

La investigación es de carácter mixto. En el enfoque cualitativo, se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre los métodos de identificación de cambio y uso de suelo, se recopiló información sobre las características de las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga. En el enfoque cuantitativo, se realizó la recolección, el análisis y la interpretación de resultados obtenidos.

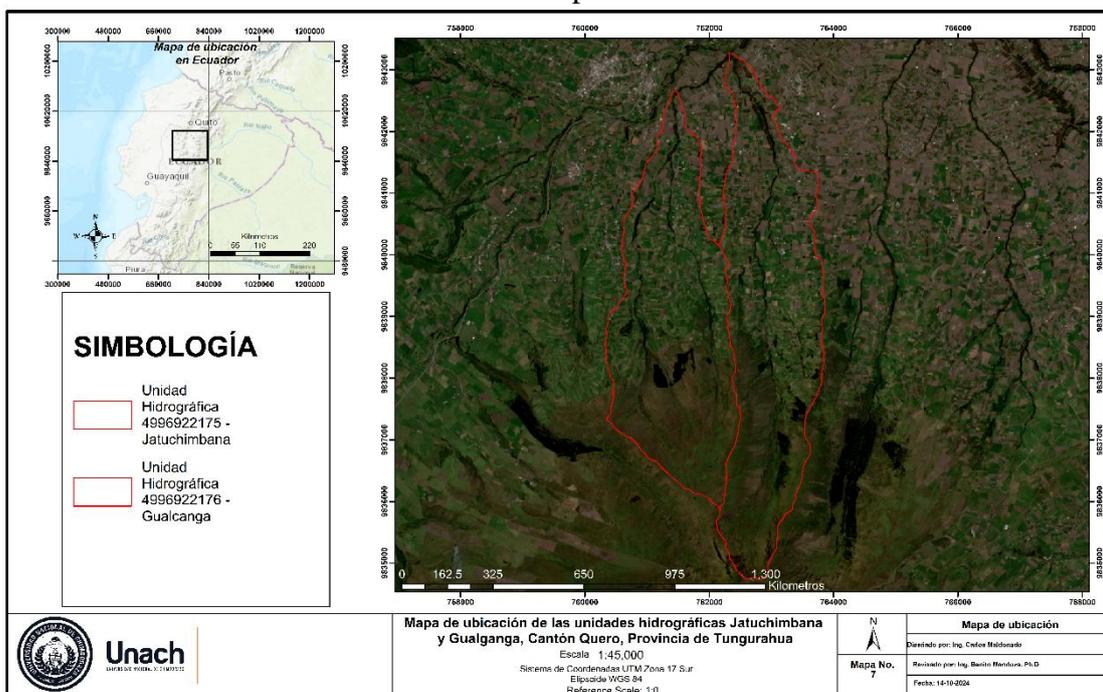
3.2 Diseño de la Investigación

La investigación adoptó un diseño experimental, profundizando en los métodos que utilizan para determinar el cambio de la cobertura y uso de la tierra. Adicionalmente, se empleó un diseño correlacional para comparar los resultados obtenidos del análisis morfométrico, de red y orden de las cuencas pareadas. Este enfoque permitió obtener una variable que determinó la cantidad de agua dentro de las unidades hidrográficas.

3.3 Área de estudio

El área de estudio corresponde a las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga, ubicada en la provincia de Tungurahua, cantón Quero, parroquias Rumipamba y Yanayacu (Figura 1). La unidad hidrográfica Jatunchimbana posee una extensión de 9,668132 Km², la unidad hidrográfica Gualcanga 8,97206 Km² y presenta una temperatura que oscila entre los 8 y 12°C. La cobertura de uso de suelo incluye páramo, bosque, cultivos y área urbana.

Ilustración 1 Mapa de Ubicación



Fuente: Autor

3.4 Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de Datos

El cálculo de geomorfología de las unidades hidrográficas se realizó con las ecuaciones descritas en la fundamentación teórica, mediante la utilización de herramientas geoespaciales como: análisis espacial 3D, hidrología, pendiente, calculadora de superficies y red de drenajes, llenado en la base de datos de un sistema de información geográficas.

3.4.1 Diseño de la muestra

En el artículo de Stephen Stehman (2009) "*Sampling Designs for Accuracy Assessment of Land Cover*", se presentan los diseños de muestreo clave para evaluar la precisión de las clasificaciones de cobertura terrestre. La planificación de un diseño de muestreo requiere la consideración de tres aspectos fundamentales: los objetivos de precisión, los criterios deseables de diseño, y los puntos fuertes y limitaciones de los diseños de muestreo, tanto básicos como complejos, en relación con estos objetivos (Taylor, 2018). Para este estudio, se utilizó un enfoque metodológico basado en los principios propuestos por Stehman, aplicando un diseño de muestreo que incluyó tanto el área de las unidades hidrográficas de Gualcanga como de Jatunchimbana, calculadas mediante el conteo de píxeles.

Dado que los cambios en el área no fueron significativos a lo largo del periodo de estudio, se mantuvo un valor constante para estas unidades hidrográficas. Siguiendo las recomendaciones de Olofsson et al. (2014), se estableció un error estándar objetivo del 5% para la precisión global y de los resultados del proyecto. Además, la distribución de las muestras fue estratificada y equilibrada entre las distintas unidades de análisis para mejorar la representatividad y reducir la varianza del error, conforme a los criterios de precisión y eficacia (Olofsson et al., 2014).

Este enfoque garantiza una evaluación de precisión robusta, proporcionando una base estadística sólida para el análisis de la cobertura terrestre en el área de estudio, lo cual es esencial para la planificación y gestión sostenible del recurso hídrico en las cuencas analizadas (Taylor, 2018).

3.5 Población y Muestra

3.5.1 Puntos de muestreo

Para las dos zonas de estudio, se obtuvo el conteo de píxeles y aplicó la fórmula del tamaño de muestra en la que se empleó un nivel de confianza de 95% y un error de estimación de 5% de tolerancia, que se utiliza para determinar puntos de control necesario para iniciar la clasificación como se muestra a continuación en la Ecuación 1:

$$n = \frac{NZ^2_{\alpha/2}pq}{e^2(N-1) + pqZ^2_{\alpha/2}} \quad (1)$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

$Z^2_{\alpha/2}$ = valor de la distribución normal estándar para un determinado nivel de confianza

N = tamaño de la población

e = error de estimación máximo tolerable

p = proporción de elementos que poseen la característica de interés.

$q = 1 - p$

3.5.2 Puntos de validación

Para establecer los puntos de validación, se realizaron varias salidas de observación a las unidades hidrográficas, seleccionando zonas que han mantenido su cobertura y uso de la tierra sin alteraciones significativas a lo largo del tiempo. Las coordenadas de cada punto se adquirieron mediante GPS utilizando el método de diseño de muestreo (Sampling design) (Tobar-Díaz et al., 2023). Del mismo modo, se emplearon imágenes satelitales para comparar lo visto en campo, como las zonas con menos variaciones en el tiempo.

3.5.3 Procesamiento de datos en Google Earth Engine.

En esta fase, se recopilaron los datos geospaciales necesarios para el proyecto, incluyendo imágenes satelitales y bases de datos de programación. Posteriormente, se realizaron diversas operaciones para preparar y transformar estos datos en información utilizable para el análisis (Nájera De Ferrari et al., 2024).

Dentro de Google Earth Engine (GEE), se dispone de un catálogo de colecciones de imágenes satelitales con correcciones radiométricas y atmosféricas. En este contexto, se seleccionaron la colección ASTER L1T Radiance para el año 2000 y la colección Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A para los periodos de 2010 y 2020, en función de su resolución y corrección atmosférica previa.

Para el análisis, se definieron bandas de predicción en función del tipo de imagen satelital utilizada, seleccionando los puntos de entrenamiento de la muestra, los cuales fueron verificados mediante la colección NICFI basemaps de Planet Labs. Esta empresa opera, desde 2015, una flota de pequeños satélites que capturan imágenes de la Tierra a 2 metros de resolución.

3.5.4 Colección de ASTER L1T Radiance.

El Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión (ASTER) es un sensor de captura de imágenes multiespectrales lanzado a bordo de la nave Terra de la NASA en diciembre de 1999. ASTER permite recolectar datos en 14 bandas espectrales, que abarcan desde el espectro visible hasta el infrarrojo térmico. Cada imagen obtenida cubre un área de 60 x 60 km y, tras ser procesadas por el USGS, estas escenas presentan radiancia calibrada en el sensor, orto-rectificadas y corregidas en función del terreno, con una resolución de 15 metros, como se muestra en la Tabla 1. Esta colección se utilizó para el análisis del periodo decenal correspondiente al año 2000 (Mengistu et al., 2024).

Tabla 1 Catálogo de datos Earth Engine “ASTER L1T Radiance

Nombre	Descripción	Mínimo	Máximo	Resolución	Longitud de onda
B01	VNIR_Banda1 (verde/Amarillo visible)	1	255	15 metros	0,520-0,600 μm
B02	VNIR_Banda 2 (rojo visible)	1	255	15 metros	0,630-0,690 μm
B3N	VNIR_Band3N (Infrarrojo cercano, que apunta al nadir)	1	255	15 metros	0,780-0,860 μm
B04	SWIR_Band4 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	1,600-1,700 μm
B05	SWIR_Band5 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,145-2,185 μm
B06	SWIR_Band6 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,185-2,225 μm
B07	SWIR_Band7 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,235-2,285 μm
B08	SWIR_Band8 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,295-2,365 μm
B09	SWIR_Band9 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,360-2,430 μm
DEM	Modelo de elevación digital del terreno	0	6000	30 metros	-

Fuente: Earth Engine Data Catalog

3.5.5 Colección de Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A.

La colección Sentinel ajusta los datos de las escenas más recientes para alinearlos con el rango de las escenas más antiguas. La misión Sentinel-2 proporciona imágenes multispectrales de alta resolución y amplio alcance, apoyando los estudios de Vigilancia Terrestre del programa Copernicus, que incluyen el monitoreo de la vegetación, el suelo, la cobertura de agua, así como la observación de vías navegables interiores y zonas costeras. A diferencia de ASTER, Sentinel-2 ofrece resoluciones de hasta 10 metros, como se detalla en la Tabla 2. Esta colección se empleó para los periodos decenales de 2010 y 2020 (Domej et al., 2025).

Tabla 2 Catálogo de datos de "H2 Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A

Nombre	Escala	Tamaño de Píxel	Longitud de onda	Descripción
B2	0,0001	10 metros	496,6nm (S2A) / 492,1nm (S2B)	Azul

B3	0,0001	10 metros	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	Verde
B4	0,0001	10 metros	664,5nm (S2A) / 665nm (S2B)	Roja
B5	0,0001	20 metros	703,9nm (S2A) / 703,8nm (S2B)	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B6	0,0001	20 metros	740,2nm (S2A) / 739,1nm (S2B)	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B7	0,0001	20 metros	782,5nm (S2A) / 779,7nm (S2B)	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B8	0,0001	10 metros	835,1nm (S2A) / 833nm (S2B)	NIR
B11	0,0001	20 metros	1613,7nm (S2A) / 1610,4nm (S2B)	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B12	0,0001	20 metros	2202,4nm (S2A) / 2185,7nm (S2B)	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
DEM	Modelo de elevación digital del terreno	0	6000	30 metros

Fuente: Earth Engine Data Catalog.

3.5.6 Clasificación de la cobertura

Los tipos de cobertura utilizados para la detección de cambios se fundamentaron en la cobertura del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), publicada en 2022 (Rengifo Candia, 2024). Esta es una cobertura terrestre de Ecuador se encuentra en libre acceso que ofrece datos con una resolución de 1 metro, que maneja información de Sentinel-1 y Sentinel-2 e incluye once categorías de cobertura terrestre validadas.

En las zonas de estudio se determinó que las clases más representativas, con la aplicación de la colección del MAATE, fueron las mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3 Clases seleccionadas de cobertura terrestre (MATTE).

Valor	Color	Descripción
10	#0a7607	Bosque
20	#edd700	Tierra agropecuaria
30	#da0000	Zona antrópica
40	#544141	Otras tierras
50	#e07b18	Paramo

Fuente: Ministerio de Ambiente, agua y transición ecológica.

3.6 Detección de cambios

3.6.1 Método de clasificación directa

Este método consistió en la combinación de dos imágenes de diferentes periodos temporales dentro de Google Earth Engine, aplicando una clasificación de cambios que utiliza todas las bandas multiespectrales disponibles. En este contexto, las clases representan directamente las modificaciones en los usos del suelo, lo que se traduce en la clasificación de la cobertura definida (Wuyun et al., 2024).

Para llevar a cabo la detección de cambios, se empleó una imagen satelital del año 2000 de la Colección ASTER L1T Radiance, así como una imagen del año 2020 de la Colección Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. Esto permitió identificar las pérdidas y ganancias de los tipos de cobertura a lo largo de dos décadas. La programación correspondiente se implementó en Google Earth Engine.

3.6.2 Random Forest

Random Forest, o bosque aleatorio, es un método que combina múltiples clasificadores basados en árboles, donde cada clasificador se genera mediante un vector aleatorio muestreado independientemente del vector de entrada. Cada árbol emite un voto para la clase más frecuente al clasificar un vector de entrada (Bastarrika et al., 2024).

Este algoritmo se clasifica como un clasificador de conjunto, ya que produce múltiples árboles de decisión, cada uno construido a partir de un subconjunto aleatorio de muestras y variables de entrenamiento (Sawant et al., 2024). Una de sus principales ventajas es su alta precisión en la clasificación (Amin et al., 2024). Cada árbol analiza diferentes porciones de los datos, lo que permite que cada uno se entrene con distintas muestras para abordar el mismo problema. Al combinar los resultados, los errores de unos árboles pueden ser compensados por los de otros, resultando en un desempeño global mejorado (Tesfaye et al., 2024).

3.6.3 Árbol de decisión

Utilizando la biblioteca “ee.Classifier”, que incluye árboles de decisión en JavaScript, se desarrolló un clasificador basado en árboles de decisión aplicado a las imágenes satelitales de las zonas de estudio. Se generó un clasificador que permite categorizar la imagen en cuatro clases específicas para las unidades hidrográficas: 0 (Bosque), 1 (Tierra agropecuaria), 2 (Páramo), 3 (Zona antrópica) y 4 (Otras tierras).

Para el clasificador de árbol de decisión, se realizaron 50 divisiones, lo que aumenta la precisión del modelo al permitir la captura de patrones más detallados en los datos de entrenamiento.

3.7 Validación de la prisión de datos obtenidos

3.7.1 Evaluación de fiabilidad

Es esencial evaluar la fiabilidad de los resultados obtenidos, lo que requiere el uso de una fuente de validación veraz e independiente para garantizar la precisión de los cambios identificados. En este estudio, se evaluaron los usos del suelo en diferentes fechas, y la variación en la fiabilidad entre ambas evaluaciones se calculó mediante la multiplicación de las fiabilidades de cada evaluación individual (Song et al., 2024).

3.7.2 Índice Kappa

El coeficiente de concordancia kappa es un indicador que expresa la precisión de la clasificación de imágenes empleada para generar un mapa temático. Las razones principales para seleccionar el coeficiente kappa como medida de precisión en la clasificación radican en su capacidad para corregir el acuerdo aleatorio, así como en su adecuación para las escalas de interpretación. Esto permite realizar estimaciones tanto específicas por clase como generales sobre la precisión del modelo (Vergni et al., 2021).

Se aplicó una notación similar a la de Cohen (1960), donde el coeficiente kappa (κ), se estima a partir de la ecuación 2:

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (2)$$

Para la determinación del coeficiente kappa existe la estimación del nivel de concordancia que ocurre al azar. Para la matriz de confusión, la proporción de concordancia (P_o) se estima a partir de la ecuación 3:

$$P_o = \frac{a+d}{n} \quad (3)$$

El coeficiente kappa de Cohen se basa en el análisis simple de los valores marginales de fila y columna (Tobar-Díaz et al., 2023). Con eso se puede obtener la proporción de concordancia esperada debido al azar P_e en la ecuación 4:

$$P_e = \left(\left(\frac{a+c}{n} \right) \left(\frac{a+b}{n} \right) \right) + \left(\left(\frac{b+d}{n} \right) \left(\frac{c+d}{n} \right) \right) \quad (4)$$

Para representar la precisión por clase, se estima el coeficiente kappa condicional (Eugenio et al., 2020). Para la clase i , que con la etiqueta + o -, puede estimarse a partir de la ecuación 5:

$$\kappa_i = \frac{nn_{ii} - n_i \times n_i}{nn_i - n_i \times n_i} \quad (5)$$

La varianza de kappa (Calsin et al., 2021) puede expresarse en términos del error estándar, σ_k , que es la raíz cuadrada de la varianza (ecuación 8), en las que se aplican también las ecuaciones 6 y 7 con la Tabla 4.

$$P_o = \sum_{i=1}^m P_{ii} \quad (6)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^m P_i \times P_{.i} \quad (7)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{(1 - P_e)\sqrt{n}} \sqrt{P_e + P_e^2 - \sum_{i=1}^m P_i \times P_{.i}(P_i + P_{.i})}$$

(8)

3.7.3 Matriz de confusión

La matriz de confusión se utiliza ampliamente en la evaluación de la precisión de la clasificación. En todo momento la muestra de los casos utilizados para formar la matriz de confusión se adquirió por medio del muestreo aleatorio (Tobar-Díaz et al., 2023).

Tabla 4. Matriz de confusión para multiclases.

<i>Clase</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>m</i>	Σ
<i>1</i>	p_{11}	p_{12}	p_{1m}	$p_{1.}$
<i>2</i>	p_{21}	p_{22}	p_{2m}	$p_{2.}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	p_{m1}	p_{m2}	p_{mm}	$p_{m.}$
Σ	$p_{.1}$	$p_{.2}$	$p_{.m}$	1

Fuente: Cohen (1960).

El valor del coeficiente puede variar de 0 a 1, es decir, entre más cercano este a 1, la concordancia de los dos métodos es alta. Este índice categoriza en seis clases (Tabla 5) y de acuerdo con esta clasificación se puede rechazar o aceptar la nueva clasificación a evaluar (Ayala Izurieta et al., 2022).

Tabla 5. Valoración del índice Kappa.

Coefficiente Kappa	Fuerza de concordancia
0, 00	Pobre
0,01 – 0,20	Leve
0,21- 0,40	Aceptable
0,41- 0,60	Moderada
0,61- 0,80	Considerable
0,81- 1,00	Casi perfecta

Fuente: Landis y Kotch (1977).

3.8 Velocidad de cambios

3.8.1 Evaluación de la velocidad de cambios de uso de la tierra

Para la evaluación de la velocidad de degradación de los cambios de uso de la tierra, se utilizó la fórmula adaptada de FAO (1984) y Ortiz-Solorio et al. (1994) por medio de las Ecuaciones 9 y 10; e indicadores para cada clase mostrados en la Tabla 6 (Ramos et al., 2004).

$$ID = \frac{(\% \text{ de US del último año} - \% \text{ del US del año anterior})}{\% \text{ de US del último año}} \times 100$$

(9)

$$ID \text{ en } \% \text{ por año} = \frac{ID}{\text{Número de años del periodo evaluado}}$$

(10)

Donde:

ID = incremento de la degradación

US = uso del suelo.

Tabla 6. Intervalos de clases para evaluar la velocidad de cambios de uso del suelo.

Intervalo	Clase
< 0,01	Recuperación (R)
0,0	Nula (N)
0,0 – 2,49	Ligera (L)
2,5 – 4,99	Moderada (M)
5,0 – 7,49	Severa (S)
> 7,5	Muy Severa (MS)

Fuente: FAO (1984).

1. Recuperación: Hay un aumento en la extensión de la superficie de uso del suelo.
2. Nula: La superficie de uso del suelo permanece sin cambios.
3. Ligero: Existe un pequeño efecto perjudicial.
4. Moderado: Los cambios representan un efecto perjudicial notable.
5. Severo: Los cambios tendrán un impacto significativo en la disminución de la superficie de uso del suelo.

6. Muy severo: El uso de la superficie de la tierra se vuelve impracticable o antieconómico (FAO, 1984).

3.9 Determinar la capacidad de campo (CN) y (S)

3.9.1 Cálculo y asignación de número de curva (CN)

Los valores de CN se determinarán a través del método de NRCS, que es una técnica que ayuda a conocer la infiltración dependiendo de las propiedades de escorrentía del terreno y el procedimiento considera el grupo hidrológico del suelo (HGS), la condición de humedad previa, el uso del suelo y el tratamiento de la cuenca hidrográfica (Morales-Méndez et al., 2022) y se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$CN = \frac{25400}{254+S} \quad (11)$$

Donde:

CN= número de curva

S= Capacidad de campo

3.9.2 Capacidad de campo o potencial máximo de retención (S)

Previo el cálculo de los valores de CN se determinará los valores de la capacidad de campo o potencial máximo de retención (S), que es la cantidad de agua que contiene el suelo saturado después del lapso de 48 horas de drenaje (Castejón-Villalobos et al., 2023). Relacionando así la relación del suelo y las condiciones de cobertura dentro de las microcuencas a través de los valores de CN y se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (12)$$

Donde:

S= Capacidad de campo

CN= Número de curva

3.9.3 Abstracción Inicial

Estas fórmulas son esenciales para aplicar el método del Número de Curva en la estimación de la escorrentía en una cuenca hidrográfica a partir de eventos de precipitación, lo cual es útil en la modelación hidrológica y en estudios de respuesta de cuencas ante eventos de lluvia.

$$I_a = 0,2 * S \quad (14)$$

3.9.4 Modelación la relación de precipitación-escorrentía a través de Hec-Hms

Modelación para obtener la relación de precipitación - escorrentía

Finalmente, se realizará el modelamiento con la ayuda de ArcGIS y el programa HEC HMS donde permitirá analizar y simular procesos de conversión de la precipitación que se obtiene a través de los datos de las estaciones meteorológicas seleccionadas para la zona de estudio y transformar la precipitación a escorrentía (Henrique et al., 2024). El modelado comienza con los cálculos previos de los valores iniciales del número de curva y almacenamiento máximo de la microcuenca, como datos iniciales para que modele el programa HEC-HMS. Así se obtendrá los caudales promedios que se obtienen en la microcuenca de estudio respecto a la precipitación y las pérdidas que se den en la misma (Abdelkebir et al., 2024).

$$P_{sb}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n P_{em}(i,j)w(j)}{\sum_{j=1}^n w(j)} \quad (15)$$

Donde:

$P_{sb}(i)$ = Precipitación media uniforme sobre una subcuenca de intervalo i

$P_{em}(i,j)$ = precipitación registrada en el intervalo i y estación j

$w(j)$ = Área de influencia de la estación J en la microcuenca

n = número de estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca

3.10 Método SCS Hidrograma Unitario

El método del hidrograma unitario SCS es ampliamente utilizado para transformar el escurrimiento en un hidrograma de caudal en función del tiempo. A continuación, se detallan las fórmulas clave utilizadas para generar el hidrograma unitario SCS (Sardoii et al., 2012).

3.10.1 Tiempo de pico T_p

El tiempo de pico, o tiempo hasta el pico del hidrograma unitario, se calcula con la fórmula:

$$T_p = 0,133 * T_c \quad (16)$$

Donde:

T_p = es el tiempo al pico del hidrograma unitario (horas),

T_c = es el tiempo de concentración de la cuenca (horas).

Caudal pico Q_p

El caudal pico del hidrograma unitario es:

$$Q_p = \frac{484 * A}{T_p} \quad (17)$$

Donde:

Q_p = es el caudal máximo (m^3/s),

A = es el área de la cuenca (km^2),

T_p = es el tiempo al pico del hidrograma (horas).

3.10.2 Forma del hidrograma unitario

El hidrograma unitario SCS adopta una forma estandarizada en la que la duración de la subida y la bajada se distribuyen simétricamente alrededor del tiempo pico T_p (Chu & Steinman, 2009). Se asume que:

La parte de subida ocurre en un 40% del tiempo total,

La parte de bajada ocupa el 60% del tiempo restante.

3.10.3 Distribución del hidrograma en intervalos de tiempo

Para construir el hidrograma unitario SCS en intervalos de tiempo específicos, se utilizan los valores de tiempo y caudal proporcionales a partir de tablas estandarizadas del SCS que definen los porcentajes de caudal en función del tiempo (Halwatura & Najim, 2013).

Capítulo 4**Análisis y Discusión de los Resultados****4.1 Análisis Descriptivo de los Resultados****4.1.1 Unidad hidrográfica Jatuchimbana**

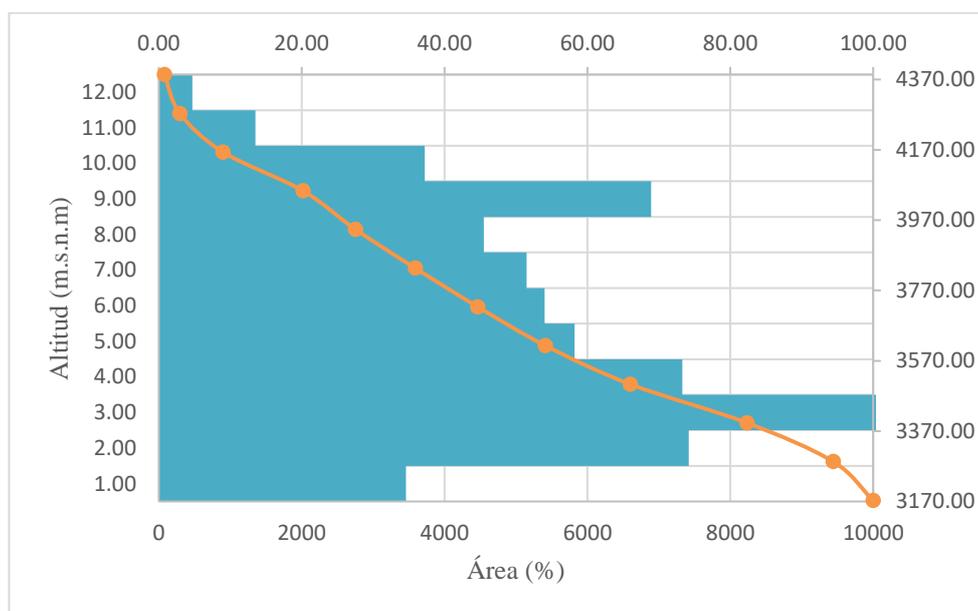
El análisis geomorfológico de la microcuenca (Tabla 7), ayuda a comprender la influencia que tiene su forma, relieve y red de drenajes de la unidad hidrográfica con las variaciones climáticas, precipitaciones, flora, fauna, entre otras; de tal manera conocer la influencia que tiene la relación precipitación escorrentía que tiene la cuenca. La unidad hidrográfica Jatuchimbana muestra un área es de 9,19 km^2 , es decir es una cuenca de tamaño pequeña, la longitud media de la cuenca es de 8,19 km; su índice de compacidad es de 1,46, por lo tanto, es una cuenca regular, esto nos quiere decir que el tiempo de respuesta ante una precipitación va a ser bueno. El factor de forma es de 0,13 por lo cual es una cuenca tiene una buena respuesta en eventos de fuertes precipitaciones. La pendiente media de la cuenca es de 35 % por tanto es de tipo escarpado, esto se da por sus pendientes pronunciadas en la parte más alta del cerro Igualata. La relación de elongación es de 0,41 esto indica que la cuenca tiene fuertes relieves y como se puede observar con la pendiente anteriormente mencionada.

Tabla 7 Parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica Jatunchimbana

Nombre	Sigla	Unidad	Valores
Área	A	km ²	9,16
Perímetro	P	km	16,26
Índice de compacidad	Ic	adimensional	1,46750
Ancho medio	B	adimensional	1,09537
Longitud media	Lc	km	8,1909
Factor de forma	Ff	adimensional	0,1337
Relación de elongación	Re	adimensional	0,4126
Relación de circularidad	Rci	adimensional	0,4640
Área sobre la curva	AS	km ²	1933471
Área bajo curva	Ab	km ²	174028
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	35,29
Longitud del cauce principal	Lc	km	8,19
Orden de la red hídrica	Or	adimensional	3
Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	Lt	km	16,662
Densidad de drenaje	Dd	km-1	1,819
Numero de canales	Nt	adimensional	17
Densidad hidrográfica	Dh	km-1	1,856
Altura Máxima rio	Hmax	msnm	4259
Altura mínima del rio	Hmin	msnm	3196
Pendiente media del cauce principal	Sm	adimensional	129,7
Tiempo de concentración	Tc	h	0,327
Tiempo de Retardo	Tr	h	17,97
Relación hipsométrica	Rh	%	10,11

Fuente: Autor

La curva hipsométrica (Ilustración 2) muestra que la unidad hidrográfica se encuentra en una etapa de madurez y equilibrio, con una curva hipsométrica tipo B, todo esto está relacionado con ser una cuenca de pie de montaña al ser parte del cerro Igualata, el cual contiene una pendiente fuertemente accidentada.

Ilustración 2 Curva hipsométrica de la unidad hidrográfica Jatunchimbana

Fuente: Autor

4.1.2 Unidad hidrográfica Gualcanga

El análisis geomorfológico de la microcuenca (Tabla 7), ayuda a comprender la influencia que tiene su forma, relieve y red de drenajes de la unidad hidrográfica con las variaciones climáticas, precipitaciones, flora, fauna, entre otras; de tal manera conocer la influencia que tiene la relación precipitación escorrentía que tiene la cuenca. La unidad hidrográfica Gualcanga muestra un área es de 9,64 km², es decir es una cuenca de tamaño pequeña, la longitud media de la cuenca es de 9,79 km; su índice de compacidad es de 1,76, por lo tanto, es una cuenca regular, esto nos quiere decir que el tiempo de respuesta ante una precipitación va a ser bueno. El factor de forma es de 0,10 por lo cual es una cuenca tiene una buena respuesta en eventos de fuertes precipitaciones. La pendiente media de la cuenca es de 24 % por tanto es de tipo escarpado, esto se da por sus pendientes pronunciadas en la parte más alta del cerro Igualata. La relación de elongación es de 0,35 esto indica que la cuenca tiene fuertes relieves y como se puede observar con la pendiente anteriormente mencionada.

Tabla 8 Parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica Gualcanga

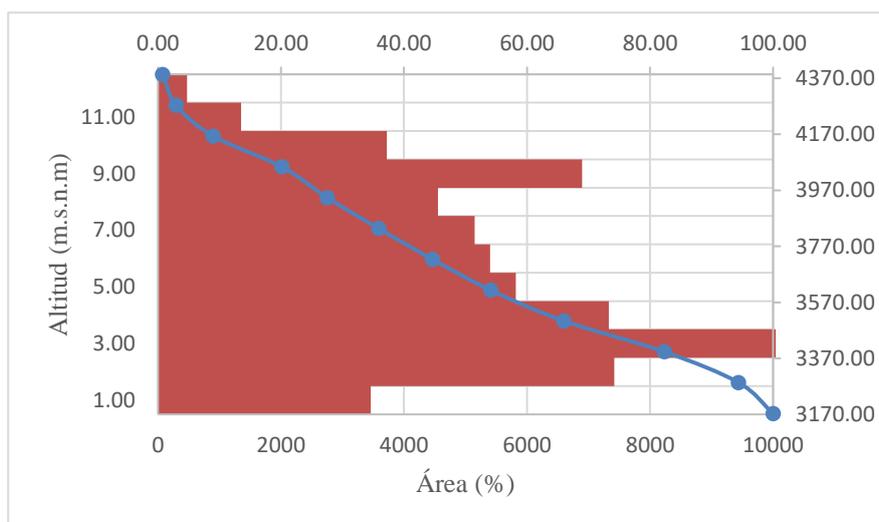
Nombre	Sigla	Unidad	Valores
Área	A	km ²	9,64
Perímetro	P	km	19,41
Índice de compacidad	Ic	adimensional	1,76358
Ancho medio	B	adimensional	0,98721
Longitud media	Lc	km	9,7934

Factor de forma	Ff	adimensional	0,1008
Relación de elongación	Re	adimensional	0,3583
Relación de circularidad	Rci	adimensional	0,3213
Área sobre la curva	AS	km ²	2011396
Área bajo curva	Ab	km ²	180603
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	24,77
Longitud del cauce principal	Lc	km	9,79
Orden de la red hídrica	Or	adimensional	3
Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	Lt	km	16,6
Densidad de drenaje	Dd	km-1	1,72
Numero de canales	Nt	adimensional	25
Densidad hidrográfica	Dh	km-1	2,59
Altura Máxima rio	Hmax	msnm	4439
Altura mínima del rio	Hmin	msnm	3118
Pendiente media del cauce principal	Sm	adimensional	134,8
Tiempo de concentración	Tc	h	0,34
Tiempo de Retardo	Tr	h	15,49
Relación hipsométrica	Rh	%	11,13

Fuente: Autor

La curva hipsométrica (Ilustración 3) muestra que la unidad hidrográfica se encuentra en una etapa de madurez y equilibrio, con una curva hipsométrica tipo B, todo esto está relacionado con ser una cuenca de pie de montaña al ser parte del cerro Igualata, el cual contiene una pendiente fuertemente accidentada.

Ilustración 3 Parámetros geomorfológicos de la unidad hidrográfica Gualcanga



Fuente: Autor

4.2 Cuantificación de cambios

En ambas zonas de estudio se asignaron porcentajes respecto a la predominancia que presenta cada clase en base a su área total, al igual que el número de puntos de validación como muestran las Tabla 9. Las entradas necesarias son las áreas del mapa y la precisión esperada del usuario para la muestra, que se introducen en las celdas resaltadas con negrita. Las celdas sobrantes se calculan con la aplicación de las fórmulas de Olofsson et al. (2014).

Tabla 9 Resultados de puntos de verificación para las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga

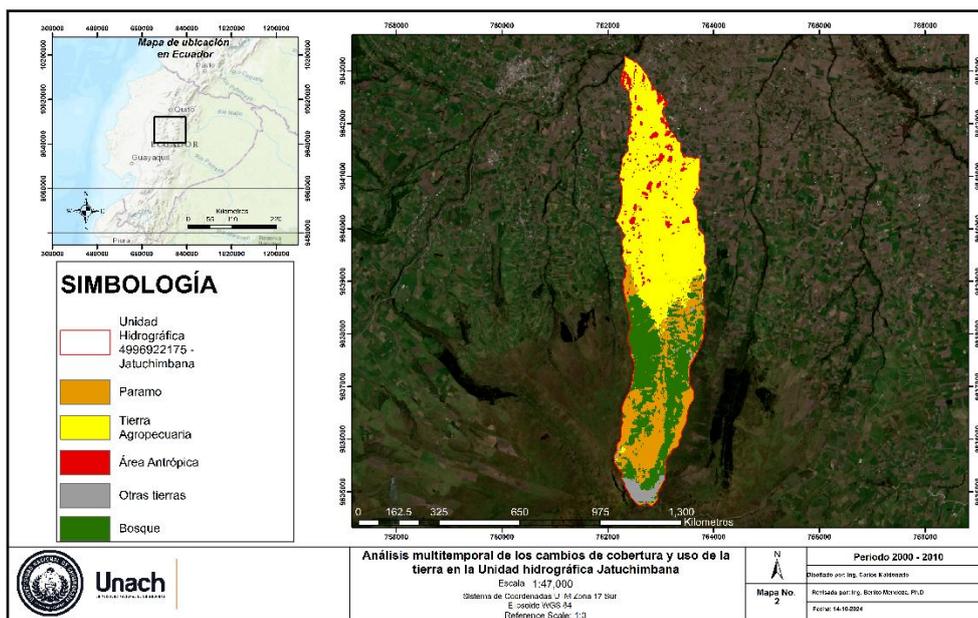
	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica		Otras tierras	Paramo	Total
Área en píxeles	20942	94293	2129	1827	70721		189912
Wi (Proporción cartografiada)	0,10	0,30	0,20	0,10	0,30		1,00
Ui (Precisión esperada del usuario)	0,10	0,30	0,20	0,10	0,30		
Si (Desviación estándar)	0,30	0,46	0,40	0,30	0,46		
Wi*Si	0,03	0,19	0,08	0,03	0,137		0,41
					SE precisión general		0,05
					Número total de muestras		69

Fuente: Autor

4.2.1 Validación de la precisión de datos obtenidos periodo 2000

La ilustración 4 presenta un panorama de la unidad hidrográfica Jatunchimbana en el año 2000, A simple vista, resalta la presencia predominante de la clase Tierra Agropecuaria en las partes bajas y centrales de la cuenca. Esta distribución se explica por el potencial agrícola que caracterizaba la región, con una variedad de cultivos que incluían maíz, tomate, papas, trigo, cebolla y col, tanto al aire libre como en invernaderos. Asimismo, se observa la presencia significativa de la clase Bosque, dado que tenía una fuerte presencia el proyecto Socio Bosque, el cual generaba incentivos económicos a la población que cuida el bosque en el siglo XX. La clase Paramo también se destaca, por la falta de este en el siglo XX. Por último, la presencia de la clase Área Antrópica es mínima lo que evidencia la poca influencia de actividades antrópicas

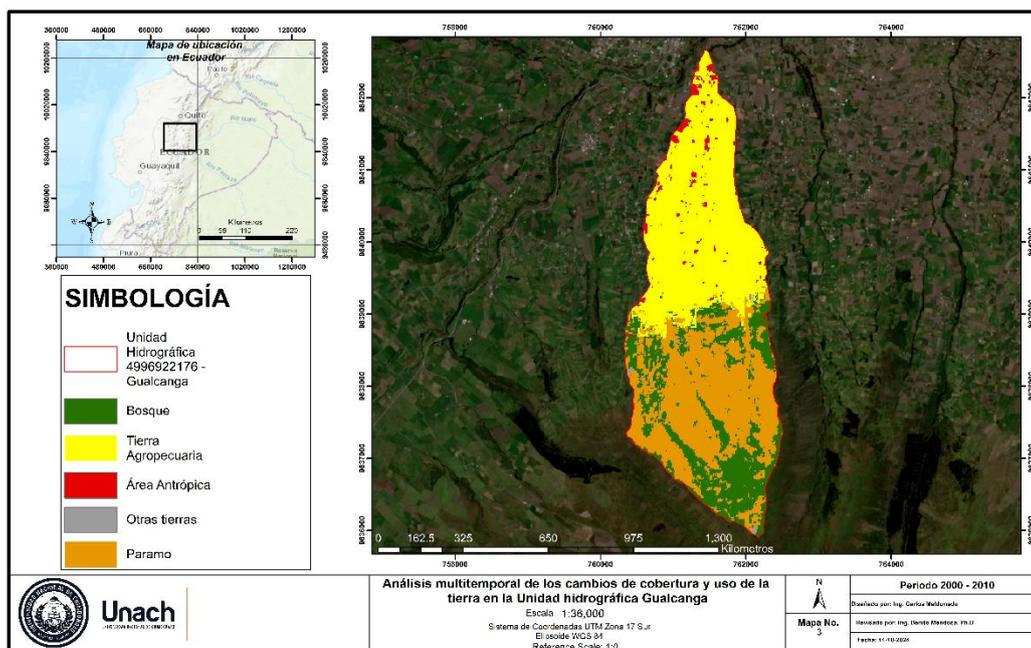
Ilustración 4 Mapa de la unidad hidrográfica Jatuchimbana periodo 2000-2010



Fuente: Autor

La ilustración 5 un panorama de todas las clases presentes en la unidad hidrográfica Gualcanga en el año 2000, Las clases que predominan son Paramo y Tierra Agropecuaria, a diferencia de la ilustración 4, podemos ver con mayor apreciación la cobertura de Bosque frente a paramo. Por otro lado, la clase Área Antrópica abarca una mínima extensión de la parroquia y la clase otras tierras no presentan significancia.

Ilustración 5 Mapa de la unidad hidrográfica Gualcanga periodo 2000-2010



Fuente: Autor

Tabla 10 Matriz de confusión periodo 2000-2010

Clases	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras tierras	Paramo	Total	Error de Comisión
Bosque	20	0	0	0	0	20	0
Tierra Agropecuaria	0	19	1	0	0	20	1
Área Antrópica	0	0	20	0	0	20	0
Otras tierras	0	0	0	20	0	20	0
Paramo	4	0	0	0	16	20	4
Total	24	19	21	20	16	100	
Error de Omisión	4	0	1	0	0		

Fuente: Autor

Tabla 11 Índice Kappa periodo 2000-2010

Clases	Error de Comisión	Error de Omisión	Precisión global (PO)	Precisión global (%)	índice k	índice k (%)
Bosque	0	4				
Tierra Agropecuaria	1	0				
Área Antrópica	0	1	0,95	95%	0,93	93%
Otras tierras	0	0				
Paramo	4	0				

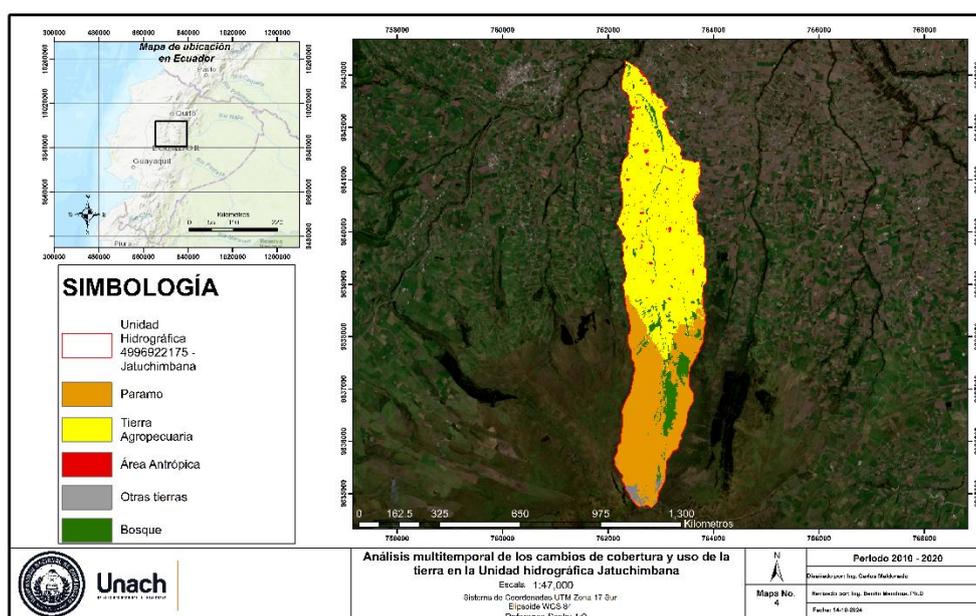
Fuente: Autor

Como muestra la Tabla 11, la clasificación del año 2000 en las dos unidades hidrográficas presentó una precisión global del 95% y un índice Kappa de 93% la cual representa una muy buena concordancia. La clase Tierra Agropecuaria presenta un error de comisión de 1% y no muestra error de omisión, la clase Otras Tierra no presenta errores de comisión ni omisión; la clase de paramo presenta un error de comisión de 4%, mientras que el bosque presenta el mismo porcentaje, pero en error de omisión, finalmente la clase la clase de área antrópica muestra un error de omisión de 1%. Cabe destacar, que debido a la resolución de las imágenes satelitales ASTER, disminuye la precisión y percepción de píxel por parte del operador, esto se da debido a la combinación diferente de bandas. Además, en la Tabla 10 se presentan los errores o confusiones que generó el programa o el operador en cada clase donde se observan 5 errores totales de comisión; 1 puntos de la clase Tierra Agropecuaria se encuentran en Área Antrópica, 4 puntos de bosque se encuentran en paramo, mientras que las otras tres clases no presentan errores.

4.2.2 Validación de la precisión de datos obtenidos periodo 2010

Como se observa en la ilustración 6, el cual representa la realidad de la unidad hidrográfica Jatunchimbana para el año 2010, evidencia un incremento de la clase paramo esto se debe a la pérdida de Bosque en este año, por el término del programa socio Bosque. Se nota también un aumento de zonas edificadas correspondientes a la clase Área antrópica, y un decremento de las otras clases, especialmente en la clase otras tierras, la cual disminuyó respecto a la ilustración 4. Cabe destacar, que en este mapa se observa un cambio considerable en la calidad de imagen, esto debido a la resolución que presentan las imágenes SENTINEL-2 (10 metros), como se mencionó anteriormente, lo que da lugar a una mejor percepción de los píxeles.

Ilustración 6 Mapa de la unidad hidrográfica Jatunchimbana periodo 2010-2020



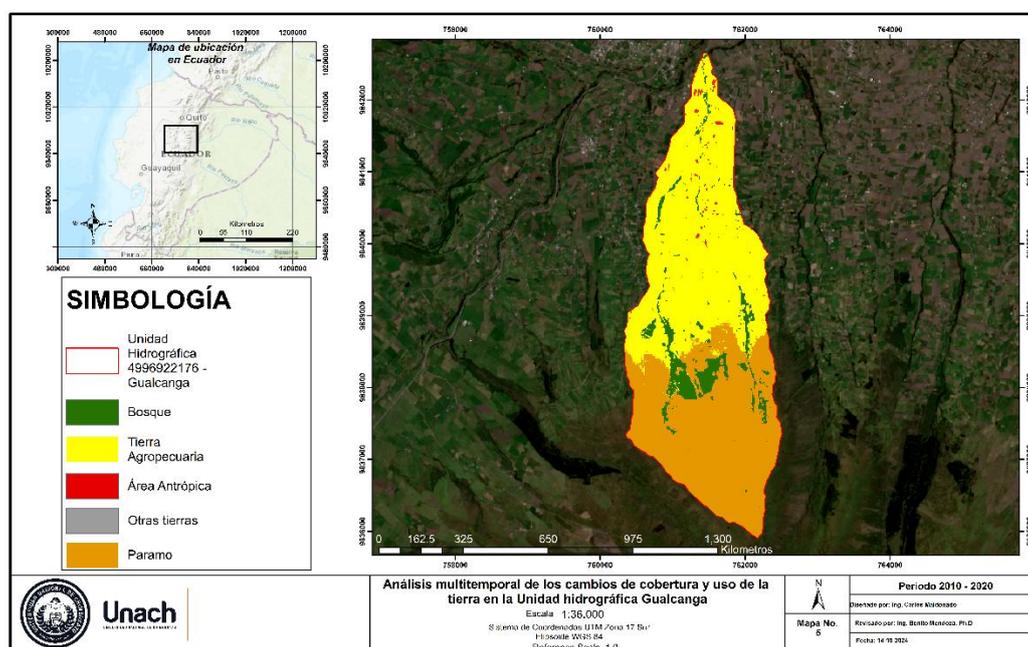
Fuente: Autor

La ilustración 7 representa la realidad de la unidad hidrográfica Gualcanga en el año 2010 donde se observa un desplazamiento de la clase Páramo, esto debido a la pérdida de la cobertura Bosque, esto debido a un cambio en la ideología de la comunidad y a una restauración del Páramo en las partes altas. Además, a diferencia del periodo anterior, en este periodo la clase Área antrópica presenta una disminución considerable ya que se vio reemplazada por la clase Tierra agropecuaria, esto se debe a un error en el sensor anterior, ya que el sensor Aster tiene diferentes bandas y colores que hacer ver la variación de los anteriores periodos.

En este mapa, el cambio de resolución de imagen es notoria debido al uso de imágenes satelitales SENTINEL-2. Consecuentemente, el algoritmo Random Forest identifica de

mejor manera cada clase, al incrementar la precisión del operador y disminuir la probabilidad de error al momento de la clasificación supervisada.

Ilustración 7 Mapa de la unidad hidrográfica Gualcanga periodo 2010-2020



Fuente: Autor

Tabla 12 Matriz de confusión periodo 2010-2020

Clases	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras tierras	Paramo	Total	Error de Comisión
Bosque	10	0	0	9	1	20	10
Tierra Agropecuaria	0	20	0	0	0	20	0
Área Antrópica	0	2	18	0	0	20	2
Otras tierras	0	0	0	20	0	20	0
Paramo	0	0	0	0	20	20	0
Total	10	22	18	29	21	100	
Error de Omisión	0	2	0	9	1		

Fuente: Autor

Tabla 13 Índice Kappa periodo 2000-2010

Clases	Error de Comisión	Error de Omisión	Precisión global (PO)	Precisión global (%)	índice k	índice k (%)
Bosque	10	0				
Tierra Agropecuaria	0	2				
Área Antrópica	2	0	0,87	88%	0,85	85%
Otras tierras	0	9				
Paramo	0	1				

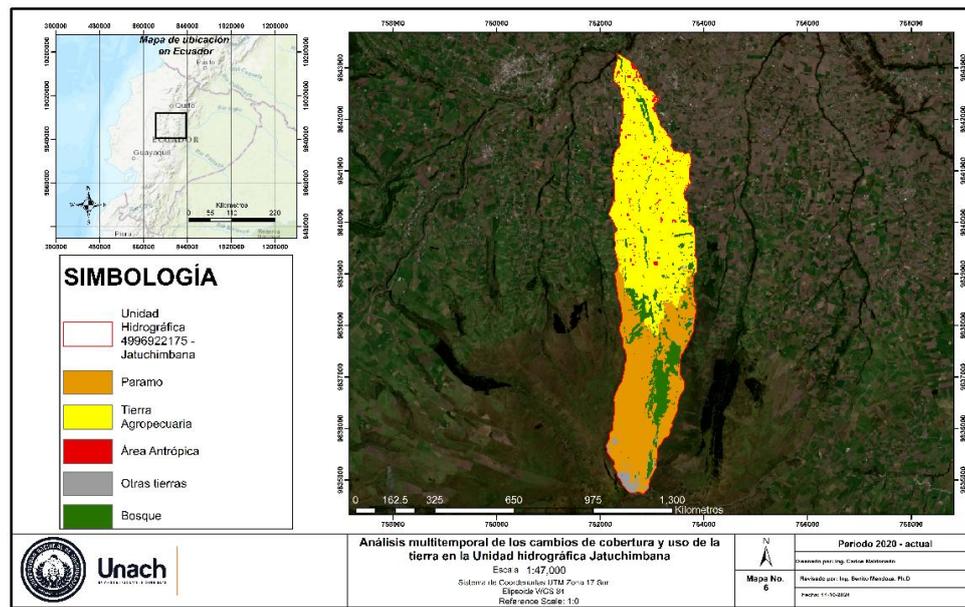
Fuente: Autor

Según se observa en la Tabla 13, la clasificación del periodo decenal 2010 de las unidades hidrográficas, muestra una precisión global del 88% y un índice Kappa del 85%, lo que refleja una concordancia casi perfecta. Se observa que la clase Bosque tiene un error de comisión de 10%; la clase Tierra Agropecuaria muestran un error de omisión del 2%, mientras que la clase Otras tierras presenta un error de omisión del 9%, mientras que la clase Área antrópica tiene un error de comisión de 2% y finalmente la clase Paramo tiene un error de omisión de 1%. Como se puede evidenciar los errores con mayor frecuencia es el bosque y el páramo ya que en este periodo existe una pérdida de la clase bosque por la reforestación del Páramo en la zona alta de las unidades hidrográficas.

4.2.3 Validación de la precisión de datos obtenidos periodo 2020

La Ilustración 8 representa las clases presentes en la unidad hidrográfica Jatunchimbana en el año 2020, se evidencia un ligero aumento en las clases Bosque y Construido, una disminución en la clase Paramo. Estas alteraciones, se deben al crecimiento urbano y al expansionismo agrícola lo que muestra un inadecuado control territorial.

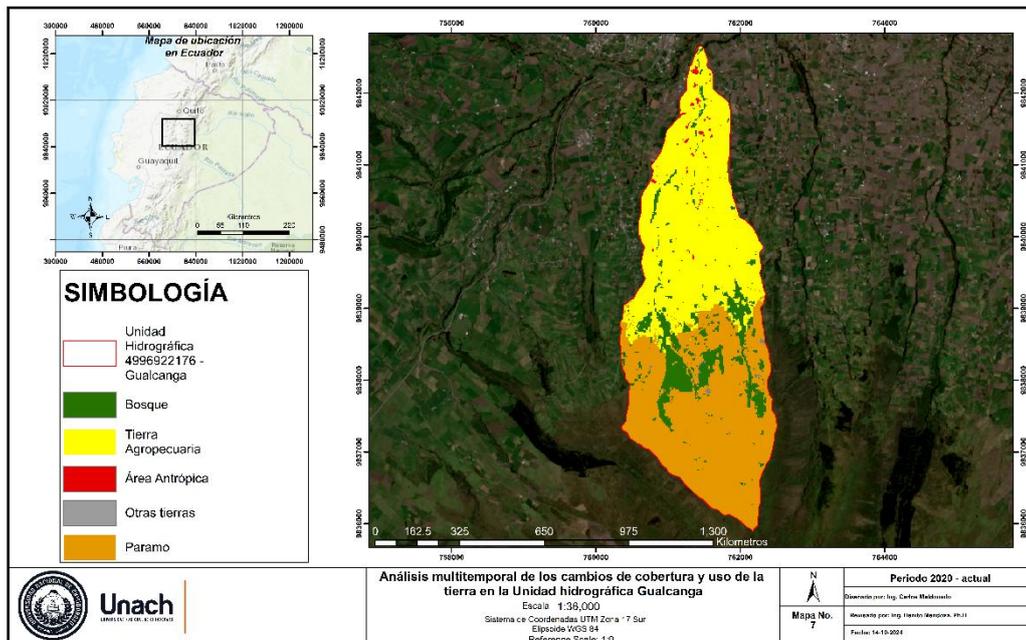
Ilustración 8 Mapa de la unidad hidrográfica Jatunchimbana periodo 2020-actual



Fuente: Autor

En la Ilustración 9 se observó que la clase Bosque creció en relación con el 2010, mientras que la clase Paramo redujo considerablemente. Así mismo, las clases Área antrópica aumento en proporción en cantidad de píxeles, sin embargo, se evidencian errores por parte del programa en la detección de vías y caminos los cuales se perciben como suelo desnudo o vegetación escasa.

Ilustración 9 Mapa de la unidad hidrográfica Gualcanga periodo 2020-actual



Fuente: Autor

Tabla 14 Matriz de confusión periodo 2020-actual

Clases	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras tierras	Paramo	Total	Error de Comisión
Bosque	20	0	0	0	0	20	0
Tierra Agropecuaria	0	20	0	0	0	20	0
Área Antrópica	0	10	10	0	0	20	10
Otras tierras	1	0	0	19	0	20	1
Paramo	0	0	0	0	20	20	0
Total	21	30	10	19	20	100	
Error de Omisión	1	10	0	0	0		

Fuente: Autor

Tabla 15 Índice Kappa periodo 2010-actual

Clases	Error de Comisión	Error de Omisión	Precisión global (PO)	Precisión global (%)	índice k	índice k (%)
Bosque	0	1				
Tierra Agropecuaria	0	10				
Área Antrópica	10	0	0,89	89%	0,87	87%
Otras tierras	1	0				
Paramo	0	0				

Fuente: Autor

La Tabla 15 muestra la precisión global de la clasificación en las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga en el periodo 2020, con un valor de 89% y un índice Kappa de 87% que representa una muy buena concordancia. La clase Paramo no muestra errores de comisión y omisión, mientras que las clases Tierra agropecuaria y área antrópica muestran errores de comisión y omisión de 10% respectivamente. Así como las clases Bosque y Otras tierras tienen de igual forma 1% en error de comisión y omisión. Esto quiere decir que las clases con mayor porcentaje de confusión son tierra agropecuaria con área antrópica, eso se da debido al satélite y la reflectancia que puede tener una clase de otra.

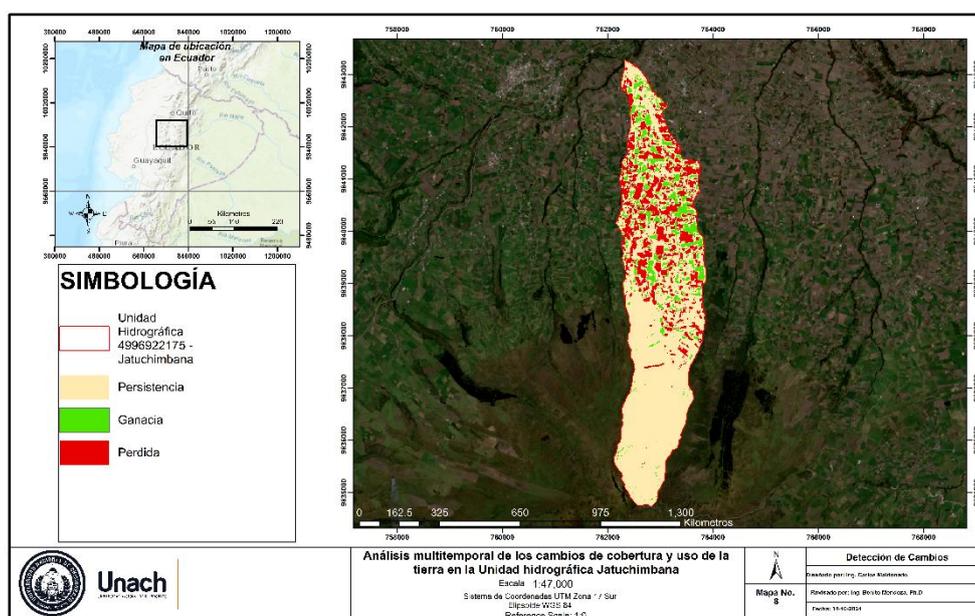
4.3 Detección de cambios

4.3.1 Detección de cambios Quebada Jatuchimbana

En la ilustración 10 se visualizan tres categorías las cuales representan la clasificación de detección de cambios, las cuales son: Persistencia, Pérdida y Ganancia. Para la obtención de

este mapa se realizó el análisis de dos distintos periodos decenales (2000 y 2020), en los que se puede observar que hasta el año 2020 presenta mayor terreno perdido con respecto al ganado esto respecto a las áreas verdes que existan en la zona, es por ello por lo que el terreno perdido se centra en las clases de Área antrópica y Tierra agrícola. La clase Ganancia se presenta en ambas categorías, pero mínimamente. La clase Persistencia es la que más predomina, seguida de la clase Perdida.

Ilustración 10 Mapa de detección de cambios de la unidad hidrográfica Jatunchimbana

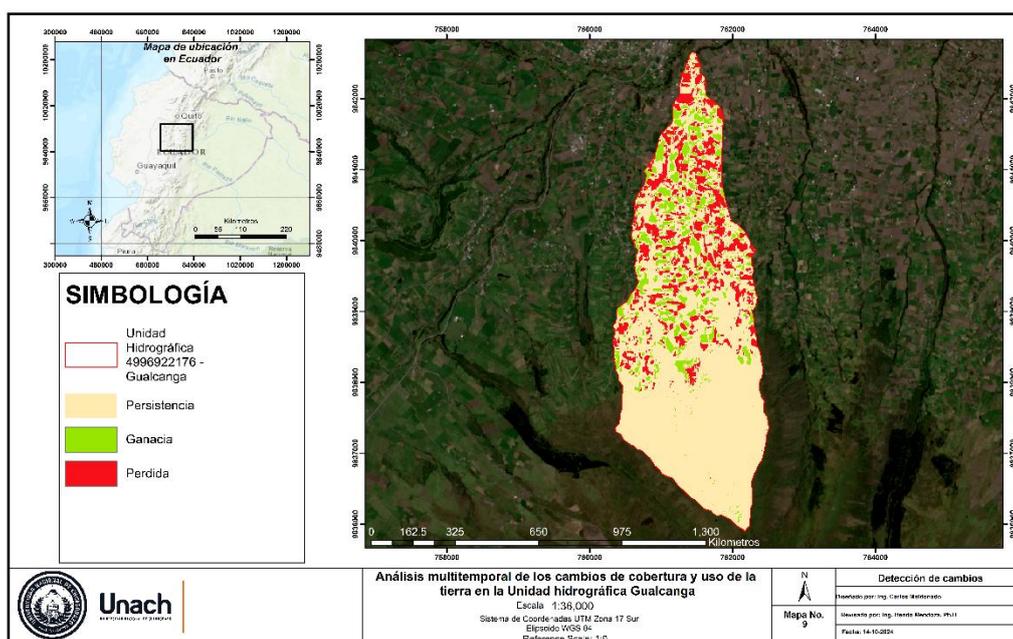


Fuente: Autor

4.3.2 Detección de cambios Quebada Gualcanga

Para la obtención de la ilustración 11 se realizó el análisis entre distintos periodos decenales (2000 al 2020), en los que se muestra la representación de la detección de cambios en función a 3 clases: Persistencias, Ganancias y Pérdidas. Con esta se denota la predominancia de la persistencia al cambio, al igual que zonas que ganaron y perdieron territorio. Cabe destacar, que el análisis de detección de cambios se basa en la determinación de alteraciones en zonas verdes, es decir, las clases TC y CA

Ilustración 11 Mapa de detección de cambios de la unidad hidrográfica Gualcanga



Fuente: Autor

4.4 Velocidad de Cambios

Al aplicar la fórmula adaptada de FAO (1984) y Ortiz-Solorio et al. (1994), se obtuvo el porcentaje de uso de cada clase mediante el conteo de píxeles de estas para el último año y el año anterior, es decir, para los años 2020 y 2000 respectivamente de ambas unidades hidrográficas en base a zonas productivas, debido a que es la prioridad de este estudio.

4.4.1 Velocidad de cambios unidad hidrográfica Jatuchimbana

En la Tabla 16 muestra que el año 2000, el 49,95% del área en Jatuchimbana estaba destinada a tierras agropecuarias (48070 píxeles). Le sigue la categoría Bosque, con 23420 píxeles, con el 24,34%. Por otro lado, la categoría Paramo cuenta con 18214 píxeles, que constituye el 18,93% del territorio, la categoría Área Antrópica y Otras tierras, que comprenden las clases con menor presencia solo 3961 y 2563 Píxeles, que representa apenas el 4,12% y 2,66% respectivamente del territorio de la unidad hidrográfica Jatuchimbana durante este período.

Tabla 16 Conteo de píxeles

Periodo 2000	Conteo de píxeles	Porcentaje
Bosque	23420	24,34%
Tierra Agropecuaria	48070	49,95%
Área Antrópica	3961	4,12%

Otras tierras	2563	2,66%
Paramo	18214	18,93%
Total	96228	100%

Fuente: Autor

4.4.2 Velocidad de cambios unidad hidrográfica Jatuchimbana

En la Tabla 16 al analizar los datos de píxeles obtenidos durante el periodo decenal de 2000 (se observa que la categoría Tierra agropecuaria es la más predominante, con un total de 48070 píxeles, lo que equivale al 49,95% del área total de la unidad hidrográfica. Le sigue la categoría Bosque, con 23420 píxeles, con el 24,34%. Por otro lado, la categoría Paramo cuenta con 18214 píxeles, que constituye el 18,93% del territorio, la categoría Área Antrópica y Otras tierras, que comprenden las clases con menor presencia solo 3961 y 2563 Píxeles, que representa apenas el 4,12% y 2,66% respectivamente del territorio de la unidad hidrográfica Jatuchimbana durante este período

Tabla 17 Conteo Pixeles Gualcanga

Periodo 2000	Conteo de píxeles	Porcentaje
Bosque	23420	24,34%
Tierra Agropecuaria	48070	49,95%
Área Antrópica	3961	4,12%
Otras tierras	2563	2,66%
Paramo	18214	18,93%
Total	96228	100%

Fuente: Autor

4.5 Capacidad de campo

La capacidad de campo lleva una estrecha relación con la cobertura vegetal, la taxonomía y la textura del suelo. El suelo se clasifica en cuatro HGS (A, B, C y D) según el porcentaje de infiltración mínima, que resulta para el suelo desnudo después de la humidificación extendida. Para la asignación de los grupos hidrológicos, se condiciona el uso y la cobertura vegetal de la zona, se establece el rango numérico de 1 a 99, donde, 99, refleja clases como humedales, zonas urbanas, agua y nieve, ya que son de procedencia impermeable, además, en las clases de cultivo, paramo, plantaciones forestales y vegetación arbustiva su CN fue determinado en base al tipo de vegetación, y condición hidrológica.

Dentro del estudio se identificó la variación de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrológicas dentro de los 3 periodos 2000, 2010 y 2020 anteriormente identificados en el estudio multitemporal, por esta razón la tabla 18 y 19 muestran la variación que sufren los parámetros en los años de estudio.

Tabla 18 Parámetros hidráulicos unidad hidrológica Jatuchimbana

Periodo	Área (km ²)	Lc (km)	Cota mayor (msnm)	Cota menor (msnm)	Capacidad de Campo (S)	CN	Tiempo de Retardo (min)	Inicial abstracción
2020					166,4	61,74	1,72	33,28
2010	9,64	9,79	4439	3118	154,1	63,64	1,75	30,82
2000					124,7	68,7	1,81	24,95

Fuente: Autor

Tabla 19 Parámetros hidráulicos de la unidad hidrológica Gualcanga

Periodo decenal	Area (km ²)	Lc (km)	Cota mayor (msnm)	Cota menor (msnm)	Capacidad de Campo (S)	CN	Tiempo de Retardo (min)	Inicial abstracción
2020					218,2	54,83	1,44	43,65
2010	9,16	8,1909	4259	3196	126,8	68,31	1,57	25,36
2000					113,6	70,82	1,60	22,74

Fuente: Autor

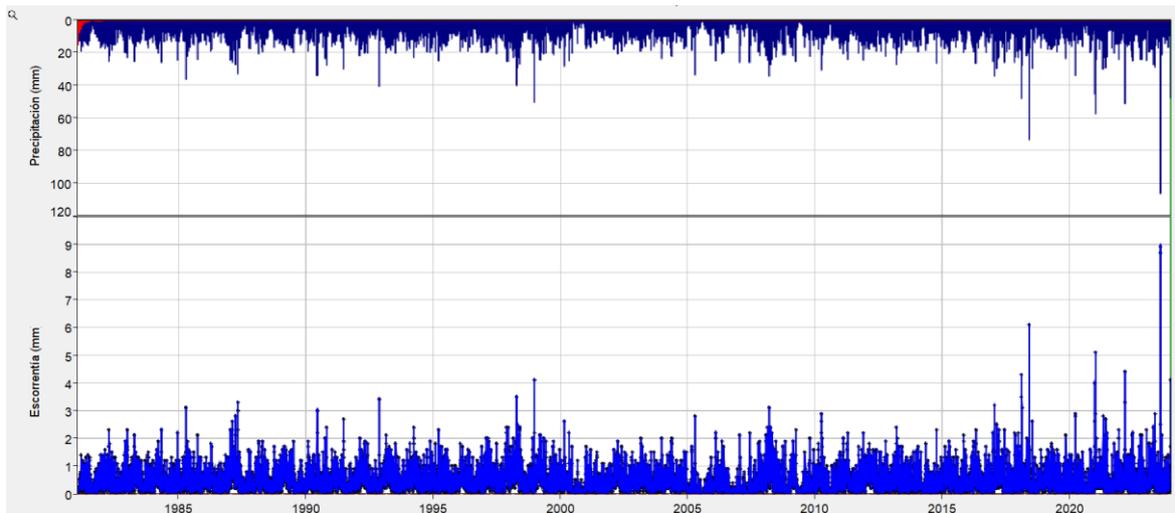
4.6 Modelación para obtener la relación de precipitación – escorrentía

4.6.1 Relación precipitación-escorrentía unidad hidrográfica Jatuchimbana

Para la relación precipitación-escorrentía se utilizó la metodología de SCS, utilizando datos diarios de precipitación y temperatura de los años 1981-2021 de los satélites de precipitación de la NASA, en efecto, se determinó la precipitación efectiva, pérdida y exceso, además, intervienen varios factores como son, tiempo de retardo, CN y umbral de escorrentía. El método del SCS asume que la abstracción inicial es el 20% de la abstracción máxima del suelo, de ahí procede el 0,2 de ambas.

La modelación de HEC-HMS demostró, que la unidad hidrográfica Jatuchimbana prioriza valores de precipitación y escorrentía máximos, estudiados en un lapso de 43 años, 1981-2024, en la unidad hidrográfica la precipitación media es de 40 mm, con algunos picos en estos últimos años, y la escorrentía media es de 2 mm, es decir que tiene un buen umbral de infiltración.

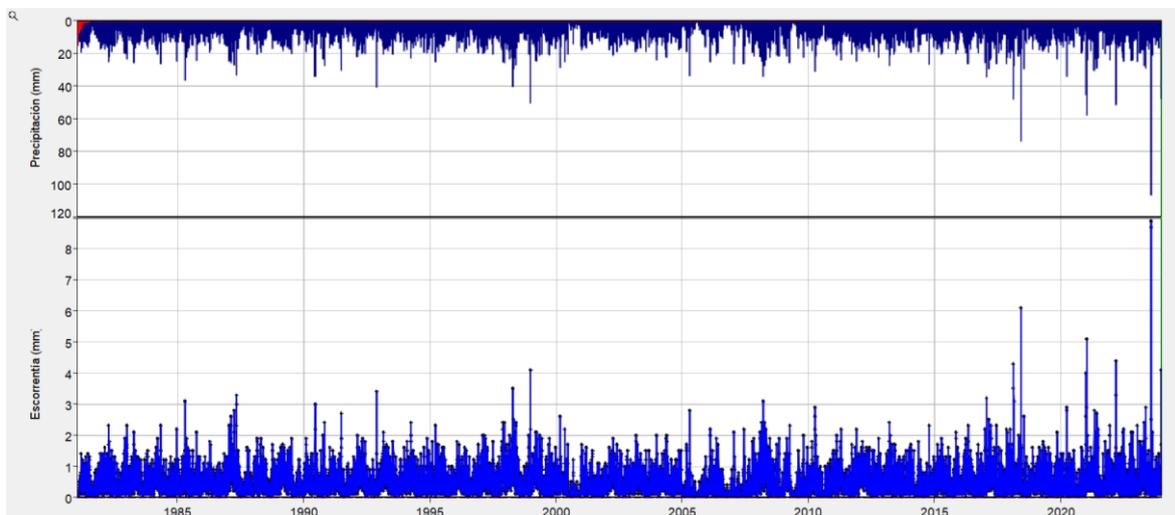
Ilustración 12 Precipitación - Escorrentía unidad hidrográfica Jatunchimbana



Fuente: Autor

En el lapso de los años 1981-2023 en la unidad hidrográfica Gualcanga tiene unos valores de precipitación media 20 mm y una escorrentía de 2 mm, esto es una peculiaridad ya que las cuencas son dos cuencas pareadas. Son cuencas de casi iguales característica, pero esta unidad hidrográfica, tiene mayor cobertura de paramo que retiene mayor humedad.

Ilustración 13 Precipitación - Escorrentía unidad hidrográfica Gualcanga



Fuente: Autor

4.7 Oferta Hídrica

4.7.1 Oferta hídrica unidad hidrográfica Jatunchimbana

La oferta hídrica corresponde al volumen de agua potencialmente aprovechable por los habitantes de la junta de agua de Quero, proporcionando además oportunidades para el desarrollo de proyectos que optimicen el uso de este recurso. Dichos proyectos pueden fomentar el crecimiento sostenible de la flora y fauna locales. En la Tabla 20 se presentan los resultados derivados del análisis de la unidad hidrográfica Jatunchimbana mediante un modelo de precipitación-escorrentía, a través del cual se identificaron el caudal máximo, el caudal ecológico, caudal autorizado y caudal ofertado, de los tres periodos decenales estudiados a lo largo de esta investigación

Tabla 20 Caudal Ofertado unidad hidrográfica Jatunchimbana

Año	Caudal Máximo	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
2000	0,4889	0,0489	0,0113	0,4287
2010	0,3653	0,0365	0,0113	0,3175
2020	0,4663	0,0466	0,0113	0,4083

Fuente: Autor

4.7.2 Oferta hídrica unidad hidrográfica Gualcanga

En la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos para la unidad hidrográfica Gualcanga, así como también los valores de caudal máximo, caudal ecológico, caudal autorizado y caudal ofertado de los 3 periodos decenales estudiados.

Tabla 21 Caudal Ofertado unidad hidrográfica Gualcanga

Año	Caudal Máximo	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
2000	0,4803	0,0480	0,0077	0,4245
2010	0,3590	0,0359	0,0077	0,3154
2020	0,4577	0,0458	0,0077	0,4042

Fuente: Autor

4.8 Comparación de Cuencas pareadas

El análisis comparativo de las cuencas pareadas de las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga permite evaluar cómo las intervenciones en el uso del suelo afectan la dinámica hidrológica de cada cuenca en el Páramo del Igualata. Estas unidades hidrográficas comparten características climáticas y geomorfológicas similares, presentan diferencias significativas en su cobertura y manejo del suelo, lo cual influye directamente en su capacidad de regulación y retención hídrica.

4.8.1 Características Geomorfológicas y de Uso del Suelo

Unidad hidrográfica Jatunchimbana: Se caracteriza por un índice de compacidad elevado, lo que sugiere una respuesta hidrológica más rápida ante eventos de precipitación intensa, incrementando así la escorrentía superficial. La cobertura del suelo en esta cuenca incluye una combinación de áreas agrícolas y vegetación de páramo, con una menor proporción de bosque en comparación con Gualcanga. Este uso intensivo del suelo ha contribuido a la pérdida de vegetación natural, afectando negativamente su capacidad de infiltración y estabilidad de los caudales.

Unidad hidrográfica Gualcanga: Presenta una configuración geomorfológica más alargada y un menor índice de compacidad, lo que favorece una respuesta hidrológica más gradual ante precipitaciones, optimizando así la infiltración y retención hídrica. Gualcanga conserva una mayor proporción de vegetación nativa, incluyendo bosque y páramo, lo cual contribuye a una regulación hídrica más estable y sostenida, especialmente en épocas de menor precipitación.

4.8.2 Impacto de las Intervenciones Humanas

Jatunchimbana: La intensificación de actividades agrícolas y el uso prolongado del suelo han incrementado la escorrentía superficial, reduciendo la capacidad de infiltración y alterando la dinámica hidrológica natural. La reducción de la cobertura de vegetación nativa ha resultado en un mayor flujo de sedimentos y una menor estabilidad del caudal en la cuenca, evidenciando la necesidad de estrategias de manejo que minimicen la degradación del suelo y optimicen la disponibilidad de agua durante la estación seca.

Gualcanga: Al conservar una mayor proporción de vegetación nativa y prácticas de uso del suelo menos intensivas, esta cuenca mantiene una capacidad de retención hídrica superior. Las intervenciones en Gualcanga han sido mínimas, lo cual se refleja en la estabilidad de su caudal ecológico y en la preservación de su capacidad de regulación hídrica. Esto permite una distribución más homogénea del caudal, incluso en periodos de sequía.

4.8.3 Oferta Hídrica en las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga

Los resultados obtenidos en las Tablas 20 a 27 evidencian diferencias significativas en la oferta hídrica de las unidades hidrográficas Jatunchimbana y Gualcanga durante los periodos evaluados. Estas diferencias están influenciadas por las características geomorfológicas y el uso del suelo en cada cuenca.

La cuenca de Jatunchimbana muestra una oferta hídrica variable entre los periodos analizados (2000, 2010 y 2020), con caudales ofertados promedio de 0,4287 m³/s, 0,3175 m³/s, y 0,4083 m³/s, respectivamente. Esta disminución en 2010 y posterior recuperación en 2020 puede estar asociada a cambios en el uso del suelo, como la intensificación de actividades agrícolas y modificaciones en la cobertura vegetal.

El caudal ecológico se mantuvo en valores promedio de 0,0466 m³/s, suficiente para preservar el equilibrio ecosistémico, pero una alta escorrentía directa y baja retención hídrica en ciertos periodos destaca la necesidad de implementar estrategias de manejo sostenible.

La oferta hídrica en Gualcanga refleja una mayor estabilidad en comparación con Jatunchimbana. Durante los periodos estudiados, los caudales ofertados fueron de 0,4245 m³/s, 0,3154 m³/s, y 0,4042 m³/s, respectivamente. La cobertura predominante de páramo, con su alta capacidad de retención de agua, contribuye a esta estabilidad, lo que demuestra la importancia de conservar la vegetación nativa.

El caudal ecológico promedio en Gualcanga fue ligeramente inferior al de Jatunchimbana, con valores de 0,0458 m³/s, pero suficiente para sostener el funcionamiento hidrológico y evitar problemas de escasez.

4.8.4 Implicaciones para la Conservación de los Recursos Hídricos

Jatunchimbana: Los hallazgos de este estudio indican la necesidad de implementar programas de restauración ecológica en la cuenca, tales como reforestación con especies nativas y conservación del suelo, con el fin de reducir la escorrentía superficial y mejorar la calidad y estabilidad del recurso hídrico. La adopción de áreas protegidas y prácticas agrícolas sostenibles contribuiría a la recuperación de su funcionalidad hidrológica.

Gualcanga: Los resultados resaltan la importancia de mantener las actuales prácticas de conservación, esenciales para preservar la estabilidad hídrica de la cuenca. La promoción de estrategias de conservación adicionales, junto con la implementación de prácticas agrícolas sostenibles en áreas circundantes, mejorará la resiliencia de Gualcanga ante posibles cambios climáticos y garantizará la sostenibilidad de sus recursos hídricos.

Conclusiones

El análisis multitemporal permitió identificar cambios significativos en la cobertura de suelo en las cuencas Jatunchimbana y Gualcanga. Se evidenció que Jatunchimbana experimentó un incremento en el uso agrícola, lo cual resultó en la disminución de áreas naturales de páramo. En contraste, Gualcanga mostró una mayor proporción de vegetación nativa, lo que favorece la estabilidad hídrica. Estos hallazgos confirman que las modificaciones en la cobertura terrestre tienen un impacto directo en la dinámica hidrológica y en la capacidad reguladora del ecosistema.

La cuantificación de la degradación hídrica reveló que Jatunchimbana presenta una mayor escorrentía superficial y una reducción en la capacidad de infiltración en comparación con Gualcanga, como resultado de las actividades antrópicas intensivas. Este deterioro hídrico destaca la vulnerabilidad de las cuencas ante cambios en el uso del suelo, subrayando la necesidad de estrategias de manejo sostenible para preservar los recursos hídricos.

Los resultados evidenciaron que Jatunchimbana, con una menor proporción de vegetación nativa, experimenta una reducción en la calidad del agua y una disminución en la capacidad de retención hídrica. Por el contrario, Gualcanga, al mantener una mayor cobertura vegetal, conserva un caudal ecológico estable y una oferta hídrica más consistente. Esto reafirma la importancia de la conservación del páramo para la sostenibilidad del recurso hídrico.

Los hallazgos de esta investigación resaltan la necesidad de implementar estrategias integrales de manejo y conservación que incluyan la reforestación con especies nativas, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y el monitoreo constante del uso del suelo. Estas acciones son esenciales para garantizar la sostenibilidad hídrica y la preservación de los servicios ecosistémicos en el Páramo del Igualata.

Recomendaciones

Implementar programas de reforestación en la cuenca de Jatunchimbana, priorizando el uso de especies nativas que favorezcan la infiltración y retención hídrica. Esta acción no solo mejorará la capacidad de regulación hídrica, sino que también reducirá la erosión y la carga de sedimentos en el sistema.

Establecer zonas de amortiguamiento en áreas agrícolas cercanas a cuerpos de agua para minimizar los impactos negativos sobre la calidad del agua.

Mantener las actuales prácticas de conservación en la cuenca de Gualcanga, fortaleciendo los programas de protección de páramos y vegetación nativa.

Fomentar la participación comunitaria en el monitoreo y conservación del recurso hídrico, brindando capacitación sobre prácticas agrícolas sostenibles que respeten la funcionalidad hidrológica del ecosistema.

Incorporar herramientas de teledetección y plataformas como Google Earth Engine para realizar monitoreos periódicos de los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal. Esto permitirá anticipar posibles deterioros en la oferta hídrica y tomar medidas preventivas.

Instalar estaciones de medición en ambas cuencas para recopilar datos precisos sobre caudal, precipitación e infiltración, lo que facilitará una gestión más informada y efectiva de los recursos hídricos.

Proponer regulaciones específicas para restringir la expansión agrícola en áreas sensibles del páramo, priorizando la conservación de zonas de alta relevancia hídrica.

Establecer incentivos para las comunidades locales que adopten prácticas sostenibles, como el pago por servicios ambientales o beneficios fiscales por actividades de conservación.

Referencias Bibliográficas

- Abdelkebir, B., Mokhtari, E., & Engel, B. (2024). Assessment of land use and land cover changes on hydrological responses in the Wadi Soummam watershed, Algeria using the HEC–HMS model. *Water Practice & Technology*, *19*(9), 3555–3577. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.224>
- Amin, G., Imtiaz, I., Haroon, E., Saqib, N. us, Shahzad, M. I., & Nazeer, M. (2024). Assessment of Machine Learning Algorithms for Land Cover Classification in a Complex Mountainous Landscape. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, *8*(2). <https://doi.org/10.1007/s41651-024-00195-z>
- Asadi, M. Z., Mokhtari, L. G., Zandi, R., & Naemitabar, M. (2024). Evaluating the effect of the land use change on discharge and flood intensity (case study: sub-basins of Kal-e Shur Sabzevar river basin, Iran). *Sustainable Water Resources Management*, *10*(6). <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01159-3>
- Ayala Izurieta, J. E., Jara Santillán, C. A., Márquez, C. O., García, V. J., Rivera-Caicedo, J. P., Van Wittenberghe, S., Delegido, J., & Verrelst, J. (2022). Improving the remote estimation of soil organic carbon in complex ecosystems with Sentinel-2 and GIS using Gaussian processes regression. *Plant and Soil*, *479*(1–2), 159–183. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05506-1>
- Bastarrika, A., Rodriguez-Montellano, A., Roteta, E., Hantson, S., Franquesa, M., Torre, L., Gonzalez-Ibarzabal, J., Artano, K., Martinez-Blanco, P., Mesanza, A., Anaya, J. A., & Chuvieco, E. (2024). An automatic procedure for mapping burned areas globally using Sentinel-2 and VIIRS/MODIS active fires in Google Earth Engine. *ISPRS Journal of*

Photogrammetry and Remote Sensing, 218, 232 – 245.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.08.019>

- Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M. R., Ochoa-Tocachi, B. F., Vanacker, V., Mao, Z., Stokes, A., & Mathez-Stiefel, S. L. (2019). Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management*, 433(June 2018), 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033>
- Bosznyay, M. (1989). Generalization of SCS curve number method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 115(1), 139–144.
- Boughton, W. C. (1989). A review of the USDA SCS curve number method. *Soil Research*, 27(3), 511–523.
- Calsin, W. H., Penã, N. P. M., Ochoa, E. N. L., Aguirre Huillcas, F., & Silva, F. E. (2021). Analisis multitemporal del glaciar del ampay por medio de la plataforma de google earth engine, periodo 2000-2019. *CICIC 2021 - Undecima Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informatica y Cibernetica, Memorias, Cicic*, 71–76.
- Carrión, D. A. D., Moreno, C. G. R., Márquez, C. O., Llerena, M. V. R., García, V. J., & Ayala, J. E. (2017). Priorización de microcuencas en los Andes ecuatorianos usando parámetros morfométricos, WSA y GIS. *Revista Geográfica Venezolana*, 58(1), 38–61.
- Castejón-Villalobos, J., Henríquez-Dole, L., Rodríguez-Lacayo, A., Grádiz-Cáceres, M., & Fletes-Ramos, Y. (2023). Assessment of three hydrological modeling methods for the estimation of mean-monthly discharge in a sub-basin of the central region of Honduras; [Evaluación de tres métodos de modelación hidrológica para la estimación de caudales medios mensuales en una s. *Bionatura*, 8(3).

<https://doi.org/10.21931/RB/2023.08.03.41>

- Chidichimo, F., Mendoza, B. T., De Biase, M., Catelan, P., Straface, S., & Di Gregorio, S. (2018). Hydrogeological modeling of the groundwater recharge feeding the Chambo aquifer, Ecuador. *AIP Conference Proceedings*, 2022(July 2020). <https://doi.org/10.1063/1.5060683>
- Chu, X., & Steinman, A. (2009). Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), 119–124. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2009\)135:1\(119\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2009)135:1(119))
- Domej, G., Pluta, K., & Ewertowski, M. (2025). CataEx: A multi-task export tool for the Google Earth Engine data catalog. *Environmental Modelling and Software*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106227>
- Eugenio, F. C., Schons, C. T., Mallmann, C. L., Schuh, M. S., Fernandes, P., & Badin, T. L. (2020). Remotely piloted aircraft systems and forests: a global state of the art and future challenges. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(8), 705–716.
- Flügel, W. (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9(3-4), 423–436.
- Gil, E. G., & Tobón, C. (2016). Hydrological modelling with TOPMODEL of chingaza páramo, Colombia; [Modelación hidrológica con TOPMODEL en el páramo de Chingaza, Colombia]. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2), 7919 – 7933. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>
- Guduru, J. U., & Mohammed, A. S. (2024). Hydrological modeling using HEC-HMS model, case of Tikur Wuha River Basin, Rift Valley River Basin, Ethiopia. *Environmental*

- Challenges*, 17(June), 101017. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101017>
- Halwatura, D., & Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling and Software*, 46, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>
- Henrique, F., Alves, B., & Cirilo, A. (2024). *Assimilação de Dados Geoespaciais Aplicada à Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas de Pernambuco Geospatial Data Assimilation Applied to Hydrological Modeling Watersheds in Pernambuco*. 05, 3992–4009.
- Koo, H., Kleemann, J., Cuenca, P., Noh, J. K., & Fürst, C. (2024). Implications of landscape changes for ecosystem services and biodiversity: A national assessment in Ecuador. *Ecosystem Services*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101652>
- Laura Telenchana, D. R. (2023). *Sistema de teledetección aérea para control de agentes patógenos y enfermedades en cultivos de brócoli con el uso de visión artificial*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas
- Mendoza, B., Fiallos, M., Iturralde, S., Santillan, P., Guananga, N., Bejar, J., Lowy, D. A., Vago, I., & Sandor, Z. (2021). Determination of field capacity in the Chibunga and Guano rivers micro-basins [version 1; peer review: 2 approved]. *F1000Research*, 10(172). <https://doi.org/10.12688/f1000research.28143.1>
- Mengistu, F., Hailu, B. T., Abera, T. A., Heiskanen, J., Zeleke, T. T., Johansson, T., & Pellikka, P. (2024). Improving the accuracy of honey bee forage class mapping using ensemble learning and multi-source satellite data in Google Earth Engine. *Scientific African*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02415>
- Monteith, S. S., Buttle, J. M., Hazlett, P. W., Beall, F. D., Semkin, R. G., & Jeffries, D. S.

- (2006). Paired-basin comparison of hydrological response in harvested and undisturbed hardwood forests during snowmelt in central Ontario: I. Streamflow, groundwater and flowpath behaviour. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(5), 1095–1116.
- Morales-Méndez, V., Vega-Gómez, C. J., Aldama-Rodríguez, Á. A., & Castillo-Téllez, B. (2022). Methodology for the parametrization and semi-distributed hydrological modeling of instantaneous peak flow and their translation to hydraulic exploitation sites; [Metodología para la parametrización y modelación hidrológica semidistribuida de gastos máximo. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 13(6), 301 – 351. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-13-06-07>
- Mosquera, G. M., Marín, F., Carabajo-Hidalgo, A., Asbjornsen, H., Célleri, R., & Crespo, P. (2024). Ecohydrological assessment of the water balance of the world's highest elevation tropical forest (Polylepis). *Science of the Total Environment*, 941. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173671>
- Mu, Y., Chen, S., Cao, Y., Zhu, B., Li, A., Cui, L., Dai, R., & Zeng, Q. (2024). Tracking the impact of typhoons on maize growth and recovery using Sentinel-1 and Sentinel-2 data: A case study of Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 359. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110266>
- Murad, C. A., Pearse, J., & Huguet, C. (2024). Multitemporal monitoring of paramos as critical water sources in Central Colombia. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67563-z>
- Nájera De Ferrari, F., Duarte, E., Smith-Ramírez, C., Rendon-Funes, A., Sepúlveda Gonzalez, V., Sepúlveda Gonzalez, N., Levio, M. F., Rubilar, R., Stehr, A., Merino,

- C., Jofré, I., Rojas, C., Aburto, F., Kuzyakov, Y., Filimonenko, E., Dörner, J., Pereira, P., & Matus, F. (2024). Multi-temporal assessment of a wildfire chronosequence by remote sensing. *MethodsX*, 13(October). <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103011>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C., Domínguez, I., Daza, M., Oviedo-Ocaña, R., Buytaert, W., & Ochoa-Tocachi, B. F. (2021). Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *Catena*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>
- Pérez-Romo, A. T., & Vanegas-Sandoval, L. J. (2016). *Estudio hidrológico e hidráulico en la zona baja de la cuenca del Río Frío en el Municipio de Chía*.
- Petrakis, R. E., Norman, L. M., Vaughn, K., Pritzlaff, R., Weaver, C., Rader, A., & Pulliam, H. R. (2021). Hierarchical clustering for paired watershed experiments: Case study in southeastern Arizona, USA. *Water*, 13(21), 2955.
- Ramírez, M., Martínez, L., Montilla, M., Sarmiento, O., Lasso, J., & Díaz, S. (2020). Obtención de coberturas del suelo agropecuarias en imágenes satelitales Sentinel-2 con la inyección de imágenes de dron usando Random Forest en Google Earth Engine. *Revista de Teledetección*, 56, 49–68.
- Rengifo Candia, H. R. (2024). *Análisis espacio temporal del cambio de cobertura y uso de la tierra entre los años 2000–2020, mediante la teledetección, distrito José Crespo y Castillo–Aucayacu, Tingo María*.
- Sardoii, E. R., Rostami, N., Sigaroudi, S. K., & Taheri, S. (2012). Calibration of loss

- estimation methods in HEC-HMS for simulation of surface runoff (case study: Amirkabir dam watershed, Iran). *Advances in Environmental Biology*, 6(1), 343–348.
- Sawant, S., Bonala, P., Joshi, A., Shindikar, M., Patil, A., Vyas, S., & Deobagkar, D. (2024). Integration of machine learning and remote sensing for assessing the change detection of mangrove forests along the Mumbai coast. *Journal of Earth System Science*, 133(4).
<https://doi.org/10.1007/s12040-024-02378-0>
- Song, W., Chen, M., & Tang, Z. (2024). A 10-m scale chemical industrial parks map along the Yangtze River in 2021 based on machine learning. *Scientific Data*, 11(1).
<https://doi.org/10.1038/s41597-024-03674-6>
- Sudmanns, M., Tiede, D., Lang, S., Bergstedt, H., Trost, G., Augustin, H., Baraldi, A., & Blaschke, T. (2020). Big Earth data: disruptive changes in Earth observation data management and analysis? *International Journal of Digital Earth*, 13(7), 832–850.
- Suescún, L. L. D., & Africano, J. G. A. (2018). Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto Interveredal en Nunchia, Casanare. *Recuperado El*, 27.
- Taylor, P. (2018). *Sampling design for accuracy assessment of land cover Access details : Access Details : [subscription number 915524576]*. February.
<https://doi.org/10.1080/01431160903131000>
- Tesfaye, W., Elias, E., Warkineh, B., Tekalign, M., & Abebe, G. (2024). Modeling of land use and land cover changes using google earth engine and machine learning approach: implications for landscape management. *Environmental Systems Research*, 13(1).
<https://doi.org/10.1186/s40068-024-00366-3>
- Tobar-Díaz, R., Gao, Y., Mas, J. F., & Cambrón-Sandoval, V. H. (2023). Clasificación de

uso y cobertura del suelo a través de algoritmos de aprendizaje automático: revisión bibliográfica. *Revista de Teledetección*, 62, 1–19.

- Turpo Cayo, E. Y., Espinoza Villar, R., Rios Caceres, S., & Moreno Flores, C. N. (2018). Mapeo multitemporal de cuerpos de agua y áreas urbanas en los Andes del Perú usando imágenes Landsat en la plataforma Google Earth Engine, periodo 1984-2018. *Anais Do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 14(1), 1–5. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Amb-239.pdf>
- Vergni, L., Todisco, F., & Di Lena, B. (2021). Evaluation of the similarity between drought indices by correlation analysis and Cohen's Kappa test in a Mediterranean area. *Natural Hazards*, 108(2), 2187–2209.
- Vilchis-Mata, I., Bâ, K. M., Franco-Plata, R., & Díaz-Delgado, C. (2015). Hydrological modeling based on rainfall estimates using hydrometeorological sensors; [Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos]. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(4), 45 – 60. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85030549458&partnerID=40&md5=483b22235f21524d541833fa1a07272b>
- Wang, X., Geng, Y., Zhou, T., Zhao, Y., Li, H., Liu, Y., Li, H., Ren, R., Zhang, Y., Xu, X., Liu, T., Si, B., & Lausch, A. (2025). Mapping the soil C:N ratio at the European scale by combining multi-year Sentinel radar and optical data via cloud computing. *Soil and Tillage Research*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106311>
- Wuyun, D., Duan, M., Sun, L., Guilherme Teixeira Crusiol, L., Wu, N., & Chen, Z. (2024). Pixel-wise parameter assignment in LandTrendr algorithm: Enhancing cropland abandonment monitoring using satellite-based NDVI time-series. *Computers and*

Electronics in Agriculture, 227. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109541>

Zhao, Q., Yu, L., Li, X., Peng, D., Zhang, Y., & Gong, P. (2021). Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(18), 3778.

Anexos

Tabla 22 Caudal ofertado unidad hidrográfica Jatuchimbana, periodo 1981-200

Años	Caudal Máximo	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
1981	0,320821918	0,032082192	0,0113	0,2774
1982	0,544383562	0,054438356	0,0113	0,4786
1983	0,524383562	0,052438356	0,0113	0,4606
1984	0,469672131	0,046967213	0,0113	0,4114
1985	0,49369863	0,049369863	0,0113	0,4330
1986	0,430684932	0,043068493	0,0113	0,3763
1987	0,535616438	0,053561644	0,0113	0,4707
1988	0,489344262	0,048934426	0,0113	0,4291
1989	0,490136986	0,049013699	0,0113	0,4298
1990	0,456438356	0,045643836	0,0113	0,3995
1991	0,445479452	0,044547945	0,0113	0,3896
1992	0,503005464	0,050300546	0,0113	0,4414
1993	0,565205479	0,056520548	0,0113	0,4974
1994	0,527123288	0,052712329	0,0113	0,4631
1995	0,423013699	0,04230137	0,0113	0,3694
1996	0,455191257	0,045519126	0,0113	0,3984
1997	0,610958904	0,06109589	0,0113	0,5386
1998	0,647123288	0,064712329	0,0113	0,5711
1999	0,552054795	0,055205479	0,0113	0,4855
2000	0,293989071	0,029398907	0,0113	0,2533
Total	0,488916274	0,048891627	0,0113	0,4287

Fuente: Autor

Tabla 23 Caudal Ofertado unidad hidrográfica Jatuchimbana, periodo 2000-2010

Años	Caudal Máximo	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
2000	0,283333333	0,028333333	0,0113	0,2437
2001	0,342191781	0,034219178	0,0113	0,2967
2002	0,487123288	0,048712329	0,0113	0,4271
2003	0,47260274	0,047260274	0,0113	0,4140
2004	0,486885246	0,048688525	0,0113	0,4269
2005	0,165205479	0,016520548	0,0113	0,1374
2006	0,271506849	0,027150685	0,0113	0,2331
2007	0,285205479	0,028520548	0,0113	0,2454
2008	0,516939891	0,051693989	0,0113	0,4539
2009	0,347123288	0,034712329	0,0113	0,3011
2010	0,359726027	0,035972603	0,0113	0,3124

Total	0,365258491	0,036525849	0,0113	0,31742
-------	-------------	-------------	--------	---------

Fuente: Autor

Tabla 24 Caudal ofertado unidad hidrográfica Jatuchimbana, periodo 2010-2020

Años	Caudal Máximo	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
2010	0,348767123	0,034876712	0,0113	0,3026
2011	0,460821918	0,046082192	0,0113	0,4034
2012	0,528415301	0,05284153	0,0113	0,4643
2013	0,509041096	0,05090411	0,0113	0,4468
2014	0,368493151	0,036849315	0,0113	0,3203
2015	0,499726027	0,049972603	0,0113	0,4384
2016	0,475956284	0,047595628	0,0113	0,4171
2017	0,563835616	0,056383562	0,0113	0,4961
2018	0,529863014	0,052986301	0,0113	0,4656
2019	0,477260274	0,047726027	0,0113	0,4182
2020	0,366666667	0,036666667	0,0113	0,3187
Total	0,46625877	0,046625877	0,0113	0,4083

Fuente: Autor

Tabla 25 Caudal ofertado unidad hidrográfica Gualcanga, periodo 1981-200

Años	Caudal Máximo	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
1981	0,323287671	0,032328767	0,0077	0,2833
1982	0,537808219	0,053780822	0,0077	0,4763
1983	0,514246575	0,051424658	0,0077	0,4551
1984	0,462295082	0,046229508	0,0077	0,4084
1985	0,484109589	0,048410959	0,0077	0,4280
1986	0,421643836	0,042164384	0,0077	0,3718
1987	0,525753425	0,052575342	0,0077	0,4655
1988	0,480601093	0,048060109	0,0077	0,4248
1989	0,483013699	0,04830137	0,0077	0,4270
1990	0,449589041	0,044958904	0,0077	0,3969
1991	0,437808219	0,043780822	0,0077	0,3863
1992	0,493989071	0,049398907	0,0077	0,4369
1993	0,554520548	0,055452055	0,0077	0,4914
1994	0,513972603	0,05139726	0,0077	0,4549
1995	0,415890411	0,041589041	0,0077	0,3666
1996	0,445355191	0,044535519	0,0077	0,3931
1997	0,601643836	0,060164384	0,0077	0,5338
1998	0,63260274	0,063260274	0,0077	0,5616
1999	0,540821918	0,054082192	0,0077	0,4790
2000	0,28715847	0,028715847	0,0077	0,2507
Total	0,480305562	0,048030556	0,0077	0,4245

Fuente: Autor

Tabla 26 Caudal ofertado unidad hidrográfica Gualcanga, periodo 2000-2010

Años	Caudal Máximo	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
2000	0,278688525	0,027868852	0,0077	0,2431
2001	0,337808219	0,033780822	0,0077	0,2963
2002	0,47890411	0,047890411	0,0077	0,4233
2003	0,464931507	0,046493151	0,0077	0,4107
2004	0,475136612	0,047513661	0,0077	0,4199
2005	0,162739726	0,016273973	0,0077	0,1388
2006	0,267945205	0,026794521	0,0077	0,2335
2007	0,279178082	0,027917808	0,0077	0,2436
2008	0,507377049	0,050737705	0,0077	0,4489
2009	0,34109589	0,034109589	0,0077	0,2993
2010	0,354520548	0,035452055	0,0077	0,3114
Total	0,358938679	0,035893868	0,0077	0,3153

Fuente: Autor**Tabla 27** Caudal ofertado unidad hidrográfica Gualcanga, periodo 2010-2020

Años	Caudal Máximo	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
2010	0,340821918	0,034082192	0,0077	0,2990
2011	0,454520548	0,045452055	0,0077	0,4014
2012	0,519945355	0,051994536	0,0077	0,4603
2013	0,499726027	0,049972603	0,0077	0,4421
2014	0,363561644	0,036356164	0,0077	0,3195
2015	0,490136986	0,049013699	0,0077	0,4334
2016	0,467486339	0,046748634	0,0077	0,4130
2017	0,550410959	0,055041096	0,0077	0,4877
2018	0,520547945	0,052054795	0,0077	0,4608
2019	0,466575342	0,046657534	0,0077	0,4122
2020	0,361202186	0,036120219	0,0077	0,3174
Total	0,457721386	0,045772139	0,0077	0,4042

Fuente: Autor