



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 CON MENCIÓN EN
RECURSOS HÍDRICOS**

TEMA:

**“ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA COMUNIDAD GALTE JATUN
LOMA PERTENECIENTE A LA PARROQUIA PALMIRA, CANTÓN
GUAMOTE, PROVINCIA DE CHIMBORAZO.”**

AUTOR:

Ing. Karina Noelia Vallejo Dávalos

TUTOR:

Ing. María Fernanda Rivera Castillo, Mgs.

Riobamba – Ecuador

2025

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: “**Análisis Hidrológico de la Comunidad Galte Jatun Loma perteneciente a la Parroquia Palmira, Cantón Guamote, Provincia de Chimborazo.**”, ha sido elaborado por la Ingeniera Karina Noelia Vallejo Dávalos, 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 antiplagio 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, 19 de febrero, de 2025

Ing. María Fernanda Rivera Castillo, Mgs.

TUTORA

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Karina Noelia Vallejo Dávalos**, con número único de identificación **060404343-0**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “Análisis Hidrológico de la Comunidad Galte Jatun Loma perteneciente a la Parroquia Palmira, Cantón Guamote, Provincia de Chimborazo.” previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental con 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, 19 de febrero de 2025

Ing. Karina Noelia Vallejo Dávalos

N.U.I. 060404343-0

Agradecimiento

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este camino académico y profesional. A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus sabias palabras que siempre me han guiado. A mi familia, por creer en mí y darme fuerzas en los momentos más desafiantes.

A mis docentes y tutores, especialmente a la Ing. María Fernanda Rivera, Mgs. tutora del presente proyecto, quien siempre mostró su predisposición a brindar la asesoría requerida, al PhD. Benito Mendoza, por haber sido quien guía desde un inicio el proyecto, al Ing. Carlos Maldonado, por su paciencia, orientación y por compartir sus conocimientos con tanta dedicación, lo cual ha sido clave para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros y amigos, quienes han estado a mi lado a lo largo de este proceso, brindándome su apoyo, motivación y momentos de alegría que hicieron este camino más llevadero.

Finalmente, agradezco a la institución y personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de esta investigación, proporcionando información, recursos o experiencias valiosas que enriquecieron mi aprendizaje.

Dedicatoria

Dedico este trabajo, con todo mi cariño y admiración, a mis padres, quienes con su esfuerzo y sacrificio me han permitido alcanzar esta meta. A mi familia, por ser mi fuente constante de inspiración y motivación.

Lo dedico también a las comunidades y personas que trabajan día a día por la conservación del medio ambiente, pues este trabajo es un reflejo de mi compromiso e interés en la sostenibilidad y el cuidado de los recursos naturales.

Finalmente, a mí misma, por no rendirme, por superar cada desafío y por demostrar que los sueños se alcanzan con esfuerzo, dedicación y perseverancia.

Índice General

Dedicatoria	
Índice General	
Índice de Tablas	
Índice de Ilustraciones	
Resumen	
Abstract	
Introducción	12
Capítulo 1 Generalidades	14
1.1 Planteamiento del problema	14
1.2 Justificación de la Investigación.....	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo General.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Descripción de la zona de estudio	16
Capítulo 2	17
2.1 Antecedentes Investigativos	17
2.2 Fundamentación Legal	19
2.2.1 Normativa nacional.....	19
2.2.2 Normativa internacional	21
2.3 Fundamentación Teórica	22
2.3.1 Cuenca hidrográfica.....	22
2.3.2 Contexto hídrico de la provincia de Chimborazo	24
2.3.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	25
2.3.4 Teledetección.....	25
2.3.5 Google Earth Engine (GEE)	27
2.3.6 Gestión y protección de los Recursos Hídricos en Ecuador	27

2.3.7	Ecosistema páramo en Ecuador	28
2.3.8	Estrategias de conservación de Páramos	30
Capítulo 3 Diseño Metodológico.....		32
3.1	Enfoque de la Investigación	32
3.2	Área de estudio	33
3.3	Fase 1. Recolección y preprocesamiento de datos	34
3.3.1	Preprocesamiento de datos en Google Earth Engine.....	34
3.3.2	Clasificación de la cobertura de la tierra	37
3.3.3	Identificación de puntos de entrenamiento y validación	38
3.3.4	Clasificación supervisada con Random Forest.....	39
3.3.5	Validación de datos	40
3.4	Fase 2. Cuantificación de los cambios.....	42
3.4.1	Comparación de datos	42
3.4.2	Tasa de Cambios.....	42
3.5	Fase 3. Modelo hidrológico	43
3.5.1	Capacidad de Campo y potencial de retención.....	43
3.5.2	Cálculo de Abstracción Inicial	44
3.5.3	Relación precipitación – escorrentía en Hec-HMS	45
3.5.4	Calibración del modelo en HEC-HMS.....	45
3.5.5	Método de Hidrograma Unitario	46
Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados		47
4.1	Análisis Descriptivo de los Resultados	47
4.1.1	Quebrada San Francisco	47
4.2	Cuantificación de cambios.....	50
4.2.1	Validación de datos período 2000	50
4.2.2	Validación de datos período 2010	52
4.2.3	Validación de datos período 2020	54

4.3	Detección de cambios	56
4.4	Tasa de cambios.....	57
4.5	CN, Capacidad de Campo y Tiempo de retardo	60
4.6	Calibración del modelo en HEC-HMS	61
4.7	Relación Precipitación – Escorrentía.....	61
4.8	Determinación de la oferta Hídrica	62
4.9	Discusión	63
	Conclusiones.....	65
	Recomendaciones.....	66
	Referencias Bibliográficas	66

Índice de Tablas

Tabla 1	35
Tabla 2	35
Tabla 3	37
Tabla 4	38
Tabla 5	39
Tabla 6	41
Tabla 7	43
Tabla 8	48
Tabla 9	50
Tabla 10	51
Tabla 11	51

Tabla 12	53
Tabla 13	54
Tabla 14	55
Tabla 15	56
Tabla 16	57
Tabla 17	58
Tabla 18	58
Tabla 19	59
Tabla 20	60

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1	33
Ilustración 2	34
Ilustración 3	40
Ilustración 4	49
Ilustración 5	51
Ilustración 6	53
Ilustración 7	55
Ilustración 8	57
Ilustración 9	61
Ilustración 10	62
Ilustración 11	63

Resumen

El trabajo titulado “Análisis Hidrológico de la Comunidad Galte Jatun Loma Perteneciente a la Parroquia Palmira, Cantón Guamote, Provincia de Chimborazo” evalúa la hidrología de esta zona altoandina. El objetivo principal es analizar el componente hidrológico de la comunidad Galte Jatun Loma a través del estudio de la cuenca de la quebrada San Francisco. Para ello se determinó cambios en la cobertura vegetal y el uso de suelo mediante un estudio multitemporal de la zona en el periodo comprendido entre el 2000 hasta el 2024, además de la caracterización geomorfológica e hidráulica y el cálculo de la oferta y demanda hídrica. Con el uso de diferentes bases de datos y herramientas como Google Earth Engine, Arc Map y HEC-HMS. Los resultados del proyecto reflejan un aumento en la capacidad de campo del suelo indicando mejoras en la infiltración y reducción de la escorrentía superficial, a pesar de la leve degradación de ecosistemas de páramo reportada. Además, se observó un incremento en la disponibilidad de agua para la comunidad, con los datos de caudal obtenidos. La conclusión enfatiza que las prácticas de conservación adoptadas en los últimos años por la comunidad, especialmente en las zonas altas de páramo, han tenido un impacto positivo en la gestión de los recursos hídricos, favoreciendo a la recuperación de sus vertientes y al bienestar de la comunidad.

Palabras claves: *análisis hidrológico, oferta hídrica, conservación, páramos.*

ABSTRACT

The paper titled "Hydrological Analysis of the Galte Jatun Loma Community, belonging to the Palmira Parish, Guamote Canton, Chimborazo Province" evaluates the hydrology of this highland area. The main objective is to analyze the hydrological component of the Galte Jatun Loma community through the study of the San Francisco Creek watershed. To achieve this, changes in vegetation cover and land use were determined through a multitemporal study of the area for the period between 2000 and 2024, in addition to geomorphological and hydraulic characterization and the calculation of water supply and demand. This was done using various databases and tools such as Google Earth Engine, ArcMap, and HEC-HMS. The project results indicate an increase in soil field capacity, reflecting improvements in infiltration and a reduction in surface runoff, despite the slight degradation of high-altitude moorland ecosystems reported. Furthermore, an increase in water availability for the community was observed, as evidenced by the flow data obtained. The conclusion emphasizes that the conservation practices adopted by the community in recent years, particularly in the high moorland areas, have had a positive impact on water resource management, promoting the recovery of its watersheds and enhancing the well-being of the community.

Key words: *hydrological analysis, water supply, conservation, moorland*



Reviewed by:

MsC. Edison Damian Escudero

ENGLISH PROFESSOR

C.C.0601890593

Introducción

El análisis hidrológico de una zona altoandina es un tema de gran interés en la actualidad, ya que los desafíos en la dotación de agua de calidad son cada vez mayores, siendo esencial para el desarrollo de una sociedad (Brück et al., 2023). Por ello se pretende realizar un análisis hidrológico de la comunidad Galte Jatun Loma, ubicada en la parroquia Palmira, cantón Guamote, provincia de Chimborazo, para lo cual se identificó la cuenca de la quebrada San Francisco que abarca la zona. Esta parroquia se ubica a una altura promedio de 3600 metros sobre el nivel del mar y es privilegiada por sus vastas extensiones de páramo y vertientes naturales, recursos importantes para la sostenibilidad y el bienestar de sus habitantes (Cáceres, 2019), quienes dependen mayormente de la agricultura y la ganadería.

La investigación tiene una relevancia académica y social, pues busca fortalecer conocimientos sobre la importancia de los sistemas hidrológicos en zonas altoandinas dando mayor énfasis a los ecosistemas de páramo que actúan como esponjas naturales, regulando el flujo hídrico y ofreciendo servicios ecosistémicos como son la provisión de agua y regulación climática (MAATE, 2023).

El diagnóstico hídrico integral de la quebrada San Francisco comprende un análisis del uso del suelo, la geomorfología y cobertura vegetal de la cuenca, así como una evaluación de oferta y demanda hídrica (Torres & Proaño, 2018) con la generación de un modelo hidrológico de la región; para lo cual se requiere un análisis multitemporal utilizando herramientas digitales tales como Google Earth Engine, Arc Map y HEC-HMS, para evaluar cambios en el paisaje, uso y cobertura del suelo (Anaya et al., 2023) y su impacto en los recursos hídricos en un período comprendido entre los años 2000 al 2024.

La combinación de herramientas información geográfica y datos de estaciones meteorológicas permitirá comprender la situación actual y la dinámica de los recursos

hídricos en la zona, contribuyendo a mejorar las capacidades técnicas y prácticas de la comunidad en la gestión de sus Recursos Hídricos y adaptación al cambio climático (Saltos & Flores, 2024); basados en los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), estrategias de manejo y conservación de los recursos hídricos (Hofstede et al., 2023).

La presente investigación está dividida en 5 capítulos, los cuales corresponden a las generalidades del proyecto; antecedentes, fundamentación legal y teórica diseño; diseño metodológico, resultados y discusión y finalmente su correspondiente discusión. Finalmente, el Capítulo 5 incluye las respectivas conclusiones y recomendaciones estratégicas a tomar en cuenta para la gestión sostenible del agua y los páramos en comunidades altoandinas.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

Ecuador posee una extensión de territorio cubierto de páramos de aproximadamente 1 514 267 hectáreas. En la provincia de Chimborazo, estos páramos representan el 12,9% de la superficie total (MAATE, 2023). Sin embargo, entre los años 2013 y 2018, se registró una disminución del 0,56% en la extensión de este ecosistema, principalmente en los cantones de Guamote, Alausí, Chunchi, Pallatanga y Cumandá (GADPCH, 2023), afectando la disponibilidad de agua para las poblaciones que se benefician directamente de este ecosistema, como es el caso de la parroquia Palmira y sus comunidades.

Los páramos son ecosistemas importantes en el ciclo del agua y la regulación climática, ya que actúan como reservorios naturales por las propiedades físico-químicas de sus suelos. Sin embargo, estos ecosistemas de alta montaña están en riesgo debido al aumento de actividades humanas, tales como la expansión de la frontera agrícola, el pastoreo y los cambios en el uso del suelo. Estas actividades afectan significativamente las propiedades del suelo, especialmente la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua, erosión e infiltración, importantes para la recarga de acuíferos (Patiño et al., 2024).

En este sentido, la comunidad Galte Jatun Loma, ha enfrentando desafíos constantes en cuanto a la reducción de sus fuentes hídricas y la limitada cantidad de agua disponible para el consumo de sus habitantes, (GADM Guamote, 2023) la falta de una adecuada gobernanza del recurso hídrico agrava la situación, impidiendo una gestión eficiente y sostenible.

Por otra parte, el proyecto “Caracterización de la oferta y demanda hídrica en el área de influencia del acuífero del Chambo”, necesita obtener información sobre el análisis

hidrológico para usarlos en el modelo de gestión que este plantea como objetivo específico, por lo que este trabajo aporta con el estudio en esta zona del acuífero.

1.2 Justificación de la Investigación

El páramo es un ecosistema natural de alta montaña que se extiende a lo largo de la Cordillera de los Andes, en los territorios de Colombia, Perú, Venezuela, Costa Rica y Ecuador (Garavito, 2015). La importancia de este ecosistema radica por su gran endemismo y su rol en la regulación del ciclo hidrológico; su potencial en la captación de agua, regulación del clima, y en el mantenimiento, protección y recarga de acuíferos (Chuncho Morocho & Chuncho, 2019). Sin embargo, los páramos son ecosistemas poco estudiados y muy vulnerables al desequilibrio ecológico dado por factores naturales y antrópicos (Daza et al., 2014).

A nivel nacional, comprende el 7% del territorio y, aunque cada vez son mayores los esfuerzos en proteger estas zonas, menos del 40% del área está protegida (Romo & Calero, 2021), lo cual repercute directamente con la cantidad de agua disponible para la población. Específicamente en el Cantón Guamote, se evidencia la disminución de fuentes hídricas y la limitada disponibilidad de agua para consumo humano y actividades agrícolas (GADM Guamote, 2023), reflejando la deficiencia en la gestión y gobernanza de este recurso.

Por ello se considera la importancia de un análisis hidrológico para comprender la dinámica hídrica de la zona y cómo ha variado el uso y cobertura del suelo a lo largo de 24 años, de manera que se puede ver el impacto de estos factores con el ciclo del agua en el ecosistema (Hofstede et al., 2023). Esta investigación contribuye al avance del conocimiento en metodologías de evaluación y gestión de recursos hídricos en áreas de páramo específicamente.

Además la investigación proporciona información valiosa para implementar prácticas sostenibles y eficientes en las actividades socioeconómicas del sector; y fortalecer la capacidad de adaptación de las comunidades rurales frente a variabilidades hidrológicas y eventos climáticos extremos. Esto permite una gestión más resiliente y adaptativa de los recursos naturales, mejorando la gobernanza del agua y garantizando la seguridad alimentaria y las condiciones de vida de la población local.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar el análisis hidrológico de la comunidad Galte Jatun Loma perteneciente al cantón Guamote, provincia de Chimborazo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio multitemporal para evaluar cambios en la cobertura vegetal y el uso de suelo.
- Caracterizar geomorfológica e hidráulicamente el área de conservación de la comunidad Galte Jatun Loma.
- Determinar la oferta y demanda hídrica de la zona de estudio, identificando los patrones de disponibilidad de agua y las necesidades de la comunidad.

1.4 Descripción de la zona de estudio

La Comunidad Galte Jatun Loma está ubicada en la parroquia Palmira, cantón Guamote, provincia de Chimborazo; en esta zona se encuentran grandes extensiones de páramos, zona agrícola y pastizales, siendo la agricultura, ganadería y actividades pecuarias las principales fuentes económicas de la población.

Con un rango altitudinal que va desde los 2560 hasta los 4200 m.s.n.m., Palmira experimenta un clima húmedo y frío de octubre a mayo, mientras que de junio a septiembre prevalece un clima cálido, seco y ventoso. La comunidad de Galte Jatun Loma comprende 3067 hectáreas dentro de las 24160,85 hectáreas totales de la parroquia Palmira y en ella habitan aproximadamente 1404 personas. (GADP Palmira, 2023).

Según el diagnóstico realizado por el GAD parroquial de Palmira, 2023; la parroquia está conformada hidrológicamente por ríos y quebradas, cuya red hidrográfica abarca aproximadamente 164,73 kilómetros de longitud. Entre los principales cuerpos de agua se encuentran los ríos Coco, Citado, Atapo-Pomachaca, y Guagracorral, junto con las quebradas Conventillo, San Francisco, Pucarumi, Letra Huayco, Capa Huaycu, Ullacoshisha, y varios drenajes menores. Estos elementos contribuyen a la formación de las subcuencas de los ríos Chanchan, Chambo, y Guayas, los cuales finalmente desembocan en la cuenca del río Pastaza (GADP Palmira, 2023).

Para el desarrollo de la presente investigación, se tomó en cuenta la cuenca de la quebrada San Francisco, la misma que corresponde a un nivel 7 según la clasificación pfastetter partiendo de datos de cuenca nivel 6 del MAATE.

Capítulo 2

2.1 Antecedentes Investigativos

La provincia de Chimborazo, en los Andes ecuatorianos, es atravesada por las redes hidrográficas de los ríos Chambo y Chanchán, cuyas aguas fluyen hacia las cuencas del Amazonas y el Océano Pacífico, respectivamente (GADPCH, 2023). La subcuenca del río Chambo, que incluye la red hidrográfica de Palmira, es una subdivisión de la cuenca del río Pastaza (Lara et al., 2021). Esta configuración hidrológica resalta la complejidad y la relevancia de los sistemas de aguas en esta región, especialmente en las zonas de páramo,

que actúa como grandes reservorios de agua y carbono orgánico (Carrillo-Rojas et al., 2019), con una capacidad de almacenar alrededor del 30% del carbono del suelo a nivel mundial (Jara et al., 2019).

Por ello, en los últimos años, se llevaron a cabo diversas investigaciones enfocadas en entender la dinámica hidrológica en zonas de alta montaña, la interacción de factores hidrometeorológicos con la cantidad de agua disponible. (Torres & Proaño, 2018), así como la relación de la precipitación, humedad del suelo y evapotranspiración con el balance hidrológico en zonas altas (Lazo et al., 2019). Además de la influencia de actividades humanas y uso de la tierra sobre las propiedades hidrofísicas del suelo que muchas veces ocasiona la erosión y escorrentía (Patiño et al., 2024).

Por otro lado, la teledetección avanza significativamente en la caracterización y funcionamiento de ecosistemas, demostrando que los cambios en la cobertura vegetal influyen en las propiedades del suelo, afectando la dinámica hidrológica (Fernández et al., 2020). En el contexto local, la subcuenca del río Chambo, con una superficie de 3 580 km², es objeto de estudios en la determinación de zonas de recarga y descarga de agua subterránea mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y análisis multicriterio (Lara et al., 2021).

Estos y otros estudios relevantes son importantes para la gestión sostenible del agua en la región, particularmente en comunidades como Jatun Loma, que han designado un área importante para protección mediante un acuerdo de conservación junto con la prefectura de Chimborazo y CARE Ecuador (Cooperative for Assistance and Relief Everywhere, Inc.). Lo cual beneficia alrededor de 500 usuarios del recurso de las comunidades Jatun Loma, Galte Pakcha y Galte Cachipata.

2.2 Fundamentación Legal

La propuesta titulada: “Análisis Hidrológico de la comunidad Galte Jatun Loma perteneciente a la parroquia Palmira, cantón Guamote, provincia de Chimborazo”, se ampara en normativa nacional e internacional, las cuales se describen a continuación:

2.2.1 Normativa nacional

- **Constitución de la República del Ecuador de 2008**

Establece el marco jurídico para la política nacional y el orden socioeconómico del país, incluyendo la gestión y uso de los recursos naturales y culturales. Reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado (Art. 14) y declara a la naturaleza como sujeto de derecho para garantizar su existencia y regeneración (Art. 71). Esto refleja las prioridades del país hacia un desarrollo sustentable y equilibrado, conforme al régimen de desarrollo del artículo 275 (Ecuador, 2008). Para cumplir estos objetivos, artículos como el 397, 406, 409 y 411 exigen la conservación de la biodiversidad, manejo sostenible de ecosistemas frágiles, protección del suelo y medidas contra el cambio climático (Art. 414). Otros artículos relevantes se encuentran en el Anexo 7 sobre gestión y manejo de recursos.

- **Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua de 2014 (LORHUyA)** Registro Oficial Suplemento Nro. 305 el 6 de agosto de 2014

Tiene como objetivo principal garantizar la regulación y control de la autorización, gestión, preservación, conservación y restauración de los recursos hídricos, así como su uso y aprovechamiento sostenible en todas sus formas y estados físicos. Reconoce al agua como un patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible e inembargable, esencial para la naturaleza y la soberanía alimentaria.

Además, la ley especifica que los recursos hídricos son parte del patrimonio estatal, cuya gestión se realizará de manera concurrente entre el gobierno central y los gobiernos autónomos descentralizados. (MAATE, 2023)

Asimismo, la LORHUyA dispone que el Estado debe garantizar el acceso equitativo al agua y su gestión integral, de manera pública o comunitaria, respetando los derechos de la naturaleza para la conservación de este recurso vital incluyendo la protección de fuentes de agua, cauces naturales y zonas de recarga hídrica.

- **Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)** expedido en 2010, última reforma en 2023

Establece la soberanía de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD), a nivel ambiental, recalca la recuperación y conservación de la naturaleza como un objetivo clave (Art. 4). Señala la responsabilidad de los GADs en promover actividades productivas y sostenible involucrando a la comunidad, para garantizar el buen manejo de los recursos naturales, además de la recuperación de ecosistemas frágiles, protección de fuentes de agua, forestación con especies nativas y programas de educación ambiental. Por otro lado asegura que las comunidades administren sus áreas naturales y las protejan de acuerdo a sus prácticas ancestrales, así como los mecanismos para la legalización de estos territorios.

- **Código Orgánico del Ambiente (COA)**, publicado en el 2018.

El COA garantiza el derecho a un ambiente sano, además que protege los derechos de la naturaleza. Incluye temas tales como el patrimonio natural, calidad ambiental, el cambio climático, además aborda las directrices para los incentivos ambientales así como también establece sanciones para diferentes tipos de flatas. Con la aplicación de este código se busca asegurar la resiliencia de los ecosistemas, mitigar su degradación y fortalecer e incentivar la conservación del recurso hídrico.

- **Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (RCOA)**, publicado en el 2019.

Es el Instrumento de aplicación del COA, es de cumplimiento obligatorio para todas actividades económicas y personas del país. Establece que la Autoridad Ambiental Nacional (AAN) en relación con la investigación, se enfatiza la gestión de páramos, considerándolos sistemas que se deben incluir en los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Además, se promueve las actividades sostenibles mediante la investigación, asistencia técnica y conservación de los conocimientos ancestrales.

- **Estrategia Nacional de Calidad del Agua (ENCA)**, publicada en el 2016 por el Comité Interinstitucional de Calidad de Agua

Coordina acciones encaminadas a la gestión y uso eficiente del agua en el marco de la Agenda 2030, el Plan Nacional de Desarrollo y otros planes similares. El objetivo principal es mejorar y proteger la calidad del agua, garantizando el correcto uso del recurso, además de controlar su contaminación, mediante estrategias que van desde diagnóstico y prevención hasta la mitigación y conservación de los recursos hídricos. Para cumplir con los objetivos prioriza la recopilación de información nacional sobre la calidad del agua y el fortalecimiento de los mecanismos de control y minimización de la contaminación, promoviendo la participación de los actores clave involucrados en la protección de las fuentes de agua.

2.2.2 Normativa internacional

A nivel global, los desafíos sociales, económicos y ambientales son punto focal de interés y por ello se reconoce las acciones colectivas y soluciones comunes. Bajo esta premisa, Ecuador ratifica su compromiso con la ONU y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados en la Agenda 2030, a través de su participación en los convenios internacionales que impulsan acciones estratégicas para el desarrollo sostenible.

(MAATE, 2023). En el desarrollo del presente proyecto se priorizan los ODS: 2 (seguridad alimentaria y agricultura sostenible), 6 (disponibilidad y gestión sostenible del agua), 13 (medidas para combatir el cambio climático) y 15 (uso sostenible de los ecosistemas), enfocados en abordar el cambio climático y la degradación del suelo mediante estrategias integrales para promover un desarrollo sostenible.

2.3 Fundamentación Teórica

2.3.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un área natural en la que el agua drena desde las partes altas hacia un punto en común en las partes más bajas, alimentando diversos cuerpos de agua en su recorrido. Este sistema permite conocer la distribución y dinámica del agua en un área específica, donde las poblaciones, usan el agua tanto para consumo doméstico, riego de cultivos, abrevadero de animales y para la industria, procurando así su desarrollo económico, social y cultural (Chuncho Morocho & Chuncho, 2019).

A continuación se describen los principales factores ambientales que intervienen en la dinámica hídrica dentro de una cuenca:

2.3.1.1 Precipitación

La precipitación influye en la selección de cultivos adecuados y en la disponibilidad de agua, siendo un componente climático esencial para el ciclo del agua y el balance hídrico de las cuencas hidrográficas. En la subcuenca del río Chambo, las precipitaciones anuales varían entre un mínimo de 515 mm y un máximo de 1372 mm (Lara et al., 2021). En los páramos la precipitación es continua y de baja intensidad lo que sumado las condiciones ambientales del ecosistema, da lugar a un alto contenido de humedad en el suelo, importante para la regulación del ciclo hidrológico y el equilibrio ecosistémico (Carrillo-Rojas et al., 2019).

2.3.1.2 Temperatura

La temperatura influye en la evapotranspiración y la capacidad del suelo para retener humedad. En los páramos, las bajas temperaturas limitan la evapotranspiración, manteniendo el suelo húmedo (Torres & Proaño, 2018). El rango altitudinal provoca un amplio gradiente de temperaturas. Según el INAMHI (2014), las temperaturas medias mensuales varían de 9°C a 24°C, con máximas generalmente en noviembre y mínimas en julio. La temperatura media anual disminuye desde el valle hacia las cordilleras; principalmente, en las parroquias San Juan, Juan de Velasco, Villa la Unión, Achupallas, y Palmira, la temperatura media se ubica entre 9°C y 10°C, mientras que en la parroquia Multitud y el cantón Cumandá, alcanzan hasta 24°C. (GADPCH, 2023).

2.3.1.3 Cobertura vegetal y uso del suelo

La cobertura vegetal y el uso del suelo factores clave en el estudio de cuencas hidrográficas, ya que son directamente proporcionales a los niveles de escorrentía y el potencial de retención de agua y humedad (Lara et al., 2021). La provincia de Chimborazo, al ser potencialmente agrícola, ha experimentado cambios en las propiedades físicas del suelo y la expansión de la frontera agrícola hacia zonas de cobertura natural. De acuerdo al mapa de cobertura y uso del suelo del Ministerio de Agricultura y Ganadería, el cantón Guamote presenta coberturas forestal, agrícola y asentamientos humanos.

En el ecosistema páramo, la cobertura vegetal juega un papel fundamental, ya que de esto depende la capacidad de retención de la humedad, disminución de escorrentía, además que mantiene la estructura del suelo, previene la erosión y favorece la infiltración de agua. Los cambios en la cobertura vegetal afectan la porosidad y textura del suelo, y existe una correlación entre el índice NDMI y el porcentaje de materia orgánica, este último siendo un parámetro clave para su identificación (Fernández et al., 2020).

2.3.1.4 Evapotranspiración

En los páramos, la evapotranspiración es relativamente baja debido a las bajas temperaturas y alta humedad al limitar la pérdida de agua del suelo y la vegetación, desempeñando un papel esencial en el ciclo hidrológico al regular el retorno de agua a la atmósfera y mantener el balance hídrico del ecosistema (Carrillo et al., 2019). Esta propiedad asegura un flujo constante de agua hacia las cuencas hidrográficas, favoreciendo a zonas agrícolas de la provincia, ya que la retención hídrica contribuye a la productividad y buenas condiciones del suelo (Torres & Proaño, 2018).

La vegetación del páramo, también da lugar a la formación de microclimas, y se relaciona con la conservación del agua al disminuir la evaporación y con ello mejorar la resiliencia del ecosistema ante el cambio climático. (Brück et al., 2023).

2.3.2 Contexto hídrico de la provincia de Chimborazo

La provincia de Chimborazo cuenta con un sistema hidrográfico compuesto por tres cuencas principales: la cuenca del río Guayas, que ocupa el 36% de la provincia, la cuenca del río Pastaza que ocupa 54% y la cuenca del río Santiago ocupando el 9%; así como cuatro subcuencas: Yaguachi, Patate, Chambo y Namangoza (Bustamante, 2017). El río Chambo se origina en la Cordillera Oriental y recibe aguas de afluentes tales como los ríos Ozogoché, Cubillín, Quimiag, Guamote y Guano (GADPCH, 2023).

La subcuenca del río Chambo es una de las más importantes de la región, abarca aproximadamente 3580 km, y presenta grandes zonas potenciales de recarga hídrica con suelos franco limosos y arenosos; vegetación de páramo y bosque, lo que favorece la infiltración del agua. Por otro lado, en la zona existen zonas rocosas altamente permeables por su porosidad. La subcuenca también se caracteriza por sus relieves escarpados y montañosos con pendientes pronunciadas en las zonas de descarga. Estas áreas generalmente

corresponden a humedales, páramos y lagunas, donde se presenta un alto índice de humedad en el suelo (Lara et al., 2021).

Sin embargo, la subcuenca del río Chambo enfrenta desafíos relacionados con la actividad humana, como la expansión de la industria agropecuaria y el crecimiento poblacional, lo que altera las propiedades hidrofísicas de la cuenca. Con lo expuesto, se realza la importancia de las zonas de recarga hídrica en la provincia, con el fin de garantizar la seguridad hídrica ya que actualmente los esfuerzos de conservación se ven dificultados por la falta de conocimiento para identificar y proteger estas áreas, con un marco regulatorio frágil y actividades humanas que no alcanzan principios de sostenibilidad (Bustamante, 2017).

2.3.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Son herramientas utilizadas en la gestión, modelado y análisis de datos georreferenciados; facilitan el procesamiento de datos espaciales y la comprensión de la relación entre los elementos geográficos con fenómenos específicos. Los SIG son ampliamente usados en campos como la planificación territorial, la prevención de riesgos naturales, la gestión ambiental y catastral (García, 2022).

2.3.4 Teledetección

Es una herramienta utilizada para el monitoreo y análisis de diferentes tipos de cobertura del suelo tales como vegetación, agua, zona antrópica, entre otros, a través del uso de imágenes satelitales de buena resolución y de métodos específicos. Además se lo puede aplicar a un análisis multitemporal para determinar los cambios de la cobertura del suelo en un periodo determinado de tiempo. (Fernández et al., 2020).

Se ha demostrado que es un instrumento valioso para el manejo y conservación de ecosistemas frágiles, ya que se usan como base imágenes de los satélites Landsat y Sentinel-

2, estos datos se pueden procesar mediante clasificadores y algoritmos de entrenamiento como *Random Forest* para cartografiar y analizar de manera precisa áreas de difícil acceso en corto tiempo. (Jara et al., 2019).

A continuación se describe los índices espectrales más usados para el análisis de coberturas de la tierra:

2.3.4.1 Índice de vegetación

Los índices de vegetación son el resultado de combinaciones de bandas del espectro electromagnético que realzan la cobertura vegetal en función de su respuesta espectral. Entre los ejemplos más comunes se encuentran el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Índice de Vegetación de Rango Dinámico Amplio WDRI y el Índice de Vegetación Mejorado 2 EVI2. Su uso depende de los datos de partida, sin embargo el aplicado en este estudio es el NDVI que permite diferenciar la cubierta vegetal en ecosistemas de montaña (Jara et al., 2019).

2.3.4.2 Índice de agua

El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) es un índice espectral utilizado para analizar el contenido y el estado del agua en los cuerpos de agua y en la vegetación (Jara et al., 2019).

2.3.4.3 Índice de suelo

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) constituye un indicador espectral que aplica un factor de corrección para minimizar los efectos de la reflectancia del sustrato en el análisis de la vegetación. Se aplica este índice para el monitoreo de ecosistemas sensibles donde la vegetación es dispersa como es el caso de los páramos o ecosistemas de alta montaña. (Carrillo et al., 2019).

2.3.5 Google Earth Engine (GEE)

Es una plataforma informática utilizada para la interpretación y visualización de datos geoespaciales a gran escala, su gran ventaja es que permite el acceso a grandes conjuntos de datos, al tener a su disposición una biblioteca completa de imágenes de los satélites mas importantes. Además permite identificar cambios ambientales, gestionar recursos naturales, y estudiar fenómenos geográficos de manera rápida y eficiente mediante algoritmos avanzados y una interfaz de programación sencilla. Esta herramienta facilita la integración y procesamiento de grandes volúmenes de datos geoespaciales, haciendo posible la generación de mapas y modelos que informan sobre diversas cuestiones ambientales y territoriales cuyos datos se almacenan en la nube. (Velasategui et al., 2023).

2.3.6 Gestión y protección de los Recursos Hídricos en Ecuador

Ecuador ha venido desarrollando mecanismos para la protección y gestión hídrica, por ejemplo la implementación de Áreas de Protección Hídrica (APH) y el aumento del control en la red de estaciones para el monitoreo de calidad del agua para mitigar la degradación de los ecosistemas, además del Plan Nacional de Gestión Integral de los Recursos Hídricos que incluye medidas para garantizar la seguridad del agua potable doméstica y que ésta cumpla con los estándares nacionales de calidad. También se promueve el tratamiento de la contaminación agrícola difusa y la mejora de la calidad del agua en todos los embalses, ríos y áreas urbanas de recursos hídricos. Otro gran ejemplo son los estudios sobre el aporte de las áreas protegidas del SNAP en la protección de la calidad del agua para hidroeléctricas y el suministro de agua para consumo humano en las ciudades más pobladas (Yáñez et al., 2017).

Sin embargo, estos esfuerzos han sido aislados y a menudo dependen de la iniciativa de los usuarios del agua. Con la emisión de la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y

Aprovechamiento del Agua (LORHUyA), se han formalizado ejes de trabajo conjunto entre el Ministerio del Ambiente (MAE) y la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) para la protección de las fuentes de agua, logrando avances en la delimitación de áreas de protección hídrica, y la definición de caudales ecológicos (CISPDR, 2016).

2.3.7 Ecosistema páramo en Ecuador

Áreas sobre los 3400 m.s.n.m. conforman este ecosistema altoandino que ocupa el 7% de la superficie del país, representando el 47% de los páramos del mundo y alberga aproximadamente al 25% de la biodiversidad total del planeta entre flora y fauna. Su importancia radica en su capacidad de regulación hídrica actuando como una esponja natural que retiene y libera agua lentamente, abasteciendo cuerpos de agua vitales en la dotación para la población y demás ecosistemas bajos. También los páramos son importantes reservorios de carbono orgánico, lo que ayuda en gran medida a mitigar el cambio climático (Cáceres, 2019). La provincia de Chimborazo es privilegiada al contar con una extensión total de páramo de 196,053 hectáreas, tal como se menciona en el Plan Nacional de Páramos (MAATE, 2023).

El páramo se caracteriza por un clima frío y húmedo, con temperaturas que varían entre 2°C y 18°C, abundantes precipitaciones en forma de lluvia, nieve o granizo y frecuente presencia de neblina. Los suelos son generalmente ácidos, ricos en materia orgánica y tienen una alta capacidad de retención de agua, lo que ayuda a la regulación hídrica. Sin embargo, es un ecosistema frágil, ya que está expuesto a amenazas como la expansión de la frontera agrícola, la ganadería, los incendios forestales y el cambio climático, que de una u otra manera alteran la estructura natural del suelo y compromete su capacidad para retener agua y carbono (Brück et al., 2023).

A continuación se describen las principales características de los páramos en relación con los componentes agua, suelo, flora y fauna; y almacenamiento de carbono orgánico.

2.3.7.1 Componente agua

Los páramos, debido a las características de sus suelos de baja densidad aparente, el desarrollo de vegetación especializada y la acumulación de materia orgánica, tienen una alta capacidad para producir, almacenar y regular agua de calidad. Estos ecosistemas son fundamentales para abastecer las cuencas hidrográficas, proporcionando agua no solo para el consumo doméstico, sino también para el riego, el abrevadero de animales y la industria, apoyando así el desarrollo económico, social y cultural de las comunidades (Lazo et al., 2019).

En Ecuador, el volumen de precipitaciones anuales en los páramos oscila entre 500 y 2000 mm, presentando un patrón de dos temporadas de humedad que van de febrero a mayo y de octubre a diciembre. El páramo normalmente registra precipitaciones de moderada a alta intensidad, con lluvias frecuentes y de intensidad baja (Carrillo-Rojas et al., 2019). En el páramo, el uso de agua es reducido debido a la preponderancia de pajonales y hierbas xerofíticas, las cuales poseen propiedades de baja evaporación. La elevada producción de agua y la reducida evapotranspiración conducen a un flujo base constante de las vertientes y ríos que son alimentados por el páramo durante todo el año, manteniendo una humedad relativa por encima del 90% (Morocho & Chuncho, 2019).

2.3.7.2 Componente suelo

En las regiones centro y norte de Ecuador, los terrenos del páramo están principalmente compuestos por cenizas volcánicas jóvenes, que son de color negro, de gran grosor y muy permeables. Estos terrenos poseen un alto nivel de retención de agua y una densidad aparente baja, lo que se relaciona a su elevado contenido de carbono orgánico. En

el sur del país, donde la actividad volcánica está ausente, los suelos aún presentan características especiales de baja densidad aparente y alta capacidad de retención de agua (-1500 kPa), lo que indica un predominio de microporos y un gran reservorio de agua inactiva (Morocho & Chuncho, 2019).

2.3.7.3 Componente Flora y Fauna

La vegetación del páramo incluye muchas especies de plantas endémicas, adaptadas a las condiciones extremas de baja presión atmosférica, intensa radiación ultravioleta y efectos de secado por el viento. La vegetación consiste principalmente en pajonales, rosetas, arbustos pequeños y musgos, lo que contribuye a la diversidad biológica del ecosistema (Morocho & Chuncho, 2019).

2.3.7.4 Almacenamiento de Carbono

Las bajas temperaturas del páramo, junto con las tasas lentas de descomposición y la acumulación de materia orgánica, lo convierten en uno de los sumideros de carbono más importantes, almacenando seis veces más carbono que los bosques tropicales. Este almacenamiento de carbono ayuda a regular el clima, (Morocho & Chuncho, 2019). Esta importante característica de los suelos del páramo se refleja en estudios, donde se menciona que en páramos húmedos, el contenido de Carbono Orgánico puede superar el 40 %, mientras que en páramos jóvenes, oscila entre 2 y 10 %, similar en páramos secos. Cabe mencionar que los suelos con plantación de pino presentan menos capacidad de retener carbono que suelos con pajonales; a medida que disminuye la materia orgánica del suelo, disminuye también la capacidad de retención de agua (Saltos & Flores, 2024).

2.3.8 Estrategias de conservación de Páramos

La diversidad biológica de los páramos en Ecuador está en riesgo debido a la modificación en el uso del suelo y al crecimiento agropecuario, lo que impacta equilibrio

ecológico. Frente a esta circunstancia, el país ha puesto en marcha el Plan de Acción Nacional de Páramos, el cual define metas y objetivos para el año 2030, centrándose en la administración sostenible, la preservación de su biodiversidad y recursos hídricos, y la recuperación de servicios ecosistémicos. Este plan tiene como objetivo potenciar la capacidad de resiliencia de este ecosistema ante el cambio climático, impulsar la gobernanza inclusiva con la implementación de conocimientos y prácticas ancestrales, brindar pautas para el financiamiento de proyectos sostenibles y fomentar la educación e investigación para garantizar el desarrollo sostenible y la calidad de vida de las comunidades que dependen de estos ecosistemas (MAATE, 2023).

Pese a que la legislación contempla incentivos para la preservación de los páramos, no todos están en funcionamiento. Iniciativas como el Programa Socio Bosque y ciertos fondos de agua han conseguido progresos notables, sin embargo, otros instrumentos, como el estímulo financiero mencionado en el artículo 50 de la Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios, todavía no se han concretado completamente. Esto con el objetivo de financiar la preservación y recuperación de páramos a través de iniciativas comunitarias. Para impulsar estas iniciativas, es importante replicar proyectos exitosos de desarrollo sostenible en ecosistemas de alta montaña incluyendo turismo responsable. Además, es necesario robustecer los sistemas de información local para tener información climática actualizada que apoye decisiones eficaces y fomente la educación pública acerca de la realidad e importancia de sus ecosistemas (Hofstede et al., 2023).

Capítulo 3

Diseño Metodológico

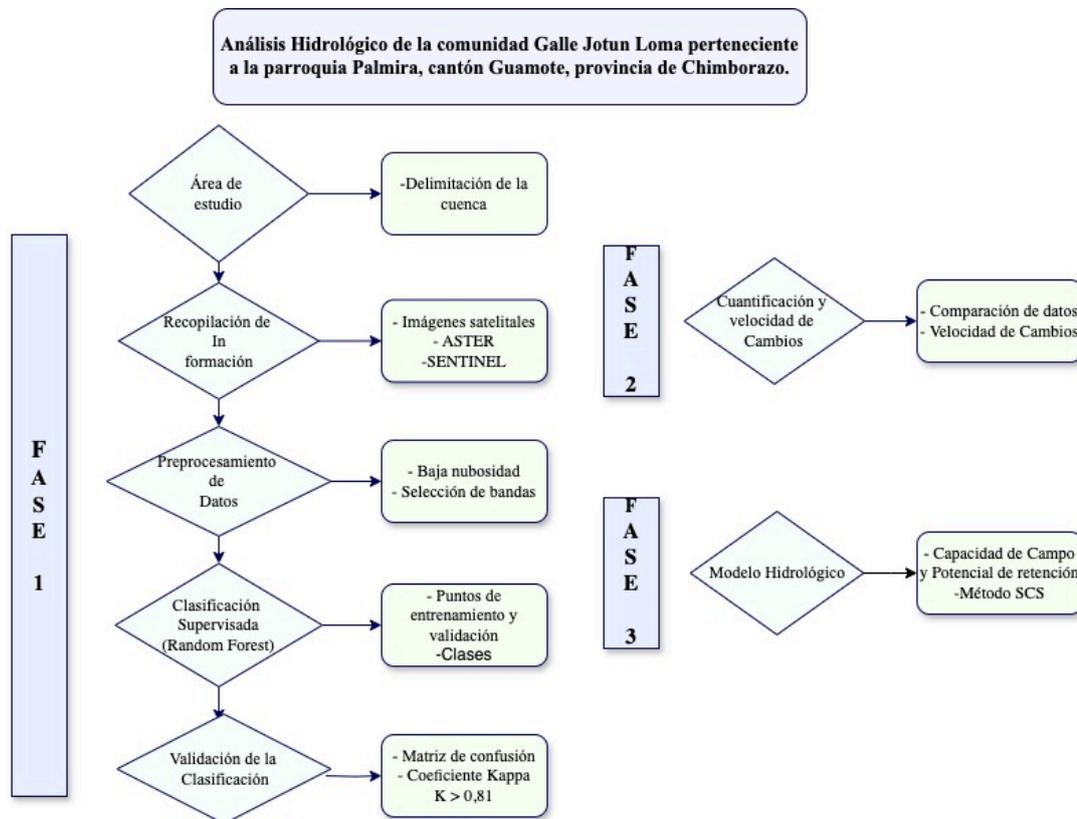
3.1 Enfoque de la Investigación

La presente investigación tiene un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión integral del análisis hidrológico en la comunidad de Galte Jatun Loma. El método cuantitativo se empleará para cuantificar y examinar datos numéricos vinculados a factores hidrológicos como la lluvia, la escorrentía y las variaciones en la cobertura vegetal. Por otro lado, el método cualitativo se aplicará para conocer las percepciones de los residentes de la comunidad en relación con la administración del agua y las prácticas de sostenibilidad.

Para el desarrollo del presente proyecto, se definieron tres fases expuestas en la ilustración 1, donde cada fase corresponde al desarrollo de cada objetivo y abarcan cada una de las actividades realizadas.

Ilustración 1

Metodología aplicada para el desarrollo del proyecto



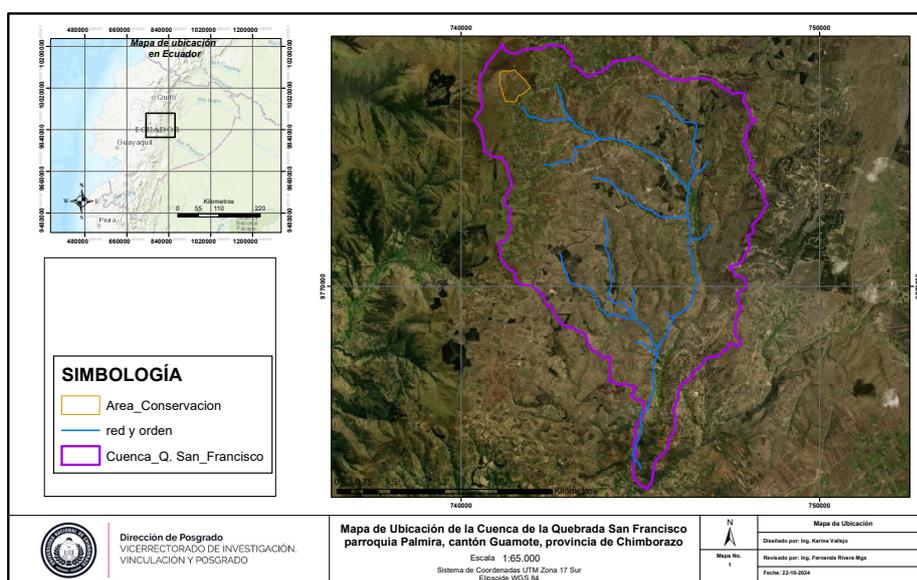
Fuente: Autor

3.2 Área de estudio

La presente investigación comprende la cuenca de la quebrada San Francisco, que abarca la comunidad Galte Jatun Loma, de la parroquia Palmira, cantón Guamote, tal como se aprecia en la ilustración 2. La quebrada San Francisco posee una extensión de 57,35 km². De acuerdo con el Plan de Ordenamiento y Desarrollo territorial de Palmira (2023). La parroquia Palmira se ubica a una altura entre los 2560 a los 4200 m.s.n.m. y limita al norte con la parroquia Cebadas y Guamote, al Sur por la parroquia Tixán, al Este por la parroquia Cebadas y al Oeste por Guamote y Pallatanga.

Ilustración 2

Mapa de ubicación de la cuenca de la Quebrada San Francisco



Fuente: Autor

3.3 Fase 1. Recolección y preprocesamiento de datos

Para la recolección de datos e imágenes satelitales se usó la herramienta Google Earth Engine, el software ArcGIS y Excel para cálculos y tablas, como se describe a continuación.

3.3.1 Preprocesamiento de datos en Google Earth Engine

En la base de datos de Google Earth Engine, se encuentra un catálogo de imágenes satelitales con correcciones radiométricas y atmosféricas. Para el estudio fue importante seleccionar imágenes con la menor cantidad posible de nubes, éstas fueron: imágenes Aster para el período del 2000 al 2010 y Sentinel para los períodos del 2010 al 2016 y del 2016 al 2024. Las características de las bandas de las colecciones usadas se describen en las tablas 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1

Catálogo de datos Earth Engine "ASTER L1T" Radiancia

Colección de ASTER L1T Radiance					
Instrumento de medición: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)					
Satélite: Terra de la NASA.					
Número de bandas: 14 bandas, desde el visible hasta el infrarrojo térmico.					
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.

Tabla 2

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

Colección de COPERNICUS/S2_HARMONIZED 2 Level-2A.					
Instrumento de medición: MultiSpectral Instrument (MSI)					
Satélite: Sentinel-2A y Sentinel-2B					
Número de bandas: 13 bandas, desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta.					

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 infrarojo cercano (VNIR)
B6	0.0001	20 metros	740.2nm (S2A) / 739.1nm (S2B)	Visible e infrarojo cercano (VNIR)
B7	0.0001	20 metros	782.5nm (S2A) / 779.7nm (S2B)	Visible e infrarojo 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.

Para el proyecto, se seleccionó la imagen ASTER/AST_L1T Radiance del 2 de octubre del 2001 para el primer período, COPERNICUS/S2_HARMONIZED del 23 de enero del 2016 para el segundo período y del 24 de agosto del 2020 para el tercer período. Una vez que se obtuvieron las imágenes de interés, se establecen las bandas de predicción de acuerdo a la imagen utilizada, y se agregó la colección NICFI basemaps de Planet Labs, ya que captura imágenes de alta resolución (Vizzari, 2022) y ayudó a contrastar la visualización en GEE.

3.3.2 Clasificación de la cobertura de la tierra

Los tipos de cobertura usados para la detección de cambios, se basan de acuerdo a la clasificación del Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador definida por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), la cual se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3

Clases de cobertura y uso de la Tierra según el MAATE

Nivel I	Nivel II	Descripción
Bosque	Bosque Nativo	Ecosistema arbóreo, primario o secundario, regenerado por sucesión natural
	Plantación Forestal	Masa arbórea establecida antrópicamente con una o más especies forestales.
Vegetación Arbustiva y Herbácea	Páramo	Vegetación tropical altoandino
	Vegetación Herbácea	Áreas constituidas por especies herbáceas nativas con un crecimiento espontáneo,
Tierra Agropecuaria	Tierra Agropecuaria	Área bajo cultivo agrícola y pastos plantados
Cuerpo de Agua	Natural	Superficie y volumen asociado de agua estática o en movimiento.
	Artificial	Asociadas con las actividades antrópicas y el manejo del recurso hídrico.
Zona Antrópica	Área Poblada	Áreas ocupadas por viviendas y edificios.
	Infraestructura	Obra civil de transporte, comunicación, agroindustrial y social.
Otras Tierras	Área sin cobertura vegetal	Generalmente desprovistas de vegetación.
	Glaciar	Nieve y hielo localizados en las cumbres de las elevaciones andinas.

Fuente: Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra MAATE, 2023

Para el presente estudio, se seleccionaron 5 clases para la cobertura de la tierra y los colores empleados en GEE se seleccionaron en base a la Agencia Espacial Europea (ESA). En el contexto de la investigación, se considera como “Otras tierras” a áreas que comprende zonas de humedales, ya que al no considerarlas existía un error en la clasificación de las coberturas. Las clases seleccionadas con su respectivo color se detalla en la tabla 4.

Tabla 4

Clases seleccionadas de cobertura de la tierra con su paleta de colores

Clase	Valor de la clase	Color ArcGis 10.8	Código GEE
Bosque	0	Verde hoja	#0a7607
Tierra agropecuarias	1	Amarillo Sol	#edd700
Zona antrópica	2	Rojo Marte	#da0000
Otras tierras	3	Gris	#544141
Páramo	4	Naranja	#e07b18

Fuente: Códigos tomados de la Agencia Espacial Europea (ESA)

3.3.3 Identificación de puntos de entrenamiento y validación

Los puntos tanto de entrenamiento como de validación se obtuvieron a partir de un muestreo aleatorio simple, calculado con la ecuación 1, en base a los píxeles de la cuenca en estudio (Quispetera, 2023).

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} \quad (1)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

N = Tamaño de la población

Z^2 = Valor de la distribución normal estándar para un nivel de confianza del 95%

e = Error de estimación, 5%

p = Proporción de elementos que presentan la característica de interés.

$$q = 1 - p$$

Los puntos fueron ponderados de acuerdo a la proporción asignada a cada clase seleccionada, tal como se detalla en la tabla 5. Para determinar los puntos de validación, se realizó salidas de campo a la Comunidad Galte Jatun Loma y se tomaron coordenadas de zonas que no han tenido cambios a lo largo del tiempo en su cobertura y uso de la tierra, especialmente en zonas de páramo.

Tabla 5

Puntos de entrenamiento y validación de cada clase

Clase	Píxeles	%	Puntos Entrenamiento	Puntos Validación
Áreas antrópica	10718	18	50	8
Áreas agropecuarias	410732	18	50	8
Bosque	32542	18	50	8
Páramo	21839	26	50	12
Otras tierras	42690	20	50	10
TOTAL		100	250	46

Fuente: Autor

3.3.4 Clasificación supervisada con Random Forest

Se realizó la clasificación supervisada mediante un conjunto de datos de entrenamiento para los 3 períodos en estudio, usando en cada caso las bandas adecuadas para obtener su respectivo falso color. Aquí se ubicaron varios puntos para cada categoría que identifican las características espectrales de cada clase de cobertura de la tierra de manera que se “supervisa” la clasificación de las mismas (Fernández et al., 2020).

En Google Earth Engine, se colocó el código respectivo al clasificador Random Forest (RF), este método consiste en la construcción de varios árboles de decisión en base a

los puntos (píxeles) seleccionados durante el entrenamiento y los puntos de validación, los combina y decide la combinación con mayor precisión (Dieguez et al., 2023).

3.3.5 Validación de datos

Los mapas o productos generados a partir de sensores remotos, requieren ser validados, para evaluar la calidad de los mapas generados y fortalecer el nivel de confianza de la información obtenida (Leiva, 2023). Esta validación se realizó a partir de la matriz de confusión o matriz de error y el coeficiente Kappa.

3.3.5.1 Matriz de confusión

Se determinó la matriz de confusión en GEE, incluyendo en el código, los datos de entrenamiento y validación seleccionados previamente. Es una tabla de doble entrada en la que se reflejan los puntos correctamente clasificados (en la diagonal) y los errores cometidos por el modelo, fuera de la diagonal. Una vez que se obtuvo la matriz de confusión en GEE, se llevó a Excel para determinar los errores tanto de omisión como comisión y verificar la validez de los resultados (Cardille et al., 2023). En la Ilustración 3 se muestra un ejemplo de matriz de confusión tomando en cuenta tres clases, con sus respectivos errores.

Ilustración 3

Ejemplo de matriz de confusión y los tipos de errores

		Observaciones a campo			Errores por inclusión	
		Agua	Vegetación	Suelo desnudo	Suma	Precisión del usuario
Clasificación	Clase 1	245	0	8	253	0,97
	Clase 2	23	356	5	384	0,93
	Clase 4	0	6	156	162	0,96
	Suma	268	362	169	799	
Precisión del productor		91,42	98,34	92,31		0,95
		Errores por exclusión			Precisión general	

Fuente: Tomado de (Dieguez et al., 2023)

3.3.5.2 Coeficiente Kappa

El coeficiente Kappa, se obtuvo directamente en GEE y corroborado en Excel a partir de la matriz de confusión. Consiste en evaluar el rendimiento de una clasificación en comparación con lo que se esperaría de una clasificación aleatoria. El valor del coeficiente Kappa puede ir entre -1 y 1, donde un valor negativo indica que la clasificación es peor que una asignación aleatoria de categorías, y los valores positivos indican una precisión fuerte, si K es mayor a 0,8, una precisión moderada si K está entre 0,40 a 0,80, y una precisión pobre si K es menor a 0,4 (Leiva, 2023). En la tabla 6 se detalla la valoración más usada para el coeficiente Kappa.

Tabla 6

Rangos de clasificación del Coeficiente Kappa

Coeficiente 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: (Leiva, 2023), (Landis & Koch, 1977)

La fórmula utilizada para determinar el coeficiente Kappa (Cardille et al., 2023) se la presenta a continuación, en la ecuación 2

$$Kappa = \frac{(Precisión\ observada - concordancia\ aleatoria)}{(1 - concordancia\ aleatoria)} \quad (2)$$

En donde la Precisión observada representa el porcentaje de casos que fueron correctamente clasificados en relación al total de casos y se la calcula de la siguiente manera:

$$Precisión\ observada = \frac{\Sigma\ aciertos\ en\ la\ diagonal}{total\ elementos} \quad (3)$$

La concordancia aleatoria se calcula con los totales de las filas y columnas de la matriz de confusión con la siguiente fórmula:

$$\text{Concordancia aleatoria} = \Sigma \left(\frac{\text{total fila}}{\text{total general}} * \frac{\text{total columna}}{\text{total general}} \right) \quad (4)$$

3.4 Fase 2. Cuantificación de los cambios

Para la determinación de los cambios en la cobertura y uso de la tierra en la cuenca de la quebrada San Francisco, se aplicó el método de detección de cambios, el cual utiliza imágenes satelitales con diferentes resoluciones para analizar la variabilidad en las imágenes relacionadas con un área en particular que se captura en un período de tiempo distinto. Es un método útil para identificar condiciones ambientales como el impacto de eventos naturales, degradación de ecosistemas y cambios en la cobertura y uso de la tierra. (Afaq & Manocha, 2021).

3.4.1 Comparación de datos

En Google Earth Engine, se colocó el código para realizar la comparación entre las imágenes de los 3 períodos en estudio, mediante el NBR que resulta de la resta del valor espectral de la primera imagen, con el valor de la segunda imagen, esta comparación se realiza píxel por píxel. Luego se clasifican las imágenes por el método de umbral, colocando valores de ganancia (1) y pérdida (2) (Cardille et al., 2023).

3.4.2 Tasa de Cambios

Para evaluar la tasa de degradación de los cambios en el uso de la tierra, se empleó una fórmula adaptada de Ortiz-Solorio et al. (1994), utilizando las Ecuaciones 9 y 10, así como los indicadores correspondientes a cada clase propuestos por la FAO (1984) presentados en la Tabla 7.

$$ID = \frac{(\% \text{ de US del último año} - \% \text{ del US del año anterior})}{\% \text{ de US del último año}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{ID en \% por año} = \frac{ID}{\text{Número de años del periodo evaluado}} \quad (6)$$

Donde:

ID = incremento de la degradación y

US = uso del suelo.

Tabla 7.

Intervalos de clases para evaluar la tasa 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).

La clasificación de la degradación del uso del suelo se define en diferentes niveles de impacto. La categoría ‘recuperación’ se refiere al incremento en la extensión de la superficie correspondiente al uso del suelo; por otro lado, la categoría ‘nula’, indica que no existen cambios. La categoría ‘ligero’ se refiere a un efecto negativo mínimo, mientras que ‘moderado’ indica un efecto negativo más evidente; la categoría ‘severo’, indica que existe una reducción importante en la superficie de uso del suelo, y la categoría ‘muy severo’ indica que el suelo no es aprovechable (FAO, 1984).

3.5 Fase 3. Modelo hidrológico

3.5.1 Capacidad de Campo y potencial de retención

Se calcula el número de curva (CN) y el potencial máximo de retención (S), a partir de los parámetros hidráulicos de la cuenca, obtenidos en el procesamiento de datos en ArcMap.

La capacidad de campo o retención máxima potencial (S) guarda relación con la cobertura vegetal, taxonomía y textura del suelo. El suelo se clasifica en cuatro grupos hidrológicos (A, B, C y D) según el porcentaje mínimo de infiltración, estos grupos fueron asignados en base al uso del suelo textura y composición del suelo, estableciendo un rango numérico de 1 a 99, donde 99 representa clases impermeables, como por ejemplo zonas urbanas, agua y nieve; y los valores mas bajos representan zonas mayormente permeables (Feldman, 2000).

Esta medición permite establecer la relación entre las propiedades del suelo y su cobertura dentro de la cuenca mediante los valores del CN Para su cálculo se puede aplicar las ecuaciones 7 y 8, para el número de curva o capacidad de campo respectivamente (Castejón-Villalobos et al., 2023).

$$CN = \frac{25400}{254 + S} \quad (7)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (8)$$

Donde:

CN= número de curva

S= Capacidad de campo

3.5.2 Cálculo de Abstracción Inicial

Es un parámetro importante al aplicar el método de Número de Curva en la estimación de la escorrentía de una cuenca partiendo de datos registrados de precipitación, ya que a partir de ello se evalúa la capacidad de respuesta de las cuencas ante eventos de lluvia, la Abstracción Inicial (I_a) se calcula a partir de la ecuación 9.

$$I_a = 0,2 * S \quad (9)$$

3.5.3 Relación precipitación – escorrentía en Hec-HMS

El modelado se llevará a cabo con el uso de herramientas geoespaciales como ArcGIS y el software HEC-HMS para transformar datos de precipitación en escorrentía a partir de la información de las estaciones meteorológicas que tienen incidencia en la microcuenca. El proceso implica calcular previamente los valores del número de curva y el almacenamiento máximo, estableciendo parámetros iniciales que permitirán al modelo simular los caudales promedio considerando las pérdidas hidrológicas asociadas a la precipitación (Borba & Cirilo, 2024). El software usa la ecuación 10 para determinar la precipitación media uniforme de la cuenca.

$$P_{sb}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n P_{em}(i,j)w(j)}{\sum_{j=1}^n w(j)} \quad (10)$$

Donde:

$P_{sb}(i)$ = Precipitación media sobre una subcuenca en un intervalo i

n = número de estaciones meteorológicas presentes en la cuenca

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

$w(j)$ = Área de influencia de la estación j

3.5.4 Calibración del modelo en HEC-HMS

Se realiza la calibración del modelo de manera que los resultados simulados se aproximen con los datos observados, esto permite mejorar la representación de los procesos hidrológicos dentro de la cuenca, incrementando la precisión y confiabilidad de las simulaciones. Para la calibración, se seleccionó una fecha aleatoria dentro del periodo de estudio, considerando las variables de CN, tiempo de retardo y abstracción inicial en base a las condiciones de la cuenca. (Gunathilake et al., 2020)

3.5.5 Método de Hidrograma Unitario

El método del hidrograma unitario SCS se utiliza datos de escurrimiento para obtener datos de caudal con respecto al tiempo, representado en un hidrograma. Para el cálculo del Hidrograma Unitario se utilizan las expresiones mencionadas a continuación (Sardoii et al., 2012).

3.5.5.1 Tiempo de Pico T_p

El tiempo de pico, o tiempo hasta el pico del hidrograma unitario, se calcula con la fórmula 11.

$$T_p = 0,133 * T_c \quad (11)$$

Donde:

T_p = Tiempo al pico del hidrograma unitario (horas),

T_c = Tiempo de concentración de la cuenca (horas).

3.5.5.2 Caudal pico Q_p

El caudal pico del hidrograma unitario se lo calcula a partir de la ecuación 12.

$$Q_p = \frac{484 * A}{T_c} \quad (12)$$

Donde:

Q_p = Caudal máximo (m³/s),

A = Área de la cuenca (km²),

T_p = Tiempo al pico del hidrograma (horas).

3.5.5.3 Forma del hidrograma unitario

El hidrograma unitario SCS tiene una forma estandarizada, donde la duración de la fase ascendente y descendente se distribuye de manera simétrica en torno al tiempo pico T_p (Chu & Steinman, 2009). Donde se dice que el incremento ocurre en un 40% del tiempo total y la disminución, corresponde al 60% del tiempo restante.

3.5.5.4 Distribución del hidrograma en intervalos de tiempo

Para construir el hidrograma unitario SCS en intervalos de tiempo determinados, se emplean valores de tiempo y caudal proporcionales extraídos de las tablas estandarizadas del SCS, que establecen 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 *Quebrada San Francisco*

Los resultados geomorfológicos de la cuenca de la quebrada San Francisco se presentan en la Tabla 8. Según la clasificación pfafstetter corresponde a un nivel 7 y abarca un área de 57.35 km². Presenta un índice de compacidad de 1.46, indicando una forma algo alargada y menos compacta que una cuenca circular ideal, lo cual puede afectar el tiempo de concentración del agua de lluvia hacia el cauce principal. Su longitud media de 17.14 km, su factor de forma de 0.1952 y relación de elongación de 0.4985 reflejan la forma elongada de la cuenca. Con la relación de circularidad de 0.4678, se corrobora la forma y favorece escurrimientos más rápidos.

Con los parámetros de relieve se determina una pendiente media de 19.64%, lo cual indica un terreno moderadamente escarpado. La altitud máxima es de 4168 m.s.n.m. y la

mínima de 2949 m.s.n.m., con lo que se tiene una relación hipsométrica de 9.08%, indicando que existe un rápido escurrimiento en la cuenca.

De acuerdo a los parámetros de drenaje, la red hídrica corresponde a un orden 3, con un total de 36.036 km de longitud de los canales y una densidad de drenaje de 0.628 km^{-1} . La densidad hidrográfica es de 0.401 km^{-1} , lo que indica una moderada capacidad de drenaje en la cuenca. Por otro lado el tiempo de concentración es 0.548 horas y el tiempo de retardo de 0.329 horas, con lo que se estima que la respuesta de la cuenca ante eventos de lluvia intensa puede ser rápida.

Tabla 8

Parámetros geomorfológicos de la cuenca de la quebrada San Francisco

PARÁMETROS DE FORMA			
Parámetro	Sigla	Unidad	Valor
Área	A	km^2	57,35
Perímetro	P	km	39,25
Índice de Compacidad	Ic	Adimensional	1,461
Ancho medio	B	Adimensional	3,345
Longitud media	Lc	km	17,141
Factor de Forma	Ff	Adimensional	0,1952
Relación de elongación	Re	Adimensional	0,4985
Relación de circularidad	Rci	Adimensional	0,4678
PARÁMETROS DE RELIEVE			
Área sobre la curva	AS	km^2	1854614,775
Área bajo curva	Ab	km^2	204135,224
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	19,641
Longitud del cauce principal	Lc	km	17,141
Altura máxima del río	Hmax	msnm	4168
Altura mínima del río	Hmin	msnm	2949
Relación hipsométrica	Rh	%	9,08
PARÁMETROS DE DRENAJE			
Orden de la red hídrica	Or	Adimensional	3
Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	Lt	km	36,036

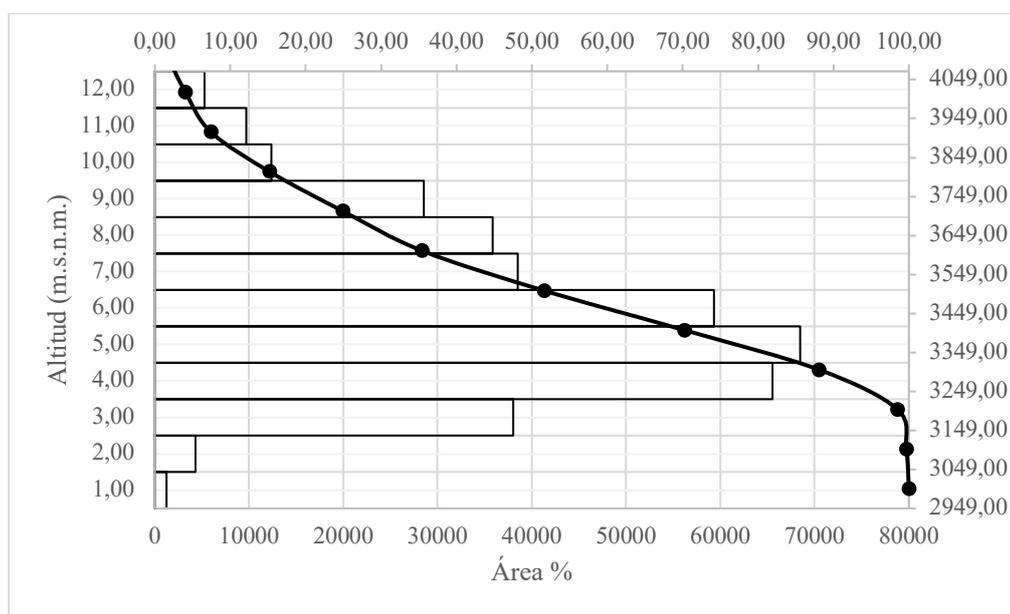
Densidad de drenaje	Dd	km-1	0,628
Número de canales	Nt	Adimensional	23
Densidad hidrográfica	Dh	km-1	0,401
Pendiente media del cauce principal	Sm	Adimensional	71,115
Tiempo de concentración	Tc	h	0,548
Tiempo de Retardo	Tr	h	0,329

Fuente: Autor

De acuerdo con la forma de la curva hipsométrica (Ilustración 4), la cuenca parece tener un equilibrio entre erosión y acumulación, característico de una etapa intermedia o madura, ya que la curva no es extremadamente empinada ni completamente plana, tiene una pendiente inicial pronunciada que luego se suaviza en la parte media y baja de la cuenca. Lo que indica que la cuenca tiene una topografía montañosa típica, con un escurrimiento rápido en las zonas altas y un área más estable en las altitudes inferiores.

Ilustración 4

Curva hipsométrica de la cuenca de la quebrada San Francisco



Fuente: Autor

4.2 Cuantificación de cambios

En la cuenca de la quebrada San Francisco, se asignan porcentajes de acuerdo a la importancia de las clases en estudio en base al área total en píxeles; de esta manera se obtuvieron tanto los puntos de validación tal como se muestra en la Tabla 9. En donde W_i se refiere a la proporción cartografiada, U_i a la precisión esperada del usuario y S_i la desviación estándar.

Tabla 9

Puntos de Validación

	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras Tierras	Páramo	Total
Área en píxeles	32542	410732	10718	42690	21839	518521
W_i	0,06	0,79	0,021	0,08	0,04	1,00
U_i	0,80	0,90	0,80	0,85	0,70	
S_i	0,40	0,30	0,40	0,36	0,46	
W_i*S_i	0,03	0,24	0,008	0,029	0,02	0,32
				Precisión general		0,05
				Número de muestras		41

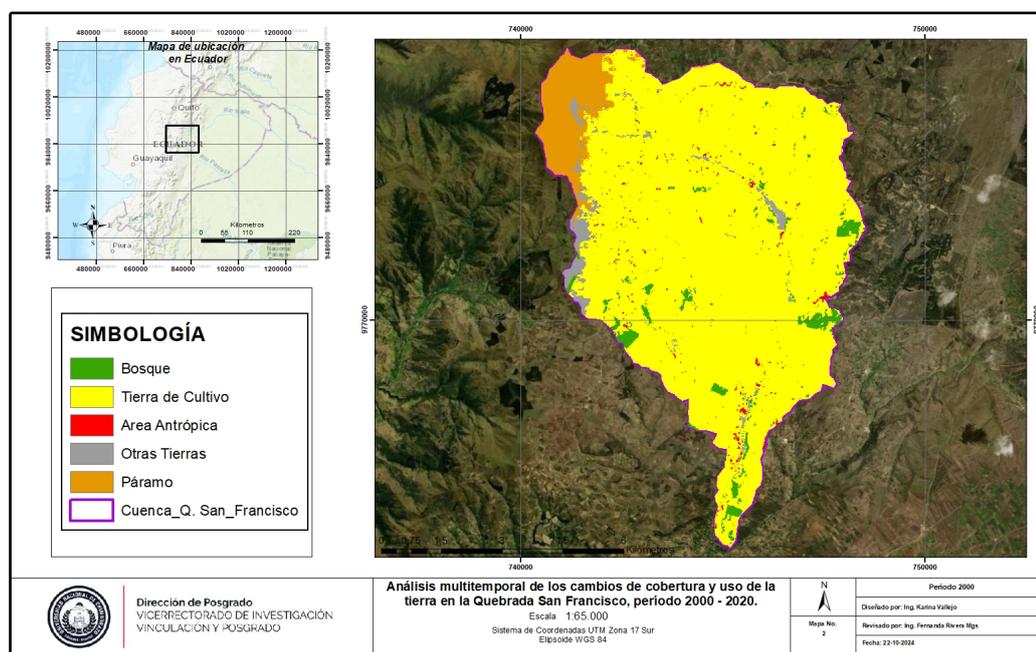
Fuente: Autor

4.2.1 Validación de datos período 2000

En la ilustración 5 se observa el estado de la quebrada San Francisco en el año 2000 donde predomina la clase de Tierra Agropecuaria en toda la cuenca, con una notable presencia de terrenos destinados a la agricultura o ganadería. La clase de bosque se encuentran bastante dispersas lo que indica que aún existen zonas sin intervención agrícola. En las zonas más elevadas, se observa páramo, un ecosistema altoandino característico, que actúa como una zona de captación de agua y protección de la biodiversidad. Las otras tierras, que en este caso comprende los humedales, son escasos y se localizan en áreas específicas de la cuenca, mientras que las áreas antrópicas son mínimas, lo que indica una baja urbanización en este periodo.

Ilustración 5

Mapa de uso y cobertura de la tierra de la quebrada San Francisco año 2000



Fuente: Autor

Tabla 10

Matriz de confusión para el periodo 2000

Clase	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras Tierras	Páramo	Total	Error de Comisión
Bosque	8	0	0	0	0	8	0
Tierra de Cultivo	1	7	0	0	0	8	1
Área Antrópica	0	1	7	0	0	8	1
Otras Tierras	0	0	0	9	1	10	1
Páramo	0	0	0	0	12	12	0
Total	9	8	7	9	13	46	
Error de Omisión	1	1	0	0	1		

Fuente: Autor

Tabla 11

Coefficiente Kappa del periodo 2000

Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras Tierras	Páramo	Total
--------	---------------------	----------------	---------------	--------	-------

Concordancia aleatoria	0,207	0,030	0,030	0,026	0,042	0,074
Precision observada o global						0,935
Kappa						0,918

Fuente: Autor

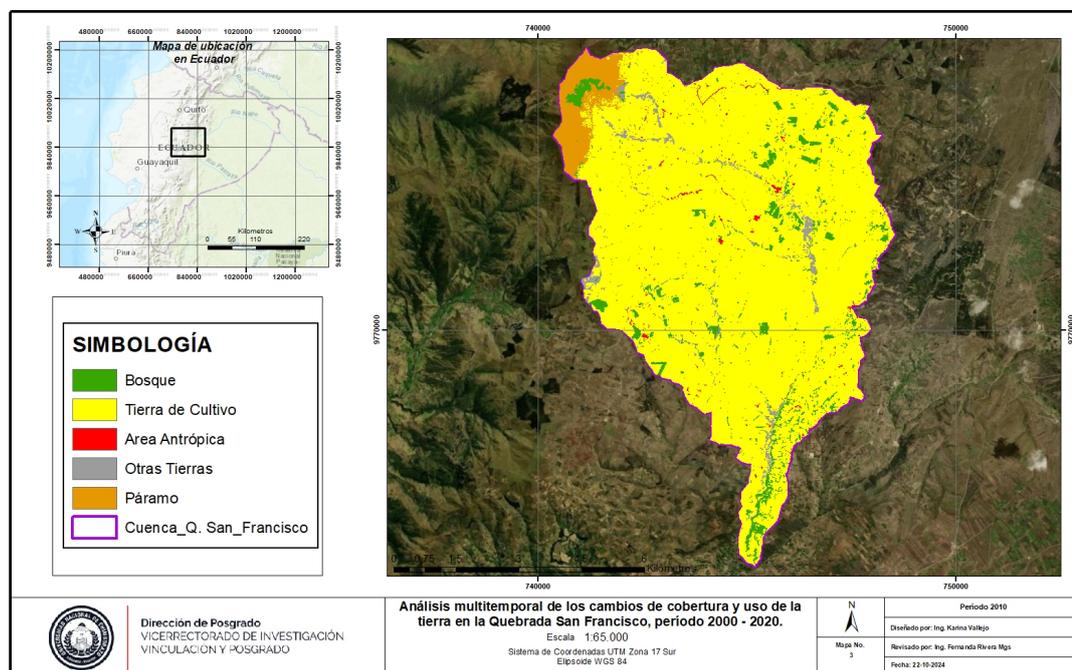
La matriz de confusión correspondiente al 2000 (Tabla 10) presenta una buena precisión en las clases de cobertura de suelo; la clase Bosque y Páramo no presentan errores de comisión, mientras que Tierra de Cultivo y Área Antrópica tienen un error de comisión leve, con solo un píxel clasificado incorrectamente en cada caso. El error de omisión, solo se observa en las clases Bosque, Tierra de Cultivo y Páramo, con un píxel omitido en cada una. La precisión general observada es del 93.5%, y el índice de Kappa (Tabla 11) es 0.918, lo que indica un alto nivel de concordancia entre la clasificación observada y esperada, a pesar de las limitaciones de resolución de las imágenes ASTER.

4.2.2 Validación de datos período 2010

La cobertura vegetal y uso de la tierra en el año 2010 (Ilustración 6) mantiene un predominio de las áreas agropecuarias; la clase bosque se mantienen en ciertas zonas de la cuenca, y disminuye moderadamente con respecto a los otros años de estudio, posiblemente debido a la expansión agrícola o el cambio en el uso de la tierra. El páramo continúa estando presente en las partes más altas de la cuenca, mientras que la clase antrópica aumenta ligeramente. En este periodo de análisis, es importante notar que existe un cambio en la resolución de imágenes comparándolas con la del 2000, esto se debe a que para este período se usó imágenes SENTINEL-2 además de la herramienta planet para tener mejor resolución.

Ilustración 6

Mapa de uso y cobertura de la tierra de la quebrada San Francisco año 2010



Fuente: Autor

Tabla 12

Matriz de confusión para el período 2010

Clase	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras Tierras	Páramo	Total	Error de Comisión
Bosque	7	1	0	0	0	8	1
Tierra de Cultivo	0	7	0	1	0	8	1
Área Antrópica	0	0	8	0	0	8	0
Otras Tierras	1	0	0	9	0	10	1
Páramo	0	0	0	0	12	12	0
Total	8	8	8	10	12	46	
Error de Omisión	1	1	0	1	0		

Fuente: Autor

Tabla 13*Coeficiente Kappa del período 2010*

	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras Tierras	Páramo	Total
Concordancia aleatoria	0,206	0,030	0,030	0,030	0,047	0,068
Precision observada o global						0,935
Kappa						0,917

Fuente: Autor

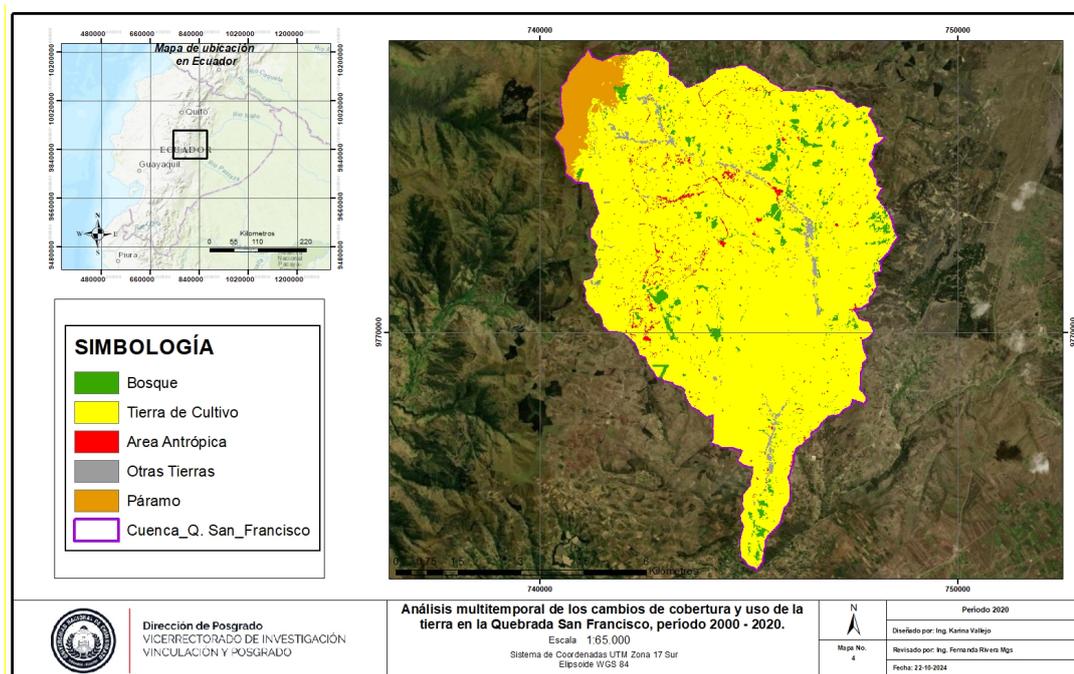
La matriz de confusión (Tabla 12) para el año 2010 muestra una alta precisión, con un error de comisión igual a 3 y un error de omisión igual a 3, en las clases de bosque, tierra agropecuaria y otras tierras. La concordancia Kappa (Tabla 13) también refleja esta alta precisión, alcanzando un valor de 0,917, con una precisión global del 93,5%.

4.2.3 Validación de datos período 2020

En la Ilustración 7 se puede observar el estado de la quebrada San Francisco en el año 2020. Las áreas agropecuarias siguen siendo la clase de uso predominante en la cuenca, lo que indica una dependencia considerable de actividades agrícolas en parroquia. La clase bosque aparece menos en comparación con los años anteriores, el páramo en las zonas elevadas sigue siendo visible, aunque en menor proporción; mientras que las áreas antrópicas van en aumento. Esta tendencia de uso de la tierra podría tener alterar la capacidad de la cuenca para manejar el escurrimiento, infiltración y el flujo hacia el cauce principal.

Ilustración 7

Mapa de uso y cobertura de la tierra de la quebrada San Francisco año 2020



Fuente: Autor

Tabla 14

Matriz de confusión para el período 2020

Clase	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras Tierras	Páramo	Total	Error de Comisión
Bosque	8	0	0	0	0	8	0
Tierra de Cultivo	0	7	0	1	0	8	1
Área Antrópica	0	0	8	0	0	8	0
Otras Tierras	1	0	0	9	0	10	1
Páramo	0	0	0	0	12	12	0
Total	8	8	8	10	12	46	
Error de Omisión	1	0	0	1	0		

Fuente: Autor

Tabla 15*Coeficiente Kappa del periodo 2020*

	Bosque	Tierra Agropecuaria	Área Antrópica	Otras Tierras	Páramo	Total
Concordancia aleatoria	0,206	0,034	0,026	0,030	0,047	0,068
Precisión observada o global						0,956
Kappa						0,945

Fuente: Autor

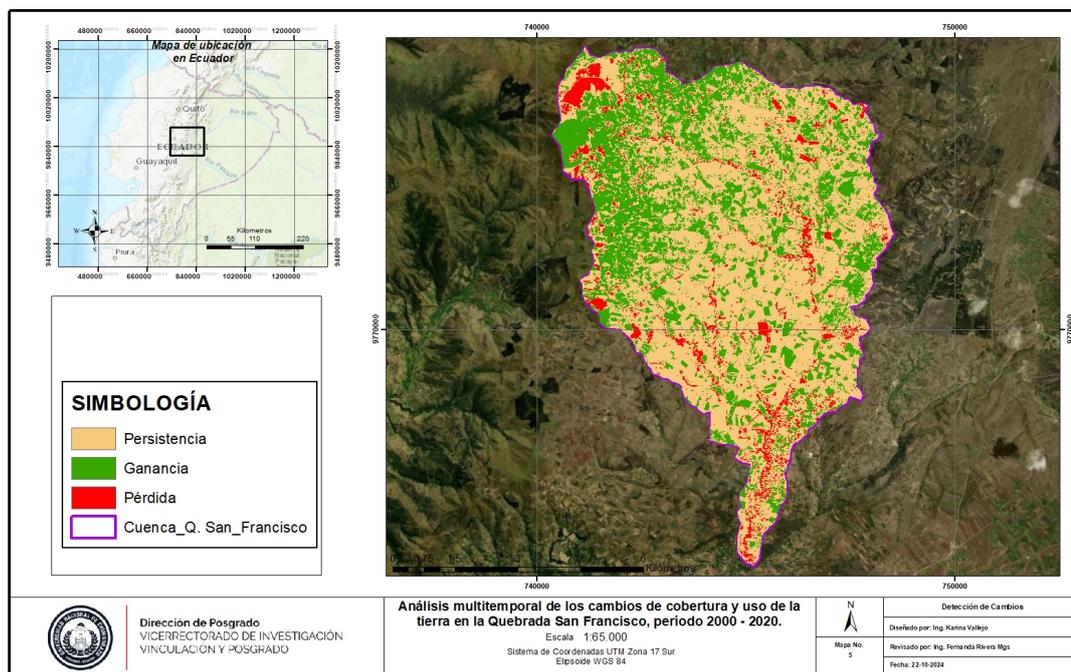
El análisis de la matriz de confusión para el periodo 2020 (Tabla 14) muestra una precisión observada o global del 95,6% y un coeficiente Kappa (Tabla 15) de 0,945, indicando una clasificación casi perfecta, con dos errores, tanto de comisión como de omisión en las clases bosque, tierra de cultivo y otras tierras. Estos resultados reflejan un modelo de clasificación válido para el análisis de cambios en el uso de la tierra en la cuenca de la quebrada San Francisco durante el año 2020.

4.3 Detección de cambios

Para la obtención del mapa de detección de cambios, se realizó el análisis de dos períodos distintos, en este caso el año 2000 y 2020 tomando en cuenta tres clasificaciones para diferenciar los cambios: Sin alteraciones (S/a), Pérdida (P) y Ganancia (G). Como se muestra en la Ilustración 8, en la cuenca predomina la clase agropecuaria, lo que confirma el principal uso de la tierra para fines agrícolas y ganaderos. También se identifican zonas de ganancia, principalmente en la clase antrópica, y áreas de pérdida de vegetación natural en ciertas zonas. La presencia continua del páramo en las zonas altas de la cuenca es importante para la conservación hídrica, sin embargo existe una disminución.

Ilustración 8

Mapa de detección de cambios correspondiente al período 2000 - 2020



Fuente: Autor

4.4 Tasa de cambios

Se obtuvo el porcentaje de uso de cada clase mediante el conteo de píxeles para el último año y el año anterior, es decir, para los años 2020 y 2000 respectivamente de la cuenca de la quebrada San Francisco y se aplicó la fórmula establecida por la FAO (1984) y Ortiz-Solorio et al. (1994)

Tabla 16

Conteo de píxeles quebrada San Francisco año 2000

Período 2000	Conteo de píxeles	Porcentaje
Bosque	16943	2,95%
Tierra de Cultivo	497968	86,84%
Área Antrópica	4489	0,78%
Otras Tierras	14415	2,51%
Páramo	39642	6,91%

Fuente: Autor

Para el año 2000, los datos ubicados en la Tabla 16 indican que la Tierra de Cultivo es la clase de uso predominante en la cuenca, representando el 86,84% del área total, lo que muestra una gran dependencia de actividades agrícolas. Los bosques ocupan el 2,95%, indicando áreas dispersas de vegetación natural, mientras que el páramo representa el 6,91%, localizado principalmente en zonas elevadas de la cuenca. Las áreas antrópicas apenas alcanzan el 0,78%, lo que sugiere una baja urbanización en este periodo, y las otras tierras, que incluyen humedales, ocupan el 2,51%.

Tabla 17

Conteo de píxeles quebrada San Francisco año 2010

Período 2010	Conteo de píxeles	Porcentaje
Bosque	27747	4,84%
Tierra de Cultivo	506662	88,35%
Área Antrópica	4054	0,71%
Otras Tierras	11424	1,99%
Páramo	23570	4,11%

Fuente: Autor

En el año 2010, tal como se observa en la Tabla 17, la Tierra de Cultivo predomina en la cuenca, con un aumento leve del 88,35% con respecto al área total, otra clase que presentó un incremento es el bosque con un valor de 4,84%, lo que se relaciona con los esfuerzos de conservación o reforestación en ciertas zonas de la cuenca. Las áreas antrópicas disminuyen ligeramente al 0,71%, y el páramo se reduce al 4,11%. Las otras tierras también disminuyen al 1,99%, lo que podría indicar una transición de estos ecosistemas hacia usos agrícolas o urbanos.

Tabla 18

Conteo de píxeles quebrada San Francisco año 2020

Período 2020	Conteo de píxeles	Porcentaje
---------------------	--------------------------	-------------------

Bosque	20783	3,62%
Tierra de Cultivo	510889	89,09%
Area Antrópica	9445	1,65%
Otras Tierras	8498	1,48%
Páramo	23842	4,16%

Fuente: Autor

Para el año 2020, como se observa en la Tabla 18, la Tierra de Cultivo sigue en aumento, ocupando el 89,09% de la cuenca, mientras que el bosque reduce su cobertura al 3,62%; el área antrópica aumenta al considerablemente al 1,65%. El páramo permanece casi estable en 4,16%, y las otras tierras representan el 1,48%, mostrando una disminución continua en comparación con los periodos anteriores.

Tabla 19

ID de las clases del uso y cobertura del suelo en la Quebrada San Francisco

Bosque		Tierra de Cultivo		de Área Antrópica		Otras Tierras		Páramo	
ID	%	ID	%	ID	%	ID	%	ID	%
18,48	0,92	2,53	0,13	52,47	2,62	-69,63	-3,48	-66,27	-3,31

Fuente: Autor

Los resultados del ID en la cuenca de la quebrada San Francisco (Tabla 19) reflejan variaciones significativas en el cambio de la cobertura vegetal y uso del s Registro fotográfico mensual Registro de suelo. El bosque presenta un ID del 18,48%, lo cual indica un proceso de degradación considerable, probablemente debido a la conversión de áreas boscosas hacia usos agrícolas o urbanizados. La Tierra de Cultivo, con un ID de 2,53%, mantiene un bajo índice de cambio, por lo que es la clase predominante en los periodos de estudio. Las áreas antrópicas muestran un ID del 52,47%, el incremento más alto entre todas las clases, reflejando un aumento considerable en la urbanización e infraestructura en la cuenca. Por otro lado, las otras tierras y el páramo presentan valores de ID negativos (-

69,63% y -66,27%, respectivamente), lo que indica una disminución significativa en sus extensiones.

4.5 CN, Capacidad de Campo y Tiempo de retardo

En el estudio se analizó la variación de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrológicas durante los tres periodos de 2000, 2010 y 2020, previamente identificados en el análisis multitemporal. En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos de CN, Capacidad de campo y tiempo de retardo que presenta la cuenca de la quebrada San Francisco en los años de estudio.

Tabla 20.

CN, Capacidad de Campo y Tiempo de retardo de la quebrada San Francisco

Periodo decenal	Área (km ²)	Lc(km)	Cota mayor (m.s.n.m.)	Cota menor (m.s.n.m.)	Capacidad de Campo (S)	CN	Tiempo de Retardo (min)	Abstracción Inicial (mm)
2020			4168		187,37	63,83	2,63	30,59
2010	57,35	17,1413		2949	114,82	70,59	2,85	22,96
2000					113,68	71,51	2,85	22,04

Fuente: Autor

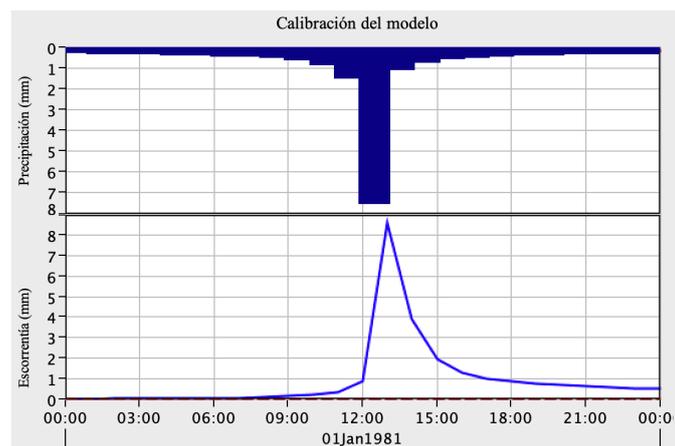
El análisis multitemporal de la quebrada San Francisco durante los tres periodos de estudio indica cambios significativos en sus parámetros, tales como la capacidad de campo que aumentó en el año 2020 con 187,37 mm en comparación con el año 2010 con 114,82 mm y el año 2000 con 113,68 mm; este cambio indica una buena condición del suelo para almacenar agua lo cual se puede deber a las medidas de conservación adoptadas por la comunidad. Por otro lado el Número de Curva tuvo un descenso gradual, de 71,51 en el año 2000; 70,59 en el año 2010 y 63,83 en el año 2020, este parámetro va ligado a la escorrentía, y al disminuir indica mayor capacidad de infiltración en la cuenca. En cuanto al Tiempo de Retardo, se mantuvo constante entre los periodos 2000 y 2010 con un valor de 2,85 minutos, pero disminuyó a 2,63 minutos en el año 2020.

4.6 Calibración del modelo en HEC-HMS

La calibración del modelo permitió obtener una representación adecuada del comportamiento hidrológico de la cuenca de la quebrada San Francisco, evidenciando una alta capacidad de infiltración del suelo, ya que el 87.5 % del volumen de precipitación (14 de 16 mm) se pierde antes de convertirse en escorrentía superficial. El modelo aplicado tiene una relación directa con las características del suelo y el Número de Curva, debido a la capacidad de absorción y escorrentía, se presenta una respuesta hidrológica rápida, con un pico en un tiempo de aproximadamente 13 horas.

Ilustración 9.

Calibración del modelo



Fuente: Autor

4.7 Relación Precipitación – Escorrentía

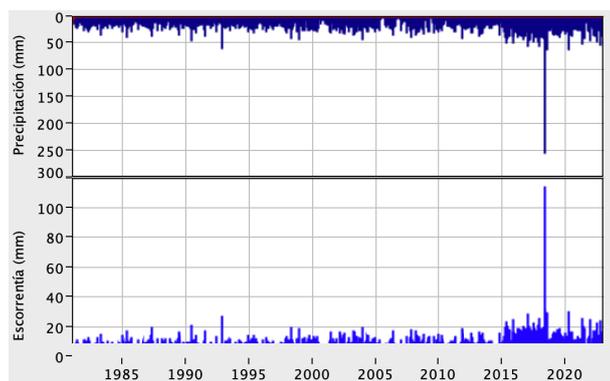
Para analizar la relación entre precipitación y escorrentía, se aplicó la metodología de diagrama unitario SCS, para lo cual se usan datos diarios de precipitación y temperatura recopilados entre 1981 y 2022 a partir de satélites de la NASA, para el cálculo de precipitación efectiva, pérdidas y exceso, tomando en cuenta otros factores como el tiempo de retardo, número de curva (CN) y el umbral de escorrentía. Cabe mencionar que este

método asume que la abstracción inicial equivale al 20% de la abstracción máxima del suelo, lo que explica el uso del factor 0,2 en sus cálculos.

La modelación realizada con HEC-HMS evidenció que la unidad hidrográfica de la quebrada San Francisco prioriza los valores máximos de precipitación y escorrentía, analizados en un periodo de 43 años (1981-2024). En esta unidad hidrográfica, la precipitación media registrada es de 50 mm, con un pico elevado en el año 2018, mientras que la escorrentía media es de 10 mm, La gráfica 9 indica también que la escorrentía mantiene una respuesta directa a los eventos de precipitación, donde los mayores picos de escorrentía coinciden con periodos de alta precipitación.

Ilustración 10.

Relación Precipitación - Escorrentía en la quebrada San Francisco



Fuente: Autor

4.8 Determinación de la oferta Hídrica

Se considera como oferta hídrica a la cantidad de agua que puede ser aprovechada por lo habitantes de la junta de agua de Palmira y Galtes; a partir de los resultados obtenidos del modelo que relaciona la precipitación y escorrentía, se determinó el caudal máximo, el caudal ecológico, caudal autorizado y caudal ofertado presentes en la tabla 21.

Ilustración 11.*Resultados de caudales de la quebrada San Francisco*

Año	Caudal Máximo (m³/s)	Caudal Ecologico (m³/s)	Caudal Autorizado (m³/s)	Caudal Ofertado (m³/s)
2000	2,739	0,274	0,011	2,453
2010	2,314	0,231	0,011	2,071
2022	3,811	0,381	0,011	3,419

Fuente: Autor

Estos resultados evidencian una variación en la disponibilidad hídrica en el sector a lo largo de los años, el caudal máximo aumenta desde el año 2000 con un valor de 2,74 m³/s hasta el año 2022 con un valor de 3,81 m³/s, lo indica una mejor situación en cuanto al agua disponible en la cuenca. Lo mismo ocurre con el caudal ecológico, con un aumento proporcional al caudal máximo y, por último, el caudal ofertado, que representa la disponibilidad efectiva para la comunidad, también evidencia un aumento importante, alcanzando en el año 2022 un valor de 3,41 m³/s.

4.9 Discusión

Con el estudio hidrológico de la cuenca de la quebrada San Francisco se determina que los cambios en el uso y cobertura del suelo afectan la dinámica del agua en las cuencas altas. Con los datos obtenidos se muestra un incremento importante en el CN lo que se relaciona con la capacidad del terreno para retener agua. Este dato se vincula además con la implementación de zonas de conservación en el páramo al ser un ecosistema esencial en la regulación hídrica. En este sentido, Hofstede et al. (2023) menciona que las actividades de conservación, como la reforestación con especies propias de la zona en zonas altas, favorecen la retención de agua en estos ecosistemas.

Los datos obtenidos en el estudio refuerzan la necesidad de implementar estrategias integrales de conservación y manejo sostenible en los páramos, alineadas con las

recomendaciones de Garavito (2015) y Chunchu Morocho y Chunchu (2019). Dentro de las cuales se debe considerar la reforestación con especies nativas como el caso de la especie alisos que favoreció el incremento de caudales en la zona, el monitoreo continuo de los recursos hídricos y principalmente fortalecer la gestión y manejo comunitario del agua, tal como lo menciona Saltos y Flores (2024), para asegurar la conservación, el desarrollo sostenible y la resiliencia frente a los desafíos climáticos.

La disminución gradual del número de curva (CN) también apunta a una mayor infiltración del agua en el suelo y una reducción de la escorrentía superficial. Este comportamiento coincide con los estudios de Carrillo-Rojas et al. (2019) y Cabrera y Suárez (2022), quienes destacan que la mejora en la cobertura vegetal y las prácticas adecuadas de manejo del suelo pueden optimizar la capacidad de infiltración en ecosistemas de alta montaña, lo que también reduce riesgos asociados a la erosión y la escorrentía excesiva durante eventos de lluvia intensa.

En términos de tasa de cambio, los resultados obtenidos son coherentes con las tendencias de pérdida de cobertura vegetal en los páramos de Ecuador. Entre 2013 y 2018, se registró una reducción del 0.56% en su extensión total (MAATE, 2023). Fernández (2022) reporta un porcentaje de pérdida del 6.69%, mientras que Ramos y Rojas (2022) estiman una tasa de pérdida de 4 hectáreas por día. Esto puede limitar la oferta de agua para las comunidades locales en el futuro y comprometiendo además servicios ecosistémicos importantes como la recarga de acuíferos y la regulación climática.

Los datos obtenidos en el estudio refuerzan la necesidad de implementar estrategias integrales de conservación y manejo sostenible en los páramos, alineadas con las recomendaciones de Garavito (2015) y Chunchu Morocho y Chunchu (2019).

Conclusiones

Mediante el análisis multitemporal de la quebrada San Francisco, se determinó que las clases páramo, bosque y otras tierras presentaron una disminución en su área durante el periodo de estudio, mientras que las zonas agrícolas y antrópicas que mostraron un incremento; con lo que se evidencia un impacto directo de las actividades humanas sobre los servicios ecosistémicos.

La caracterización geomorfológica de la cuenca de la quebrada San Francisco indica una topografía inclinada y alargada, con una pendiente promedio del 19,64% y una relación de circularidad de 0,4678, parámetros que se asocian al flujo rápido del agua hacia el cauce principal. Los parámetros hidráulicos indican un incremento en la capacidad de campo para el año 2020 con un valor de 187,37 mm, lo cual indica una mayor capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo. Sin embargo, el tiempo de retardo se redujo a 2,63 minutos para este año, lo que indica que existe una respuesta más rápida a precipitaciones intensas y posibles picos de caudal ante eventos de lluvia intensa a comparación de los años anteriores.

Con el diagrama unitario, a través del modelo SCS se obtuvo un aumento en la capacidad de campo de 113,68 mm en 2000 a 187,37 mm en 2020, una disminución en el Número de Curva de 71,51 en el 2000 a 63,83 en el 2020, y una reducción en el Tiempo de Retardo de 2,85 minutos en el 2010 a 2,63 minutos en el 2020 lo cual indica mejores características en las condiciones de infiltración del suelo y por ende una reducción en los niveles de escorrentía en el sistema hidrológico de la cuenca de la Quebrada San Francisco.

Entre 2000 y 2022, la oferta hídrica de la quebrada San Francisco mostró un incremento significativo, gracias a las prácticas de conservación implementadas en los ecosistemas de páramo. La restauración de áreas degradadas y la mejora de la cobertura

vegetal con especies nativas, promovidas mediante acuerdos comunitarios y programas de manejo sostenible, incrementaron la capacidad de campo del suelo, optimizando la retención y regulación hídrica. Estos resultados destacan la efectividad de la gestión participativa y la protección de los páramos como estrategias clave para garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico en comunidades altoandinas, resaltando la importancia de fortalecer políticas de conservación y educación ambiental.

Recomendaciones

Se recomienda que para futuras investigaciones, las imágenes satelitales provengan de la misma fuente, ya que en este caso, para el año 2000 se tomó información de ASTER L1 Radiance al no tener imágenes de alta resolución para dicho periodo, lo cual puede generar un grado de incertidumbre al clasificar las diferentes coberturas de la tierra.

Realizar investigaciones complementarias sobre la influencia del cambio climático en la precipitación y su efecto sobre los caudales ecológicos y ofertados, considerando periodos más largos.

Es necesario también instrumentar la cuenca con equipos para medición en tiempo real de parámetros hidroclimáticos de tal manera que permita un análisis de mejor calidad con datos que permitan visualizar si son o no consistentes las aplicaciones de restauración de los ecosistemas.

Referencias Bibliográficas

Afaq, Y., & Manocha, A. (2021). Analysis on change detection techniques for remote sensing applications: A review. *Ecological Informatics*, 63, 101310. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101310>

Anaya, J. A., Rodríguez, S., & Londoño, M. C. (2023). Clasificación de cobertura vegetal

con resolución espacial de 10 metros en bosques del Caribe colombiano basado en misiones Sentinel 1 y 2. *Revista de Teledetección*, 61, 29-41. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.17655>

Borba, F., & Cirilo, J. (2024). (PDF) Assimilação de dados geoespaciais aplicada à modelagem hidrológica em bacias hidrográficas de Pernambuco. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.5.p3992-4009>

Brück, S. A., Torres, B. D. M., & De Moraes Polizeli, M. D. L. T. (2023). The Ecuadorian paramo in danger: What we know and what might be learned from northern wetlands. *Global Ecology and Conservation*, 47, e02639. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02639>

Bustamante, D. P. (2017). ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL DE SUBCUENCAS HIDROGRÁFICAS PARA EL AÑO 2050 DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO- ECUADOR. *La Granja*, 26(2), 15. <https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.02>

Cáceres, J. F. (2019). *LOS PÁRAMOS DE LA PARTE ALTOANDINA DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA MACIZO DEL CAJAS (ECUADOR): GESTIÓN PARA EL MANTENIMIENTO DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS*.

Cardille, J. A., Crowley, M. A., Saah, D., & Clinton, N. E. (2023). *Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine: Fundamentals and Applications*. Springer Nature.

Carrillo, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 30-47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.006>

Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 30-47.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.006>

Chuncho Morocho, C. C., & Chuncho, G. (2019). *Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión*. 9, 71-83.

Daza, M., Hernández, F., & Alba, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz—Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189-7200. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>

Dieguez, G. D., Tengler, E., Ortiz, M., & Van Der Ploeg, Augusto. (2023). *Metodología para la clasificación de cobertura del suelo en Argentina*. https://opendata.fi.uncoma.edu.ar/jornadasIDERA/trabajos2023/Gaviola_etal.pdf

Ecuador. (2008). *Constitucion de la Republica del Ecuador*. https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf

Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*.

Fernández, A. A., Rosero, C. R., Beltrán, A. A., & Echeverría, M. M. (2020). *Caracterización y dinámica de la cobertura de suelo mediante teledetección: Caso de estudio volcán Tungurahua, Ecuador*. 6, 906-938.

GADM Guamate. (2023). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Guamate*.

GADP Palmira. (2023). *GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO DE LA PARROQUIA RURAL DE PALMIRA*.

GADPCH. (2023). *Plan de desarrollo y Ordenamiento Territorial Provincial de Chimborazo*.

Garavito, L. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Ingeniare*, 19,

Article 19. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.19.530>

García, C. (2022). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA DE USO DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL EN LA MICROCUENCA DEL RÍO ILLANGAMA*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO.

Gunathilake, M. B., Amaratunga, Y. V., Perera, A., Karunanayake, C., Gunathilake, A. S., & Rathnayake, U. (2020). Statistical evaluation and hydrologic simulation capacity of different satellite-based precipitation products (SbPPs) in the Upper Nan River Basin, Northern Thailand. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100743. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100743>

Hofstede, R., Mena, P., & Suárez, E. (2023). *Los páramos del Ecuador Pasado, presente y futuro* (USFQ PRESS).

Jara, C., Delegido, J., Ayala, J. E., Lozano, P., Armas, A., & Flores, V. (2019). Estudio de bofedales en los Andes ecuatorianos a través de la comparación de imágenes Landsat-8 y Sentinel-2. *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 53, 45-57.

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>

Lara, N. X., Cushquicullma, D. F., Guaiña, J. I., Espinoza, V. M., & Ati Cutiupala, G. M. (2021). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 6(6), 122-148.

Lazo, P. X., Mosquera, G. M., McDonnell, J. J., & Crespo, P. (2019). The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in Andean Páramo catchments. *Journal of Hydrology*, 572, 805-819.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.050>

Leiva, I. M. L. (2023). *VALIDACIÓN DE LA COBERTURA FORESTAL CLASIFICADA EN EL MAPA DE TIPOS DE BOSQUE Y OTRAS TIERRAS 2021 DEL SINAC PARA EL ÁREA CONSERVACIÓN TEMPISQUE, GUANACASTE, COSTA RICA.*

MAATE. (2023). *PLAN DE ACCIÓN NACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN, RESTAURACIÓN Y USO SOSTENIBLE DE LOS PÁRAMOS.*

Patiño, S. E., Domínguez, I. C., Daza, M. C., Ochoa, B. F., & Oviedo, E. R. (2024). Effects of rainfall seasonality and land use change on soil hydrophysical properties of high-Andean dry páramo grasslands. *CATENA*, 238, 107866. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107866>

Quispetera, L. (2023). *ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE CAMBIOS DE COBERTURA DE LA TIERRA EN LA RESERVA NACIONAL SALINAS Y AGUADA BLANCA – AREQUIPA, MOQUEGUA.* Universidad Nacional de Moquegua.

Romo, M., & Calero, E. (2021). Degradación de la vegetación de páramo por efecto de la ganadería en el Parque Nacional Llanganates, Ecuador. *Revista Verde de Agroecología e Desarrollo Sustentável*, 17(1), 27-34. <https://doi.org/10.18378/rvads.v17i1.9093>

Saltos, N., & Flores, J. (2024). Análisis de los recursos naturales y prácticas campesinas en ecosistemas de altura: Caso de estudio: comunidad Cochapata en Urcuquí-Ecuador. *Siembra*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.29166/siembra.v11i1.4486>

Torres, S. F., & Proaño, C. O. (2018). *Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador.* 28. <https://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>

Velastegui, A., Montalván, N., Carrión, P., Rivera, H., Sadeck, L., & Adami, M. (2023). Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*, 15(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>

Vizzari, M. (2022). PlanetScope, Sentinel-2, and Sentinel-1 Data Integration for Object-Based Land Cover Classification in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 14(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/rs14112628>