



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:

**“CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO PARA DETERMINAR
ÁREAS DE PROTECCIÓN HÍDRICA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO
GUANO”**

AUTOR:

Ing. Jonathan Naun Amaya Lema

TUTOR:

Ing. María Fernanda Rivera Castillo, Mgs.

Riobamba – Ecuador

2025

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: “**Caracterización del medio físico para determinar áreas de protección hídrica en la microcuenca del río Guano**”, ha sido elaborado por el Ingeniero Jonathan Naun Amaya Lema, 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, 17 de marzo de 2025

Ing. María Fernanda Rivera Castillo, Mgs.

TUTOR

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Jonathan Naun Amaya Lema** con número único de identificación **050375161-2**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “**Caracterización del medio físico para determinar áreas de protección hídrica en la microcuenca del río Guano**” 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, 17 de marzo de 2025

Ing. Jonathan Naun Amaya Lema

N.U.I. 050375161-2

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las personas que hicieron posible la realización de esta tesis y que, con su apoyo y guía, contribuyeron de manera fundamental para mi desarrollo profesional.

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la salud, sabiduría y el valor de culminar un peldaño más de mi crecimiento profesional, agradezco de igual manera a mi tutora de posgrado Ing. Maria Fernanda Rivera C. Msc., por depositar la confianza para la realización del tema de proyecto.

No puedo dejar de agradecer a mi familia, por su amor condicional, apoyo y comprensión durante este periodo. Su confianza en mí fue una motivación constante para seguir adelante, incluso en los momentos de mayor dificultad.

Finalmente, mi gratitud se extiende a todos aquellos que, de manera directa o indirecta contribuyeron a este logro, el presente trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo, y es honor poder compartirlo con ustedes.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, cuya constante confianza en mí, apoyo incondicional y enseñanzas sobre el valor del esfuerzo y la perseverancia han sido fundamentales en mi vida. Han sido un pilar esencial en mi desarrollo personal y académico, impulsándome siempre a seguir mis sueños.

Índice General

Certificación del Tutor	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	iii
Agradecimiento.....	iv
Dedicatoria	iv
Índice General.....	v
Índice de Tablas.....	viii
Índice de Figuras	ix
Resumen	1
ABSTRACT	2
Introducción.....	3
Capítulo 1 Generalidades.....	5
1.1 Planteamiento del problema	5
1.2 Justificación de la Investigación.....	6
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2 Objetivos Específicos	8
1.4 Descripción de la microcuenca.....	8
Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica	10
2.1 Antecedentes Investigativos	10
2.2 Fundamentación Legal	12
2.2.1 Normativa Nacional.....	13
2.2.2 Normativa Internacional	15
2.3 Fundamentación Teórica	16
2.3.1 Cuenca y Microcuenca hidrográfica.....	16
2.3.2 Estudio multitemporal de la cobertura vegetal y uso de suelo	26
2.3.3 Áreas de protección hídrica	32

Capítulo 3 Diseño Metodológico.....	34
3.1 Enfoque de la Investigación	34
3.2 Diseño de la Investigación.....	34
3.3 Tipo de investigación	35
3.4 Nivel de Investigación	35
3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	36
3.6 Población y Muestra	37
3.6.1 Población	37
3.6.2 Tamaño de la Muestra	37
3.7 Metodología para la Caracterización geomorfológica e hidrológica de la microcuenca del río Guano	38
3.7.1 Delimitación de la Microcuenca.....	38
3.7.2 Caracterización Geomorfológica.....	39
3.7.3 Caracterización Hidrológica	39
3.7.4 Modelación Hidrológica con HEC-HMS	39
3.8 Metodología para el estudio multitemporal de cobertura vegetal y el uso de suelo	39
3.8.1 Fase 1: Cuantificación de cambios	40
3.9 Metodología para la determinación de las áreas de protección hídrica.....	41
Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados	43
4.1 Caracterización geomorfológica e hidrológica de la microcuenca del río Guano	43
4.1.1 Sampling design	44
4.1.2 Mapas de Clasificación Supervisada utilizando Randon Forest.....	45
4.1.3 Detección de cambios	51
4.1.4 Velocidad de cambios.....	52
4.1.5 Áreas de Protección Hídrica	53
4.2 Discusión de los Resultados	53
4.2.1 Caracterización Geomorfológica e Hidrológica	53

4.2.2	Estudio Multitemporal de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo	54
4.2.3	Determinación de Áreas de Protección Hídrica	54
	Conclusiones.....	56
	Recomendaciones.....	57
	Referencias Bibliográficas	58

Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros Morfométricos de una cuenca	19
Tabla 2 Parámetros Hidrológicos de una cuenca.....	23
Tabla 3 Parámetros geomorfológicos	43
Tabla 4 Resultados de puntos de verificación de la microcuenca del río Guano	45
Tabla 5 Matriz de confusión periodo 2000.....	46
Tabla 6 Índice kappa periodo 2000	47
Tabla 7 Matriz de confusión periodo 2015.....	48
Tabla 8 Índice kappa periodo 2015	48
Tabla 9 Matriz de confusión periodo 2020.....	50
Tabla 10 Índice kappa periodo 2020	50
Tabla 11 Conteo de píxeles de la microcuenca del río Guano	52

Índice de Figuras

Figura 1 Ciclo Hidrológico.....	29
Figura 2 Ubicación de la microcuenca del río Guano	38
Figura 3 Curva hipsométrica de la microcuenca Guano.....	44
Figura 4 Mapa de la microcuenca del río Guano periodo 2000	46
Figura 5 Mapa de la microcuenca del río Guano periodo 2015	48
Figura 6 Mapa de la microcuenca del río Guano periodo 2020	50
Figura 7 Mapa de detección de cambios de la microcuenca del río Guano	51
Figura 8 Área de protección hídrica	53

Resumen

La tesis titulada "*Caracterización del medio físico para determinar áreas de protección hídrica en la microcuenca del río Guano*" aborda la necesidad de identificar áreas prioritarias para la conservación hídrica en esta región estratégica de la provincia de Chimborazo, Ecuador. Su objetivo principal fue caracterizar geomorfológica e hidrológicamente la microcuenca, además de analizar los cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo a lo largo del tiempo, para delimitar áreas de protección hídrica clave.

Se empleó una metodología basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes satelitales y modelado hidrológico con HEC-HMS, que permitió analizar las dinámicas hídricas en tres periodos: 2000-2010, 2015-2019 y 2020-2024. La investigación identificó una pérdida significativa de cobertura vegetal en las partes altas de la microcuenca, acompañada de un incremento de áreas dedicadas a la agricultura en zonas intermedias y bajas, lo que ha elevado el riesgo de erosión y afectado la capacidad de regulación hídrica.

Los resultados principales destacaron zonas críticas para la recarga de acuíferos y áreas con alta vulnerabilidad a la degradación, lo que permitió delimitar y clasificar áreas prioritarias de protección hídrica. Además, se concluyó que estas áreas desempeñan un rol esencial en la conservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo hidrológico y el suministro de agua. Los hallazgos son una base para estrategias de manejo hídrico integrado, contribuyendo a la sostenibilidad de los recursos en la microcuenca del río Guano.

Palabras clave: microcuenca, protección hídrica, SIG, cobertura vegetal, modelado hidrológico.

ABSTRACT

The thesis titled "*Characterization of the Physical Environment to Determine Water Protection Areas in the Guano River Micro-watershed*" addresses the need to identify priority areas for water conservation in this strategic region of the province of Chimborazo, Ecuador. The main objective was to characterize the micro-watershed geomorphologically and hydrologically, analyze changes in land use and vegetation cover over time, and delineate key water protection areas. A methodology based on Geographic Information Systems (GIS), satellite images, and hydrological modeling using HEC-HMS was employed to analyze hydrological dynamics in three periods: 2000-2010, 2015-2019, and 2020-2024. The research identified a significant loss of vegetation cover in the upper parts of the micro-watershed, accompanied by an increase in agricultural areas in the middle and lower zones, which has elevated erosion risks and negatively impacted water regulation capacity. The main results highlighted critical zones for aquifer recharge and areas highly vulnerable to degradation, enabling the delimitation and classification of priority water protection areas. These areas were found to play an essential role in biodiversity conservation, hydrological cycle regulation, and water supply. The findings provide a foundation for integrated water management strategies, contributing to the sustainability of resources in the Guano River micro-watershed.}

Keywords: micro-watershed, water protection, GIS, vegetation cover, hydrological modeling.



Reviewed by:
Mgs. Hugo Romero
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603156258

Introducción

En la provincia de Chimborazo, Ecuador, se encuentra la microcuenca del río Guano, siendo un área ambiental y socioeconómica de gran relevancia, por su capacidad de suministrar el recurso agua a las poblaciones y ecosistemas circundantes, forma parte de la cuenca alta del río Chambo, la microcuenca del río Guano es importante por la capacidad de abastecer agua a poblaciones locales, apoyar la agricultura, mantener la biodiversidad y regular el ciclo hidrológico en la región (Zúñiga, 2019).

Sin embargo, la microcuenca enfrenta múltiples desafíos debido a la intervención humana y el cambio climático. La creciente presión antropogénica, como la expansión agrícola, la urbanización descontrolada y la deforestación, han generado una preocupación creciente por la protección de los recursos hídricos en esta región. Estas alteraciones han afectado negativamente la capacidad de la microcuenca para retener y regular el agua, incrementando los riesgos de erosión, deslizamientos de tierra, degradación del medio físico (a través de la alteración de suelos), la pérdida de cobertura vegetal y la modificación del régimen hidrológico, ponen en riesgo la calidad y cantidad del agua disponible (Mendoza et al., 2021).

En este contexto, este tema se enmarca en un escenario más amplio de gestión de cuencas hidrográficas en Ecuador y América Latina, donde la conservación de los recursos hídricos es una prioridad debido a su importancia para el desarrollo sostenible. Esta investigación no solo aporta al conocimiento científico sobre la gestión de cuencas hidrográficas, sino que proporciona gran relevancia académica, empresarial y social destacando la importancia de una gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos en la microcuenca del río Guano, asegurando su protección para las generaciones presentes y futuras que garanticen la conservación de los recursos naturales en la región.

En la academia la investigación puede servir de referencia para futuras investigaciones en áreas similares, proporcionando una base sólida para el desarrollo de modelos de gestión sostenible de recursos naturales en microcuencas andinas. A nivel empresarial las empresas agrícolas y ganaderas que operan en la región podrán implementar prácticas más sostenibles basadas en el conocimiento de las áreas críticas para la recarga y protección hídrica, y, además la participación de la comunidad en la gestión de estas áreas protegidas fortalecerá el tejido social y fomentará una cultura de conservación ambiental (García & Ponce, 2010).

El fundamento de esta investigación es mediante revisión bibliográfica, basada en estudios previos realizados autores como Ibarra & Jorge, (2023), Meneses, (2023), Picuña & Pilamunga, (2023), Remache, (2023) y Sánchez, (2023), quienes abordan temas afines con la geomorfología e hidrología de cuencas y microcuencas similares. Mediante la utilización de métodos, técnicas y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), y con la ayuda de imágenes satelitales obtenidas de Google Engine, se lleva a cabo la caracterización geomorfológica e hidrológica de la microcuenca. La metodología Random Forest es aplicada para el análisis, con la finalidad de obtener datos relevantes de pendiente, altitud, precipitación, caudales, cobertura vegetal y uso del suelo a través de un estudio multitemporal.

Para identificar las áreas de protección hídrica de la microcuenca del río Guano, se analiza la cobertura vegetal y el uso del suelo mediante estudios multitemporales en tres periodos, los cuales son: 2000-2010, 2015-2019 y 2020-2024.

En el desarrollo de la investigación se aborda, en el capítulo 1: el planteamiento del problema, justificación, objetivos, descripción de la microcuenca del río Guano, capítulo 2: antecedentes, fundamentación legal y teórica, capítulo 3: el diseño metodológico que abarca el enfoque, diseño, tipo de investigación, técnicas e instrumentos de recolección, procesamiento e interpretación de datos, además, la población y muestra, en el capítulo 4: el

análisis y discusión de los resultados y capítulo 5: conclusiones de la investigación, con lo cual se obtendrá la Caracterización del medio físico para determinar áreas de protección hídrica en la microcuenca del río Guano.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

A nivel nacional, las políticas y estrategias para la protección de los recursos hídricos en Ecuador han demostrado ser insuficientes para contrarrestar los impactos negativos, debido en gran medida a la falta de información detallada sobre el estado físico de las microcuencas y a una gestión inadecuada (Riofrío et al., 2025). La ausencia de datos espaciales precisos a nivel de microcuencas afecta los procesos de gestión relacionados con los recursos hídricos y dificulta las tareas enfocadas en la conservación del paisaje natural. Además, se ha identificado una falta de coordinación institucional y una deficiente implementación de políticas ambientales, lo que agrava la problemática de la gestión hídrica en el país (Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento Del Agua, 2014).

En este sentido, la microcuenca del río Guano, ubicada en una región de alta vulnerabilidad ambiental, desempeña un papel crucial en la provisión de recursos hídricos para las comunidades aledañas y en la preservación de la biodiversidad local durante las últimas décadas. Sin embargo, en los últimos 20 años, el acelerado crecimiento de las actividades humanas, como la agricultura, deforestación y desarrollo urbano, ha generado una serie de alteraciones sobre el medio físico de la microcuenca, afectando negativamente la calidad y disponibilidad de sus recursos hídricos (Cevallos, 2015).

Por otra parte, el manejo inadecuado del suelo y la falta de medidas de protección y conservación de este entorno natural, ha ocasionado la degradación de la cobertura vegetal,

la erosión de los suelos y la disminución de la capacidad de regulación hídrica de la microcuenca, incrementando el riesgo de inundaciones, pérdida de biodiversidad, y la reducción de la capacidad de recarga de acuíferos, lo que pone en peligro al ecosistema y a las poblaciones humanas que dependen de estos recursos (Uquillas, 2023).

En la última década, estas problemáticas se han agravado, por lo que surge con gran necesidad realizar una caracterización del medio físico de la microcuenca del río Guano, para identificar áreas prioritarias de protección hídrica, lo que permitirá determinar las zonas más vulnerables a la degradación para proponer estrategias efectivas de protección y conservación hídrica que permitan mitigar los impactos negativos y así asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos y garantizar la disponibilidad de agua en calidad y cantidad, contribuyendo a la gestión integral de la microcuenca (Remache, 2023).

1.2 Justificación de la Investigación

El estudio de cuencas y microcuencas a nivel nacional como mundial en la actualidad, es fundamental para fomentar la gestión sostenible de los recursos naturales. En la regulación del ciclo hidrológico, la conservación de la biodiversidad, la protección de la cobertura vegetal y del suelo, estas zonas geográficas juegan un papel muy importante, así también, en la mitigación de riesgos naturales, como en el suministro de agua (Riofrío et al., 2025). Las cuencas y microcuencas son vitales para mantener el equilibrio ecológico, radicando su interés en los ecosistemas de páramo.

Los páramos actúan como esponjas naturales que almacenan y liberan agua de forma gradual, garantizando la disponibilidad hídrica para las poblaciones aguas abajo, además de contribuir a la conservación de especies endémicas y a la protección frente a fenómenos climáticos extremos (Padrón, 2025). La provincia de Chimborazo presenta un clima variado, con épocas de lluvia y sequía, ocasionando cambios bruscos en la biodiversidad, provocando

la degradación de los recursos hídricos, afectando las actividades agrícolas, ganaderas e industriales (Cevallos, 2015). En este contexto, la microcuenca del río Guano presenta deterioro de la calidad del agua, disminución del caudal e inundaciones afectando a la sociedad y a la biodiversidad de esta (Mendoza et al., 2021; Ponce, 2019; Zúñiga, 2019)

En las zonas rurales, los recursos naturales como páramos, bosques, suelos agrícolas, humedales, y fuentes de agua son esenciales, no solo para el sustento y bienestar de las comunidades locales, sino también para la supervivencia de una amplia diversidad de especies vegetales y animales que dependen de estos ecosistemas. Sin embargo, la expansión de actividades agrícolas, ganaderas, extractivas y de desarrollo de infraestructura incrementa significativamente la susceptibilidad de estas áreas a la degradación del suelo, poniendo en riesgo la integridad de estos valiosos recursos y la biodiversidad que albergan.

Por esta razón, es necesario realizar este estudio en donde se determinará áreas de protección hídrica en la microcuenca a partir de un análisis hidrológico y vulnerabilidad hídrica que se presenta en la parte alta, media y baja, identificando las zonas de protección de las riberas (vertientes) presentes en la cuenca del río Guano, esto para generar un modelo de gestión hídrico en el área de influencia de la microcuenca, planteando como hipótesis ¿Pueden las características geomorfológicas, hidrológicas y socioeconómicas establecer áreas de protección hídrica en la cuenca del río Guano?

Por otra parte, el presente trabajo será elaborado bajo la línea de investigación medio ambiente y biodiversidad, como parte del proyecto “Caracterización de la oferta y demanda hídrica en el área de influencia del acuífero del Chambo”, que tiene como objetivo determinar áreas de protección hídrica para usarlos en el modelo de gestión que este plantea como objetivo específico, por lo que este trabajo contribuye a conocer este tipo de áreas en esta zona del acuífero.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Caracterizar el medio físico para determinar áreas de protección hídrica en el río Guano.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar geomorfológica e hidrológicamente la cuenca del río Guano.
- Determinar la variación multitemporal de la cobertura vegetal y el uso de suelo.
- Determinar las áreas de protección hídrica en la microcuenca del río Guano.

1.4 Descripción de la microcuenca

La microcuenca del río Guano con una extensión aproximada de 200 km² y una altitud que varía entre los 2500 y 4000 msnm se ubica en la provincia de Chimborazo, en la región central de los Andes ecuatorianos, forma parte de la cuenca del río Chambo, que desemboca en el río Pastaza, considerado uno de los afluentes del río Amazonas. A la microcuenca le rodean los cantones Guano y Riobamba, siendo el río Guano una fuente de agua primordial para estas áreas (INEN, 2022).

La topografía de la microcuenca es variada, incluye montañas, colinas y valles, lo que contribuye a la alta escorrentía y la susceptibilidad a la erosión, generalmente donde la cobertura vegetal ha sido removida, presenta un clima con temperaturas que oscilan entre los 10 y 15°C, su precipitación anual varía entre 500 y 1200 mm, siendo mayor en las partes altas de la microcuenca. El río Guano recibe aportaciones hídricas de varias quebradas menores que contribuyen al aumento de su caudal, el flujo del río varía por las estaciones húmeda y seca (INEN, 2022).

En la microcuenca del río Guano el uso del suelo se encuentra dominado por la ganadería y agricultura en las zonas bajas e intermedias, mientras que en la zona alta páramo, en el cantón Guano considerado como zona urbana se presenta crecimiento poblacional, generando expansión de infraestructuras que con el paso del tiempo han modificado el paisaje natural, por esta razón se le considera a la microcuenca como fuente primordial para la ganadería, agricultura, consumo humano y otras actividades económicas en la región (Cevallos, 2015).

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1 Antecedentes Investigativos

Diversos estudios en a nivel internacinal y nacional muestran la relación entre la degradación de las cuencas hidrográficas y la disminución en la calidad y cantidad del agua disponible (Picuña & Pilamunga, 2023; Remache, 2023). El estudio titulado "Caracterización del medio físico para determinar áreas de protección hídrica en la microcuenca del río Guano" se enmarca en la creciente necesidad de conservar los recursos hídricos a través de la identificación y protección de áreas estratégicas en las cuencas hidrográficas. A continuación se detallan algunos antecedentes investigativos relevantes para este tema:

Guzmán et al. (2021) evaluó la variabilidad geoespacial de la fragilidad morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Chico, Tornquist, Argentina, los datos fueron tomados en campo con GPS y con valores provenientes del uso de modelos de elevación digital SRTM DEM procesados con sistemas de información geográfica, con est a metodología evidenciaron que la variabilidad geoespacial de la fragilidad morfométrica varía desde las serranías hacia la desembocadura, indicando una mayor torrencialidad y con una considerable descarga de sedimentos, con alta peligrosidad sobre los asentamientos urbanos ubicados adyacentes a sus cursos de agua.

Herrera Mora (2019) en su tema titulado Delimitación del área de protección hídrica para la microcuenca "Limón" utiliza la metodología aplicada por la SENAGUA y FORAGUA, concluyó que uno de los pasos fundamentales para la delimitación es contar con un DEM de alta resolución, que servirá como principal unto de partida par realizar

mapas de flujos y ubicar el punto de drenaje, además conoficó el área de conservación, zona poblada y zona para usos sustentable.

El tema titulado Caracterización hidrológica de la microcuenca del río Quevedo, Ecuador realizada por Guerrero Chuez et al. (2024), tiene por objetivo realizar un análisis geoespacial de las características morfométricas y biofísicas con el uso del software ArcGIS IDRISI como herramienta SIG, presentando la cuenca un área de 4635,1 km², un perímetro de 812,88 km² y una longitud axial de 312,02 km, su forma es oval-pblonga rectangular oblonga con tendencia a crecidas, todos los datos obtenidos constituyen una base de datos en la toma dedecisiones y planificación de la gestión de recursos hídricos en la microcuenca del río Quevedo.

Cevallos (2015), caracterizó la calidad hídrica de la microcuenca del río Guano, obteniendo información para optimizar el comportamiento socio-ambiental, determinando el caudal, el índice de calidad del Agua (ICA) y el índice Bioológico (ABI) en el periodo agosto-diciembre 2014, concluyendo que la calidad del agua de la microcuenca es media (57,4%) y dudosa (35,76%) según los índices WQI y ABI respectivamente.

Uquillas (2023), caracterizó la microcuenca San Sebastián, afluente del río Guano, se basó en una metodología con enfoque mixto, un diseño experimental de tipo transversal, utilizando ArcGis 10.5 y la herramienta ArcSwar con el modelo de Elevación Digital (DEM), obteniendo parámetros morfométricos de forma, relieve y drenaje de la microcuenca, para caracterizar la capacidad de respuesta ante precipitación empleó el programa del Centro de Ingeniería Hidrológica-Sistema de Modelización Hidrológica (HEC-HMS), concluyó que la microcuenca es alargada propensa a la conservación y baja susceptibilidad a crecidas, se encuentra en una etapa de desarrollo intermedia, caracterizándose como un río maduro.

Cabrera (2018), determinó la vulnerabilidad hídrica del río Guano, en cantidad y calidad y su disposición frente al cambio climático, la calidad del agua presentó en la parte alta Aceptable, en la media Poco Contaminada y en la baja Contaminada, además, con los datos registrados por la estación meteorológica de la ESPOCH en los últimos 30 años determinó el comportamiento de temperaturas, precipitados, humedades relativas y velocidad del viento, lo que se encuentran íntimamente relacionadas entre ellas. La microcuenca presenta una vulnerabilidad en la categoría MEDIO, el índice de retención de la humedad es muy baja y el índice de Uso de agua son muy Bajas.

El estudio multitemporal de la cobertura vegetal y uso de suelo de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo realizado por Zambrano (2016), utiliza fotografías e imágenes satelitales de diferentes periodos de tiempos, con la finalidad de analizar el comportamiento del uso de suelo y cambio de la vegetación, de esta manera comprender la dinámica que ha experimentado la reserva, también estableció que con medidas de mitigación y recuperación de la cobertura vegetal, podría recuperarse de manera gradual el mismo.

Todos estos estudios sirven de base bibliográfica para el desarrollo de esta investigación, a pesar que existen estudios en la microcuenca del río Guano ninguno cuenta con la información necesaria para caracterizar geomorfológica e hidrológicamente esta microcuenca, un estudio multitemporal de la cobertura vegetal y el uso de suelo, ni información para determinar las áreas de protección hídrica.

2.2 Fundamentación Legal

La Caracterización del medio físico para determinar áreas de protección hídrica en la microcuenca del río Guano en Ecuador, está respaldado por un conjunto de normativas

legales nacionales e internacionales que establecen la importancia de estos estudios para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos territoriales, por lo que se fundamenta legalmente con la siguiente normativa:

2.2.1 Normativa Nacional

Constitución de la República del Ecuador: Artículos 12, 313 y 395: Declaran que el agua es un patrimonio nacional estratégico, de uso público, y establecen que es responsabilidad del Estado garantizar la conservación de fuentes hídricas mediante la creación de áreas de protección hídrica, lo cual incluye la caracterización geomorfológica e hidrológica de cuencas. **Artículo 411:** Con la finalidad de conservar el ciclo del agua y asegurar la disponibilidad para futuras generaciones, se dispone la protección y anejo sostenible de las cuencas hidrográficas. **Artículos 71 al 74:** mediante la implementación de un monitoreo continuo del uso del suelo y cobertura vegetal, se impulsa la conservación y restauración de los ecosistemas. **Artículo 276:** por la importancia de análisis multitemporales para una gestión eficaz se promueve el desarrollo sostenible, mediante la planificación y aprovechamiento responsable del uso de suelo y de otros recursos naturales. **Artículos 407 y 408:** Prohíben la explotación de recursos naturales en áreas protegidas y zonas intangibles, incluyendo áreas de recarga hídrica, garantizando la protección de los ecosistemas acuáticos (Asamblea Nacional del Ecuador, 2021).

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua: **Artículos 16 y 19:** Establecen la necesidad de estudios técnicos que incluyan la caracterización geomorfológica e hidrológica de cuencas y microcuencas como base para la gestión y planificación del uso del agua. **Artículos 86 al 91:** Detallan los procedimientos para la identificación y delimitación de áreas de protección hídrica, incluyendo la creación de reservas hídricas, para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico. **Artículo 92:** Regula la protección de zonas de recarga hídrica y las actividades que pueden realizarse en estas

áreas, subrayando la necesidad de su conservación y manejo sostenible (Asamblea Nacional del Ecuador, 2023).

Código Orgánico del Ambiente: Artículos 55 al 57: implementando la creación de zonas de protección hídrica en base a la planificación territorial y gestión ambiental sostenible, se promueve la importancia de conservar los ecosistemas acuáticos y las fuentes de agua. **Artículos 92 al 94:** Establecen normas para la creación de zonas de conservación y protección de recursos hídricos, abarcando áreas de recarga, fuentes de agua y ecosistemas frágiles que desempeñan un papel clave en el ciclo hidrológico. **Artículos 87 y 88:** Enfatizan en la regulación de la gestión de los ecosistemas terrestres, resaltando la necesidad de estudios continuos sobre la evolución de la cobertura vegetal y la transformación en el uso del suelo (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017).

Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025: Este plan promueve la importancia de la gestión integrada de los recursos hídricos y la protección de cuencas hidrográficas, incentivando a estudios hidrológicos y geomorfológicos para preservar la sostenibilidad del recurso hídrico en el país. Además, establece la protección de fuentes hídricas como una prioridad estratégica del país, promoviendo la identificación y manejo de áreas de protección hídrica para garantizar la disponibilidad y calidad del agua. También hace énfasis en la necesidad de monitorear y gestionar los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal como parte de la estrategia para el desarrollo sostenible del país, promoviendo el uso de estudios multitemporales (Consejo Nacional de Planificación, 2021).

Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Ecuador 2023-2027: Esta estrategia destaca la relevancia de realizar estudios exhaustivos sobre las cuencas hidrográficas, abarcando su análisis hidrológico y geomorfológico, con la finalidad de reducir los impactos del cambio climático y fortalecer la resiliencia de los ecosistemas, así como de las comunidades (Ministerio del Ambiente, 2023).

Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo: Artículos 4 y 5: enfatizando en estudios que analicen el uso del suelo y los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, se establecen que el ordenamiento territorial y la gestión del suelo, deben enfocarse en la conservación y restauración de la naturaleza (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2021).

Estrategia Nacional de Biodiversidad 2015-2030: La estrategia enfatiza la importancia de monitorear los cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo para la conservación de la biodiversidad, promoviendo la realización de estudios multitemporales como parte de los compromisos de Ecuador en conservación (Ministerio del Ambiente, 2015).

2.2.2 Normativa Internacional

Se pueden considerar varias normativas internacionales que proporcionan estándares y lineamientos en el manejo y gestión de recursos hídricos y cuencas, ofreciendo metodologías que pueden ser aplicadas al realizar estudios de cuencas hidrográficas, entre esta fundamentación legal se tiene:

- La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) proporciona directrices detalladas para la gestión de cuencas hidrográficas. Estas directrices incluyen métodos de caracterización geomorfológica e hidrológica, manejo de suelos, y conservación de agua (FAO, 2014).
- La Organización Internacional de Normalización (ISO) ha establecido normas vinculadas a la gestión del agua, entre las cuales se destaca la **ISO 14046:2014**, destinada a la evaluación de la huella hídrica (ISO, 2014).

- La UNESCO ha desarrollado un manual de los recursos hídricos para la evaluación hidrológica y geomorfológica de cuencas hidrográficas (UNESCO, 2006).
- Existe una relación directa con las ODS establecidos por las Naciones Unidas en su Agenda 2030, entre las cuales se pueden mencionar la ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento), ODS 13 (Acción por el Clima), ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres), las mismas que permiten asegurar un desarrollo sostenible que equilibre las necesidades humanas con la protección del medio ambiente (Naciones Unidas, 2018).

2.3 Fundamentación Teórica

2.3.1 Cuenca y Microcuenca hidrográfica

2.3.1.1 Cuenca

Se considera a una extensión de terreno en el cual discurren las aguas superficiales como el agua lluvia, los arroyos y ríos hacia un único lugar común o punto de descarga que puede ser un río principal, lago o el océano. La cuenca hidrográfica representa un gran ecosistema conformado por suelos, bosques, agua y seres vivos (Montesdeoca et al., 2021).

Son fundamentales para el ciclo hidrológico y el manejo de recursos hídricos, incluye los componentes naturales que afectan la captación almacenamiento y el movimiento del agua, como la topografía, la vegetación y el uso del suelo por actividades humanas. El estudio de las cuencas es importante para comprender la disponibilidad del agua, la gestión de riesgos como inundaciones y sequías, la calidad y cantidad de agua y los efectos ambientales generadas por las actividades humanas.

2.3.1.2 Microcuenca

Es una unidad física determinada por una línea divisoria de agua dentro de una cuenca hidrográfica más grande, tiene un área de captación de agua más reducida, de menor extensión que drenan hacia un punto de salida común, se considera microcuenca a una quebrada, arroyo o río pequeño (Quishpi et al., 2018).

Cuando el caudal de agua y las áreas de drenaje de múltiples microcuencas se combinan, se forman cuencas hidrográficas de mayor extensión. Estas cuencas más grandes son el resultado de la integración de varios sistemas de microcuencas interconectadas, donde cada microcuenca aporta su flujo de agua y sedimentos al curso principal y son esenciales para el equilibrio y la salud del ecosistema, porque integran los procesos ecológicos, hidrológicos y geomorfológicos que ocurren a lo largo del mismo (Robledo, 2022).

2.3.1.2.1 Características de una Microcuenca

- Alcanzan área que van desde algunos kilómetros cuadrados hasta de pocas hectáreas, facilitando que la evaluación sea más precisa y enfatizando en una gestión focalizada.
- Son utilizadas como unidades de gestión para programas de conservación de suelos, reforestación, manejo sostenible de agua, entre otros.
- Juegan un papel fundamental en el mantenimiento de la biodiversidad local, regulación del microclima, protección de fuentes de agua, e influyen en el régimen hidrológico de las cuencas mayores en las que desembocan.
- Favorecen la regulación del flujo de agua, minimizan la erosión del suelo y contribuyen a la infiltración de agua, además reducen el riesgo de inundaciones.

Por lo tanto, el estudio de las microcuencas es esencial para planificación y gestión local de los recursos hídricos que facilitan la implementación de prácticas de conservación y protección hídrica.

2.3.1.2.2 Partes o zonas de la microcuenca

Parte Alta: ubicada en la cabecera de la microcuenca, se distingue por la presencia de montañas y elevaciones pronunciadas. En esta parte es fundamental la conservación del bosque, en donde durante la temporada de lluvias, el suelo retenga el agua facilitando su infiltración. Este proceso no solo contribuye a la recarga de los acuíferos subterráneos, sino que garantiza un suministro constante de agua en la estación seca, cuando el agua almacenada emerge a través de manantiales, asegurando el flujo hídrico en el ecosistema (Montesdeoca et al., 2021).

Parte Media: se caracteriza por comprender terrenos con pendientes moderadas, en esta área predominan las actividades agrícolas y pecuarias, sus terrenos son utilizados para actividades productivas y cultivos, siendo de esta manera viable siempre que se apliquen prácticas de preservación y manejo sostenible del suelo, lo que resulta primordial para conservar la fertilidad del suelo, evitar la erosión y asegurar un aprovechamiento eficiente de los recursos naturales a largo plazo (Montesdeoca et al., 2021).

Parte Baja: corresponde a la zona de descarga, donde los suelos presentan pendientes suaves o planos, estas condiciones favorecen el desarrollo de la agricultura a gran escala, facilitando de gran manera el cultivo, el riego y la mecanización de las labores agrícolas, optimizando de esta manera el uso del suelo de manera más eficiente e intensiva (Montesdeoca et al., 2021).

2.3.1.3 Caracterización geomorfológica de una cuenca

Una cuenca se caracteriza geomorfológicamente por el estudio detallado de algunas variables que implican características de superficie, lineales, de drenaje y de relieve, lo que permite entender la forma física de una cuenca, de esta manera facilita una comparación entre las mismas. Con este enfoque, se conoce el funcionamiento hidrológico de la cuenca y se puede definir estrategias eficientes en el manejo y conservación. Es fundamental que estas mediciones se realicen sobre mapas que cuenten con información hidrográfica y topográfica precisa y detallada, garantizando así un análisis fiable y completo (Cardona, 2016).

El comportamiento de los flujos que recorren la cuenca está relacionado con las características morfométricas, los mismos que comprenden estimaciones que pueden calcularse al inicio de un estudio hidrológico, para aprovechar eficientemente los recursos hídricos y para implementar medidas de gestión y control de la cuenca (Cardona, 2016).

En la Tabla 1 se detallan algunos parámetros morfométricos que se deben considerar en la caracterización geomorfológica de una cuenca o microcuenca:

Tabla 1. Parámetros Morfométricos de una cuenca

Parámetro	Unidad	Definición
Área (A)	km ²	Se define como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía que converge, de manera directa o indirecta, hacia un mismo cauce natural. Esta superficie está delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio.
Perímetro (P)	km	Longitud de la línea que sigue la divisoria de aguas sobre un plano horizontal.

<p>Índice de compacidad o coeficiente de Gravelius (Ic)</p>	<p>Adimensional</p>	<p>Se define como la relación entre el perímetro de la cuenca, equivalente a la longitud de su divisoria de aguas, y el perímetro de dicho círculo. Los valores del Ic nunca serán menores que uno. Cuanto más cercano sea el índice a la unidad, mayor será la tendencia de la cuenca a concentrar grandes volúmenes de agua de escorrentía, indicando una mayor concentración de flujo. Si su valor es igual a uno la cuenca es circular, si el $Ic \approx 1$ se considera una cuenca regular y si el $Ic = 1$ la cuenca es irregular.</p> $Ic = \frac{P}{P_0} = \frac{P}{2 * \sqrt{\pi * A}} = 0 - 282 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$ <p style="text-align: right;">Ecuación 1</p> <p>Donde:</p> <p><i>P</i>: perímetro de la cuenca</p> <p><i>P₀</i>: perímetro de la circunferencia</p> <p><i>A</i>: área de la cuenca</p>
<p>Ancho medio (Bm)</p>	<p>Adimensional</p>	<p>Se define como el cociente entre el área de la cuenca y su longitud total. Su ecuación es:</p> $Bm = \frac{A}{Lc}$ <p style="text-align: right;">Ecuación 2</p> <p>Donde:</p> <p><i>A</i>: área de la cuenca</p> <p><i>Lc</i>: longitud de la cuenca</p>

Longitud de la cuenca (Lc)	km	Distancia horizontal medida desde el punto de salida de la cuenca, o desembocadura, hasta el punto aguas arriba en el que el cauce principal cruza la línea de contorno de la cuenca.
Factor de forma (Ff)	Adimensional	<p>Es una medida que relaciona el área de la cuenca con el cuadrado de su longitud, y se utiliza para evaluar si la cuenca tiene una forma más alargada o cuadrada. Cuencas con un factor de forma bajo son menos propensas a crecidas rápidas en comparación con aquellas de igual área, pero con un factor de forma más alto. La forma de las cuencas hidrográficas está principalmente influenciada por factores geológicos que determinan la fisiografía de una región. Un valor de Kf mayor que uno indica que la cuenca es más achatada o que el río principal es más corto, lo que puede favorecer la concentración del escurrimiento tras lluvias intensas, generando crecidas significativas con mayor facilidad. Su ecuación es:</p> $F_f = \frac{A}{Lc^2}$ <p style="text-align: right;">Ecuación 3</p> <p>Donde:</p> <p><i>A</i>: área de la cuenca</p> <p><i>Lc</i>: longitud de la cuenca</p>
Relación de elongación (Re)	Adimensional	Es la proporción entre el diámetro de un círculo que tiene la misma área que la cuenca y la longitud

		<p>máxima de dicha cuenca. Si R_e varía entre 0.60 y 1.00 la cuenca presenta una amplia variedad de climas y geologías, se relaciona con el relieve de manera que valores cercanos a la unidad representan regiones con relieve bajo. Si R_e varía de 0.60 a 0.80 los relieves son fuertes con pendientes pronunciadas. Su ecuación es:</p> $R_e = \frac{D}{Lc} = 1.1284 * \frac{\sqrt{A}}{Lc}$ <p style="text-align: right;">Ecuación 4</p> <p>Donde:</p> <p><i>D</i>: diámetro de un círculo</p> <p><i>A</i>: área de la cuenca</p> <p><i>Lc</i>: longitud de la cuenca</p>
Relación de circulación (Rci)	Adimensional	<p>También conocido como radio de circularidad, se define como la relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo cuyo perímetro es igual al perímetro de la cuenca.</p> $R_{ci} = \frac{4\pi A}{P^2}$ <p style="text-align: right;">Ecuación 5</p> <p>Donde:</p> <p><i>P</i>: perímetro de la cuenca</p> <p><i>A</i>: área de la cuenca</p>
Altura media (Amed)	m.s.n.m.	<p>Se define como la ordenada promedio en la curva hipsométrica, donde el 50 % del área de la cuenca se</p>

		encuentra por encima de esta altitud, mientras que el otro 50 % está por debajo.
Altitud más frecuente (Amf)	m.s.n.m.	Se refiere al valor más alto en términos de porcentaje en el histograma de frecuencias de altitudes.
Altitud de frecuencia media (Afm)	m.s.n.m.	Se define como la altitud promedio que corresponde a la media de las abscisas en el histograma de frecuencias de altitudes.
Pendiente media de la cuenca (Pmc)	%	Es un parámetro clave que describe el relieve de la cuenca y facilita la comparación entre diferentes cuencas para identificar y analizar fenómenos erosivos en la superficie.

Fuente: Cardona, (2016); Cahuana & Yugar, (2009).

2.3.1.4 Caracterización Hidrológica de una cuenca

La caracterización hidrológica de una microcuenca implica el análisis de varios factores que influyen en el comportamiento del agua dentro de este espacio geográfico, siendo primordial para entender la distribución, disponibilidad y calidad del recurso hídrico, así como contribuye en la planificación de la gestión sostenible del agua.

En la Tabla 2 se presenta algunos parámetros fundamentales que destacan en la caracterización hidrológica de una microcuenca.

Tabla 2 Parámetros Hidrológicos de una cuenca

Parámetro	Unidad	Definición
Longitud del cauce principal (Lc)	km	Distancia horizontal medida desde el punto de salida de la cuenca, o desembocadura, hasta el punto

		aguas arriba en el que el cauce principal cruza la línea de contorno de la cuenca.
Orden de la red hídrica (Or)	Adimensional	<p>Es un valor que indica el nivel de ramificación dentro de la red de drenaje. Existen diferentes criterios para clasificar los cauces en una cuenca hidrográfica según su orden.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Primer orden (1), no poseen tributarios. - Segundo orden (2), tiene afluentes de primer orden. - Tercer orden (3), están influenciados por cauces de segundo orden, pudiendo recibir directamente cauces de primer orden. - Orden n, reciben tributarios de orden n-1 hasta 1.
Densidad de drenaje (Dd)	km ⁻¹	<p>Se define como la relación entre la longitud total de los cauces en la red de drenaje de una cuenca y el área total de la cuenca.</p> $Dd = \frac{Lt}{A}$ <p style="text-align: right;">Ecuación 6</p> <p>Donde:</p> <p><i>Lt</i>: longitud total</p> <p><i>A</i>: área de la cuenca</p> <p>Es un indicador que refleja cómo responde una cuenca a un aguacero, influyendo directamente en la forma del hidrograma en el desagüe de la cuenca.</p> <p>Una mayor densidad de drenaje significa que el</p>

		flujo en los cauces es más predominante en comparación con el flujo en las laderas, lo que resulta en un tiempo de respuesta más corto para la cuenca y, en consecuencia, un tiempo reducido hasta alcanzar el pico del hidrograma.
Número de canales (Nt)	Adimensional	Segmento o tramo de canal que no recibe contribuciones de ningún otro canal.
Densidad hidrográfica (Dh)	km ⁻¹	Es la relación entre el número de segmentos de canal de la cuenca y el área de esta. $Dh = \frac{Nt}{A}$ Ecuación 7 Donde: <i>Nt</i> : número de canales de la cuenca <i>A</i> : área de la cuenca
Altura máxima del río (Hmax)	m.s.n.m.	Cota máxima del cauce
Altura mínima del río (Hmin)	m.s.n.m.	Cota mínima del cauce
Pendiente media del cauce principal (Sm)	Adimensional	Se calcula como la relación entre la diferencia de alturas del cauce principal y la longitud de este. $S_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$ Ecuación 8 Donde: <i>H_{max}</i> : altura máxima <i>H_{min}</i> : altura mínima

		<i>L: longitud</i>
Tiempo de concentración (Tc)	h	Es el tiempo que tarda una gota de agua de lluvia en recorrer desde el punto más distante hidráulicamente de la cuenca hasta la sección de salida de esta.
Relación hipsométrica (Rh)	%	<p>A partir de la curva hipsométrica, se obtiene la siguiente relación hipsométrica:</p> $R_H = \frac{A_s}{Ab_i}$ <p style="text-align: right;">Ecuación 9</p> <p>Donde:</p> <p><i>A_s</i>: área sobre la curva hipsométrica</p> <p><i>Ab_i</i>: área bajo la curva hipsométrica</p>

Fuente: (Cardona, 2016), (Cahuana & Yugar, 2009).

2.3.2 Estudio multitemporal de la cobertura vegetal y uso de suelo

Se fundamenta en la evaluación y análisis de los cambios en la vegetación y uso del suelo a lo largo del tiempo, para lo cual se utiliza varias técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG). Lo que permite identificar comportamientos, tendencias y dinámicas de transformación del paisaje, y, así tener una visión integral de cómo los cambios han venido afectando a los procesos ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos de un área determinada (Moreno, 2017).

2.3.2.1 Estudio multitemporal

Los estudios multitemporales son análisis espaciales que se llevan a cabo mediante la comparación de interpretaciones de coberturas en imágenes satelitales, mapas o fotografías aéreas de una misma área en diferentes momentos. Este enfoque permite evaluar

los cambios ocurridos en las coberturas del suelo previamente clasificadas, identificando así la evolución del entorno natural o los efectos de las actividades humanas sobre él. Es un método eficaz para comparar y estimar cambios a lo largo de un período específico (García & Hachi, 2022).

Generalmente los estudios multitemporales se obtienen a través de imágenes satelitales, proporcionando una reseña del pasado y presente en una zona específica, principalmente se basan en la caracterización de la superficie terrestre, mediante indicadores como la cobertura vegetal y el uso del suelo (García & Hachi, 2022).

2.3.2.2 Cobertura vegetal y uso del suelo

La cobertura vegetal se considera una manifestación evolutiva de las especies vegetales en un lugar y tiempo específicos, y refleja el estado o condición de un ecosistema determinado. Junto con el uso del suelo, la cobertura vegetal define los atributos de la superficie terrestre y las interacciones de las actividades humanas o acciones antrópicas dentro de un espacio biofísico (Zambrano, 2016).

Estos elementos son esenciales para comprender la funcionalidad y la estructura de los ecosistemas, y cómo éstos influyen en los procesos de biodiversidad, ciclo del agua, ciclo de nutrientes y el clima.

La cobertura vegetal en una cuenca hidrográfica afecta la dinámica del flujo de agua, tanto verticalmente (a través de la evapotranspiración e infiltración) como horizontalmente (mediante la escorrentía). Las especies presentes en la cuenca determinan el paisaje fluvial, estableciendo patrones característicos de distribución tanto en el cauce principal del río como en los diferentes sectores de la cuenca (Volonté et al., 2018)

2.3.2.2.1 Tipo de vegetación y tipo de uso de suelo

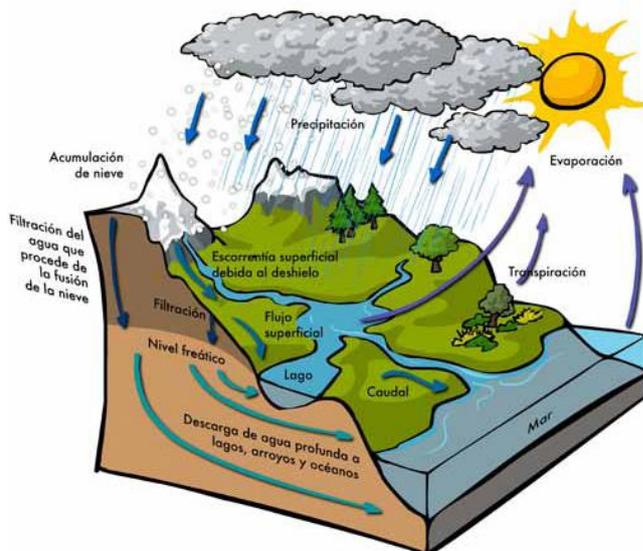
El tipo de suelo en una cuenca afecta tanto la cantidad de agua que se infiltra y percola como la calidad y cantidad de las aguas subterráneas en la cuenca. El uso del suelo en la cuenca puede influir en todos los aspectos del ciclo hidrológico. En cuencas urbanas, donde hay más pavimento y menos vegetación, los procesos de infiltración e intercepción pueden ser diferentes en comparación con cuencas agrícolas, que tienden a contribuir a una mayor evapotranspiración (Vásconez et al., 2019).

Una cuenca tiene un gran impacto en como responde a los eventos de precipitación, y esto se debe al tipo de vegetación o a la ausencia de este. En los páramos ecuatorianos se encuentra las vegetaciones rastreras, que ayudan a mitigar el riesgo de inundaciones, ya que, actúan como esponjas naturales (Vásconez et al., 2019).

2.3.2.2.2 Ciclo Hidrológico

Es un fenómeno global que describe la circulación continua del agua entre la superficie terrestre y la atmósfera, impulsado por la energía solar, la gravedad y la rotación de la Tierra. En esencia, representa el trayecto del agua a través de sus tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso. Además, es un proceso mediante el cual los seres vivos obtienen agua es fundamental para las condiciones naturales de las cuencas hidrológicas y representa una de las partes más cruciales de su funcionamiento (Maderrey & Jiménez, 2001). En la Figura 1, se observa el ciclo hidrológico con los componentes que este involucra.

Figura 1 Ciclo Hidrológico



Fuente: <http://es.contenidos.climantica.org/cms/assets/climantica/unidad-3/2.2/figura-2-es.png>

Precipitación: Hace referencia a cualquier forma de humedad que se origina en las nubes y llega hasta la superficie de la tierra. Esto incluye fenómenos como la lluvia, la nieve, el granizo y la nevisca, entre otros procesos mediante los cuales el agua desciende hacia el suelo.

Temperatura: es un parámetro primordial que se ve afectado por diversos factores en función del grado de calor del agua que se encuentra en los cuerpos hídricos, los cuales son: el flujo de agua, el clima, la cobertura vegetal, la radiación solar y las descargas que pueden ser de origen natural o antropogénico.

Evapotranspiración: Es el resultado de la combinación de dos procesos independientes que generan la pérdida de agua: la evaporación de agua desde la superficie del suelo y la transpiración de las plantas. Por lo tanto, todos los factores que afectan tanto la evaporación como la transpiración tendrán un impacto directo en la evapotranspiración (Vásconez et al., 2019).

Escorrentía o escurrimiento: es el agua originada por la precipitación que se dirige a nutrir las corrientes superficiales dentro de una cuenca.

Infiltración: es el proceso mediante el cual el agua de la precipitación penetra en el suelo y se mueve hacia abajo a través de las capas del suelo y el subsuelo. Este proceso es crucial porque recarga los acuíferos subterráneos, contribuye al suministro de aguas subterráneas y afecta la disponibilidad de agua para plantas y ecosistemas (Urrutia, 2016).

2.3.2.3 Teledetección

La teledetección o teledetección espacial, es una técnica que permite obtener información sobre la Tierra, sus propiedades físicas, los recursos naturales y las actividades humanas, mediante mediciones y estudios realizados a distancia, sin necesidad de contacto directo con los objetos o áreas de interés (Coronel, 2022).

2.3.2.4 Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales son representaciones visuales o datos recopilados por satélites que orbitan alrededor de la Tierra, se obtienen a través de sensores y cámaras a bordo de estos satélites, los cuales están diseñados para captar distintas longitudes de onda de la radiación electromagnética, abarcando desde la luz visible hasta el infrarrojo y otras partes del espectro (Coronel, 2022).

Se utiliza para visualización y estudio de la tierra, por lo que se consideran como una herramienta fundamental, aporta información para: la planificación territorial, gestión ambiental e investigación científica.

2.3.2.5 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Se consideran herramientas tecnológicas que permiten y facilitan la visualización, recopilación, almacenamiento y análisis de datos geoespaciales, proporcionan el estudio y

la representación de diversos fenómenos en un contexto espacial, combinando información geográfica con datos alfanuméricos.

Para analizar el impacto y los cambios en los ecosistemas generados por actividades humanas o por causas naturales se utilizan los SIG, considerado como una herramienta clave en la evaluación ambiental (García & Hachi, 2022).

Los SIG son una gran plataforma en el mapeo y análisis espacial, modelado hidrológico, en la gestión de recursos hídricos y estudio, monitoreo y evaluación de cuencas hidrográficas, mejoran la comprensión de los procesos hidrológicos y facilitan la toma de decisiones para la conservación y uso sostenible de los recursos hídricos.

2.3.2.5.1 ArcGIS

Es una plataforma geoespacial, integra herramientas avanzadas para mapeo, análisis espacial y gestión de datos, conecta datos mediante el contexto geográfico, permitiendo crear, analizar, administrar, visualizar y representar cartográficamente, además comparte todo tipo de datos mediante servicios en la nube y facilita la producción cartográfica y la edición de datos (García, 2023).

2.3.2.5.2 Google Earth Engine (GEE)

Es una plataforma de computación en la nube desarrollada por Google, diseñada para el análisis y visualización de grandes volúmenes de datos geoespaciales, integra un vasto repositorio de imágenes satelitales y otros conjuntos de datos geoespaciales globales, además cuenta con herramientas y algoritmos de procesamiento (Gorelick et al., 2017).

Esta plataforma es esencial en el área ambiental, para la investigación y análisis ambientales que involucra cambios en el uso del suelo, monitoreo del cambio climático, conservación de la biodiversidad y para la gestión de recursos hídricos y naturales.

2.3.3 Áreas de protección hídrica

Las áreas de protección hídrica son zonas estratégicas para la conservación del recurso hídrico como ríos, lagos, acuíferos, humedales y cuencas hidrográficas. Estas áreas son esenciales para proteger las fuentes de agua de la degradación ambiental, garantizar la calidad y cantidad del agua para el consumo humano, y conservar los servicios ecosistémicos relacionados con el ciclo hidrológico, y así mitigar los impactos negativos del desarrollo humano y el cambio climático (Groot et al., 2012).

2.3.3.1 Criterios para la identificación de áreas de protección hídrica

Para identificar áreas de protección hídrica, se debe considerar algunos criterios, entre los cuales se tiene:

- Vulnerabilidad a la contaminación: áreas cercanas a fuentes de contaminación como industrias, zonas urbanas, áreas agrícolas, ganaderas.
- Importancia para la recarga de acuíferos: en estas áreas la geología y las condiciones del suelo facilitan la infiltración del agua pluvial, lo que genera una recarga de acuíferos. Se estudian varias características geológicas como la permeabilidad y la capacidad de infiltración del suelo.
- Biodiversidad acuática y terrestre: presencia de especies endémicas o en peligro de extinción que dependen de estos ecosistemas.
- Servicios ecosistémicos: beneficios que los ecosistemas ofrecen a la sociedad como el suministro de agua potable, estabilidad del clima, el control de la erosión y actividades recreativas.
- Regulación del ciclo hídrico: analizar áreas críticas, como zonas de retención de agua que pueden ser humedales, bosques riparios, llanura de inundación.

- Condiciones geomorfológicas y topográficas: se debe considerar las formas de relieve y la configuración del terreno, afectan la escorrentía y erosión del suelo.
- Uso y cobertura del suelo: es fundamental analizar los cambios en la cobertura y uso del suelo para una gestión sostenible de los recursos hídricos.
- Factores socioeconómicos y culturales: considerar la existencia de áreas de importancia cultural o espiritual para las comunidades locales, que puedan estar vinculadas a la protección de fuentes de agua.
- Riesgos climáticos y Naturales: evaluar áreas más vulnerables a eventos extremo, como sequías, inundaciones o deslizamientos de tierra, considerando posibles impactos ambientales del cambio climático (Chaves, 2007).

2.3.3.2 Gestión del agua en cuencas hidrográficas

La gestión del agua a nivel de cuenca, o en grupos de cuencas, se reconoce cada vez más como el enfoque más adecuado para conciliar las perspectivas nacionales, como la articulación de objetivos sociales, económicos y ambientales, con las aspiraciones específicas de las regiones y comunidades locales. En este sentido, las cuencas hidrográficas se presentan como unidades territoriales clave para alcanzar metas concretas de “desarrollo sostenible”, adaptadas a las particularidades de cada lugar, lo que implica compatibilizar niveles de calidad de vida con las capacidades del territorio, así como con la organización social y económica (Dourojeanni et al., 2003).

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la Investigación

Esta investigación tiene un enfoque metodológico para cumplir con los objetivos propuestos, que permiten identificar, analizar y proponer las áreas críticas para la protección hídrica de la microcuenca, éstas son:

- Caracterización geomorfológica e hidrológica la cuenca del río Guano
- Estudio multitemporal de la cobertura vegetal y el uso de suelo en 3 periodo (2000-2010, 2015-2019 y 2020-2024)
- Determinación de las áreas de protección hídrica

3.2 Diseño de la Investigación

Diseño Exploratorio-Descriptivo: Este diseño permite explorar y describir en detalle las características del medio físico de la microcuenca del Río Guano. Se busca identificar patrones, relaciones y áreas críticas para la protección hídrica, sin manipular variables independientes. El estudio se centra en la recopilación de información existente y en la realización de mediciones.

Diseño Transversal: permite analizar datos en el momento específico, permite conocer las características físicas, hidrológicas, climáticas, de uso de suelo y cobertura vegetal de la microcuenca en su estado actual, y de esta manera identificar áreas de importancia para la conservación hídrica y de vulnerabilidad.

Diseño de Estudio de Casos: La microcuenca del Río Guano se estudia como un caso específico. Se profundiza en la comprensión de sus características ambientales, hidrológicas y socioeconómicas para identificar factores clave que influyen en la protección

hídrica. Este enfoque permite generar conocimientos aplicables a contextos similares en otras microcuencas (Arispe et al., 2020).

3.3 Tipo de investigación

Cuantitativo: ayuda a recopilar, procesar y analizar datos de manera numérica mediante la aplicación de técnicas experimentales y métodos de análisis estadísticos con la finalidad de obtener resultados sobre la características geomorfológicas de la microcuenca, como: clima, topografía, hidrología, uso del suelo y cobertura vegetal (Arispe et al., 2020).

Cualitativo: permite obtener datos no cuantificables sobre la gestión del agua de la microcuenca mediante percepciones y conocimientos locales.

3.4 Nivel de Investigación

El nivel de investigación que se considera es mixto, que combina los niveles exploratorio, descriptivo y correlacional, que favorece una visión integral del medio físico de la microcuenca del río Guano, facilitando la toma de decisiones en la gestión y preservación del recurso hídrico.

Exploratorio: ayuda entender la compleja interacción entre las características físicas de la microcuenca (como la topografía, el uso del suelo, y la cobertura vegetal) y su capacidad para conservar los recursos hídricos. Dado que la información detallada y actualizada sobre la microcuenca del río Guano es limitada, se requiere una exploración inicial, para esto se realiza un revisión bibliográfica, recolección de datos preliminares y uso de herramientas de Sistema de Información Geográfica para explorar patrones espaciales (Arispe et al., 2020).

Descriptivo: busca detallar las características del medio físico de la microcuenca del río Guano, incluyendo la geomorfología, los patrones de precipitación, la hidrología, el uso del suelo, y la cobertura vegetal, para crear una base de datos comprensiva que permita

comprender la situación actual de la microcuenca y su dinámica hídrica. En este nivel se realiza la creación de mapas temáticos, la medición y registro de parámetros geomorfológicos e hidrológicos y la descripción de la red hidrográfica (Arispe et al., 2020).

Correlacional: analiza cómo distintas características físicas de la microcuenca (como la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura vegetal) se relacionan con la calidad y disponibilidad del recurso hídrico. Se relaciona con la aplicación de análisis estadísticos y uso de análisis multivariado (Arispe et al., 2020).

Propositivo: propone cambios o soluciones basadas en observaciones directas en áreas prioritarias para la conservación del recurso hídrico en la microcuenca y proteger el mismo.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Análisis Geoespacial y SIG: Recopilación de información de diferentes tipos de datos geoespaciales, utilizando software geoespacial, SIG y de teledetección como el Google Earth Engine para analizar los entornos naturales para la conservación y gestión de la microcuenca mediante variables ambientales como: tipo de suelo, cobertura vegetal y uso del suelo. Se utiliza diversas herramientas como modelos digitales de elevación (DEM), mapas temáticos para el análisis y evaluación más detallada y precisa de la microcuenca.

Modelado Hidrológico: Aplicación de modelos hidrológicos (HEC-HMS) para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca. Esto incluye la evaluación del balance hídrico, la escorrentía superficial, la infiltración, y la recarga de acuíferos, permitiendo identificar las zonas de mayor contribución a la recarga hídrica y las áreas más vulnerables a la erosión y la degradación.

Evaluación Multicriterio (EMC): aplicación de la evaluación multicriterio por la diversidad de variables a estudiar que implica la evaluación de riesgos naturales y la

identificación de áreas prioritarias para la protección hídrica. Las variables que se consideran son: la erosión, uso del suelo, vulnerabilidad, biodiversidad, capacidad de retención de agua y la relevancia socioeconómica. La EMC permite analizar a través de comparaciones pareadas para medir la relación entre diversas fuentes de datos y su importancia, permitiendo una toma de decisiones más eficiente.

3.6 Población y Muestra

3.6.1 Población

La población son todos los elementos físicos que influyen en la microcuenca del río Guano, los cuales son:

- Cuerpos de agua
- Suelos (tipos de suelo)
- Cobertura vegetal
- Uso del suelo

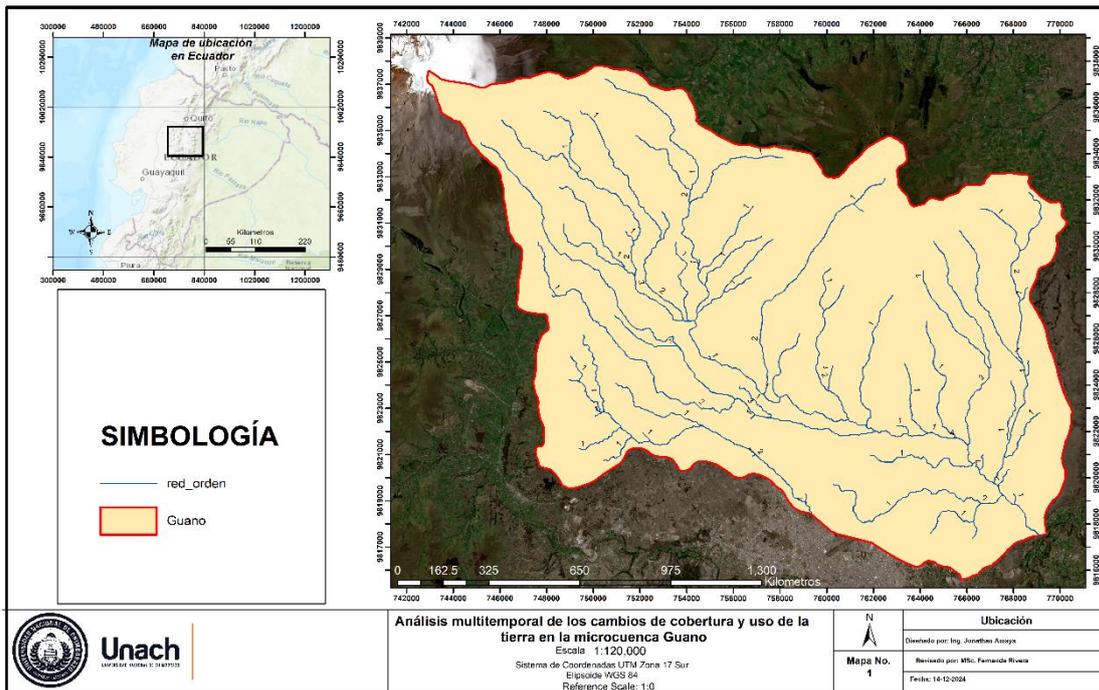
3.6.2 Tamaño de la Muestra

La muestra abarca todos los elementos ambientales de la microcuenca del Río Guano que serán medidos y evaluados para obtener una caracterización del medio físico.

3.6.2.1 Área de estudio

La presente investigación se enfoca en la microcuenca del río Guano, que pertenece al cantón Guano, provincia de Chimborazo, siendo un afluente para la cuenca del río Chambo, en la figura 2 se observa la delimitación de la microcuenca del río Guano, la misma que presenta una extensión de 374,52 km², cuenta con una altitud de 6286. Esta microcuenca es primordial por su biodiversidad y en el abastecimiento de agua para uso doméstico, agropecuario e industrial.

Figura 2 Ubicación de la microcuenca del río Guano



3.7 Metodología para la Caracterización geomorfológica e hidrológica de la microcuenca del río Guano

3.7.1 Delimitación de la Microcuenca

Se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) con resolución de 30 m obtenido de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para delinear los límites de la cuenca, identificar redes de drenaje y definir las subcuencas. Este proceso se realizó mediante el software ArcGIS y HEC-GeoHMS, herramientas recomendadas para análisis topográficos (Jensen, 2007).

El DEM permitió calcular parámetros geomorfológicos como pendiente, área de la cuenca, longitud de cauces y relaciones de compacidad, siguiendo metodologías de análisis geoespacial estandarizadas.

3.7.2 Caracterización Geomorfológica

Se generaron mapas de pendiente y curvas de nivel para evaluar las características topográficas. Estos mapas sirvieron para clasificar el terreno según su capacidad de escurrimiento e infiltración (Schmidt & Persson, 2003).

Los datos se complementaron con mapas temáticos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), que clasificaron los suelos según su textura y capacidad de retención de agua (FAO, 1998).

3.7.3 Caracterización Hidrológica

Se aplicó el método SCS-CN del Soil Conservation Service para estimar la escorrentía directa en función de la capacidad de infiltración y el uso del suelo. Este método combina datos sobre las características del suelo y la cobertura terrestre (NRCS, 2004).

3.7.4 Modelación Hidrológica con HEC-HMS

Se utilizó el modelo HEC-HMS para simular los procesos de precipitación-escorrentía en las subcuencas. Los datos de entrada incluyeron series históricas de precipitación proporcionadas por el INAMHI, así como parámetros calculados como tiempo de concentración y coeficientes de escorrentía.

Los resultados obtenidos del modelo fueron comparados con los datos observados de estaciones hidrometeorológicas para evaluar su precisión, empleando indicadores como el índice Nash-Sutcliffe y el coeficiente de determinación (R^2) (Moriasi et al., 2007).

3.8 Metodología para el estudio multitemporal de cobertura vegetal y el uso de suelo

Para el estudio multitemporal de cobertura vegetal y uso de suelo en la microcuenca del río Guano, se tomaron 3 periodos de tiempo: 2000-2010, 2015-2019 y 2020-2024, las

mismas que se desarrollaron en dos fases: fase 1: Cuantificación de cambios y fase 2: Validación de datos obtenidos.

3.8.1 Fase 1: Cuantificación de cambios

Para la detección de cambios de la microcuenca del río Guano, se aplica las técnicas de detección de cambios digitales usando datos de sensores remotos proporcionado por Singh (1989), lo que conlleva a evaluar y comparar varios métodos para identificar los posibles cambios que se han generado en la superficie terrestre a lo largo del tiempo, además, proponer mejoras en los modelos de detección de cambios ambientales que puedan distinguir las variaciones reales del terreno de aquellas causadas por factores externos.

3.8.1.1 Puntos de muestreo

Para las dos zonas de estudio, se obtuvo el conteo de píxeles y aplicó la fórmula del tamaño de muestra en la que se empleó un nivel de confianza de 95% y un error de estimación de 5% de tolerancia, que se utiliza para determinar puntos de control necesario para iniciar la clasificación como se muestra a continuación en la Ecuación 6:

$$n = \frac{NZ^2_{\alpha/2}pq}{e^2(N-1) + pqZ^2_{\alpha/2}} \quad (6)$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

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

N = tamaño de la población

e = error de estimación máximo tolerable

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

$$q = 1 - p$$

3.9 Metodología para la determinación de las áreas de protección hídrica

3.9.1.1 Delimitación de la Microcuenca

Uso de Modelos Digitales de Elevación (DEM) con una resolución de 30 m para la delimitación de los límites de la microcuenca y las subcuencas asociadas.

Software SIG como ArcGIS y QGIS para generar mapas topográficos y redes de drenaje.

Análisis geomorfológico de la cuenca, que abarca la identificación de áreas con pendiente pronunciadas y zonas bajas susceptibles a acumulación de agua.

3.9.1.2 Identificación de Zonas de Recarga Hídrica

Clasificación de cobertura vegetal mediante imágenes satelitales (Landsat, Sentinel) utilizando algoritmos de clasificación supervisada, como Random Forest.

Determinación de parámetros hidrológicos fundamentales, como el índice de capacidad de infiltración, que se calcula a partir del tipo de suelo y la cobertura del terreno.

Presencia de vegetación nativa, como páramos y bosques; Zonas con baja escorrentía y alta capacidad de retención de agua.

3.9.1.3 Priorización de Áreas de Protección

Zonas con alta capacidad de recarga hídrica y conexión directa a fuentes de agua superficiales.

Áreas críticas afectadas por actividades humanas (agricultura intensiva, urbanización).

Preservación de biodiversidad y servicios ecosistémicos asociados al recurso hídrico.

Metodología multicriterio (AHP - Analytical Hierarchy Process) para ponderar y jerarquizar los indicadores.

Mapas de calor generados en SIG para representar visualmente las áreas prioritarias.

3.9.1.4 Validación y Propuesta de Conservación

Comparación de los resultados con datos empíricos obtenidos de estaciones meteorológicas y mediciones de caudal.

Análisis de precisión mediante el uso de índices como el coeficiente Kappa para verificar la calidad de las clasificaciones.

Elaboración de estrategias de manejo sostenible, tales como la reforestación con especies autóctonas y la implementación de incentivos económicos por servicios ambientales.

Fomento de la participación de las comunidades locales en el proceso de conservación a través de talleres de concienciación y sensibilización.

Capítulo 4

Análisis y Discusión de los Resultados

4.1 Caracterización geomorfológica e hidrológica de la microcuenca del río Guano

El análisis geomorfológico de la microcuenca (Tabla 3), ayuda a comprender la influencia que tiene su forma, relieve y red de drenajes de la unidad hidrográfica con las variaciones climáticas, precipitaciones, flora, fauna, entre otras; de tal manera conocer la influencia de la relación precipitación-escorrentía que tiene la cuenca. La microcuenca del río Guano muestra un área es de 374,52 km², es decir es una cuenca de tamaño grande, la longitud media de la cuenca es de 41,81 km; su índice de compacidad es de 1,40, por lo tanto, es una cuenca regular, es decir que el tiempo de respuesta ante una precipitación va a ser bueno. El factor de forma es de 0,21 por lo cual es una cuenca que tiene una buena respuesta en eventos de fuertes precipitaciones. La pendiente media de la cuenca es de 16 % por tanto es de tipo escarpado, esto se da por sus pendientes pronunciadas en la parte más alta de la microcuenca del río Guano. La relación de elongación es de 0,52 esto indica que la cuenca tiene fuertes relieves y como se puede observar con la pendiente anteriormente mencionada.

Tabla 3 Parámetros geomorfológicos

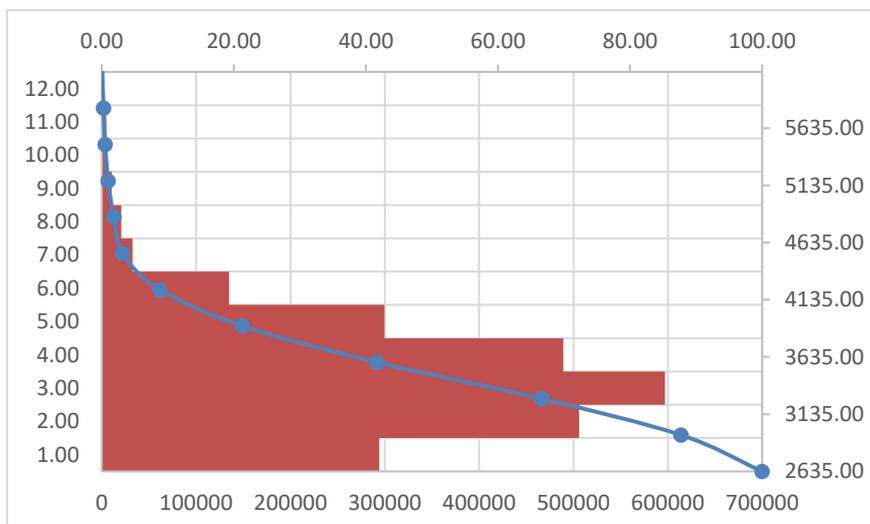
Nombre	Sigla	Unidad	Valores
Área	A	km ²	374,52
Perímetro	P	km	96,38
Índice de compacidad	Ic	adimensional	1,40
Ancho medio	B	adimensional	8,95
Longitud media	Lc	km	41,81
Factor de forma	Ff	adimensional	0,2142
Relación de elongación	Re	adimensional	0,5223
Relación de circularidad	Rci	adimensional	0,5067
Área sobre la curva	AS	km ²	2720934
Área bajo curva	Ab	km ²	342815
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	16,92
Longitud del cauce principal	Lc	km	41,81

Orden de la red hídrica	Or	adimensional	8
Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	Lt	km	299,98
Densidad de drenaje	Dd	Km ⁻¹	0,81
Numero de canales	Nt	adimensional	120
Densidad hidrográfica	Dh	Km ⁻¹	0,32
Altura Máxima río	Hmax	m.s.n.m.	6286
Altura mínima del río	Hmin	m.s.n.m.	2477
Tiempo de concentración	Tc	h	0,72
Relación hipsométrica	Rh	%	10,11

Fuente: Autor

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

Figura 3 Curva hipsométrica de la microcuenca Guano



Fuente: Autor

4.1.1 *Sampling design*

En ambas zonas de estudio se asignaron porcentajes respecto a la predominancia que presenta cada clase en base a su área total, al igual que el número de puntos de validación como muestra la Tabla 4. Las entradas necesarias son las áreas del mapa y la precisión

esperada del usuario para la muestra, que se introducen en las celdas resaltadas con negrita.

Las celdas sobrantes se calculan con la aplicación de las fórmulas de Olofsson et al. (2014).

Tabla 4 Resultados de puntos de verificación de la microcuenca del río Guano

	Bosque	Tierra Agropecuaria	Glacial	Área Antrópica	Otras tierras	Páramo	Total
Área en píxeles	253468	2119400	19387	599381	57398	255779	3304813
Wi (Proporción cartografiada)	0,15	0,30	0,10	0,25	0,10	0,10	1,00
Ui (Precisión esperada del usuario)	0,15	0,30	0,10	0,25	0,10	0,10	
Si (Desviación estándar)	0,36	0,46	0,30	0,43	0,30	0,30	
Wi*Si	0,054	0,14	0,03	0,11	0,03	0,030	0,39
						SE precisión general	0,05
						Número total de muestras	379

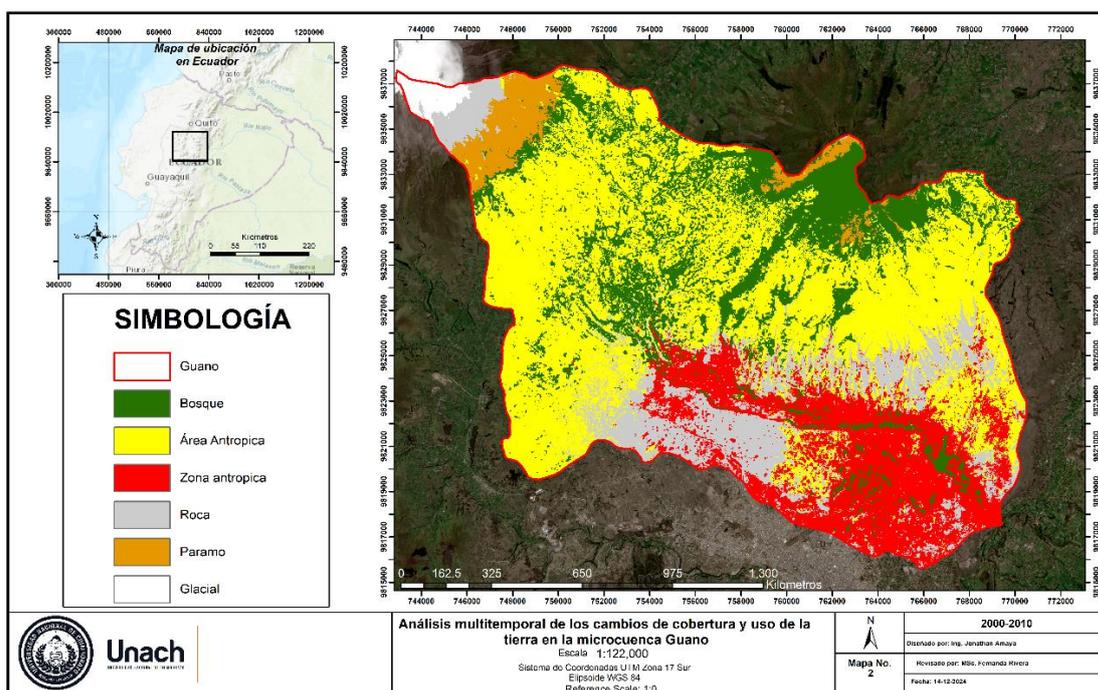
Fuente: Autor

4.1.2 Mapas de Clasificación Supervisada utilizando Randon Forest

4.1.2.1 Validación de la precisión de datos obtenidos de la microcuenca del río guano periodo 2000.

La figura 4 presenta un panorama de la microcuenca del río Guano en el año 2000, A simple vista, resalta la presencia predominante de la clase zona antrópica en las partes bajas y centrales de la cuenca. Esta distribución se explica por un error al clasificar, ya que el satélite aster contiene diferentes bandas y el clasificador confunde ciertas clases, pero la implementación de 379 puntos de control tampoco se ve una mejora. Asimismo, se observa la presencia significativa de la clase Bosque, en las partes altas donde se encuentra el páramo y ciertos cultivos. La clase Paramo también se destaca, en la parte alta del Chimborazo, esta cuenca tiene una importancia hidrológica y de aprovechamiento ya que cuenta con 5 clases de cobertura vegetal de nivel 2 dadas por el MATTE.

Figura 4 Mapa de la microcuenca del río Guano periodo 2000



Fuente: Autor

Como muestra la Tabla 5, la clasificación del año 2000 en la cuenca del río Guano tiene un índice Kappa de 95% la cual representa una muy buena concordancia. La clase Tierra Agropecuaria presenta un error de comisión de 1,4% y no muestra error de omisión, la clase Otras Tierra no presenta errores de comisión ni omisión; la clase de paramo presenta un error de omisión de 1%, mientras que el bosque presenta 4% y 1%, en los errores de comisión y omisión respectivamente, finalmente la clase de área antrópica no muestra ningún error. Cabe destacar, que debido a la resolución de las imágenes satelitales ASTER, disminuye la precisión y percepción de píxel por parte del operador, esto se da debido a la combinación diferente de bandas.

Tabla 5 Matriz de confusión periodo 2000

Clases	Bosque Nativo	Tierra agropecuaria	Área antrópica	Otras tierras	Páramo	Glaciar	Total	Error de Comisión
--------	---------------	---------------------	----------------	---------------	--------	---------	-------	-------------------

Bosque Nativo	85	9	0	0	6	0	100	15
Tierra agropecuaria	5	95	0	0	0	0	100	5
Área antrópica	0	0	100	0	0	0	100	0
Otras tierras	0	0	0	20	0	0	20	0
Páramo	0	0	0	0	20	0	20	0
Glaciar	0	0	0	0	0	20	20	0
Total	90	104	100	20	26	20	340	
Error de Omisión	5	9	0	0	6	0		

Fuente: Autor

Tabla 6 Índice kappa periodo 2000

Clases	Error de Comisión	Error de Omisión	Precisión global (PO)	Precisión global (%)	índice k	índice k (%)
Bosque Nativo	4,4	1,4				
Tierra agropecuaria	1,4	2,6				
Área antrópica	0	0	0,96	96%	0,959	95%
Otras tierras	0	0				
Páramo	0	1,7				
Glaciar	0	0				

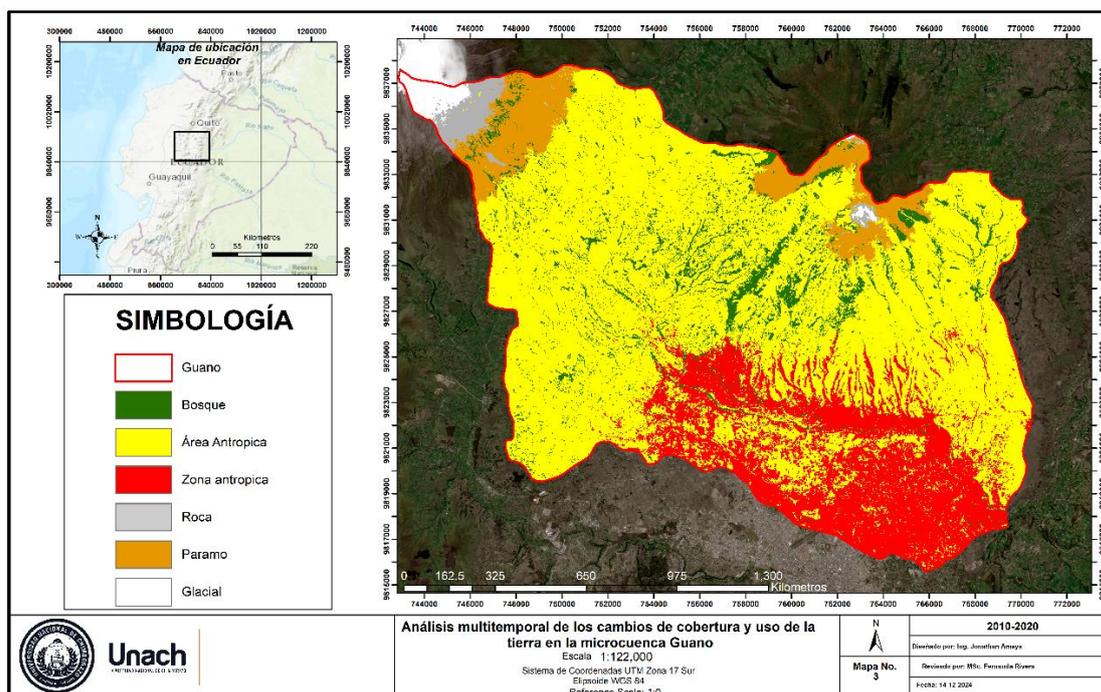
Fuente: Autor

4.1.2.2 Validación de la precisión de datos obtenidos de la microcuenca del río

Guano periodo 2015

Como se observa en la figura 5, la cual representa la realidad de la cuenca del río Guano para el año 2010, evidencia un incremento de la clase tierra agropecuaria, esto se debe a la pérdida de Bosque en este año. Se nota también un aumento de zonas edificadas correspondientes a la clase Área antrópica, especialmente en la clase otras tierras y glacial se mantiene con el tiempo. Cabe destacar, que en este mapa se observa un cambio considerable en la calidad de imagen, esto debido a la resolución que presentan las imágenes SENTINEL-2 (10 metros), como se mencionó anteriormente, lo que da lugar a una mejor percepción de los píxeles.

Figura 5 Mapa de la microcuenca del río Guano periodo 2015



Fuente: Autor

Tabla 7 Matriz de confusión periodo 2015

Clases	Bosque Nativo	Tierra agropecuaria	Área antrópica	Otras tierras	Páramo	Glaciar	Total	Error de Comisión
Bosque Nativo	85	9	0	0	6	0	100	15
Tierra agropecuaria	5	95	0	0	0	0	100	5
Área antrópica	0	0	100	0	0	0	100	0
Otras tierras	0	0	0	20	0	0	20	0
Páramo	0	0	0	0	20	0	20	0
Glaciar	0	0	0	0	0	20	20	0
Total	90	104	100	20	26	20	340	
Error de Omisión	5	9	0	0	6	0		

Fuente: Autor

Tabla 8 Índice kappa periodo 2015

Clases	Error de Comisión	Error de Omisión	Precisión global (PO)	Precisión global (%)	índice k	índice k (%)
Bosque Nativo	4,4	1,4				
Tierra agropecuaria	1,4	2,6	0,94	94%	0,927	93%

Área antrópica	0	0
Otras tierras	0	0
Páramo	0	1,7
Glaciar	0	0

Fuente: Autor

Según se observa en la Tabla 8, la clasificación del periodo decenal 2010 de la microcuenca del río Guano, muestra una precisión global del 94% y un índice Kappa del 93%, lo que refleja una concordancia casi perfecta. Se observa que la clase Bosque tiene un error de comisión de 4%; la clase Tierra Agropecuaria muestra un error de omisión del 2%, mientras que la clase Otras Tierras y Área Antrópica no presenta errores de omisión y comisión, finalmente la clase Páramo tiene un error de omisión de 1%. Como se puede evidenciar los errores con mayor frecuencia es el bosque y el páramo ya que en este periodo existe una pérdida de la clase bosque por la reforestación del Páramo en la zona alta de las unidades hidrográficas.

4.1.2.3 Validación de la precisión de datos obtenidos de la microcuenca del río Guano periodo 2020

La figura 6 representa las clases presentes en la microcuenca del río Guano, se evidencia una ligera disminución en las clases Bosque y Área antrópica, y un crecimiento en la clase Páramo.

Figura 6 Mapa de la microcuenca del río Guano periodo 2020

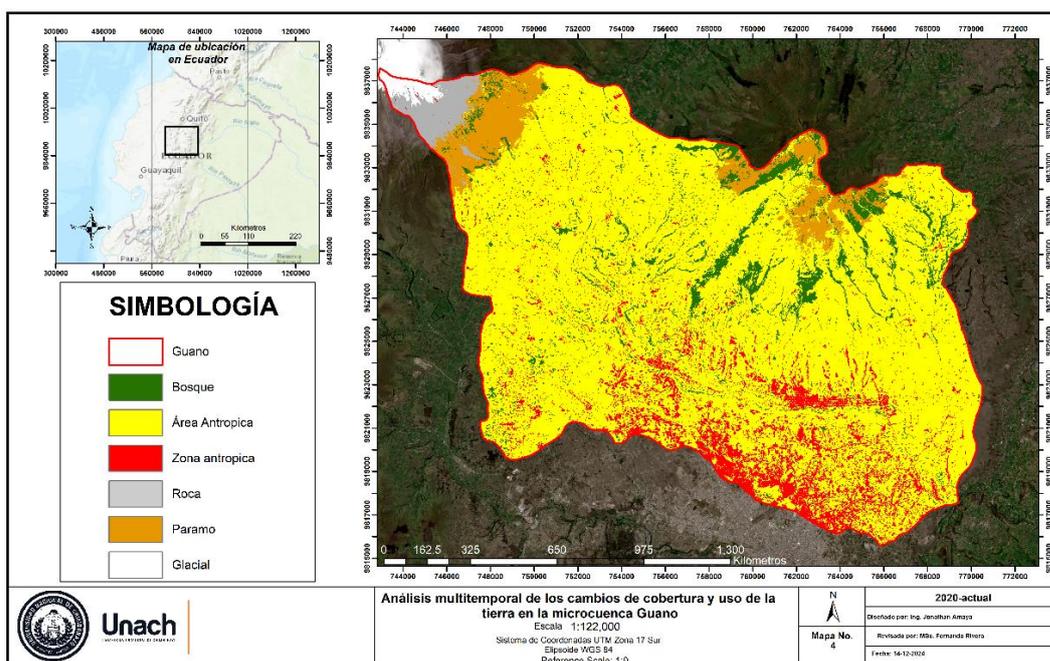


Tabla 9 Matriz de confusión periodo 2020

Clases	Bosque Nativo	Tierra agropecuaria	Área antrópica	Otras tierras	Páramo	Glaciar	Total	Error de Comisión
Bosque Nativo	95	3	0	0	2	0	100	5
Tierra agropecuaria	1	99	0	0	0	0	100	1
Área antrópica	0	1	99	0	0	0	100	1
Otras tierras	0	0	0	20	0	0	20	0
Páramo	0	0	0	1	19	0	20	1
Glaciar	0	0	0	0	0	20	20	0
Total	90	104	100	20	26	20	340	
Error de Omisión	1	4	0	1	2	0		

Fuente: Autor

Tabla 10 Índice kappa periodo 2020

Clases	Error de Comisión	Error de Omisión	Precisión global (PO)	Precisión global (%)	índice k	índice k (%)
Bosque Nativo	5	1				
Tierra agropecuaria	1	1				
Área antrópica	1	0	0,977	98%	0,97	97%
Otras tierras	0	1				
Páramo	1	2				

Glaciar 0 0

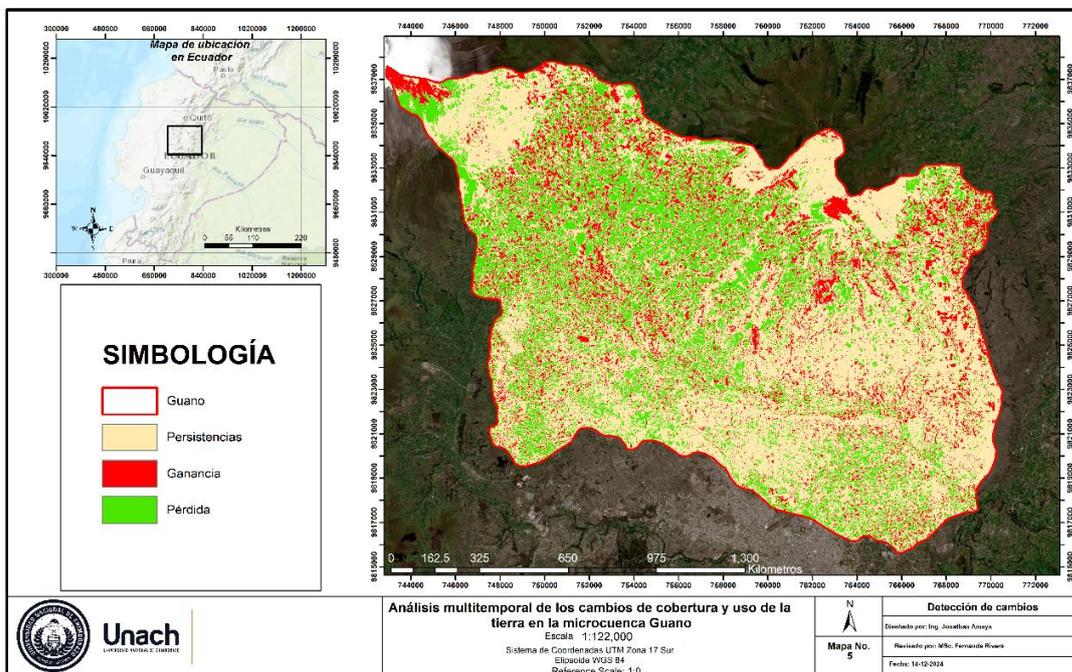
Fuente: Autor

La Tabla 10 muestra la precisión global de la clasificación en la cuenca del río Guano en el periodo 2020, con un valor de 98% y un índice Kappa de 97% que representa una muy buena concordancia. La clase Glaciar no muestra errores de comisión y omisión, mientras que las clases Tierra agropecuaria y bosque nativo muestran errores de comisión y omisión de al menos 1%. Así como las clases Bosque y Otras tierras tienen de igual forma 1% en error de comisión y omisión. Esto quiere decir que las clases con mayor porcentaje de confusión son tierra agropecuaria con área antrópica, eso se da debido al satélite y la reflectancia que puede tener una clase de otra.

4.1.3 Detección de cambios

4.1.3.1 Detección de cambios de la microcuenca del río Guano

Figura 7 Mapa de detección de cambios de la microcuenca del río Guano



Fuente: Autor

En la figura 7 se visualizan tres categorías que representan la clasificación de detección de cambios, las cuales son: Persistencia, Pérdida y Ganancia. Para la obtención de este mapa se realizó el análisis de dos distintos periodos decenales (2000 y 2020), en los que se puede observar que hasta el año 2020 presenta mayor terreno perdido con respecto al ganado, esto respecto a las áreas verdes que existan en la zona, es por ello por lo que el terreno perdido se centra en las clases de Área antrópica y Tierra agrícola. La clase Ganancia se presenta en ambas categorías, pero mínimamente. La clase Persistencia es la que más predomina, seguida de la clase Perdida.

4.1.4 Velocidad de cambios

4.1.4.1 Velocidad de cambios de la microcuenca del río Guano

En la Tabla 11 muestra que el año 2000 – 2020, el 75,62% del área de la microcuenca del río Guano destinada a tierras agropecuarias (2499129 píxeles). Le sigue la categoría área antrópica con 2499129 píxeles, con el 8,02%. Por otro lado, la categoría Bosque nativo cuenta con 237654 píxeles, que constituye el 7,19% del territorio, la categoría de páramo cuenta con un porcentaje de 7,07%, finalmente las categorías glaciales y otras tierras, que comprenden las clases con menor presencia solo 9800 y 59625 Píxeles, que representa apenas el 0,30% y 1,80% respectivamente del territorio de la microcuenca del río Guano durante este período.

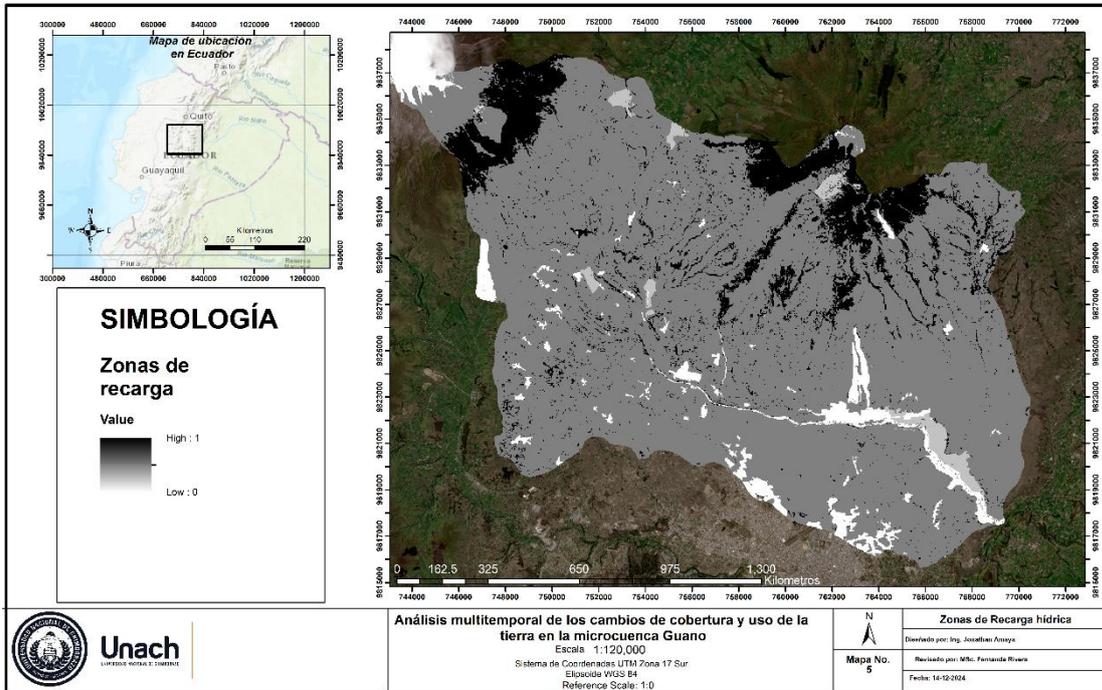
Tabla 11 Conteo de píxeles de la microcuenca del río Guano

Periodo	Conteo de píxeles	Porcentaje
Bosque Nativo	237654	7,19%
Tierra agropecuaria	2499129	75,62%
Área antrópica	264922	8,02%
Otras tierras	59625	1,80%
Páramo	233683	7,07%
Glaciar	9800	0,30%
Total	3304813	100%

Fuente: Autor

4.1.5 Áreas de Protección Hídrica

Figura 8 Área de protección hídrica



Como se puede observar en la figura 8 las zonas de recarga hídrica que tiene mayor presencia es el páramo de la parte alta, la escala de grises demuestra como la decoloración delimita las zonas con mayor o menos probabilidad de protección hídrica.

4.2 Discusión de los Resultados

4.2.1 Caracterización Geomorfológica e Hidrológica

La microcuenca del río Guano muestra una topografía compleja, caracterizada por montañas, colinas y valles, con una altitud que varía entre los 2500 y 4000 m.s.n.m. Estos atributos geomorfológicos influyen directamente en los patrones de escorrentía e infiltración, con mayores tasas de escorrentía observadas en áreas de pendiente pronunciada y menor cobertura vegetal. La clasificación del uso del suelo revela que el 75,62% del

territorio está destinado a tierras agropecuarias, lo que incrementa la susceptibilidad a la erosión y modifica los flujos hídricos naturales.

4.2.2 Estudio Multitemporal de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo

El análisis multitemporal (2000-2020) reveló una reducción de las áreas de bosque nativo y páramo, contrarrestada por un crecimiento en las áreas agrícolas y urbanas. Esta tendencia resalta el impacto de las actividades humanas sobre la cobertura vegetal, con repercusiones en la capacidad de retención de agua de la microcuenca. La pérdida de páramo, que representa un 7,07% del área total, afecta negativamente la recarga hídrica y los flujos sostenibles de la microcuenca.

4.2.3 Determinación de Áreas de Protección Hídrica

Se identificaron las áreas prioritarias para la protección hídrica en el páramo y las zonas boscosas, esenciales para la recarga de acuíferos y la reducción de la escorrentía superficial generada por las actividades agrícolas. A través del uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la metodología Random Forest, se logró una identificación precisa de estas zonas estratégicas del agua.

Los resultados obtenidos coinciden con los de Gómez et al. (2022), quienes, al aplicar técnicas SIG en la cuenca alta del río Pastaza, identificaron zonas de recarga hídrica similares, destacando el papel crucial de la cobertura vegetal en la regulación de los caudales y la reducción de la erosión. De manera similar, López y Ramírez (2021) utilizaron el método Random Forest en microcuencas del páramo andino y reportaron una alta precisión en la delimitación de áreas críticas para la conservación hídrica, lo que respalda la efectividad del enfoque utilizado en este estudio.

Por otro lado, Martínez et al. (2020) demostraron que las áreas boscosas, particularmente aquellas con coberturas nativas bien conservadas, son fundamentales en la disminución de

la escorrentía superficial, coincidiendo con las zonas prioritarias identificadas en esta investigación. Estas coincidencias con estudios previos no solo validan la metodología empleada, sino que también refuerzan la necesidad de implementar acciones de manejo sostenible en las áreas identificadas para garantizar la conservación de los servicios ecosistémicos proporcionados por los páramos y los bosques.

Conclusiones

- El análisis geomorfológico e hidrológico de la microcuenca del río Guano permitió identificar áreas clave para la conservación hídrica. La caracterización del terreno, apoyada en herramientas SIG y modelación hidrológica, reveló que las zonas con mayor pendiente y cobertura de páramo poseen una alta capacidad de recarga hídrica. Estas áreas son cruciales para la regulación del ciclo hidrológico y deben ser consideradas prioritarias en la gestión de recursos hídricos.
- El análisis multitemporal de la cobertura vegetal y el uso del suelo mostró cambios significativos en el paisaje de la microcuenca, principalmente impulsadas por las actividades agrícolas y urbanización. Estos cambios han provocado una disminución de la cobertura nativa, lo que ha aumentado la escorrentía superficial y reducido la capacidad de infiltración. Los resultados destacan la necesidad de conservar y restaurar la vegetación nativa para asegurar la sostenibilidad hídrica a mediano y largo plazo.
- La identificación de áreas de protección hídrica se fundamentó en un enfoque metodológico integral que combinó análisis geomorfológicos, teledetección y criterios hidrológicos. Este enfoque permitió identificar zonas prioritarias que, además de contribuir a la recarga hídrica, son esenciales para la preservación de los servicios ecosistémicos clave de la microcuenca. Estas áreas prioritarias constituyen una base sólida para el desarrollo de políticas públicas enfocadas en la conservación y la gestión sostenible de los recursos hídricos.
- Este estudio proporciona un marco metodológico replicable para identificar áreas de protección hídrica en ecosistemas similares. Los resultados resaltan la importancia de implementar estrategias de conservación integrales, que incluyan la reforestación con especies nativas y el monitoreo continuo de los cambios en el uso del suelo, con el fin

de mitigar los impactos de las actividades humanas y garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Guano.

Recomendaciones

- Se recomienda implementar un sistema integral de monitoreo hidrológico en la microcuenca del río Guano, que incluya la instalación de estaciones meteorológicas y sensores hidrológicos para recopilar datos en tiempo real sobre precipitación, caudales y calidad del agua. Este sistema no solo fortalecerá la base de datos existente, sino que también permitirá una evaluación continua de los impactos del cambio climático y las actividades humanas sobre la dinámica hídrica.
- Desde una perspectiva de gestión territorial, es fundamental desarrollar políticas públicas que promuevan la conservación de las áreas de recarga hídrica identificadas. Estas políticas deben contemplar mecanismos como el pago por servicios ambientales y la creación de reservas naturales para garantizar la protección de los servicios ecosistémicos vinculados al agua. Además, la integración de las comunidades locales en estos procesos, mediante programas de capacitación y sensibilización, garantizará la sostenibilidad de las medidas implementadas.
- Finalmente, se recomienda aplicar la metodología utilizada en este estudio en otras microcuencas con características similares. Esto facilitará la validación y optimización de las estrategias desarrolladas, mejorando su aplicabilidad en diversos contextos y promoviendo un manejo integral de los recursos hídricos en ecosistemas vulnerables como los páramos.

Referencias Bibliográficas

- Arispe, C., Yangali, J., Gerrero, M., Lozada, O., Acuña, L., & Arellano, C. (2020). *La Investigación Científica: Una aproximación para los estudios de posgrado*.
<https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4310/1/LA%20INVESTIGACION%20CIENCIA.pdf>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. www.lexis.com.ec
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2021). CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR. En *Registro Oficial* (Vol. 449, Número 20). www.lexis.com.ec
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2023). *Ley Orgánica de los Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*.
- Cabrera, L. J. (2018). *Determinación de la vulnerabilidad hídrica del río Guano de la provincia de Chimborazo, en cantidad y calidad y su disponibilidad frente al cambio climático*.
- Cahuana, A., & Yugar, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233*. Universidad Mayor de San Simón.
- Cardona, B. L. (2016). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*.
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/>
- Cevallos, C. F. (2015). *Caracterización de la calidad hídrica de la microcuenca del río Guano*.
- Consejo Nacional de Planificación. (2021). *Plan Nacional de Desarrollo 2021-2025*.
<https://iste.edu.ec/wp-content/uploads/2022/08/PLAN-NACIONAL-DE-DESARROLLO-2021-2025.pdf>
- Coronel, R. M. (2022). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y uso del suelo en el área de influencia de la carretera Gualaceo- Plan de milagro en el periodo 2013-2020 para la*

definición de zonas prioritarias de restauración ecológica [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24029/1/UPS-CT010274.pdf>

Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2003). *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*. Naciones Unidas, CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura.

FAO. (2014). *Experiencias de Manejo y Gestión de Cuencas en el Ecuador: Indicadores para una evaluación rápida*. www.fao.org/publications

García, C. L., & Hachi, M. X. (2022). Análisis multitemporal de la dinámica de uso de suelo y cobertura vegetal en la microcuenca del Río Illangama. *Revista de Investigación Talentos*, 9(2), 101-116. <https://doi.org/10.33789/talentos.9.2.173>

García, M. (2023). *Manual ArcGis10.3*. https://www.researchgate.net/publication/373482820_Manual_ArcGis_103

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodriguez, L. C., ten Brink, P., & van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>

INEN. (2022). *Anuario Estadístico de Recursos Hídricos en Ecuador*.

ISO. (2014). *Environmental management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines*.

<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/43263/98b5af59d9574880a6d97da0aeb30940/ISO-14046-2014.pdf>

- Maderey, L., & Jiménez, A. (2001). *Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México*. 45, 3-8.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2021). *Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo*. https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2021/08/LOOTUGS-Correspondencias-Juridicas_oficial_8M.pdf
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2015). *Estrategia Nacional de Biodiversidad 2015-2030*. <http://maetransparente.ambiente.gob.ec/documentacion/WebAPs/Estrategia%20Nacional%20de%20Biodiversidad%202015-2030%20-%20CALIDAD%20WEB.pdf>
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2023). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Ecuador 2023-2027*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/02/PNA_Plan-Nacional-de-Adaptacion_2023_2027.pdf
- Montesdeoca, A., Aguirre, P., Rosales, O., & Cabrera, S. (2021). *Protección de las Fuentes de Agua en la Microcuenca del río Escudillas*.
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- Singh, A. (1989). Review Article: Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989-1003. <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>
- UNESCO. (2006). *Evaluación de los recursos hídricos: Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas*. <http://www.unesco.org.uy/phi>
- Uquillas, J. V. (2023). *Caracterización de la microcuenca San Sebastián, afluente del río Guano, del cantón Guano, provincia de Chimborazo*.

- Urrutia, M. A. (2016). *Aplicación del modelo SWAT para la simulación del ciclo hidrológico de la cuenca alta del río San Juan bajo la influencia de la actividad minera*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., & Ortíz, L. (2019). *Cuencas Hidrográficas*.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas.pdf>
- Volonté, A., Gil, V., & Campo, M. (2018). Estudio de la vegetación y sus efectos en la dinámica fluvial en cuencas serranas, Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 59, 366-380.
- Zambrano, L. (2016). *Estudio multitemporal de la cobertura vegetal y uso de suelo de la reserva de producción de fauna Chimborazo*.