



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:

“Determinación de los estados de degradación y sus consecuencias: caso de estudio microcuenca altoandina (Hualcanga) en el páramo del Cerro Igualata, provincia de Tungurahua”

AUTOR:

Ing. Kiara Elena Castro Franco

TUTOR:

Ing. Carla Fernanda Silva Padilla, Mes.

Riobamba – Ecuador

2024

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: “**Determinación de los estados de degradación y sus consecuencias: caso de estudio microcuenca Altoandina (Hualcanga) en el Páramo del Cerro Igualata, Provincia de Tungurahua**”, ha sido elaborado por la **Ingeniera Kiara Elena Castro Franco**, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta anti plagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 05 de marzo, de 2025

Ing. Carla Fernanda Silva Padilla, Mes.

TUTOR

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Kiara Elena Castro Franco**, con número único de identificación **0850040700**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: **“Determinación de los estados de degradación y sus consecuencias: caso de estudio microcuenca Altoandina (Hualcanga) en el Páramo del Cerro Igualata, Provincia de Tungurahua”** 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, 05 de marzo de 2025

Ing. Kiara Elena Castro Franco

N.U.I. 085004070-0

Agradecimiento

Agradezco a Dios por guiar mis pasos, por darme la fuerza y la sabiduría necesarias para alcanzar esta meta, y por permitirme compartir mi vida con las personas que más amo.

A mis padres y hermanos, por ser mi mayor inspiración y apoyo incondicional. Su confianza en mí, sus palabras de aliento y su amor han sido el motor que me impulsó a seguir adelante, incluso en los difíciles momentos. Gracias por acompañarme en cada etapa de este camino y por recordarme siempre el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis pequeños sobrinos, que con su ternura y dulces palabras me regalaron alegría en los días de estudio, llenando mi corazón de amor sincero e inocente.

Este logro no es solo mío, sino de cada uno de ustedes, gracias por ser mi familia, mi refugio y mi mayor bendición. Con amor y gratitud...

Kiara Elena Castro Franco

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi querido y gran amor BAAT porque sin ti este logro no habría sido posible, gracias por ser mi apoyo, por estar siempre a mi lado en cada desafío, por sostenerme en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada pequeño avance. Tu PACIENCIA, amor y dedicación fueron mi mayor fortaleza en este camino, no solo me ayudaste en todo, sino que me recordaste todos los días que no estaba sola y que juntos podíamos lograrlo todo.

A mi pequeño bebé, aunque aún no has llegado a este mundo, ya has sido mi mayor inspiración; cada esfuerzo, cada desvelo y cada paso que di para alcanzar esta meta fue con la ilusión de ofrecerte lo mejor.

Finalmente, pero con igual amor, dedico este logro a mis padres por su amor incondicional, su apoyo en cada paso y sus sacrificios, que han sido la base de mi crecimiento y la inspiración para alcanzar esta meta.

Kiara Elena Castro Franco

Índice General

Certificación del Tutor	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	iii
Agradecimiento.....	iv
Dedicatoria	iv
Índice General.....	v
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
Resumen	1
Abstract	2
Introducción.....	3
Capítulo 1 Generalidades.....	4
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Justificación de la Investigación.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica	6
2.1 Antecedentes Investigativos	6
2.2 Fundamentación Teórica	7
2.2.1 Cuenca hidrográfica.....	7
2.2.2 Microcuenca	7
2.2.3 Servicios ecosistémicos	7
2.2.4 Degradación de cuencas hidrográficas	7
2.2.5 Degradación del suelo	8
2.2.6 Cambios de uso de suelo	8
2.2.7 Suelo del páramo	8

2.2.8	Indicadores de degradación de suelo	8
2.2.9	Tipos de degradación.....	9
2.2.10	Restauración ecológica.....	10
Capítulo 3 Diseño Metodológico.....		11
3.1	Metodología de la investigación.....	11
3.1.1	Enfoque de la Investigación	11
3.1.2	Diseño de la Investigación.....	11
3.2	Área de estudio	11
3.3	Variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la zona alta de la microcuenca Hualcanga.....	12
3.3.1	Obtención y corrección de imágenes satelitales	12
3.3.2	Corrección error de bandeamiento	13
3.3.3	Corrección radiométrica y atmosférica.....	13
3.3.4	Clasificación supervisada	13
3.3.5	Confiabilidad de la clasificación	13
3.4	Zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación mediante el modelo USLE	14
3.4.1	Factor de erosividad de la lluvia (R)	14
3.4.2	Factor de longitud y pendiente de la ladera (LS).....	16
3.4.3	Factor cobertura y manejo del suelo (C)	17
3.4.4	Factor prácticas de conservación (P).....	18
3.4.5	Factor de erosionabilidad del suelo (K).....	18
3.4.6	Factor de pérdida de suelo (A)	23
3.5	Causas y consecuencias de los procesos de degradación para promover medidas de recuperación.....	23
Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados		25
4.1	Análisis Descriptivo de los Resultados	25

4.1.1	Variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la zona alta de la microcuenca Hualcanga	25
4.1.2	Zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación mediante el modelo USLE	33
4.1.3	Causas y consecuencias de los procesos de degradación para promover medidas de recuperación	43
4.2	Discusión de los Resultados	49
4.2.1	Variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la zona alta de la microcuenca Hualcanga	49
4.2.2	Zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación mediante el modelo USLE	51
4.2.3	Causas y las consecuencias de los procesos de degradación para promover medidas de recuperación.....	53
	Conclusiones.....	55
	Recomendaciones.....	56
	Referencias Bibliográficas	57
	Apéndice	65
	Apéndice A. Fase de recolección de muestras y laboratorio.....	65
	Apéndice B. Permeabilidad y orden K.....	65
	Apéndice C. Resultados de la fase de laboratorio	66

Índice de Tablas

Tabla 1.	<i>Estaciones meteorológicas</i>	15
Tabla 2.	<i>Clasificación del Índice de Fournier Modificado (IFM)</i>	16
Tabla 3.	<i>Clasificación del Factor LS.....</i>	17
Tabla 4.	<i>Valores de cobertura y uso de suelo.....</i>	18
Tabla 5.	<i>Clasificación de tipos de estructura del suelo.....</i>	20
Tabla 6.	<i>Niveles erosivos según las pérdidas de suelos</i>	23

Tabla 7. <i>Matriz de confusión año 2004</i>	28
Tabla 8. <i>Matriz de confusión año 2014</i>	29
Tabla 9. <i>Matriz de confusión año 2024</i>	29
Tabla 10. <i>Índice Kappa para los años 2004 – 2014 – 2024</i>	30
Tabla 11. <i>Uso y cobertura de suelo en la parte alta de la microcuenca Hualcanga</i>	31
Tabla 12. <i>Precipitación periodo 2004 - 2022</i>	33
Tabla 13. <i>Clasificación de la Pendiente en función a la probabilidad de erosión</i>	36
Tabla 14. <i>Factor LS en la microcuenca Hualcanga</i>	37
Tabla 15. <i>Resultados del factor K</i>	40
Tabla 16. <i>Resultante del factor A</i>	41
Tabla 17. <i>Causas y consecuencias de la degradación de la zona alta de la microcuenca Hualcanga</i>	43
Tabla 18. <i>Estrategia de restauración ambiental 1</i>	45
Tabla 19. <i>Estrategia de restauración ambiental 2</i>	46
Tabla 20. <i>Estrategia de restauración ambiental 3</i>	47
Tabla 21. <i>Estrategia de restauración ambiental 4</i>	48
Tabla 22. <i>Anexo fotográfico de la fase de laboratorio</i>	65
Tabla 23. <i>Datos para obtener la permeabilidad y orden K para la figura 4 y 5</i>	65
Tabla 24. <i>Datos de las muestras de suelo obtenidas en el laboratorio</i>	66

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Mapa de ubicación de la microcuenca Hualcanga</i>	12
Figura 2. <i>Proceso de recolección de muestra</i>	19
Figura 3. <i>Tipos de estructura del suelo y su formación</i>	21
Figura 4 <i>Triángulo textural para permeabilidad</i>	21
Figura 5. <i>Nomograma para el cálculo del factor de erosionabilidad del suelo (K)</i>	22

Figura 6. <i>Pasos para la identificación de causa/consecuencias</i>	24
Figura 7. <i>Uso y cobertura de suelo en el área de estudio</i>	25
Figura 8. <i>Puntos de control del año 2004 y 2014</i>	26
Figura 9. <i>Puntos de control del año 2024</i>	27
Figura 10. <i>Uso y cobertura de suelo en la zona alta de la microcuenca Hualcanga</i>	32
Figura 11. <i>Factor de erosividad de la lluvia (R)</i>	34
Figura 12. <i>Longitud de pendiente (L)</i>	35
Figura 13. <i>Pendiente (S)</i>	36
Figura 14. <i>Factor de erosividad topográfica (LS)</i>	37
Figura 15. <i>Factor de cobertura y uso de suelo (C) con la clasificación.</i>	38
Figura 16. <i>Factor de prácticas de conservación (P)</i>	39
Figura 17. <i>Factor de erosionabilidad del suelo (K)</i>	41
Figura 18. <i>Erosión actual en la zona alta de la microcuenca Hualcanga (A)</i>	42

Resumen

La investigación tiene como objetivo determinar los estados de degradación y sus consecuencias en la microcuenca Altoandina Hualcanga en el páramo del Cerro Igualata, provincia de Tungurahua. Como primer paso, se estableció una comparación de variaciones temporales de cobertura vegetal (páramo, plantación forestal y zona agropecuaria) en la zona alta de la microcuenca a partir de la interpretación de imágenes satelitales para observar la transformación del ecosistema en la zona de estudio. Las imágenes utilizadas fueron Landsat 7, Landsat 8 y Sentinel 2 para los años 2004, 2014 y 2024, para su posterior corrección de error de bandas y clasificación supervisada. Luego, con las variaciones identificadas para el año 2024 se estableció la zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación, donde se determinó el nivel de degradación que sufre la zona de estudio de la microcuenca, mediante la utilización del modelo USLE, el cual incluyó factores como precipitación, suelo, topografía, cobertura vegetal y prácticas de conservación. Por último, los resultados de esta investigación demostraron que la zona de estudio presentó un nivel de degradación de grado medio por lo que se identificó las causas y consecuencias de esta problemática, y para evitar que esta degradación pase a un grado alto se propusieron medidas de recuperación y restauración ambiental incluyendo la educación ambiental, proyectos para fomentar la agricultura y ganadería sostenible, reforestación y conservación de especies nativas y la limitación de actividades antrópicas en zonas vulnerables y de protección.

Palabras claves: *degradación, erosión del suelo, erosión hídrica, modelo USLE, restauración ambiental y ecológica.*


Abstract

The current research aims to assess the degradation status and its consequences in the Altoandina Hualcanga micro-catchment, located in the mountain páramo of the Cerro Iguualata, Tungurahua Province. The first research stage involved analyzing temporal changes in vegetation cover (páramo, forest plantations, and agricultural zones) in the upper part of the micro-catchment by interpreting satellite images to observe ecosystem transformations. Satellite images from Landsat 7, Landsat 8, and Sentinel 2, corresponding to 2004, 2014, and 2024, were processed to correct for band errors and undergo supervised classification. Based on the 2024 data, a zoning map was developed to assess the magnitude, susceptibility, and severity of desertification, with degradation levels determined using the Universal Soil Loss Equation (USLE) model. The model incorporated factors such as precipitation, soil type, topography, vegetation cover, and conservation practices. The results indicated that the study area is experiencing moderate degradation. To address this issue, the study identified its causes and consequences and proposed preventive measures to avoid further degradation. These measures include environmental education, promoting sustainable agricultural and livestock practices, reforestation, conserving native species, and restricting human activities in vulnerable and protected areas.

Keywords: *degradation, soil erosion, water erosion, USLE model, environmental and ecological restoration.*

Reviewed by

ADRIANA
XIMENA
CUNDAR
RUANO



Firmado
digitalmente por
ADRIANA XIMENA
CUNDAR RUANO
Fecha: 2025.03.02
23:55:50 -05'00'

MsC. Adriana Ximena Cundar Ruano

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 1709268534

Introducción

La degradación de una cuenca hidrográfica es un fenómeno mundial que en su mayoría es causado por actividades antrópicas. En las cuencas hidrográficas existen diferentes usos de suelo lo cual influye de forma directa en contribuir o potenciar su degradación por los cambios que sufre el sistema natural (Montero, 2023; Moreira et al., 2020).

La mala gestión en la ocupación del territorio acelera el deterioro en la estructura natural del suelo de una cuenca generando su degradación (Ferrer et al., 2024). La pérdida de la cubierta vegetal, ocasiona disminución en las aportaciones hídricas, provocando consecuencias negativas a corto y largo en la disponibilidad de los recursos hídricos en cualquier época del año (Álvarez et al., 2020; Campbell et al., 2022).

En la zona andina del Ecuador, uno de los problemas más relevantes en las cuencas altas tropicales es la degradación del suelo por diferentes actividades antrópicas (Pinargote et al., 2021). Las prácticas agrícolas, el sobrepastoreo y las plantaciones forestales en estas áreas tienen efectos negativos, lo que lleva a una disminución de la calidad del recurso hídrico, el suelo y su capacidad de proveer servicios ecosistémicos (Acevedo et al., 2021).

Para comprender los cambios que sufre el suelo, surge la necesidad de generar estrategias que proporcionen información sobre como ocurren los procesos de degradación en una cuenca hidrográfica en tiempo y espacio, las variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas partiendo de la interpretación de imágenes satelitales (Perez, Solarte, et al., 2018).

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

Las cuencas hidrográficas proporcionan servicios ecosistémicos, que se basan en la provisión de agua, regulación de caudal, control de erosión hídrica y su importancia se enfoca en su disponibilidad, calidad y aprovechamiento (Montero, 2023; Mosquera et al., 2023). Al mismo tiempo, los cambios en el uso de suelo, provocan una gran presión sobre las cuencas hidrográficas y posteriormente, una reducción en la capacidad de proveer estos servicios ecosistémicos (Arellano & Ruiz, 2018).

Es de gran relevancia mencionar que, los cambios en el uso del suelo y los fenómenos ambientales, suceden a distintas velocidades provocando una acelerada degradación en las cuencas hidrográficas y su comprensión se dificulta para realizar un correcto diagnóstico de los impactos ambientales ocurridos en el pasado y compararlos con los impactos ambientales del presente (Perez, Solarte, et al., 2018).

En muchos países latinoamericanos como Venezuela, Colombia, Ecuador y el norte de Perú, las necesidades de la población relacionadas con los cambios en la ocupación del suelo, se han realizado sin considerar los impactos y las consecuencias que conllevan (Novoa, 2017; Ochoa et al., 2016).

En la zona sierra centro del Ecuador, la cobertura de suelo de la parte alta de las cuencas hidrográficas correspondiente al páramo representan grandes extensiones de la superficie total de la cuenca y estos son sumamente importantes debido a que, permiten el almacenamiento, regulación y suministro de agua (Mosquera et al., 2023). La respuesta hidrológica de los páramos en las cuencas hidrográficas se relaciona con las condiciones del suelo (Díaz et al., 2019; Ochoa et al., 2016).

1.2 Justificación de la Investigación

En la actualidad, la degradación de los recursos afecta su cantidad y calidad, y compromete la capacidad de una cuenca hidrográfica para proveer servicios ecosistémicos hidrológicos (Arellano & Ruiz, 2018).

En Ecuador, se implementó la metodología LADA – WOCAT a nivel nacional, con excepción de las Islas Galápagos donde fue posible la “*Evaluación Nacional de la Degradación de la Tierra*”, para determinar cómo se distribuye la degradación del suelo en

todo el territorio ecuatoriano. Dentro de esta evaluación se tomó en cuenta las causas e impactos por los cambios en el uso del suelo, y se incluyen las actividades de conservación en progreso y la formulación de recomendaciones para frenar o revertir el proceso de degradación. (Segarra, 2017).

Para establecer una correcta evaluación de la progresiva degradación de los suelos, el uso de imágenes satelitales permite la comparación de estas variaciones, ya que mejoran la exactitud de predicciones al proporcionar información del pasado de forma regular y continua (Arias et al., 2024; Perez, Solarte, et al., 2018).

La investigación iniciará con el análisis de variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la parte alta de la microcuenca Hualcanga a través de la interpretación de imágenes satelitales en un periodo de diez años (2004 – 2014 - 2024). Por consiguiente, para la zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación, a través mapas temáticos de erosión hídrica, erodabilidad del suelo y potencial erosivo por cobertura del suelo se determinará los estados de degradación que sufre la microcuenca. Finalmente, para proponer técnicas de recuperación y conservación sobre la situación actual a través de la metodología LADA – WOCAT.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Determinar los estados de degradación y sus consecuencias en la microcuenca Altoandina Hualcanga en el páramo del Cerro Igualata, provincia de Tungurahua

1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer las variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la zona de páramo correspondiente a la microcuenca a partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos.
- Elaborar la zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación, mediante mapas de erosión hídrica, erodabilidad del suelo y potencial erosivo por cobertura del suelo, con la ayuda de sistema de información geográfica.
- Identificar y evaluar las causas y las consecuencias de los procesos de degradación para promover medidas de recuperación.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1 Antecedentes Investigativos

Investigaciones previas en Ecuador, como el estudio de (Valencia et al., 2014): a través de la comparación de dos años (2002 – 2013) entre la ocupación del suelo y la oferta natural de agua, demuestra que el incremento de zonas de cultivos de la parte alta de la microcuenca del río Blanco influye significativamente en la circulación de aguas en páramo y un moderado estrés hídrico en la mayor parte del cauce principal.

De acuerdo con (Arias et al., 2024) en su investigación menciona que: “La planificación del uso de suelo es una característica importante para la toma de decisiones. Para tener un análisis detallado de la realidad sobre la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador, se utilizaron imágenes satelitales, Landsat y Sentinel del año 1996, 2007 y 2018 para explorar el cambio en las coberturas y usos del suelo en la cuenca, y un posterior análisis de las causas y consecuencias que generan este cambio en el ecosistema”.

De acuerdo con (Perez, Segovia, et al., 2018), en su investigación “*Uso del suelo y su influencia en la presión y degradación de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas*” destaca: que las actividades antrópicas de cierta forma influyen en el ciclo hidrológico natural en las cuencas hidrográficas. Lo cual se confirma, partiendo desde la correlación entre la presión del uso de suelo y la degradación de los recursos hídricos, se concluyó que la cuenca del río Juqueri (en Brasil) presenta una necesidad urgente de planificación del uso y ocupación de suelos en el área de la cuenca.

Otro estudio relevante de esta línea de investigación es (Mosquera et al., 2023) sobre la “Hidrología de los páramos en el Ecuador” menciona: la importancia de los páramos para el desarrollo socioeconómico de las zonas urbanas y rurales de los ecuatorianos y se destaca, que la información existente sobre la hidrología de los páramos se encuentra dispersa, lo que limita su disponibilidad para mejorar el manejo y la gestión de los recursos hídricos del ecosistema.

A partir de la investigación de (Novoa, 2017) titulado como “Análisis de la degradación de los páramos debido a las actividades productivas en este ecosistema”: se enfocan en el análisis de la condición actual de los ecosistemas de páramo y qué medidas de mitigación se pueden implementar para evitar que estos ecosistemas se sigan viendo afectados por diferentes actividades productivas.

Por consiguiente, la presente investigación proporciona un análisis detallado del estado actual de la parte alta de la microcuenca Hualcanga, evaluando los estados de degradación y su relación con las propiedades del suelo, el estudio permitió una comprensión más profunda de la importancia hidrológica de este ecosistema y contribuirá a la formulación de estrategias más efectivas para su recuperación.

2.2 Fundamentación Teórica

2.2.1 Cuenca hidrográfica

Para (Vásquez et al., 2019) en su investigación define a una cuenca hidrográfica como: “un área cuyos aportes hídricos naturales son drenados por un curso de agua denominado precipitaciones, que dispone de una salida/desembocadura para que todo el caudal efluente sea descargado”.

2.2.2 Microcuenca

Según (Moreira et al., 2020): “Una microcuenca es toda área que desarrolla su drenaje hacia el curso del ramal principal de una subcuenca, y que el conjunto de una microcuenca pueden formar una subcuenca y se considera una microcuenca al espacio geográfico que conforma un área de 10 a 500 km²”.

2.2.3 Servicios ecosistémicos

Para (Arellano & Ruiz, 2018), las cuencas hidrográficas ofrecen servicios ecosistémicos de regulación de flujos de agua y control de erosión hídrica, así como los de provisión de agua, recarga las fuentes de agua subterránea y superficial. Mientras que, para (Díaz et al., 2019) :“La generación y regulación del caudal son dos de los servicios ecosistémicos más cruciales que ofrece el páramo como parte de una cuenca hidrográfica”.

Para (Mosquera et al., 2023): “El páramo tiene una notable capacidad para regulación hídrica gracias a su ubicación geográfica, así como a sus características físicas e hidrometeorológicas”.

2.2.4 Degradación de cuencas hidrográficas

Para (Damian et al., 2018) la degradación de una cuenca hidrográfica, provoca que los servicios ecosistémicos como proveedora y reguladora de servicios hídricos sean amenazados. Por otro lado, en su investigación, (Perez, Segovia, et al., 2018) describe: “La degradación de los recursos hídricos como el deterioro de la calidad y cantidad del recurso hídrico por la fuerte presión ambiental de los procesos degradantes de ocupación antrópica,

provoca la disminuciones de cuerpos de aguas y áreas forestales así como la pérdida de flora y fauna”.

2.2.5 Degradación del suelo

Para (Montero, 2023): “La degradación del suelo es cualquier modificación que cause cambios que deterioran su salud, disminuyendo su habilidad para generar recursos, afectando su productividad, capacidad para mejorar la calidad del aire y agua, y servicios esenciales para las personas que dependen de él”.

2.2.6 Cambios de uso de suelo

Para (Trespalacio & Anastacio, 2023): “los cambios en el uso del suelo ocurridos en una cuenca hidrográfica afectan la escorrentía superficial ya que altera la interceptación, la infiltración y la evapotranspiración”. Para (Montatixe & Eche, 2021) en su investigación: “Los cambios en la ocupación del uso de suelo y en las actividades antrópicas con fines económicas afectan de manera directa las dinámicas hídricas, demostrando variaciones importantes, con el estrés hídrico”.

2.2.7 Suelo del páramo

De acuerdo con (Díaz et al., 2019): “El clima frío y húmedo, junto con la baja presión atmosférica, favorece la acumulación de materia orgánica en el suelo. Los suelos de páramos se caracterizan por ser húmedos y ácidos, además son ricos en humus descompuesto y de color marrón oscuro o negro. En el páramo por las bajas temperaturas y alta humedad, la descomposición de la materia orgánica mantiene tasas bajas y la textura es típicamente porosas relacionados con altos valores de conductividad”.

2.2.8 Indicadores de degradación de suelo

2.2.8.1 Indicadores físicos

Para (Sarmiento et al., 2018): “los indicadores físicos están relacionados con las propiedades físicas del suelo con el uso eficiente del agua, los nutrientes y el uso de agroquímicos, y son cruciales para evaluar su calidad. Además, menciona que la densidad aparente, textura, estabilidad de agregados y conductividad hidráulica son los indicadores físicos más utilizados”.

2.2.8.2 Indicadores biológicos

De acuerdo con (Nuñez et al., 2023), el carbono orgánico es el indicador biológico más utilizado, ya que con este indicador biológico los organismos demuestran que con su presencia o abundancia, reflejan cambios o estados de ciertas propiedades o procesos del suelo.

2.2.8.3 Indicadores químicos

Según Acevedo et al., (2021): “Los indicadores químicos se refieren a las condiciones químicas que influyen en la interacción del suelo con las plantas, la calidad y disponibilidad del agua, la capacidad de retención del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas y microorganismos”.

2.2.9 Tipos de degradación

2.2.9.1 Pérdida de fertilidad del suelo.

En la investigación de (Montatixe & Eche, 2021; Pinargote et al., 2021): “La pérdida de fertilidad es cuando el suelo pierde su capacidad productiva debido a diversos procesos que deterioran y alteran su composición química, física y biológica”.

Además, en la investigación de los autores (Estrada et al., 2017), mencionan que la deforestación con remoción de vegetación y las actividades agrícolas provocan una disminución en la fertilidad del suelo y en la materia orgánica.

2.2.9.2 Erosión

Según (Delgado, 2020): “La erosión es la pérdida selectiva de las capas superficiales de los materiales del suelo por la acción del agua y/o el viento. Existe un tipo de erosión asociada a causas naturales o geológicas que es necesaria, puesto que actúa eliminando lentamente las capas superiores de los suelos y permite la incorporación de materiales nuevos al suelo”.

2.2.9.3 Erosión hídrica

De acuerdo con (Aguirre et al., 2023) en su estudios resalta que: “La erosión hídrica se presenta cuando hay degradación, por la exposición de los suelos a efectos climatológicos como la cantidad, intensidad y distribución de las precipitaciones cuando cae o se mueve. Además, comprende tres procesos como el desprendimiento de las partículas del suelo, transporte de los sedimento y deposición en sitios en depresión”.

2.2.9.4 Desertificación

Para Echavarría et al., (2020): “La desertificación no es más, que la degradación del suelo en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, a causa de variaciones climáticas y las actividades humanas”.

2.2.10 Restauración ecológica

Para Mazón et al., (2017): “La restauración ecológica es un proceso que consiste en ayudar al restablecimiento de un ecosistema que ha sufrido degradación, daño o destrucción. Además, busca facilitar el proceso natural de sucesión del ecosistema, permitiendo que la composición de especies y las interacciones dentro de la comunidad original se recuperen en un plazo relativamente corto”.

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Metodología de la investigación

3.1.1 Enfoque de la Investigación

El enfoque en primera instancia se determinó como cuantitativo a causa de que se medirán las variaciones a lo largo del tiempo del uso y cobertura del suelo en la zona alta correspondiente a la microcuenca Hualcanga. Además, se elaborará mapas temáticos según la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación. A partir de estos resultados se podrá identificar áreas prioritarias y establecer estrategias efectivas para la recuperación de este ecosistema. Posteriormente, el enfoque cualitativo al analizar de manera bibliográfica la metodología LADA-WOCAT, que servirá de base para el desarrollo de la presente investigación.

3.1.2 Diseño de la Investigación

3.1.2.1 Investigación descriptiva

La recolección de información acerca de las características de la zona, enfocándose en el estudio y análisis de las causas y consecuencias de la degradación en la parte alta de la microcuenca Hualcanga.

3.1.2.2 Investigación exploratoria

A pesar de que la falta de estudios sobre degradación en la zona, se llevó a cabo una investigación exploratoria para recopilar información y obtener resultados que brindan una comprensión del estado actual de la parte alta de la microcuenca Hualcanga.

3.1.2.3 Investigación correlacional

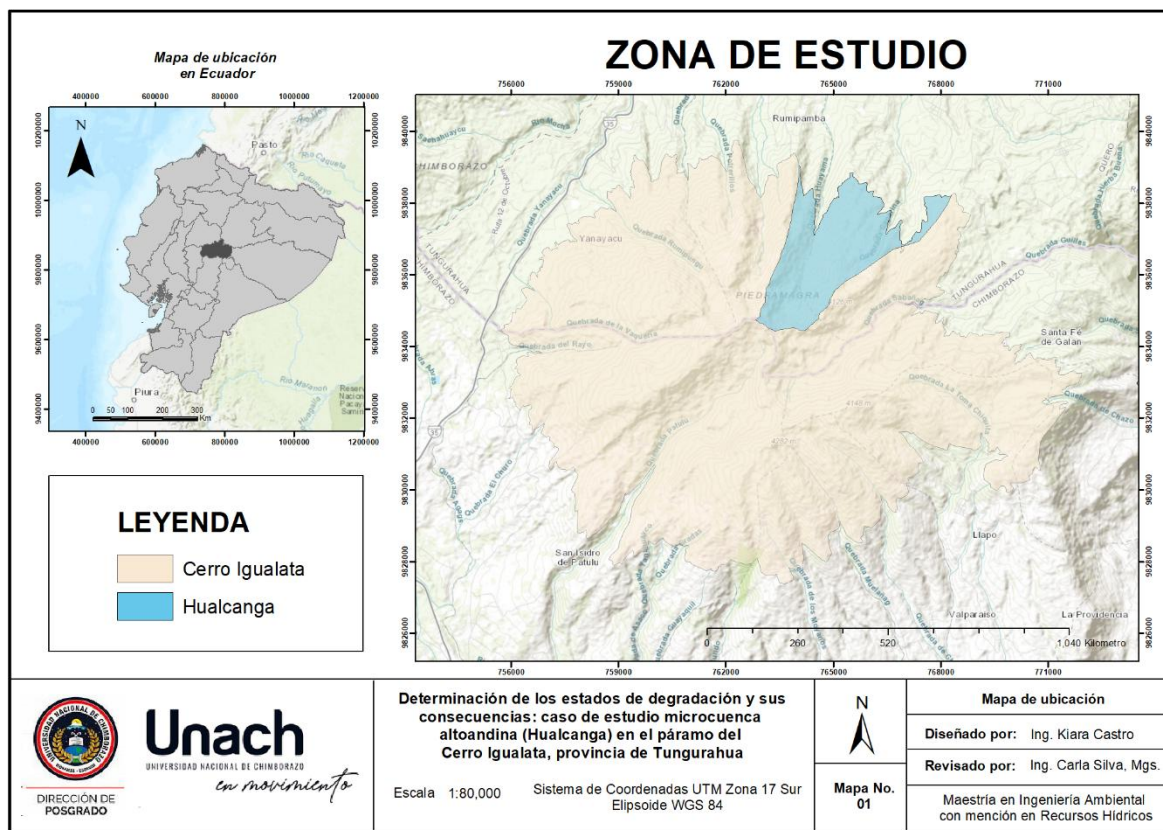
La información relativa sobre el uso y ocupación del suelo se obtuvo mediante fotointerpretación, a través de la comparación y contraste de imágenes satelitales y datos geoespaciales obtenidos en diferentes años, se recopila información de los cambios en el uso y cobertura de suelo de la cuenca para establecer diferencias significativas de la zona.

3.2 Área de estudio

El área de estudio de la presente investigación se centra en la parte alta de la microcuenca Hualcanga, que se ubica en el Cerro Igualata entre las provincias de Tungurahua y Chimborazo. Geográficamente, se ubica entre las coordenadas (X= 765247.454574; Y= 9836688.1062). Se extiende por los cantones Quero, Mocha y Guano. Su altitud varía desde los 3600 msnm hasta los 4400 msnm, y abarca un área total de 957.10 hectáreas.

Figura 1.

Mapa de ubicación de la microcuenca Hualcanga



Nota. El gráfico presenta la ubicación de la zona de estudio, específicamente de la parte alta de la microcuenca Hualcanga.

3.3 Variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la zona alta de la microcuenca Hualcanga

3.3.1 Obtención y corrección de imágenes satelitales

Las variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la parte alta de la microcuenca, se estableció a partir de la interpretación de imágenes satelitales. Para la obtención de las tres imágenes satelitales necesarias para esta investigación, se utilizó dos plataformas digitales: para obtener dos imágenes Landsat ETM +7 y Landsat OLI/TIRS 8 se utilizó la web del *Geological Survey of the United States* (USGS) y para una imagen Sentinel 2 se utilizó la web *Copernicus Services Data Hub* de la Agencia Espacial Europea (ESA). Luego, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el software ArcMap se realizarán diversos tratamientos para corregir las imágenes los cuales ayudarán a obtener una mejor calidad visual (Paz, 2018).

3.3.2 Corrección error de bandeamiento

A menudo, las imágenes de satélites están sometidas a errores relacionados por la captación de los sensores ocasionando la pérdida de líneas o píxeles (Palacios et al., 2018). Para la corrección del bandeado de la imagen, se utilizará una técnica de corrección llamada “*GAP FILL*” o “método de llenado de vacíos”, implementada en el software QGIS. Esta técnica aprovecha la triangulación para interpolar los datos faltantes, permitiendo rellenar las áreas sin información y corregir las distorsiones generadas por el sensor.

3.3.3 Corrección radiométrica y atmosférica

Las interferencias en los niveles digitales de las imágenes, son eliminadas mediante correcciones radiométricas, de modo que al compensar las diferencias en los valores de radiancia y al convertir los niveles digitales a valores de radiancia y reflectancia empleando modelos atmosféricos y las geometrías de iluminación y observación (Mendoza et al., 2021). Mediante la herramienta “*Radiometric Calibration*”, se obtendrán las imágenes corregidas con valores de radiancia espectral y reflectancia.

Posteriormente se utilizará la herramienta “*Fast Line-Of-Sight Atmospheric Analysis Of Hypercubes (Flaash)*”, la cual realiza la corrección atmosférica en base al algoritmo de transferencia de radiación (Palacios et al., 2018).

3.3.4 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada permite estimar de forma confiable la dinámica de cambio de las coberturas vegetales, para establecer los puntos de control e información sobre las coberturas del suelo, se llevará a cabo una salida de campo, como mecanismo de validación de los análisis visuales de las imágenes satelitales. Luego se evaluarán la diferentes categorías por cobertura de uso de suelo presentes en la zona de estudio y los puntos de control por cada categoría (Poveda et al., 2022). A través del método “*máxima verosimilitud*”, como primera fase se enfoca en la construcción de las coberturas del suelo en los diferentes periodos y como segunda se asigna a cada pixel una categoría que mayor probabilidad de pertenencia tenga de acuerdo a la información espectral (Damian et al., 2018).

3.3.5 Confiabilidad de la clasificación

Con el propósito de evaluar la precisión de la clasificación supervisada en cada categoría, se llevará a cabo cálculos con un nivel de confianza del 95% y un margen de error

del 5% de la muestra poblacional mínima estadísticamente representativa (López et al., 2017). Luego, para evaluar el rendimiento de la clasificación supervisada realizada y obtener el coeficiente Kappa, se generó una matriz de confusión que indica la confiabilidad y precisión general de la clasificación temática (Poveda et al., 2022).

El coeficiente de Kappa (K) se utilizó para evaluar la exactitud de una imagen clasificada, entre las clases asignadas por el método de clasificación supervisada y las clases reales que existen en el área de estudio (Damian et al., 2018; Tobar et al., 2023). Si el resultado obtenido es mayor a 0,75 significará que hay una concordancia total entre las capas comparadas (Tobar et al., 2023).

3.4 Zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación mediante el modelo USLE

Para la elaboración de la zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación, se planteó estudiar la erosión hídrica sobre la degradación del suelo en la parte alta de la microcuenca Hualcanga, utilizando el método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), en la cual se aplicó sistemas de información geográfica (SIG) para la obtención de resultados cuantitativos sobre el riesgo de degradación del suelo y la necesidad de medir o estimar la erosión hídrica.

El modelo USLE, incluye a los factores de precipitación, suelos, topografía, cobertura y prácticas de conservación (Olivares et al., 2015). Este método se describe mediante la ecuación (1):

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Fuente: (Pham et al., 2018; Prado et al., 2017).

Donde, A es la pérdida media anual de suelo (Ton / ha año), R es la erosividad de la lluvia (MJ mm / ha h año), K es el factor de erosionabilidad del suelo (Mg / ha MJ mm), LS es el factor topográfico (adimensional), C son los factores de gestión de cobertura y uso de suelo (adimensional) y P es el factor de prácticas de manejo de conservación (adimensional) (Pham et al., 2018; Prado et al., 2017).

3.4.1 Factor de erosividad de la lluvia (R)

Para la obtención de los datos pluviométricos, se seleccionó las estaciones cercanas al área de estudio, luego en la web de la NASA *Prediction Of Worldwide Energy Resources*

(POWER) y su herramienta *Data Access Viewer* (DAV), se obtuvo las precipitaciones mensuales y anuales de cada estación meteorológica.

Tabla 1.

Estaciones meteorológicas

ID	Nombre	X	Y
M128	Pedro Fermín Cevallos (colegio)	750189	9814502
M258	Querochaca (UTA)	769118	9821777
M377	Tisaleo	785773	9810627
M380	Huambalo	751899	9808792
M390	Urbina	751267	9843323
M1261	Ilapo	781551	9843021
M5107	Urbina - INER	761394	9808433
EC18RB	Riobamba - Chimborazo	753556	9843001
EC18TS	Tisaleo	753890	9811016
EC18BN	Baños	780740	9823897

Posteriormente se utilizó el Índice de Fournier Modificado (IFM), en la que se consideran las precipitaciones mensuales del año 2004 al 2022 para la influencia del clima en el suelo. Este índice se lo observa en la ecuación (2):

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} \quad (2)$$

Fuente: (J. Jaramillo, 2021; Ricardo et al., 2022).

Donde (Pi) representa la precipitación mensual (mm) y (Pt) es la precipitación total anual del área de estudio (mm).

Luego para la determinación del factor R a partir del IMF basado en la ecuación (3) validada para las condiciones pluviométricas de la zona de la lluvia:

$$R = \sum_i^{12} 38.4 * IFM + 28.3 \quad (3)$$

Fuente: (Calero et al., 2021).

Finalmente, para la elaboración del mapa temático del factor de erosividad R, se procedió a utilizar ArcMap, con la ayuda de las herramientas *spatial analyst 15olos* –

interpolation – spline y se procesó los datos obtenidos por el cálculo de las ecuaciones (2) y (3).

Tabla 2.

Clasificación del Índice de Fournier Modificado (IFM)

IFM	Agresividad climática
< 60	Muy Baja
60 – 90	Baja
90 – 120	Moderado
120 – 160	Alta
>160	Muy Alta

Nota. Adaptado de “Evaluación de modelos para estimar la erosividad de la lluvia en el Valle del Cauca, Colombia” (p. 202), por (Calero et al., 2021), *Acta Agronómica*, 70 (20).

3.4.2 Factor de longitud y pendiente de la ladera (LS)

El factor LS representó el efecto que genera la topografía en un suelo determinando su erosión. A medida que incrementa la longitud del terreno (L) la erosión aumenta en el sentido de la pendiente y la inclinación de la superficie (S) (Prado et al., 2017).

3.4.2.1 Factor L

La longitud de la pendiente (L) se determinó mediante la ecuación (4):

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - (A_{(i,j)})^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m} \quad (4)$$

Fuente: (Schürz et al., 2020; Zhang et al., 2017)

donde, L es la longitud de la pendiente, A es la acumulación del flujo nivel de píxel, D es el lado del píxel, x es el coeficiente de forma, que, para sistemas pixelados, x es igual a 1 y m es constante de la longitud de la pendiente, que se obtiene a partir de la expresión ecuación (5).

$$m = \frac{F}{(1 + F)} \quad (5)$$

Fuente: (Schürz et al., 2020; Zhang et al., 2017).

El factor F se obtuvo mediante la expresión en función de la pendiente a nivel de píxel (β) ecuación (6), con las herramientas del software ArcMap, a través de *Tin - Tin to*

ráster – Fill – Slope – ráster calculator para rellenar datos en espacios vacíos, determinar β y finalmente para establecer F.

$$F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{0.56 + 3(\sin \beta)^{0.8}} \quad (6)$$

Fuente: (Schürz et al., 2020; Zhang et al., 2017).

3.4.2.2 Factor S

La pendiente (S), reflejó la gradiente que se genera en una pendiente provocando la erosión. El factor S diferencian la relación entre la pérdida de suelo y la inclinación de la pendiente en radianes (s) con dos funciones. Una para pendientes con una inclinación menor al 9% y la otra mayor o igual al 9%:

$$S = 10.8 \sin \beta(i,j) + 0.03, \text{ cuando } \tan \beta(i,j) < 0.09$$

$$S = 16.8 \sin \beta(i,j) - 0.5, \text{ Cuando } \tan \beta(i,j) \geq 0.09$$

posteriormente, en ArcMap con la herramienta *raster calculator*, ocupando el dato de β en grados, se lo multiplicó por 0.01745 (Schürz et al., 2020).

3.4.2.3 Factor LS

Se obtuvo el factor LS, mediante *raster calculator* en ArcMap multiplicando las resultantes de L y S.

Tabla 3.

Clasificación del Factor LS

Factor LS	Categorización
< 15	Bajo
15 - 30	Moderado
30 - 45	Alto
> 45	Muy Alto

Nota. Adaptado de “Propuesta para el control y manejo de cárcavas en sectores rurales de la Provincia de Manabí” (p. 906), por (Zambrano & Cabrera, 2021), *Dominio de las Ciencias*, 7 (5).

3.4.3 Factor cobertura y manejo del suelo (C)

Durante la elaboración del primer objetivo, se seleccionó las categorías correspondientes a cada uso y cobertura de suelo en el área de estudio, las cuales se clasificaron en tres: plantación forestal (pf), páramo (pr) y zona agropecuaria (za).

Obtenido el uso de suelo para el año 2024 y conforme a los valores descritos para diferentes tipos de cobertura el factor C se distribuye según la tabla (3).

Tabla 4.

Valores de cobertura y uso de suelo

Cobertura de suelo	Factor C
Plantación Forestal	0.003
Páramo	0.04
Zona Agropecuaria	0.65

Fuente: (Arias et al., 2023; Ganasri & Ramesh, 2016; Lianes et al., 2009; Singh et al., 2023)

3.4.4 Factor prácticas de conservación (P)

De acuerdo con el “*Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia rural Rumipamba (PDOT)*”, el “*Plan de Forestación y Reforestación de la provincia de Tungurahua 2021-2041*” y el “*Fondo de Páramos Tungurahua y Lucha contra la Pobreza 2017*”, se determinó que la parte alta de la microcuenca Hualcanga del Páramo de Igualata a pesar de ser considerada como un área natural, no pertenecen a un Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), por lo que, presenta problemas de presión demográfica ya que el cantón Quero presenta un mayor número de población con respecto a otros cantones, es por ello que se asumió un valor de uno, debido a que no es posible el conocimiento de prácticas de control de la erosión ni de manejo en las actividades productivas que se realicen dentro del área de estudio (Pham et al., 2018; Prado et al., 2017).

3.4.5 Factor de erosionabilidad del suelo (K)

Para el desarrollo del factor de erosionabilidad del suelo (K), se realizaron tres fases para su obtención: fase de campo, fase de laboratorio y procesamiento de datos.

3.4.5.1 Fase de campo

- **Selección de puntos de muestreo**

De acuerdo con el Geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM) y a partir de la Cartografía Básica del cantón Quero, se seleccionó los sitios de muestreo mediante la caracterización de los usos del suelo en la zona de estudio y se apoyó, mediante la clasificación supervisada del primer objetivo. Se definieron los sitios de muestreos de acuerdo con las categorías descritas correspondientes a páramo, plantación forestal y por actividades antrópicas de cultivos y pasto.

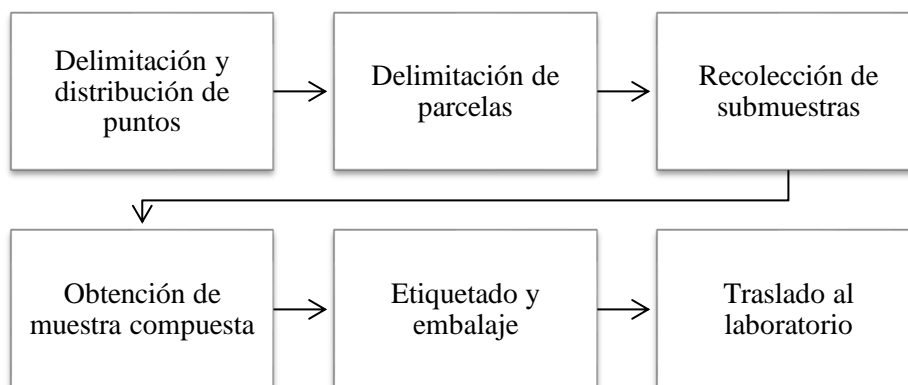
- **Recolección de muestras de suelo**

A través de la aplicación móvil GPS “*Maps.me*” y el uso de Sistemas de Información geográfica (SIG) facilitó la selección de ubicaciones de fácil acceso para la recolección de puntos de muestreo correspondientes a cada categoría mencionada. Se establecieron un total de 10 puntos de muestreo en páramo, 5 puntos para plantación forestal y 10 por actividades antrópicas de cultivos y pasto.

Durante la recolección de cada muestra, se delimitó una parcela de 20mx20m a una profundidad de 30 cm, definiendo cinco puntos (cuatro en cada esquina y una en el centro) y se recolectó las cinco muestras con una pala y una espátula, después se realizó una mezcla de manera cuidadosa entre las muestras y se obtuvo una muestra compuesta. Finalmente, la muestra compuesta fue colocada en una bolsa etiquetada por cada categoría definida para su posterior traslado al laboratorio.

Figura 2.

Proceso de recolección de muestra



3.4.5.2 Fase de laboratorio

Para la fase de laboratorio, se realizó un análisis físico - químico para cada una de las muestras de suelo. Para los parámetros físicos se definió a la estructura, textura y permeabilidad y para los parámetros químicos se determinó la materia orgánica.

3.4.5.2.1 Análisis de parámetros físicos

- **Textura**

Para la determinación de la clase textural del suelo se realizó el método organoléptico propuesto por la Guía para la descripción de suelo 4a edición, (2006), en donde fue necesario la manipulación de una muestra de suelo húmedo o ligeramente mojada, para que a partir de

la percepción táctil y manipulación manual se diferencien los componentes texturales de las muestras. Se realizaron los siguientes ensayos para determinar la textura del suelo:

- Prueba del lanzamiento de la bola
- Prueba de compresión de la bola
- Prueba de la bola de barro
- Prueba de sacudimiento de la bola
- Prueba de manipulación

- **Estructura**

La estructura del suelo se determinó de acuerdo a la clasificación con respecto al grado, tamaño y tipo de agregados (FAO, 2009).

Tabla 5.

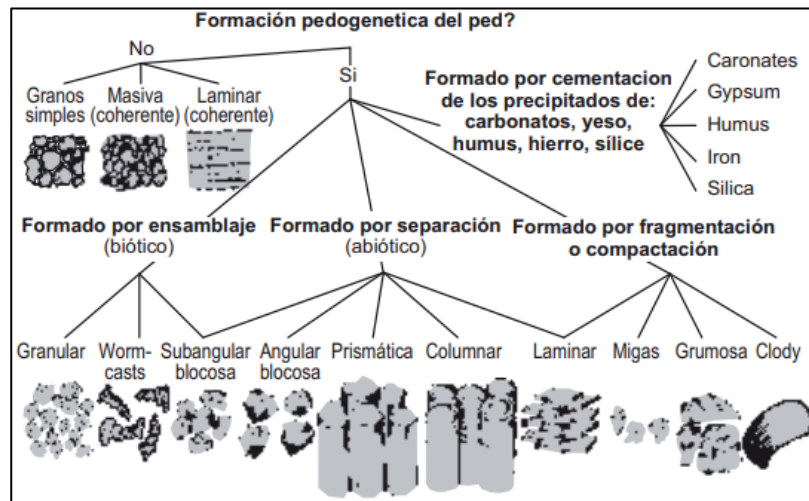
Clasificación de tipos de estructura del suelo

Tipo de estructura	Descripción
Blocosa (bloques)	Bloques o poliedros, casi equidimensionales, con superficies planas o ligeramente redondeadas que son moldes de caras de los agregados vecinos
Granular	Esferoides o poliedros, que tienen superficies curvilíneas o irregulares que no son moldes de las caras de los agregados vecinos.
Laminar	Planos con dimensiones verticales limitadas; generalmente orientados sobre un plano horizontal y usualmente sobrepuestos.
Prismática	Las dimensiones están limitadas en el plano horizontal y extendido a lo largo del plano vertical; las caras verticales están bien definidas; tienen superficies planas o ligeramente redondeadas que son moldes de las caras de los agregados circundantes.
Estructura rocosa	La estructura rocosa incluye la estratificación fina en sedimentos no consolidados y pseudomorfos de minerales intemperizados reteniendo sus posiciones relativas cada una y los minerales no intemperizados en saprolita de rocas consolidadas.

Nota. Adaptado de “*Guía para la descripción de suelos*” (p. 46), por (FAO, 2009) Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Figura 3.

Tipos de estructura del suelo y su formación



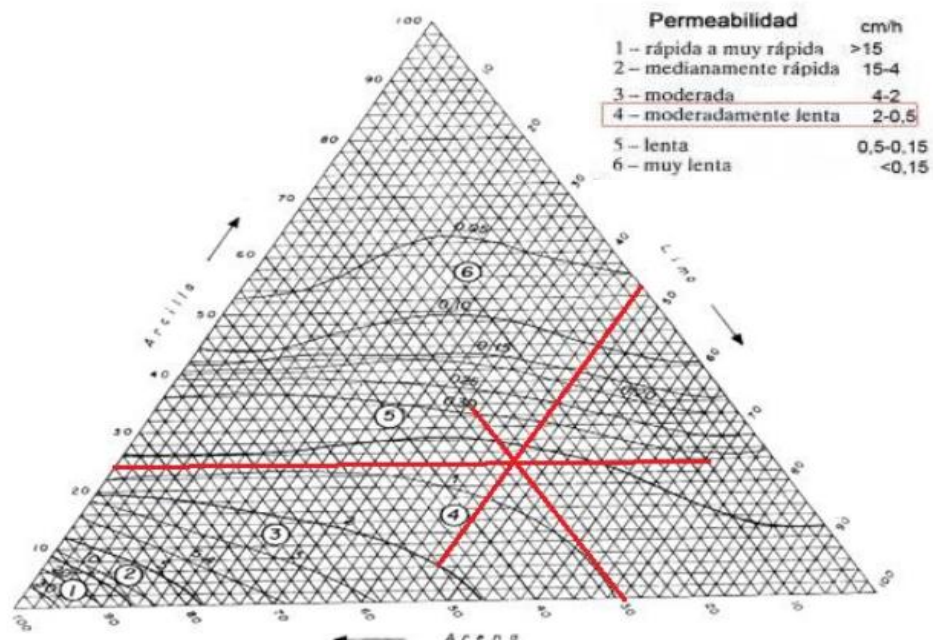
Nota. Adaptado de “Guía para la descripción de suelos” (p. 47), por (FAO, 2009) Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- Permeabilidad

Para la variable de permeabilidad se determinó mediante la utilización del triángulo textural para la permeabilidad que se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Triángulo textural para permeabilidad



Nota. Adaptado de “Estrategias para la reducción del riesgo de erosión, microcuenca Quebrada-negra, vereda Piluma, municipio de Sasaima Cundinamarca” (p. 37), por (Castillo & Gonzales, 2016), Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

3.4.5.2.2 Análisis de parámetros químicos

- Materia orgánica (MO)

El porcentaje de MO fue resultado del método de *Pérdida por Ignición*. Cada muestra pasó por un proceso de tamizado a 2 mm y 150 µm para posteriormente, cuantificar la cantidad de carbono mediante la calcinación controlada. Este proceso consistió en deshidratar la muestra en la estufa a 105°C durante 24 horas, luego se pesó 5g de suelo seco para colocarlo en la mufla a 550°C durante 4 horas para su calcinación y se pesó la muestra después de este proceso (Dabadie et al., 2018; Izquierdo & Arévalo, 2021). Finalmente, se calculó la materia orgánica (MO) mediante la ecuación (8):

$$\%MO = \frac{\text{Peso inicial del suelo} - \text{Peso después de ignición}}{\text{Peso inicial del suelo}} \times 100 \quad (7)$$

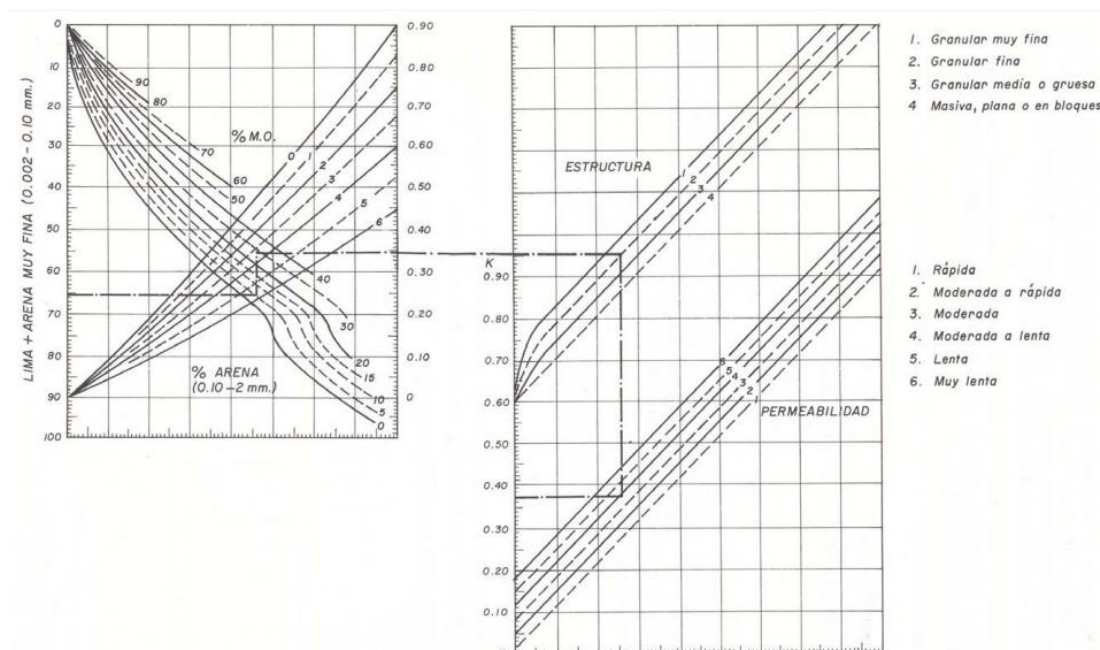
Fuente: (Izquierdo & Arévalo, 2021).

3.4.5.3 Fase de procesamiento de datos

El cálculo del factor de erosividad del suelo (K) se estableció con la figura 5, en donde se tomó en consideración la textura, estructura, permeabilidad y el contenido de materia orgánica los cuales se obtuvieron en la fase de laboratorio

Figura 5.

Nomograma para el cálculo del factor de erosionabilidad del suelo (K)



Nota. Adaptado de “Estimation of water erosion for the current use and potential erosion of the soil in the experimental uni agricultural farm, Las Flores municipality, Masaya Departmen” (p.29). por (Sotelo et al., 2021), *El Higo Revista Científica*, 11(2).

3.4.6 Factor de pérdida de suelo (A)

Con cada uno de los factores, se obtuvo como resultado final, el mapa que representa las pérdidas de suelo por erosión expresado en el Factor A.

Tabla 6.

Niveles erosivos según las pérdidas de suelos

Pérdida de suelo (Ton/ha año)	Grado de erosión
< 15	Nula o escasa
15 – 50	Media
50 -120	Moderada
120 - 200	Fuerte
> 200	Muy fuerte

Nota. Adaptado de “Propuesta para el control y manejo de cárcavas en sectores rurales de la Provincia de Manabí” (p. 906), por (Zambrano & Cabrera, 2021), *Dominio de las Ciencias*, 7 (5).

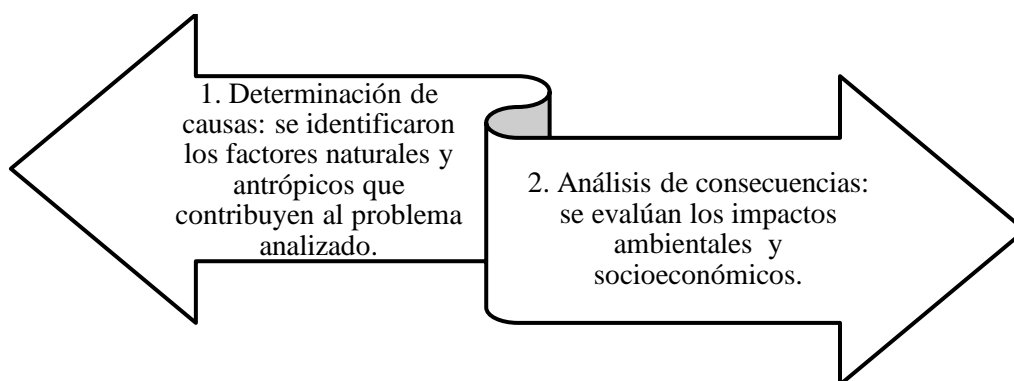
3.5 Causas y consecuencias de los procesos de degradación para promover medidas de recuperación

Para el desarrollo del objetivo, se realizaron tres fases para su obtención: fase de identificación de los procesos de degradación, fase de evaluación de causas/consecuencias y fase de propuesta de medidas de recuperación.

Fase 1: Identificación de los Procesos de Degradación

- Revisión bibliográfica y documental: mediante estudios previos, normativas y antecedentes se realizó el análisis sobre la degradación ambiental en la zona de estudio.
- Trabajo de campo: se realizó observaciones directas para identificar signos de degradación.
- Análisis de indicadores ambientales: se evaluó los parámetros como calidad del suelo, agua (precipitación), biodiversidad y cambios en el uso del suelo mediante imágenes satelitales y datos históricos.

Fase 2: Evaluación de Causas y Consecuencias

Figura 6.*Pasos para la identificación de causa/consecuencias*

Para la evaluación de las causas y consecuencias de la degradación en la zona de estudio se realizó una matriz causa-efecto donde se sintetizó las relaciones entre los factores identificados y sus repercusiones.

Fase 3: Propuesta de Medidas de Recuperación

La recuperación de la zona alta de la microcuenca Hualcanga que se encuentra degradada requiere estrategias que se adapten a las condiciones ecológicas particulares de estos ecosistemas, con el objetivo de restaurar sus funciones y garantizar su sostenibilidad a largo plazo. A partir del diagnóstico de la situacional actual de la zona de estudio, la identificación de las causas y consecuencias, se formularon programas y proyectos, los cuales incluirán lo siguiente:

- Se definieron estrategias de recuperación para la implementación de planes y medidas.
- Se planteó un objetivo para que las intervenciones fueran efectivas, alcanzables y sostenibles, asegurando que se logaran los resultados a favor de la restauración de los ecosistemas degradados.
- Se priorizaron acciones y actividades para que su evaluación incluyera la viabilidad técnica, económica y social de las medidas propuestas.
- Se identificaron actores claves para que, mediante reuniones con comunidades, expertos y autoridades, se recogiera información sobre necesidades y soluciones.
- Se diseñó un plan de monitoreo y evaluación para establecer indicadores que permitieran medir el éxito de las medidas implementadas y realizar ajustes si fuera necesario.

Capítulo 4

Análisis y Discusión de los Resultados

4.1 Análisis Descriptivo de los Resultados

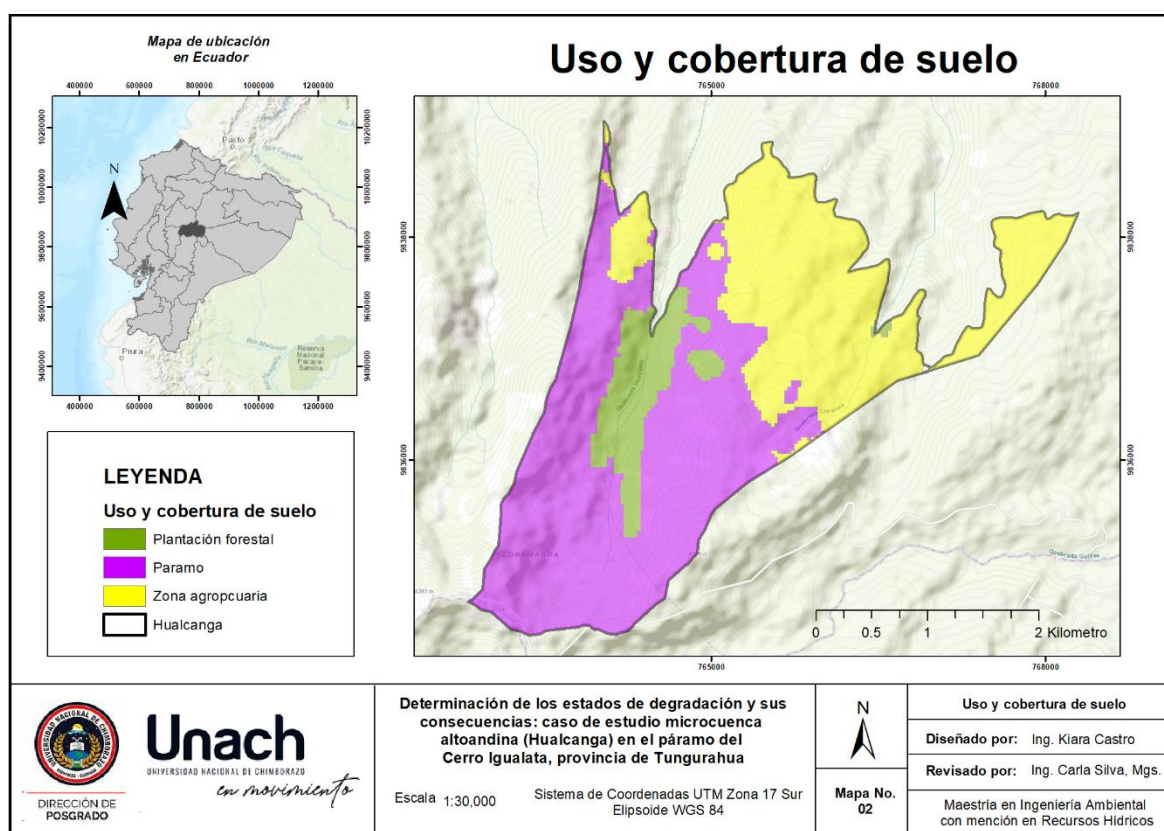
4.1.1 Variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la zona alta de la microcuenca Hualcanga

4.1.1.1 Clasificación y delimitación de los usos de suelo

Se identificaron los diferentes usos y coberturas de suelo correspondientes a la zona alta de la microcuenca Hualcanga en el Cerro Igualata. De acuerdo con el Proyecto “*Mapa de Cobertura y Uso de La Tierra del Ecuador*” propuesto por el Ministerio del Ambiente, se determinó tres categorías: plantación forestal (Pf), páramo (Pr) y zona agropecuaria (Za) (MAE, 2015).

Figura 7.

Uso y cobertura de suelo en el área de estudio



Para la clasificación de coberturas y usos de suelo correspondientes a la zona de estudio, se utilizó el método de clasificación supervisada, el cual permitió identificar y clasificar las distintas categorías de plantación forestal (Paf), páramo (Pr) y zona agropecuaria (Za) dentro de una superficie de 957.10 ha, tal como se presenta en la Figura 7.

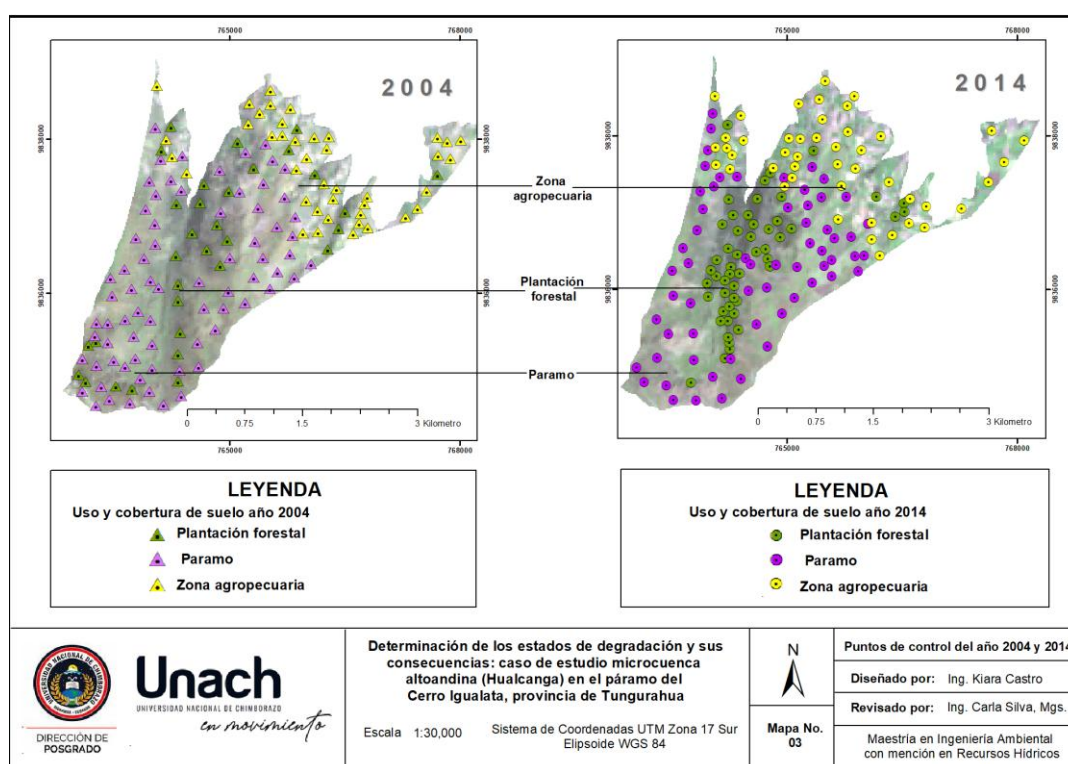
4.1.1.2 Determinación de puntos de control y estratificación

Los puntos de control correspondientes al año 2004 fueron seleccionados manualmente a través del historial de imágenes de Google Earth, los cuales permitieron la observación de las versiones anteriores de la zona de estudio para ese año. Para el 2004 se alcanzaron un total de 146 puntos de control distribuidos en toda la zona de estudio: 32 puntos para la categoría de plantación forestal (Pf), 73 puntos para la categoría de páramo (Pr) y 41 puntos para la zona agropecuaria (Za) correspondientes a los diferentes usos de agricultura, cultivos y ganadería.

En el caso, de los puntos de control para el año 2014 fueron seleccionados mediante la cartografía topográfica del cantón Quero que fue obtenida mediante el *Geoportal IGM*, la cual permitió que la información categorizada y clasificada a través de la interpretación de la imagen satelital para este año pueda ser complementada y validada con los datos obtenidos en la carta topográfica, ya que esta presentó datos fundamentales y básicos que soportaron la estructura del Sistema Nacional de Información Geográfica. Para el 2014 se alcanzaron un total de 159 puntos de control para la zona de estudio, los cuales están distribuidos en 51 puntos para la categoría de plantación forestal (Pf), 61 puntos para la categoría de páramo (Pr) y 47 puntos para la zona agropecuaria (Za).

Figura 8.

Puntos de control del año 2004 y 2014



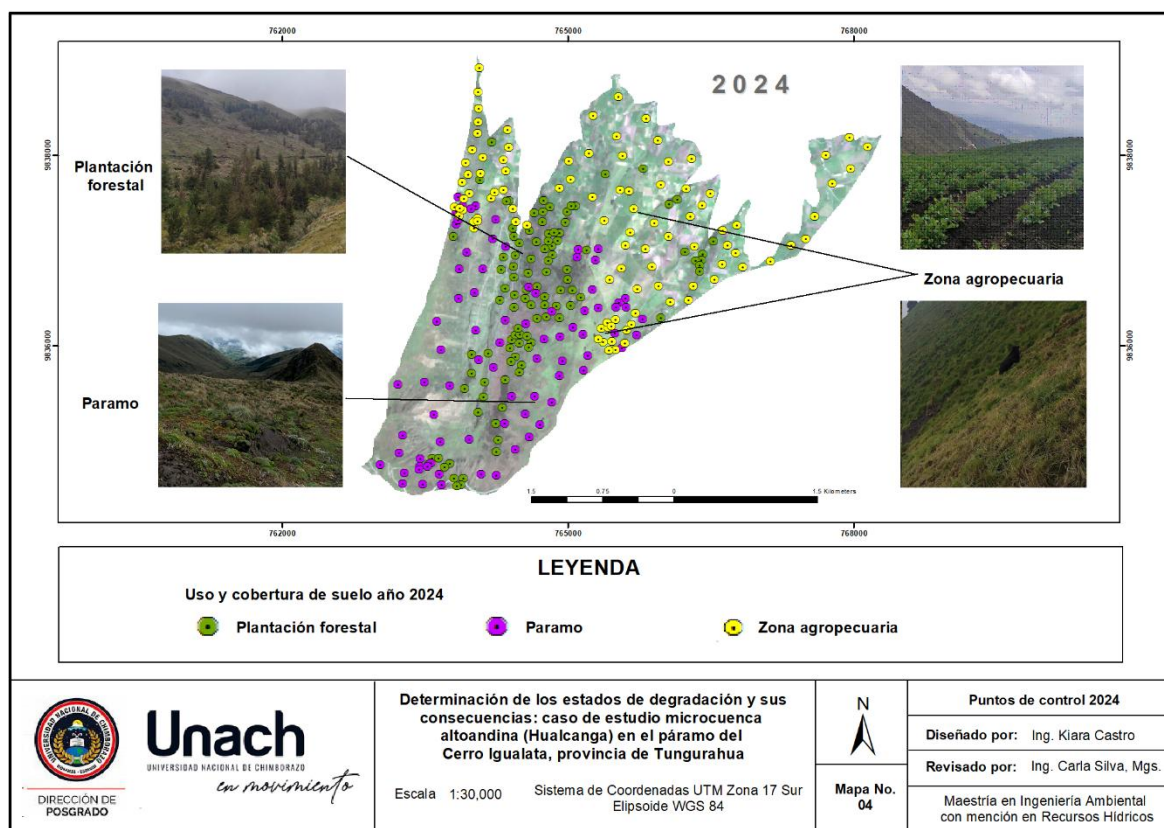
Para los puntos de control correspondientes al año 2024, se realizaron salidas de campo hacia la zona de estudio, en donde se seleccionaron zonas de fácil acceso que permitieron seleccionar espacios estratégicos para la toma de datos correspondientes a cada categoría mencionada. La selección de los puntos de control en campo sirvió para complementar y validar la información obtenida a través de la imagen satelital seleccionada para este año.

Durante las salidas de campo se utilizó una herramienta que sirvió como GPS durante la toma de datos. Mediante la aplicación móvil “*Maps.me*”, se obtuvieron las coordenadas geográficas de cada punto de control correspondiente a las categorías seleccionadas de la zona de estudio.

Así mismo, para el año 2024 se alcanzaron un total de 279 puntos de control distribuidos en toda la zona de estudio: 103 puntos para la categoría de plantación forestal (Pf), 79 puntos para la categoría de páramo (Pr) y 97 puntos para la zona agropecuaria (Za) correspondientes a los diferentes usos de agricultura, cultivos y ganadería.

Figura 9.

Puntos de control del año 2024



Nota. Los puntos de control presentados para el año 2024 fueron recolectados en salidas de campo, seleccionando áreas de fácil acceso para su adquisición.

4.1.1.3 Validación de la clasificación

La matriz de confusión fue utilizada como primer método de validación de la clasificación, ya que, sirvió para evaluar la incertidumbre en el proceso de clasificación supervisada para cada una de las categorías definidas en el área de estudio para los tres años definidos (2004-2014-2024).

Es así como, para el año 2004 se utilizaron un total de 115 puntos de validación de las categorías definidas demostrando una precisión global del 92.17% tal como se muestra en la Tabla 1. Por otro lado, en la Tabla 2 para el año 2014 se utilizaron un total de 114 puntos de validación demostrando una precisión global del 92.98%. Por último, en la tabla 3 se muestra como para el año 2024 se usaron un total de 255 puntos de validación demostrando una precisión global del 93.73%. La precisión global de los tres casos demuestra una confiabilidad mayor al 90%, por lo que, los valores de precisión se basan únicamente en la información obtenidas en el mapa y con datos reales en campo.

Tabla 7.

Matriz de confusión año 2004

Clases reales	Clases predichas			Total	Precisión	Error de comisión	Sensibilidad (Precisión de usuario)
	Plantación forestal	Páramo	Zona agropecuaria				
Plantación forestal	25	1	2	28	89.29	3	89%
Páramo	1	53	2	56	94.64	3	94.64%
Zona agropecuaria	2	1	28	31	90.32	3	90.32%
Total	28	55	32	115			
Error de omisión	3	2	4				
Precisión (Precisión de productor)	89%	96.36%	87.50%				
Precisión global	0.922	92.17%					
Proporción esperada	0.367	36.72%					
Kappa	0.876	87.63%					

Nota. La matriz de confusión se presentó con una validación del 95% de confianza.

Tabla 8.*Matriz de confusión año 2014*

Clases reales	Clases predichas			Total	Precisión	Error de comisión	Sensibilidad (Precisión de usuario)
	Plantación forestal	Páramo	Zona agropecuaria				
Plantación forestal	34	0	2	36	94.44	2	94%
Páramo	2	44	2	48	91.67	4	91.67%
Zona agropecuaria	1	1	28	30	93.33	2	93.33%
Total	37	45	32	114			
Error de omisión	3	1	4				
Precisión (Precisión de productor)	92%	97.78%	87.50%				
Precisión global	0.930	92.98%					
Proporción esperada	0.343	34.26%					
Kappa	0.893	89.33%					

Nota. La matriz de confusión se presentó con una validación del 95% de confianza.

Tabla 9.*Matriz de confusión año 2024*

Clases reales	Clases predichas			Total	Precisión	Error de comisión	Sensibilidad (Precisión de usuario)
	Plantación forestal	Páramo	Zona agropecuaria				
Plantación forestal	85	3	0	88	96.59	3	97%
Páramo	5	68	3	76	89.47	8	89.47%
Zona agropecuaria	3	2	86	91	94.51	5	94.51%
Total	93	73	89	255			
Error de omisión	8	5	3				
Precisión (Precisión de productor)	91%	93.15%	96.63%				
Precisión global	0.937	93.73%					
Proporción esperada	0.336	33.57%					
Kappa	0.906	90.55%					

Nota. La matriz de confusión se presentó con una validación del 95% de confianza.

Por otro lado, otra prueba estadística complementaria que se empleó fue el grado de confiabilidad evaluado a través del coeficiente Kappa, y se demuestra en la tabla 4:

Tabla 10.

Índice Kappa para los años 2004 – 2014 – 2024

	AÑOS		
	2004	2014	2024
Índice Kappa	0.876	0.893	0.906
% Índice Kappa	87.6%	89.3%	90.6%

De acuerdo con la Tabla 4, se determinó que la confiabilidad de estos resultados para los años 2004 – 2014 – 2024 fueron aceptadas como una buena aproximación a las condiciones reales, debido a que el índice Kappa presenta valores superiores al 87% en los tres años presentados.

4.1.1.4 Cambio de uso de suelo

La superficie de las categorías definidas para la zona alta de la microcuenca Hualcanga en el cerro de Igualata se presentaron en la Tabla 5.

Para el año 2004 se presentó un área de 173.52 ha de plantación forestal (Pf), mientras que el año 2014 se reflejó una disminución significativa llegando a 114.09 ha. 10 años después, se observó que esta categoría disminuyó su superficie a 79.32 ha, dando como resultado una reducción en porcentaje de 18.13% a 8.29%. Estos resultados demostraron un aumento en la tasa de deforestación dentro de la zona de estudio.

En el caso de la clasificación de páramo (Pr) es otra categoría que presentó una reducción a lo largo de los tres periodos. En el periodo 2004 – 2014 la superficie de páramo se redujo de 574.81 ha a 523.95 ha, lo que representa un porcentaje de pérdida de 5.31%. Posteriormente, en el periodo entre 2014 – 2024 se ha perdido un total de 68.30 ha. De acuerdo con este análisis, se demostró que el páramo pasó de ocupar un 60.06% en el 2004 a ocupar apenas un 47.61% de todo el territorio de la zona de estudio para el 2024.

Por otro lado, la zona agropecuaria, fue la categoría que más ganancias obtuvo. Inicialmente, en el año 2004 esta categoría tuvo una superficie de 208.78 ha y en el 2014 aumentó un 11.53%, es decir que abarcó una superficie total de 319.06 ha. En 2024, la zona agropecuaria siguió en aumento de forma significativa en su área hasta un 422.13 ha. Este

aumento de superficie para esta categoría se debe principalmente a un importante aumento por cultivos y manejo pecuario en la zona, ya que considerablemente el incremento de su cobertura se observó cuando se reemplazó a las coberturas de plantación forestal y páramo, por las de zonas agrícolas y ganaderas.

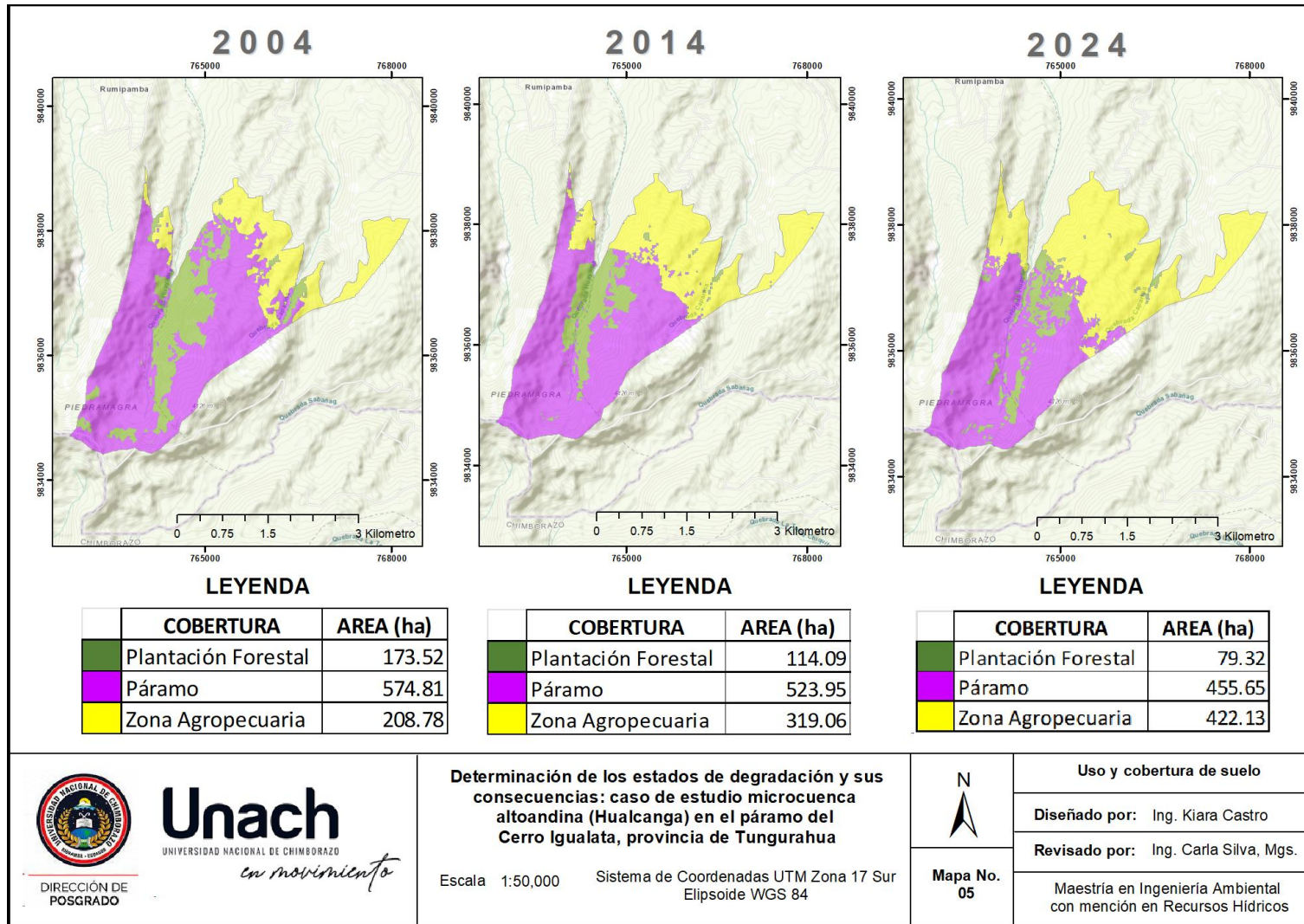
Tabla 11.

Uso y cobertura de suelo en la parte alta de la microcuenca Hualcanga

CLASIFICACIÓN	2004		2014		2024	
	ha	%	ha	%	ha	%
Plantación Forestal	173.52	18.13	114.09	11.92	79.32	8.29
Páramo	574.81	60.06	523.95	54.74	455.65	47.61
Zona Agropecuaria	208.78	21.81	319.06	33.34	422.13	44.11
Total	957.10	100	957.10	100	957.10	100

Figura 10.

Uso y cobertura de suelo en la zona alta de la microcuenca Hualcanga



4.1.2 Zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación mediante el modelo USLE

4.1.2.1 Factor de erosividad de la lluvia (R)

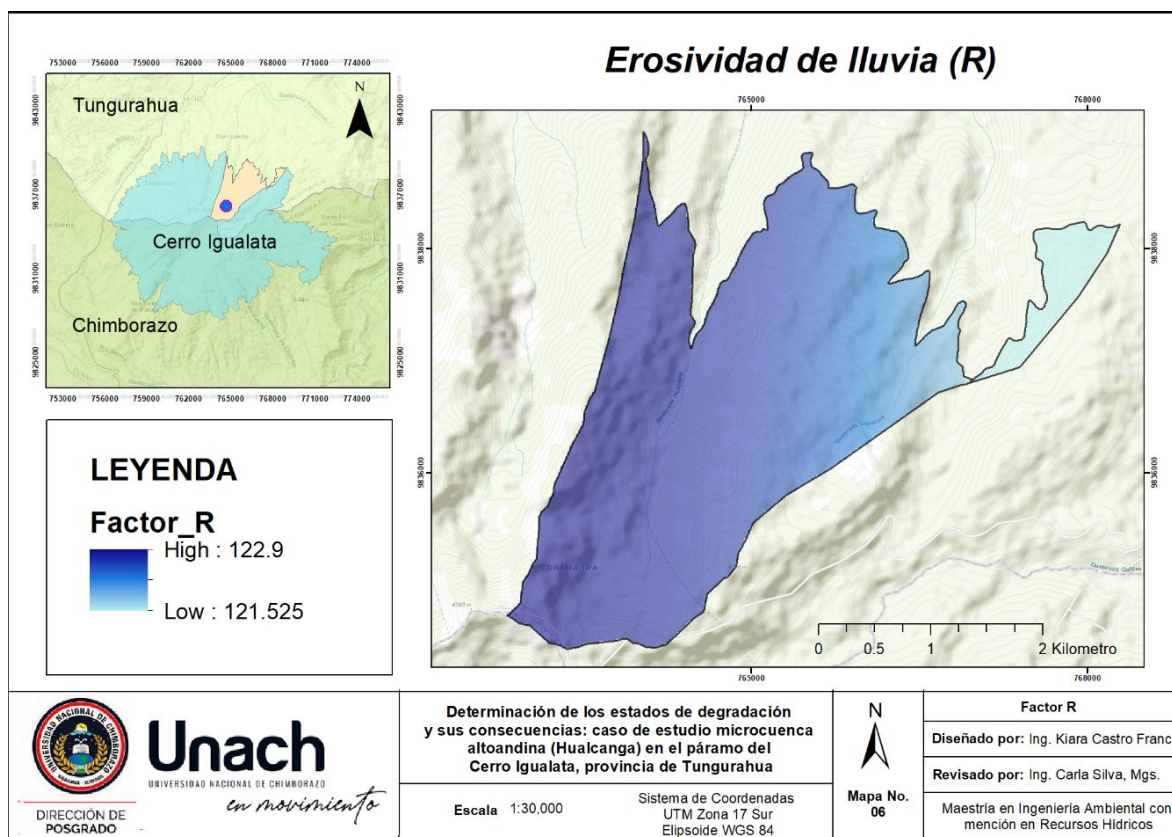
Para el cálculo del *Índice de Fournier Modificado* (IMF), se obtuvo el promedio de las precipitaciones mensuales y anuales de cada estación meteorológica cercanas a la zona de estudio durante el periodo 2004 – 2022.

Tabla 12.

Precipitación periodo 2004 - 2022

EM Mes	M128	M258	M377	M380	M390	M1261	M5107	EC18RB	EC18TS	EC18BN
Ene	122.05	116.87	112.47	128.37	126.89	121.97	124.89	134.95	123.68	162.59
Feb	139.03	160.08	138.58	141.89	151.03	146.28	149.03	157.26	148.95	181.44
Marz	144.75	175.71	152.11	162.53	166.75	161.51	164.75	169.51	165.26	208.80
Abr	117.70	168.63	146.63	153.16	159.70	154.93	157.70	166.96	158.58	230.57
May	106.33	136.33	115.63	124.16	128.33	123.23	126.33	136.26	127.58	207.10
Jun	116.67	126.63	105.53	115.63	118.67	113.63	116.67	121.65	117.32	205.43
Jul	104.09	83.03	64.53	75.63	76.09	71.83	74.09	79.85	75.32	145.17
Ago	58.22	79.29	57.79	66.95	71.22	65.19	68.22	78.18	69.95	121.66
Sep	67.01	68.01	46.22	57.05	59.01	54.11	57.01	62.12	58.53	110.38
Oct	96.32	117.33	95.55	108.63	108.32	103.13	106.32	114.15	107.63	181.03
Nov	119.35	124.31	98.21	106.05	111.45	106.51	109.25	114.52	108.53	181.01
Dic	95.01	116.05	94.95	107.74	112.01	102.35	105.01	117.09	104.37	173.25
P Anual	1286.51	1472.26	1228.19	1347.79	1389.45	1221.53	1359.25	1452.52	1365.68	2108.42

La erosividad pluvial obtenidos a través del IMF, los valores máximos y mínimos para el área de estudio fueron de 122.9 y 121.5 MJ mm/ha h año, respectivamente. Además, de acuerdo con la **Tabla 1** se comprobó que gran parte del área de estudio presentó valores de R mayores a 120, siendo los valores más altos presentados a lo largo de toda el área de estudio. Esto permitió detectar las áreas donde la agresividad de la lluvias de acuerdo con la cantidad de precipitación podría generar mayores escorrentías y erosiones en el suelo, con un tipo de agresividad climática alta.

Figura 11.*Factor de erosividad de la lluvia (R)*

En zonas altoandinas y en presencia de páramos, la humedad se manifiesta por el rocío y lloviznas frecuentes. La humedad no está directamente relacionada con una precipitación alta, sino por las bajas temperaturas y la alta nubosidad, que provocan una evapotranspiración reducida y es ésta una de las principales razones del alto rendimiento hídrico de estos ecosistemas y por tanto, unos mayores índices pluviométricos (Díaz et al., 2019). Por su parte, (Berrones et al., 2022), menciona que la niebla también es otro factor que limita las pérdidas de agua por evapotranspiración, manteniendo una alta humedad relativa del aire y disminuyendo la incidencia de la radiación solar.

Además, los mayores índices pluviométricos y las variaciones de precipitaciones en zonas de los Andes del Ecuador tienen su influencia principalmente por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los fenómenos de El Niño y La Niña, las anomalías de temperatura en la superficie del Atlántico y, en menor medida, del Pacífico, pese a su cercanía a los Andes (Mosquera et al., 2023). En los páramos del Ecuador la precipitación anual varía entre 500 y 2 000 mm y, en la mayoría del territorio, se presentan dos estaciones húmedas: febrero a mayo y octubre a diciembre (Chuncho & Chuncho, 2019).

En efecto, la zona alta de la microcuenca Hualcanga se ubica en el Páramo del Cerro Igualata, la lluvia está formada principalmente por humedad atmosférica proveniente de la selva amazónica, presentando una agresividad climática alta en el factor R.

4.1.2.2 Factor de longitud y pendiente de la ladera (LS)

El mapa resultante del factor LS (Figura 14), es la relación que existe entre los factores independientes L y S, tomando en cuenta la degradación del suelo de la microcuenca en función a la longitud y el grado de inclinación de la pendiente del terreno. En este sentido la microcuenca Hualcanga presenta un probabilidad de erosión baja con una superficie del 57.41% y una probabilidad de erosión media de 23.52% del territorio total, siendo estos porcentajes las superficies más altas de cada valoración. Sin embargo, a pesar de que la probabilidad de erosión alta y muy alta abarca una superficie de apenas el 0.23% del total del territorio, se encuentra en las zonas más altas y con más pendientes correspondientes a la categoría de páramo, cuyo ecosistema son más sensibles a procesos erosivos.

Figura 12.

Longitud de pendiente (L)

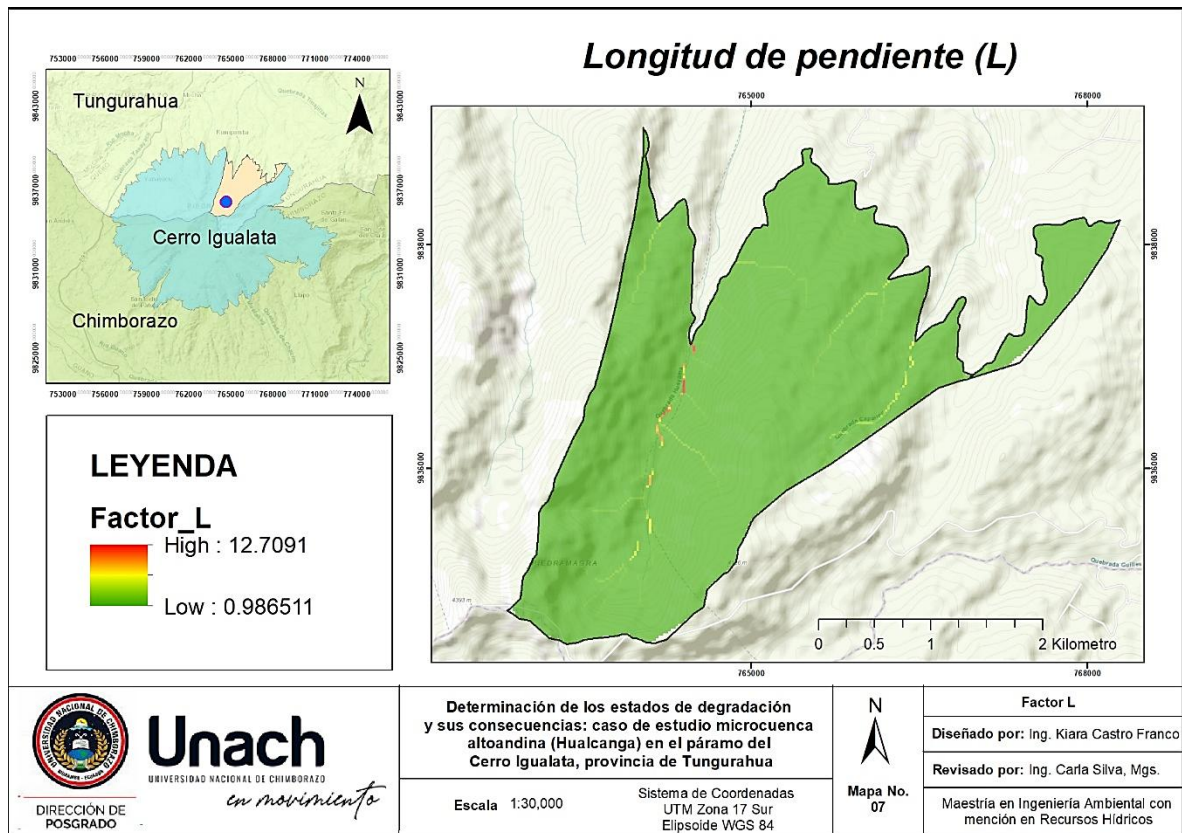


Figura 13.
Pendiente (S)

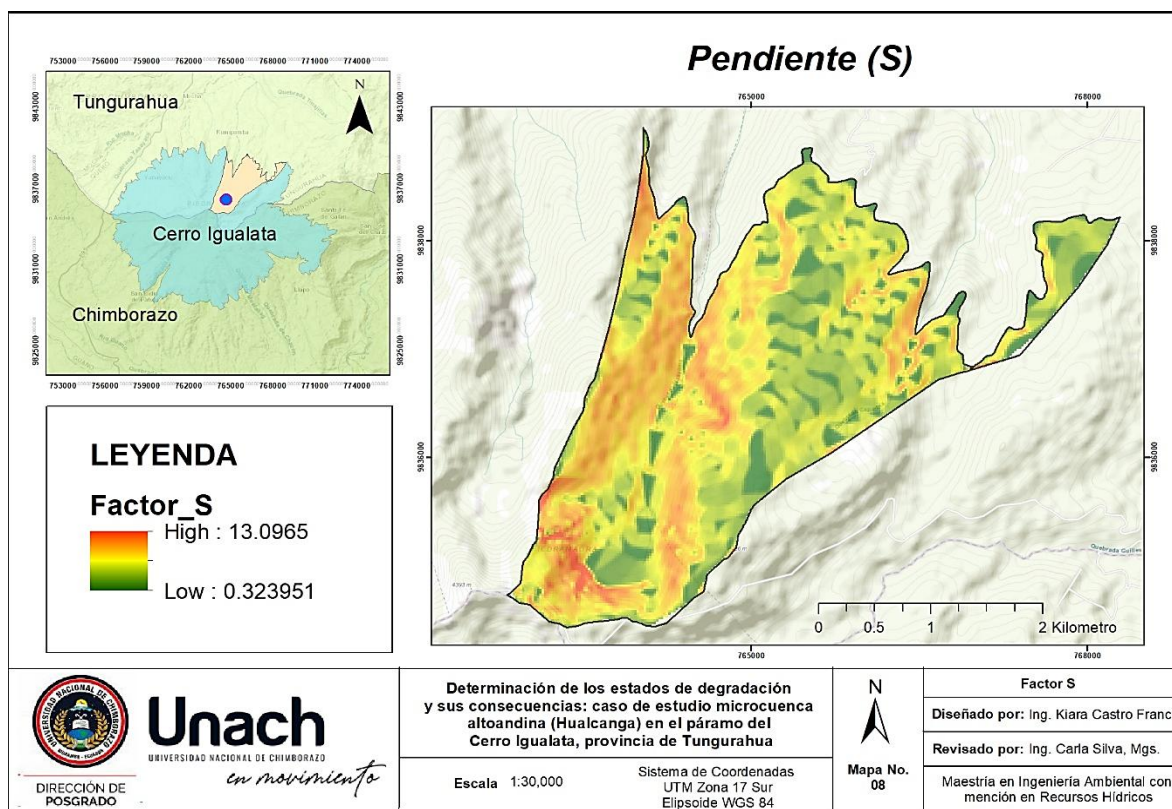


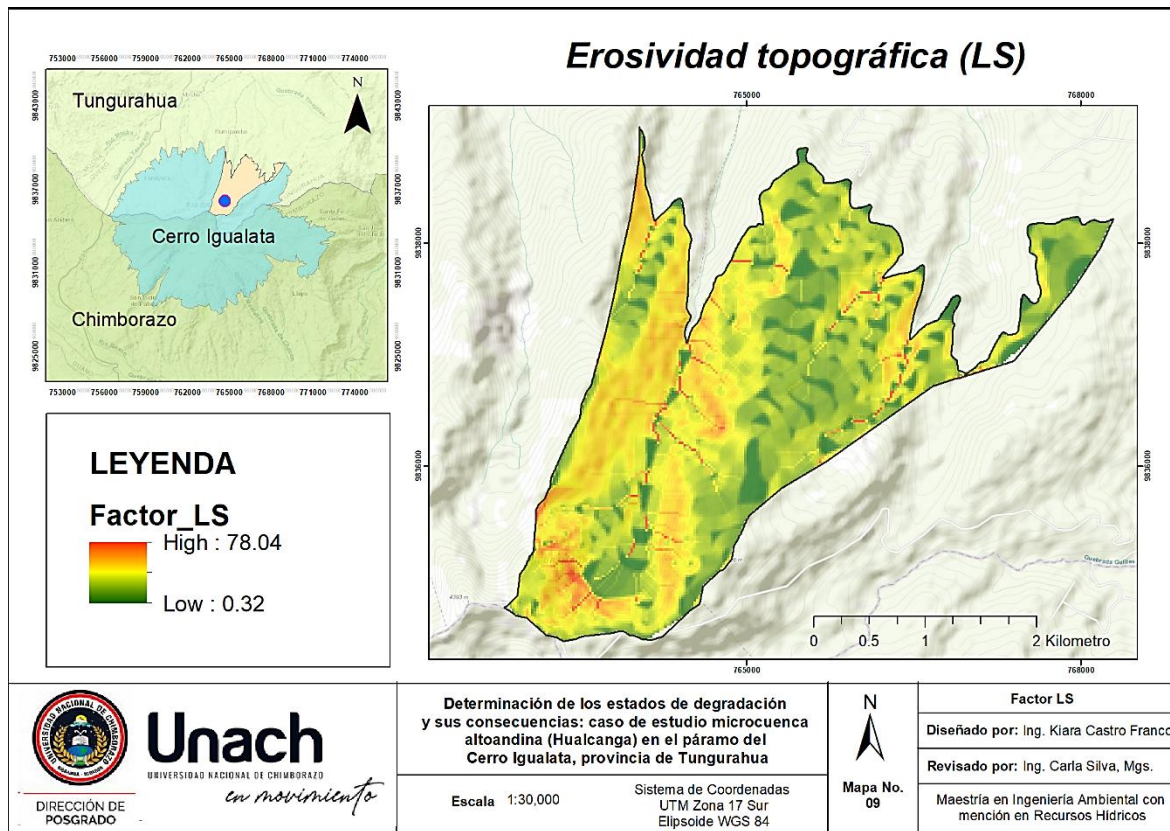
Tabla 13.
Clasificación de la Pendiente en función a la probabilidad de erosión

Pendiente	Probabilidad de erosión	Área (Ha)	(%)
0-3	Muy baja	180.32	18.84
3,1-7	Baja	549.42	57.41
7,1-20	Media	225.11	23.52
20,1-35	Alta	1.34	0.14
Mayor a 35	Muy Alta	0.90	0.09
Total		957.10	100.00

Los resultados de la distribución espacial del factor de erosividad topográfico (LS) representó el potencial de erosión del agua topográfica, obteniéndose valores entre un mínimo de 0.32 y un máximo de 78.03. De acuerdo con la Tabla 14 y la Figura 14, el mapa del factor LS de la zona de estudio se encuentra en un rango de erosividad topográfica entre bajo y moderado, demostrando que los valores cercanos a una muy alta categorización se debe por el aumento de la inclinación y la longitud de la pendiente representando erosión hídrica.

Tabla 14.*Factor LS en la microcuenca Hualcanga*

Factor LS	Definición	Área (Ha)	%
<15	Bajo	387.11	40.45
15-30	Moderado	563.85	58.91
30-45	Alto	5.19	0.54
> 45	Muy alto	0.94	0.10
Total		957.10	100.00

Figura 14.*Factor de erosividad topográfica (LS)*

4.1.2.3 Factor cobertura y manejo del suelo (C)

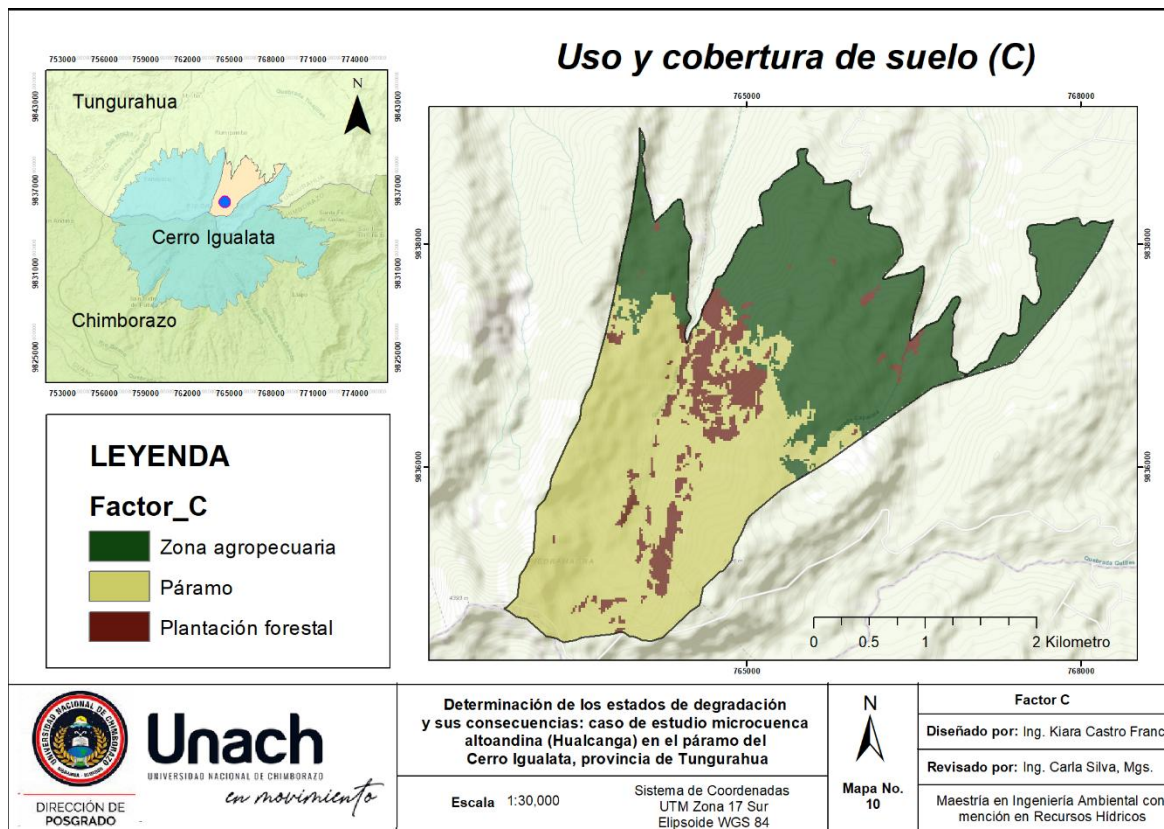
En el mapa de cobertura y uso de suelo, en la que se presentan tres clases de cobertura para la zona alta de la microcuenca del área de estudio: plantación forestal, páramo y zona agropecuaria.

La erosión por el factor C determinó que la microcuenca es vulnerable a procesos erosivos. La zona agropecuaria presentó los valores más altos, y dentro de ellos destacan las rotaciones de diferentes cultivos con valores de 0.25. Para la plantación forestal, el valor más alto se obtiene en bosque degradado, donde el factor C alcanza un valor de 0.003, al combinar una baja cobertura con una elevada altura de caída de gotas desde los árboles

aislados. Se observaron valores de 0.01 del factor C en la parte del páramo donde la superficie se caracteriza por la presencia de vegetación nativa.

Figura 15.

Factor de cobertura y uso de suelo (C) con la clasificación.

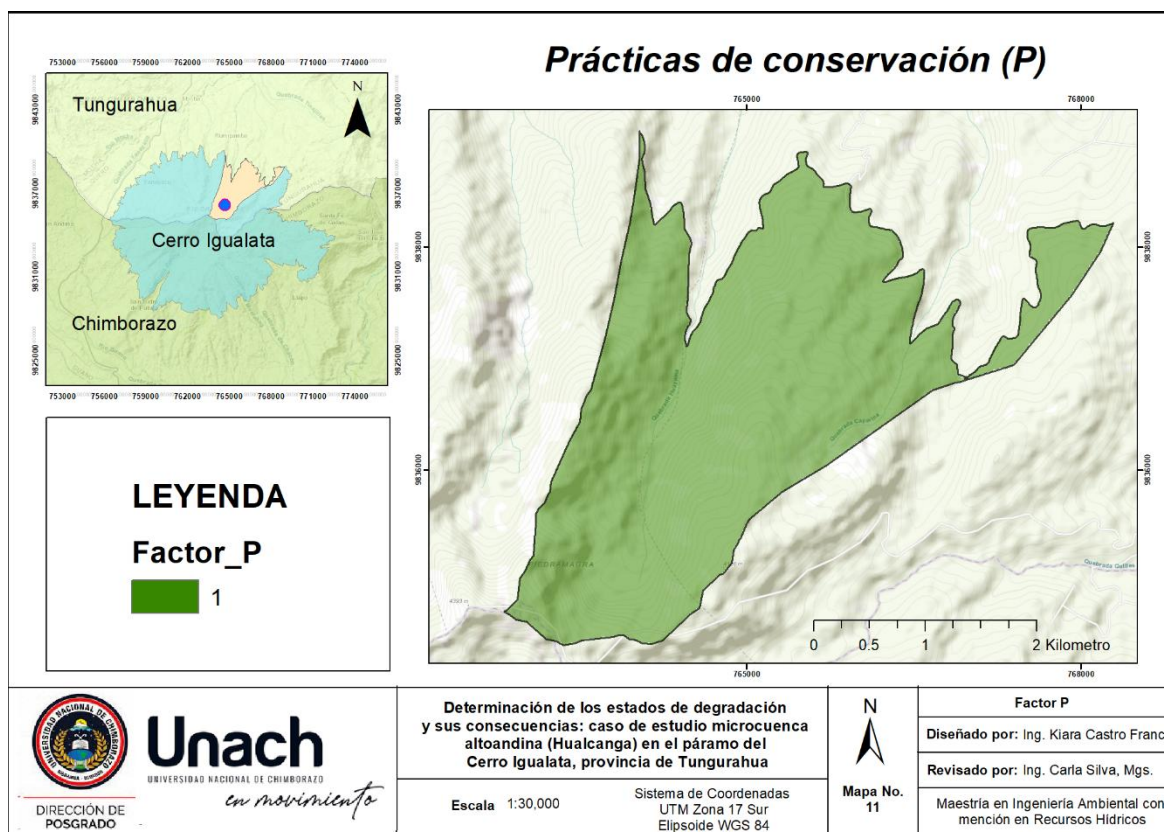


4.1.2.4 Factor prácticas de conservación (P)

Para el factor de prácticas de conservación (P) mediante el “Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia rural Rumipamba (PDOT)”, el “Plan de Forestación y Reforestación de la provincia de Tungurahua 2021-2041” y el “Fondo de Páramos Tungurahua y Lucha contra la Pobreza 2017” se determinó que el cerro Igualata no se encuentra dentro de los procesos para emplear medias de conservación. Además, en las salidas de campo, se observó el aumento significativo de la frontera agrícola y ganadera por la creciente presión demográfica. A pesar, de que la zona de estudio incluye únicamente la zona alta de la microcuenca Hualcanga la presencia de ganado bovino y de cultivos como papa, habas, cebolla, zanahoria y pasto, reflejó una diversificación agropecuaria sin la presencia de métodos de protección y conservación del suelo.

Figura 16.

Factor de prácticas de conservación (P)



4.1.2.5 Factor de erosionabilidad del suelo (K)

El factor de erosionabilidad del suelo presenta valores del factor K entre 0.18 y 0.27 Mg / ha MJ mm conociendo que el suelo predominante en la zona tiene alta influencia de arena en su composición.

La zona de páramo presentó un área del 47.61% con un valor de K de 0.27, cuya composición del suelo contiene una mayor cantidad textural de arenas y limos que arcillas (franco arenoso). A pesar de que en muchos estudios mencionan que las cuencas de páramo en los Andes tropicales presentan un alto rendimiento hídrico y una alta capacidad de regulación (Mosquera et al., 2023), las diferencias en cuanto al clima, el tipo de suelo y las características geológicas deben ser consideradas para lograr una mejor gestión de los recursos hídricos en el páramo ecuatoriano, pero cuando se degradan pierden cohesión y se vuelven vulnerables a la erosión.

La categoría de plantación forestal de pino (*Pinus radiata*) presentó un área de 8.29% del territorio con un valor de K de 0.18, con características texturales similares a la de páramo (franco arenoso). Sin embargo, el pino al ser una especie exótica introducida reduce significativamente el contenido de agua del suelo (hasta un 50-60 %) en relación con la

vegetación nativa de la microcuenca. Además, al presentar una textura de suelo franco arenoso y de baja cohesión son más susceptibles a la erosión, la tala bajo fines económicos deja el suelo expuesto, aumentando la erosión y la pérdida de nutrientes (Calispa et al., 2023).

En la zona agropecuaria, los cultivos y el pastoreo intensivo de ovinos y bovinos presentó un área de 44.11% del territorio con un valor de K de 0.20. En el caso de su clase textural (arenoso franco) presentó un bajo contenido de materia orgánica y han mostrado efectos contrastantes sobre el contenido y almacenamiento de agua del suelo que van desde fuertes reducciones. Estos sitios de la cuenca soportan una elevada degradación del terreno y una muy alta probabilidad de erosión y vulnerabilidad biofísica debido a los monocultivos y el sobrepastoreo inadecuado que compactan el suelo, disminuyen la infiltración y aumentan la escorrentía superficial (Aramayo et al., 2024; Pérez & Mende, 2018).

Tabla 15.

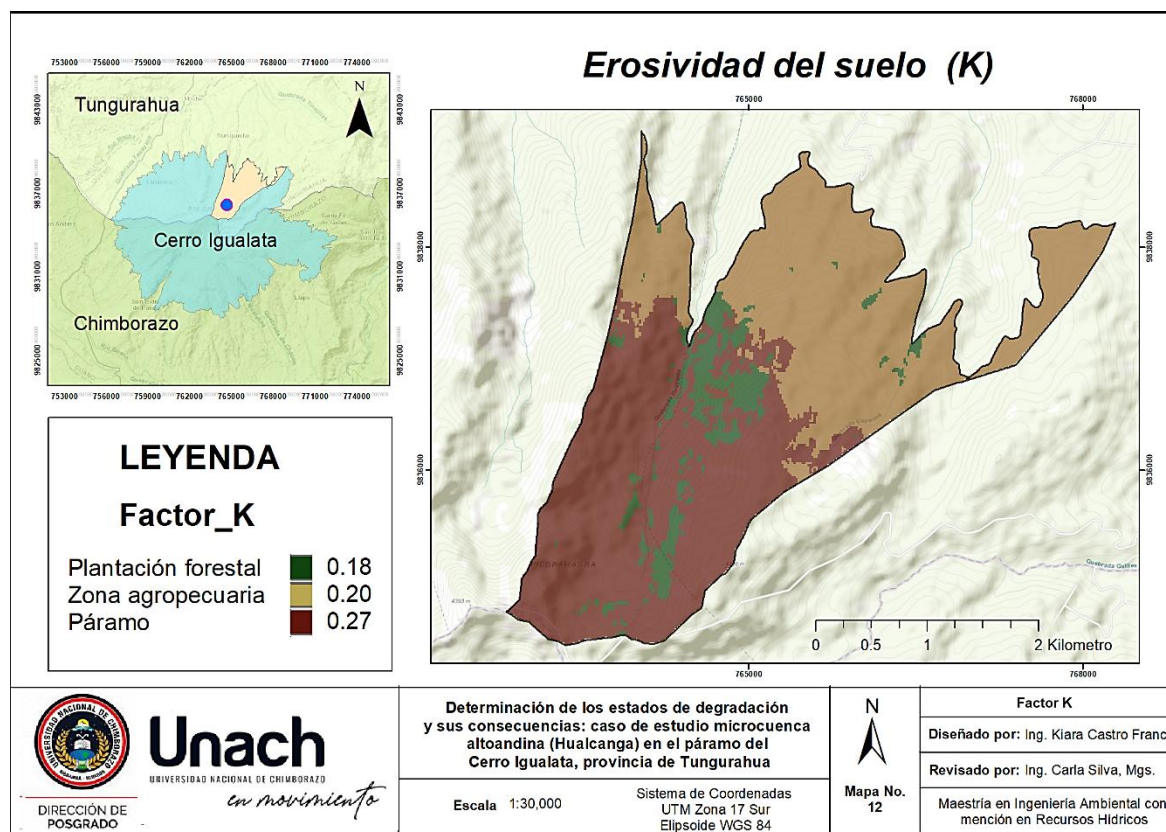
Resultados del factor K

Cobertura de uso de suelo	Orden	Estructura	Textura	Permeabilidad	% Materia Orgánica	ha	K
Páramo	Andosol	Granular media	Franco arenoso	3	6.46	455.65 (47.61%)	0.27
Plantación forestal	Andosol	Granular media	Franco arenoso	3	4.80	76.32 (8.29%)	0.18
Zona agropecuaria	Andosol	Granular media	Arenoso franco	3	3.97	422.13 (44.11%)	0.20
TOTAL						957.10	

Asimismo, dichos efectos se ven exacerbados cuando el terreno tiene un arado siguiendo la pendiente del terreno, lo cual favorece el drenaje rápido del agua fuera de la cuenca y la subsecuente reducción de caudales base, lo que adicionalmente puede provocar un incremento acelerado de la erosión del suelo. Tanto en las propiedades utilizadas en el cálculo del K en los diferentes sitios de la cuenca alta, como el coeficiente de erodabilidad obtenido, la variación es muy pequeña y con valores similares. Los mapas de susceptibilidad revelaron que casi el 40 % de la cuenca se consideraba altamente susceptible a la erosión y el 20 % moderadamente susceptible, lo que indica la necesidad crítica de control de la erosión del suelo en la zona alta de esta cuenca para reducir la susceptibilidad.

Figura 17.

Factor de erosionabilidad del suelo (K)



4.1.2.6 Factor (A)

La estimación del grado de erosión en la microcuenca Hualcanga se ve reflejada en cada uno de los factores R, LS, C, P y K, como resultado se obtuvo el factor A el cual mostró la pérdida por erosión que sufre el área de estudio.

Tabla 16.

Resultante del factor A

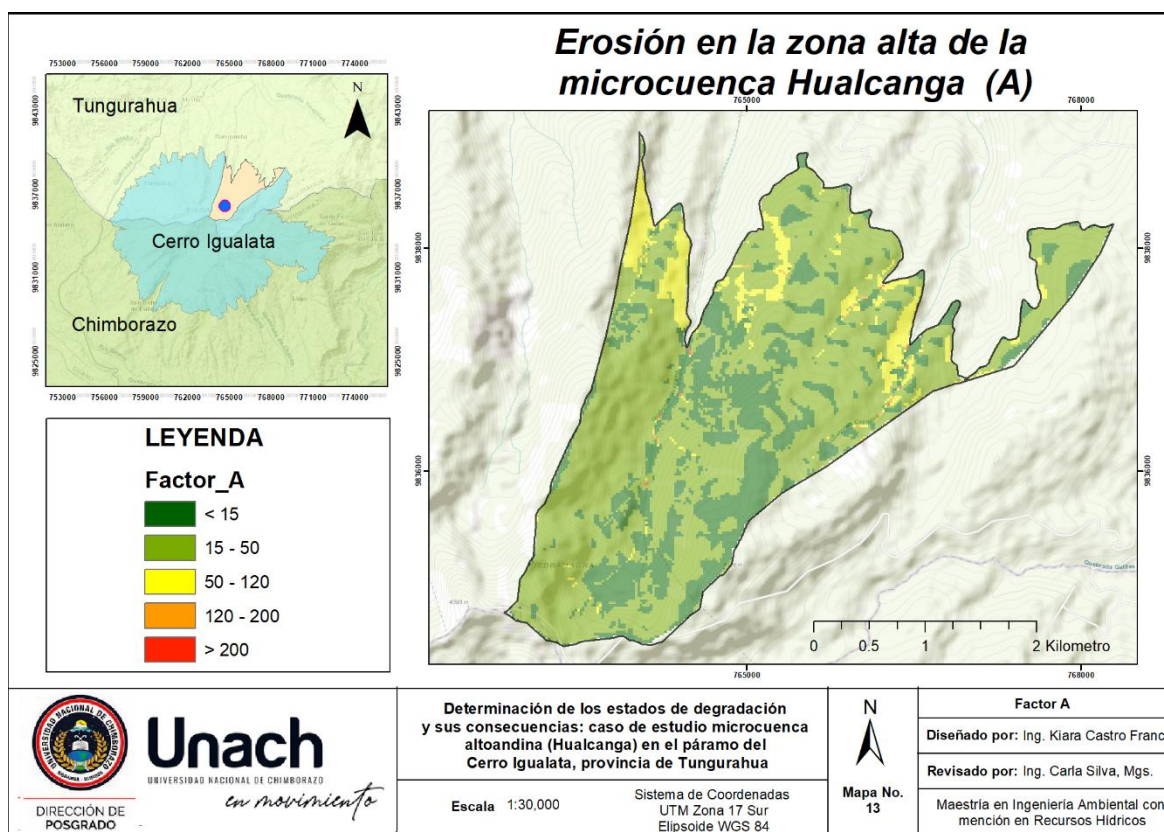
Pérdida de suelo (Ton/ha año)	Grado de erosión	ha	%
< 15	Nula o escasa	242.08	25.29
15 – 50	Media	635.59	66.41
50 -120	Moderada	77.34	8.08
120 - 200	Fuerte	1.43	0.15
> 200	Muy fuerte	0.66	0.07
TOTAL		957.10	100

El factor A representó la erosión actual por la que sufre la zona alta de la microcuenca, cuyos valores se encontraron entre 1 – 322 (Ton / ha año). El grado de erosión

nula o escasa ocupó el 25.29% de la superficie de la zona de estudio. La mayor superficie de la microcuenca que presentó una susceptibilidad a la erosión de grado medio ocupó el 66.41% del área total. Por otro lado, el grado de erosión moderado, fuerte y muy fuerte representaron una superficie en porcentaje de 8.08 - 0.15 y 0.07, respectivamente.

Figura 18.

Erosión actual en la zona alta de la microcuenca Hualcanga (A)



De acuerdo con la Tabla 16 y la Figura 18, el factor A demostró el estado actual de la zona de estudio frente a la susceptibilidad a la erosión, ya que en la zona alta de la cuenca la pluviosidad resultó ser alta, lo que contribuye a una erosión significativa y una pérdida de suelo moderada que puede afectar la fertilidad a largo plazo y con la erosionabilidad de suelos franco arenosos y con diferentes coberturas de uso de suelo, se determinó que las coberturas de plantación forestal y agropecuaria son más susceptibles a la erosión.

Adicionalmente, la zona agropecuaria y plantación forestal de la microcuenca presentaron un grado de erosión que varía entre media y moderada, principalmente porque estas dos categorías no son nativas de la zona de estudio y son coberturas introducidas con fines económicos. No obstante, a pesar de que la cobertura de páramo presentó un grado de erosión baja y media, la susceptibilidad a la erosión por la pérdida de suelo es menor en comparación con las demás coberturas de uso de suelo, y esto se debe principalmente a que

al ser nativa y a pesar de su pendiente pronunciada, los suelos tienen una alta porosidad y un gran contenido de materia orgánica (García & Leal, 2019).

En general, el grado de susceptibilidad a la erosión en la zona alta de la microcuenca Hualcanga fue de grado medio, a pesar de que el páramo del Cerro Igualata posee mecanismos naturales para conservar los suelos, la intervención humana como la expansión agropecuaria, las plantaciones forestales y su tala, ha generado alteraciones que facilitan la pérdida de suelo y nutrientes volviéndolo más susceptible a los procesos erosivos, por eso, existe la necesidad de incluir prácticas de recuperación y/o conservación para evitar que la erosión pase a un nivel alto.

4.1.3 Causas y consecuencias de los procesos de degradación para promover medidas de recuperación

4.1.3.1 Matriz causa – efecto

A partir del modelo USLE se identificó el nivel de degradación principalmente por la alteración en los patrones de lluvia y factores que influyen en el ciclo hidrológico, siendo estas causas naturales. Así mismo, con la comparación de las variaciones temporales de cobertura vegetal, se identificó que los cambios en el uso del suelo y las diferentes actividades antrópicas que se realizaron en la zona de estudio dan lugar a los procesos erosivos y aumentaron significativamente los niveles de degradación en la microcuenca.

Tabla 17.

Causas y consecuencias de la degradación de la zona alta de la microcuenca Hualcanga

	Causas	Consecuencias	
		Ambientales	Socioeconómicas
Naturales	Cambio climático	<ul style="list-style-type: none"> - Cambios en los regímenes de precipitación y alteraciones en las tasas de evapotranspiración que afectan el balance hídrico - Aumento de emisiones de CO₂, alterando la capacidad de para secuestrar carbono. - Desplazamiento altitudinal de los cinturones zonales - Cambios en los procesos de descomposición y el deterioro de las comunidades microbianas del suelo (Hofstede et al., 2023). 	<ul style="list-style-type: none"> - Desplazamiento y migración de la frontera agrícola; - Inseguridad alimentaria y pérdidas económicas; - Reducción de los rendimientos agrícolas y la calidad de los pastizales para la ganadería; - Aumento de pobreza por escasez de recursos y pérdida de ingresos; - Aumento de los costos de adaptación al cambio climático (Hofstede et al., 2023).

Fenómenos meteorológicos extremos	<ul style="list-style-type: none"> - Erosión, erosión hídrica y degradación del suelo; - Alteración del régimen hidrológico (Mosquera et al., 2023). 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdidas agrícolas y plantaciones para la ganadería; - Aumento en la vulnerabilidad: reduciendo las oportunidades de desarrollo económico (Mosquera et al., 2023). 	
Procesos geológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Erosión del suelo y erosión hídrica - Alteración de las variables hidrológicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de tierras aptas para actividades productiva - Disminución de la seguridad de la población cerca de la zona de estudio 	
Consecuencias			
Causas	Ambientales	Socioeconómicas	
Antropóicas	Deforestación de especies nativas	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de la capacidad de regulación hídrica; - Erosión del suelo y erosión hídrica; - Alteración en el ciclo hidrológico y carbono 	<ul style="list-style-type: none"> - Escasez hídrica, disminuyendo la seguridad alimentaria - Aumento de la frontera agrícola y ganadera - Desarrollo y crecimiento rural
	Sobreexplotación	<ul style="list-style-type: none"> - Erosión del suelo y erosión hídrica - Alteración de las variables hidrológicas - Pérdida de especies nativas y endémicas (Calispa et al., 2023). 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento en los ingresos económicos por la extracción de recursos naturales - Aumento/disminución de la productividad agropecuaria - Expansión de la frontera agropecuaria y demográfica (Calispa et al., 2023).
	Contaminación agropecuaria	<ul style="list-style-type: none"> - Erosión del suelo y erosión hídrica; - Alteración de las variables hidrológicas y al ciclo del carbono; - Pérdida de la vegetación nativa (Sherwood et al., 2023). 	<ul style="list-style-type: none"> - Conflictos por déficit hídrico; - Pérdida de la productividad agrícola y ganadera a largo plazo; - Inseguridad alimentaria y pérdidas económicas (Sherwood et al., 2023).

4.1.3.2 Estrategias de restauración ambiental para la zona alta de la microcuenca Hualcanga

La situación actual de la zona de estudio evidenció un proceso de degradación de nivel medio. La mayor parte del territorio está conformado por ecosistemas de páramo, lo que ha

limitado la intensidad de la erosión y la desertificación en comparación con otras áreas, como las zonas de plantación forestal y agropecuaria, donde estos procesos son más severos. No obstante, la continua pérdida y degradación de la cobertura natural y nativa en la parte alta de la microcuenca tiene implicaciones significativas para el equilibrio ambiental.

Estos cambios resaltan la importancia de implementar estrategias de conservación y manejo sostenible para garantizar la estabilidad ecológica y el bienestar de las poblaciones que dependen de estos ecosistemas. Por tal motivo, la restauración ambiental surge como una estrategia que busca la implementación de prácticas de conservación e incrementar la productividad agropecuaria de manera sostenible (Montoya et al., 2024).

La estrategia de restauración ambiental 1, establece como fundamento principal a la educación ambiental ya que esta asegura conciencia, sensibilización, conocimiento y participación, garantizando un desarrollo sostenible en las acciones de restauración que se puedan plantear.

Tabla 18.

Estrategia de restauración ambiental 1

Estrategia 1.	Proyecto de educación ambiental para las comunidades cercanas a la zona alta de la microcuenca Hualcanga	
Objetivo	Descripción	
Sensibilizar y concientizar sobre la importancia de preservar el ecosistema mientras realizan sus actividades económicas	<ul style="list-style-type: none"> - La educación ambiental busca promover la conciencia ambiental entre los involucrados, fomentando prácticas económicas sostenibles que minimicen el impacto negativo en el ecosistema. - Se pretende integrar la protección del medio ambiente en el desarrollo productivo en actividades agrícolas y ganaderas, asegurando un equilibrio entre el aprovechamiento de los recursos y su conservación a largo plazo. 	
Actividades	Actores	Resultados
Capacitaciones y sociabilización de lo proyecto de educación ambiental: objetivos, logros alcanzar y posibles resultados.	<ul style="list-style-type: none"> - GAD Provincial de Tungurahua - GAD Municipal de Quero - GAD parroquial Rumipamba - Poblaciones aledañas a la zona de estudio 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento en la conciencia ambiental y de sostenibilidad en los ciudadanos - Incremento de la sensibilización y predisposición para el equilibrio entre el ambiente y sus actividades

La estrategia de restauración ambiental 2, toma como prioridad a las actividades productivas de la población bajo un enfoque sostenible, buscando un equilibrio entre las variables ambientales y socioeconómicas. Por tal motivo, esta estrategia es aplicable en la zona de estudio ya que se prioriza la economía de la población sin afectar la conservación del medio ambiente

Tabla 19.

Estrategia de restauración ambiental 2

Estrategia 2.	Proyecto para fomentar la agricultura y ganadería sustentable	
Objetivo	Descripción	
Fomentar la responsabilidad ambiental entre los propietarios de la zona, promoviendo prácticas económicas que integren la conservación del ecosistema y el uso sostenible de los recursos naturales para fines agrícolas y pecuarios.	<ul style="list-style-type: none"> - El proyecto de agricultura y ganadería sustentable buscar impulsar la adopción de un enfoque sostenible en las actividades económicas de los propietarios de la zona, promoviendo la integración de prácticas que minimicen el impacto ambiental. - Se pretende generar conciencia sobre la importancia de conservar los ecosistemas, fomentando el uso responsable de los recursos naturales y la implementación de estrategias que contribuyan a su preservación a largo plazo. 	
Actividades	Actores	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> - Uso de técnicas agrícolas y ganaderas ecológicas y amigables con el ambiente. - Delimitación y establecimiento de zonas de protección del páramo cerca de las zonas de cultivo mediante ordenanzas municipales - Difusión sobre los beneficios de la protección del medio ambiente y las buenas prácticas, para evitar la expansión agrícola y ganadera hacia zonas vulnerables como el páramo. 	<ul style="list-style-type: none"> - GAD Provincial de Tungurahua - GAD Municipal de Quero - GAD parroquial Rumipamba - Poblaciones aledañas a la zona de estudio 	<ul style="list-style-type: none"> - Control del avance de la actividad agrícola y ganadera hacia las zonas vulnerables como el páramo - Mejoramiento de la producción agrícola y ganadera por la aplicación de técnicas ecológicas y sustentables.

La reforestación con especies nativas andinas, como el *Polylepis*, es la base central de la estrategia de restauración ambiental 3. Desde la década de los 80, la reforestación con *Pinus* en zonas altoandinas del Ecuador ha demostrado efectos negativos, como la reducción del almacenamiento de agua en el suelo y la disminución en la generación y regulación del caudal (Romoleroux et al., 2023). Esto se debe a una mayor pérdida de agua hacia la atmósfera por interceptación y transpiración, en comparación con la vegetación de pajonal, que predomina en cuencas de páramo no degradadas (Mosquera et al., 2023).

En el Ecuador se han reportado dos especies de *Polylepis* endémicas en el país, entre las cuales *P. simpsoniae* y *P. lanuginosa* y ocho especies nativas las cuales son *P. incana*, *P. reticulata*, *P. longipilosa*, *P. humboldtii*, *P. loxensis*, *P. ochreatea*, *P. microphylla* y *P. pauta* distribuidas desde los 2700 hasta 4350 msnm en las cordilleras Oriental y Occidental de los Andes ecuatorianos (Romoleroux et al., 2016). Por esta razón, la reforestación con *Polylepis* se considera una alternativa más adecuada, ya que esta especie favorece la diversidad, estructura y función del ecosistema, debido a que, su presencia puede tener un impacto positivo en la regulación hídrica y en el desarrollo de comunidades de flora y fauna con altos niveles de endemismo (Suárez et al., 2023).

Tabla 20.

Estrategia de restauración ambiental 3

Estrategia 3.	Fortalecimiento de actividades de reforestación y conservación de cobertura vegetal nativa	
Objetivo	Descripción	
Impulsar la reforestación de <i>Polylepis</i> y la preservación de la vegetación nativa mediante el fortalecimiento de acciones de conservación y restauración ecológica.	<ul style="list-style-type: none"> - La restauración y conservar los ecosistemas a través de la reforestación con <i>Polylepis pauta</i>, <i>Polylepis incana</i> y otras especies forestales nativas andinas en zonas donde sigue avanzando la tala de plantaciones forestales de pino y la protección de la vegetación nativa. - Se fortalecerán estrategias de conservación y restauración ecológica, promoviendo la regeneración natural, la recuperación de suelos degradados y la preservación de la biodiversidad. - Se pretende sensibilizar a las comunidades locales sobre la importancia de estos ecosistemas y fomentar su participación en acciones de manejo sostenible. 	
Actividades	Actores	Resultados
<ul style="list-style-type: none"> - Producción y siembra de <i>Polylepis</i> en zonas donde la tala de pino dejó expuesto el suelo - Manejo y control de especies introducidas como reforestación - Talleres, charlas y actividades comunitarias para promover la importancia de la reforestación y el 	<ul style="list-style-type: none"> - GAD Provincial de Tungurahua - GAD Municipal de Quero - GAD parroquial Rumipamba - Poblaciones aledañas a la zona de estudio 	<ul style="list-style-type: none"> - Reforestación de especies de <i>polylepis</i> se regenerará los páramos en Ecuador para promover la resiliencia climática a largo plazo, la seguridad hídrica, garantizar beneficios económicos y de conservación a las comunidades de la zona de estudio. - Reducción de la erosión hídrica y del suelo, mejorando las variables hidrológicas como la infiltración y mayor estabilidad del suelo en las áreas reforestadas.

-
- | | | |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Establecer sistemas de seguimiento para identificar y controlar la expansión de la agricultura y ganadería en áreas sensibles dentro de la franja de protección del páramo de la microcuenca Hualcanga. - Organizar talleres y programas educativos para informar sobre las consecuencias negativas de las prácticas actuales y las alternativas sostenibles. - Establecer mecanismos para detectar y sancionar la invasión de áreas protegidas o el uso no autorizado de recursos en la zona de protección. | <ul style="list-style-type: none"> - GAD Provincial de Tungurahua - GAD Municipal de Quero - GAD parroquial Rumipamba - Poblaciones aledañas a la zona de estudio | <ul style="list-style-type: none"> - Disminución de la expansión de la frontera agrícola en la zona de páramo para evitar el alto impactos negativos en la zona alta de la microcuenca - Restauración del paisaje natural de zonas degradadas cómo el páramo - Recuperación del ecosistema degradado en el cerro Igualata - Prevención y mitigación del aumento de degradación de grado medio a grado alto o muy alto en la zona alta de la microcuenca Hualcanga |
|--|---|---|
-

4.2 Discusión de los Resultados

4.2.1 Variaciones temporales de cobertura vegetal y transformación de los ecosistemas en la zona alta de la microcuenca Hualcanga

4.2.1.1 Validación de la clasificación

De acuerdo con (Tobar et al., 2023), en su investigación menciona que la matriz de confusión fue utilizada mayoritariamente para demostrar la exactitud y errores que ocurren durante la clasificación. Asimismo, con la construcción de las matrices de confusión, se obtienen valores de precisión mediante la comparación de la clasificación de la cobertura de cada año con la información proporcionada por los mapas de cobertura y uso de suelo, validando estos resultados con datos reales recopilados en campo (Damian et al., 2018; L. V. Jaramillo & Antunes, 2018). Por lo que, a partir de la construcción de la matriz de confusión para cada año, se demostró que la precisión global de los tres años 2004 – 2014 – 2024 demostraron una confiabilidad mayor al 90%, debido a que los valores de precisión se determinan exclusivamente a partir de los datos obtenidos en los mapas a partir de las imágenes satelitales y los registros reales en campo a partir de los puntos de control.

De acuerdo con (Poveda et al., 2022), en su investigación menciona que cuando el índice kappa refleja valores entre 0.81 a 1, se considera como una clasificación casi perfecta. Además, los resultados que coinciden entre esos valores, representan una concordancia de buena calidad, con una mejor fiabilidad que otros métodos tradicionales (L. V. Jaramillo & Antunes, 2018). Por lo que, partiendo de este análisis se determinó que la confiabilidad de

los resultados para los años 2004 – 2014 – 2024 tuvieron porcentajes que varían entre 87.6 y 90.6%, los cuales fueron aceptados como una buena aproximación a las condiciones reales, permitiendo de esta forma demostrar la realidad de los cambios en el uso del suelo ocurridos en el área de estudio a lo largo de los años.

4.2.1.2 Cambio de uso de suelo

Como consecuencia de la acogida de nuevas políticas económicas y ambientales la presencia de plantaciones forestales con especies exóticas (pino), presentó una notable disminución en la cobertura natural de los páramos, denotando que una mala decisión puede alterar los servicios ecosistémicos (Mazón et al., 2017; Vargas & Linares, 2011). De acuerdo con (Chuncho & Chuncho, 2019), la introducción de especies forestales exóticas en los páramos ecuatorianos, han sido cuestionadas por las afectaciones que ocasiona, mientras que (Mosquera et al., 2023) menciona que se debe restringir la forestación con pinos en estas áreas y se debe tener una mejor planificación en cuanto al uso y ocupación del suelo, ya que su ausencia compromete la capacidad de proveer los servicios de generación y regulación de caudales.

A lo largo de los periodos 2004 –2014 – 2024 la cobertura forestal y páramo han perdido significativamente territorio, ya que se sigue con la expansión agrícola y pastoreo. Este aumento podría estar relacionado con el constante crecimiento demográfico y la necesidad de encontrar nuevas áreas para la producción de alimentos y satisfacer las necesidades de la población, lo que provocó rápidos cambios en los usos del suelo y un aumento en la intensificación de los sistemas productivos.

Durante las visitas técnicas, se observó la tala bajo fines económicos de las plantaciones forestales de pino dejando suelos desnudos, la presencia de ganado bovino y de cultivos como papa (*Solanum tuberosum*), habas (*Vicia faba*), cebolla (*Allium cepa*), zanahoria (*Daucus carota*) y pasto (*Pennisetum clandestinum*), lo que refleja una diversificación agropecuaria en respuesta a la creciente demanda demográfica. Estos cambios en el uso de suelo en la parte alta de la microcuenca Hualcanga están provocando la degradación del ecosistema, aumentando el riesgo por erosión. La erosión es una problemática que sigue provocando una disminución de la capacidad de retención y contenido de agua, aumento de las pérdidas por evapotranspiración y el tiempo de movilidad del agua (Chuncho & Chuncho, 2019).

En áreas donde el suelo es rico en nutrientes como es el caso de los suelos del páramo de cuencas hidrográficas, las plantaciones forestales exóticas de pino pueden ocasionar un gran desequilibrio en la estructura del suelo, dando como resultado un ecosistema degradado y un incremento en áreas donde los suelos expuestos son susceptibles a cualquier tipo de erosión (Perez, Segovia, et al., 2018). Los impactos del uso del suelo son altamente diversos, como el incremento de la variabilidad del caudal y a una disminución de la capacidad de regulación hidrológica y del rendimiento hídrico de las cuencas (Ochoa et al., 2016).

4.2.2 Zonificación de la magnitud, susceptibilidad y severidad de la desertificación mediante el modelo USLE

4.2.2.1 Factor de erosividad de la lluvia (R)

Estudios como el de (Ricardo et al., 2022), para obtener el factor R con estimaciones confiables y con moderadas variabilidad, se realizaron correlaciones de precipitaciones en un periodo de 20 años, cuyos resultados demostraron que la subcuenca del Río Palacios en Cuba, presentó una alta agresividad de las precipitaciones en la región generando un riesgo de degradación del suelo por erosión. Así mismo, en este estudio se realizó una correlación de precipitaciones en el periodo entre 2004 – 2022 para cada una de las estaciones, lo que demostró un análisis acertado para el comportamiento de la erosividad a través del Índice de Fournier Modificado (IFM).

Además, en la zona alta de la microcuenca Hualcanga el factor de erosividad de lluvia (R) se obtuvo valores superiores a 122.9 MJ mm/ha h año dando como resultado un riesgo por erosión pluvial alta, ya que la agresividad de la lluvias podría generar mayores escorrentías y erosiones en el suelo. Por su parte, (J. Jaramillo, 2021) reportaron una relación similar mencionando que en áreas de mayores precipitaciones y pendientes, las zonas tienden a tener riesgos de erosión entre moderada, grave y muy grave.

4.2.2.2 Factor de longitud y pendiente de la ladera (LS)

En el caso de la microcuenca Hualcanga, los valores del factor LS se establecieron entre un rango moderado y alto, esto se debe principalmente a que la zona alta de la microcuenca ocupa territorio del Cerro Igualata, mismo que se encuentra a más de 4000 msnm. A su vez, (Arias et al., 2023), mencionaron que las tasas de erosión aumentan en los Andes ecuatorianos centrales y del sur, ya que al ser regiones montañosas presentan características climáticas y geomorfológica tienden a ser susceptibles a la erosión por el escurrimiento generado por el aumento de la pendiente y las alturas pluviométricas.

4.2.2.3 Factor cobertura y manejo del suelo (C)

En zonas montañosas de los Andes, se confirmó una alta susceptibilidad a la erosión debido a las tasas promedio y máximas de erosión registradas en la cuenca media-alta del río Mira principalmente por la expansión de actividades antrópicas como las zonas agrícolas y ganaderas que generalmente, invaden zonas altas de la cordillera (Arias et al., 2023). Esto sucede similar a la zona alta de la microcuenca Hualcanga, ya que se observó que el crecimiento demográfico generó la necesidad de que la zona agropecuaria se expanda hacia las coberturas de páramo.

Por otro lado, es fundamental mencionar que no sólo las malas prácticas agrícolas generan erosión, sino que todas las coberturas de suelo estén sujetas a pérdidas por erosión (Ganasri & Ramesh, 2016; Lianes et al., 2009). Sin embargo, en la investigación de (Arias et al., 2023), la presencia de cobertura natural no perturbada es el factor más importante de protección porque previene la pérdida de suelo incluso en pendientes pronunciadas. Por esta razón, en la cobertura de páramo se presentó un factor LS con riesgo de erosión moderado a pesar de ubicarse en la parte más alta de la zona estudio.

4.2.2.4 Factor de erosionabilidad del suelo (K)

En el caso de la zona de estudio de la microcuenca Hualcanga, la parte alta ubicada en el cerro Igualata forma parte de la cadena montañosa y volcánica de la zona centro del país, presentó propiedades físicas y químicas del suelo, demostraron una alta presencia de arenas gruesas y limo en su estructura, con texturas franco arenosas y con alto contenido de materia orgánica principalmente por ser una zona montañosa de los andes.

4.2.2.5 Pérdida media anual de suelo (A)

El factor A representó la erosión actual por la que sufre la zona alta de la microcuenca Hualcanga, cuyos valores se encontraron entre 1 – 322 (Ton / ha año), donde la mayor superficie de la zona de estudio sufre un tipo de erosión media a moderada principalmente en las categorías de plantación forestal y zona agropecuaria. La susceptibilidad a la erosión demostró que la microcuenca presentó una vulnerabilidad media a alta a la erosión hídrica y por pérdida de suelo, debido a que su cobertura natural (páramo) ha sido removida por las actividades antrópicas y en efecto tiene menor cantidad de materia orgánica, ya que los cambios en el uso de suelo, alterar los procesos hidrológicos como la infiltración, compactación del suelo y aumento de la escorrentía.

Así mismo, (Zambrano & Cabrera, 2021), en su investigación en Manabí, indicó que el modelo USLE determinó que la erosión por acción hídrica es muy frecuente en zonas con presencia de prácticas agrícolas y con fuertes pendientes, similar al caso, de la microcuenca Hualcanga, donde en el factor de erosividad de lluvia, presentó un grado de erosión hídrica principalmente por las condiciones climáticas y el territorio. Por otro lado, en la investigación de (Parrado & Valcárcel, 2013), menciona que las zonas más susceptibles a la erosión en la cuenca de la quebrada El Mochuelo (Bogotá, Colombia) son las zonas de suelos desnudos, ya que anteriormente existía plantaciones forestales de especies exóticas y el estado erosivo actual que presenta la cuenca, fue debido al mal uso del suelo, por la deforestación realizada en la década de los 40 y 50, por esto, en la zona de estudio de esta investigación, los cambios de uso de suelo ocurridos en la zona alta de la microcuenca, de páramo a plantación forestal y de páramo a zona agropecuaria, hace que esta zona de estudio sea susceptible a la erosión en un grado medio, debido a que el mayor territorio es nativo, esto provoca que la erosión no llegue a un mayor grado.

4.2.3 Causas y las consecuencias de los procesos de degradación para promover medidas de recuperación.

De acuerdo con la investigación de (Perez, Segovia, et al., 2018), menciona que en la cuenca del río Juqueri, los problemas de degradación se deben principalmente a los cambios en el uso del suelo que ejercen una fuerte presión ambiental, y recomiendan que una gestión en la cuenca mejorará estos problemas ambientales y socioeconómicos. En el caso de la zona alta de la microcuenca Hualcanga, a pesar de presentar una degradación de nivel medio, se propusieron estrategias de restauración ambiental con el objetivo de que esta degradación sea controlada y no pase de un nivel alto. De modo que para las Estrategias de Restauración Ambiental se tomaron en cuenta: 1, a la educación ambiental para tomar conciencia, sensibilización, conocimiento y participación entre la toma de decisiones y las comunidades; 2, las actividades productivas sostenibles para lograr un equilibrio entre las variables ambientales y socioeconómicas; 3, la reforestación con especies nativas y endémicas de *Polylepis*, debido a su capacidad en la regulación hídrica y en el desarrollo de comunidades de flora y fauna con altos niveles de endemismo; y 4, la zonificación de zonas de protección como el páramo del Cerro Igualata para evitar la expansión agrícola y aumentar los niveles de degradación de la microcuenca

En otras investigaciones como el caso de (Del Barrio et al., 2020) se propone la implementación de un “Programa integral de control, descontaminación y saneamiento de

las cuencas hídricas”, y esto se debió principalmente a que el grado de degradación de dos principales cuencas hídricas que atraviesan el centro-norte de la provincia de Río Negro es relativamente alto, cuyas problemática no sólo han afectado los aspectos ambientales sino los aspectos socioeconómicos. No obstante, en la microcuenca Hualcanga su nivel de degradación medio permite aun la búsqueda de soluciones a corto y largo plazo mediante la propuestas de estrategias de restauración ambiental.

Por otro lado, (Montoya et al., 2024) para la microcuenca El Potrero de la república mexicana, se construyó una propuesta de restauración ecológica con *Agaves* nativos en zonas con altos niveles de perturbación en sistemas productivos y forestales, por sus características físicas y biológicas que ofrecen beneficios ambiental y socioeconómicos. Así mismo, una de las estrategias restauración ambiental propuestas para la zona alta de la microcuenca Hualcanga fue la reforestación con *Polylepis* en zonas degradadas por la tala de plantaciones forestales de pino, ya que los bosques de esta especie tienen beneficios ambientales como albergar una biota única, regular la escorrentía y mejorar la captación de agua, reducen la erosión de los suelos, retienen sedimentos y nutrientes (Cuyckens & Renison, 2018).

Los bosques de *Polylepis* son elegidos no sólo porque los suelos donde crecen presentan altas tasas de infiltración, favoreciendo la conservación de los recursos hídricos, sino también por su capacidad de adaptarse a un amplio rango altitudinal, entre 2.700 y 4.350 msnm en las cordilleras Oriental y Occidental de los Andes ecuatorianos. Además, su rápido crecimiento y frondosidad lo hacen más ventajoso en comparación con otras especies forestales como el *Quishuar* (*Buddleja incana*) que, aunque habita en zonas altoandinas entre los 2.200 y 3.500 msnm, tiene un desarrollo más lento.

Conclusiones

- A través de la interpretación de imágenes satelitales se determinó los cambios ocurridos en el uso y la cobertura de suelo de los periodos 2004 – 2014 – 2024. Las categorías analizadas fueron páramo, plantación forestal y zona agropecuaria, donde la cobertura agropecuaria aumentaba territorio significativamente cada 10 años debido a la expansión de estas actividades antrópicas en la zona de páramo y plantación forestal que ha sido talada comprometiendo los servicios ambientales que la zona alta de la microcuenca Hualcanga ofrece.
- Con el modelo USLE, se determinó la susceptibilidad a la degradación en la zona alta de la microcuenca Hualcanga, siendo esta de grado medio. Si bien, el páramo del Cerro Igualata posee mecanismos naturales para la conservación de los suelos y mantener el funcionamiento de los servicios ambientales, la expansión agropecuaria y las plantaciones forestales de pino han generado alteraciones que facilitan la pérdida de suelo y nutrientes volviéndolo más susceptible a los procesos erosivos demostrando que es un ecosistema vulnerable a la degradación.
- La susceptibilidad a los procesos de degradación y erosión en la microcuenca Hualcanga se deben principalmente a los cambios en el uso de suelo que han ido ocurriendo con a lo largo de los años. Estos cambios, comprometen los componentes ambientales, sociales y económicos, por lo que se propusieron medidas de restauración ambiental las cuales incluyeron educación ambiental, proyectos para fomentar agricultura y ganadería sostenible, reforestación de especies nativas como *Polylepis* y conservación de cobertura vegetal nativa y limitación de actividades antrópicas en zonas de protección las cuales generarán beneficios ambientales, economicos y sociales.

Recomendaciones

- Utilizar imágenes satelitales de distintas plataformas web como Landsat y Sentinel, ya que la diferencias de los años y su resolución permitirá mejores resultados y comparar períodos clave mediante análisis multitemporal.
- Complementar el análisis del factor de erosividad de lluvia con datos de los anuarios de estaciones meteorológicas, datos de precipitación de plataformas web e imágenes satelitales, y estudios en campo para una mejor calibración del modelo USLE.
- Realizar estudios participativos con comunidades locales para identificar prácticas agrícolas y actividades humanas que influyen en la degradación y evaluar la relación entre cambios en la cobertura del suelo y factores socioeconómicos para diseñar estrategias de manejo sostenible.

Referencias Bibliográficas

- Acevedo, I., Sánchez, A., & Mendoza, B. (2021). Evaluation of the level of soil degradation in two productive systems in the Quibor depression. II. soil quality. *Bioagro*, 33(2), 127–134. <https://doi.org/10.51372/BIOAGRO332.6>
- Aguirre, O. T., Pérez, J., Aguirre, C. A., Monterroso, A. I., & Gallardo, J. F. (2023). Water erosion, soil organic carbon redistribution and soil and water conservation: a review. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 29(3), 47–60. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.10.075>
- Álvarez, A. J., Yustres, L. F., & Ivanova, Y. (2020). Estimación del cambio de la capacidad de regulación hídrica como respuesta a los cambios de coberturas de la tierra (Caso de estudio: Cuenca alta del río Chinchiná, Caldas, Colombia). *Revista EIA*, 18(35), 1–11. <https://doi.org/10.24050/reia.v18i35.1465>
- Aramayo, V., Nosetto, M., & Cremona, M. V. (2024). Análisis de la susceptibilidad a la erosión hídrica en una cuenca de la Patagonia árida bajo distintos escenarios. *Investigaciones Geográficas*, 81, 181–199. <https://doi.org/10.14198/ingeo.25246>
- Arellano, J. L., & Ruiz, L. E. (2018). Evaluación y tendencias de los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*, 95, 1–22. <https://doi.org/10.14350/riig.59467>
- Arias, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2023). Estimation of soil erosion through the RUSLE model. Case study: upper-middle basin of Mira River in Andean-Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, 79, 207–230. <https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- Arias, P., Saz, M. Á., & Escolano, S. (2024). Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, 81, 155–179. <https://doi.org/10.14198/ingeo.25248>
- Berrones, G., Crespo, P., Ochoa, A., Wilcox, B. P., & Célleri, R. (2022). Importance of Fog and Cloud Water Contributions to Soil Moisture in the Andean Páramo. *Hydrology*, 9(4), 2–18. <https://doi.org/10.3390/hydrology9040054>
- Calero, D., Martínez, C., & Menjívar, J. C. (2021). Evaluación de modelos para estimar la erosividad de la lluvia en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 70(2), 198–210. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.95115>
- Calispa, M., Vasconez, F. J., Santamar, S., & Samaniego, P. (2023). Los suelos de los

- páramos del Ecuador. In R. Hofstede, P. Mena, & E. Suárez (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 40–75). USFQ PRESS.
- Campbell, T., Booth, E., Gratton, C., Jackson, R., & Kucharik, C. (2022). Agricultural Landscape Transformation Needed to Meet Water Quality Goals in the Yahara River Watershed of Southern Wisconsin. *Ecosystems*, 25(3), 507–525. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00668-y>
- Castillo, G. A., & Gonzales, K. J. (2016). *Estrategias para la reducción del riesgo de erosión, microcuenca Quebrada-Negra, Vereda Piluma, municipio de Sasaima Cundinamarca.*
- Chuncho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión Páramos del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71–81.
- Cuyckens, G. A. E., & Renison, D. (2018). Ecología y conservación de los bosques montanos de Polylepis. Una introducción al número especial. *Ecologia Austral*, 28(1), 157–162. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.1.766>
- Dabadie, M., Pérez, C., Arturi, M., Goya, J., & Sandoval, M. (2018). Calibración del método de pérdida de peso por ignición para la estimación del carbono orgánico en Inceptisoles del NE de Entre Ríos. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 117(1), 157–162. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/70942>
- Damian, D., Márquez, C., García, V., Rodríguez, M., & Recalde, C. (2018). Transiciones sistemáticas en el uso y la cobertura del suelo en una microcuenca alto andina, Ecuador 1991-2011. *Revista Espacios*, 39(32), 1–8.
- Del Barrio, R., Ocampo, M., & Larrañaga, M. (2020). Políticas públicas y gobernanza ambiental: lineamientos para un programa integral de control, descontaminación y saneamiento de las cuencas hídricas rionegrinas (Argentina). *Sección Ciencias Sociales*, 23(5), 72–85. <https://revelo.uncoma.edu.ar/index.php/Sociales/article/view/2982/59836>
- Delgado, J. (2020). Estimation of soil loss using the usLe model and GIS tools in the chillón river basin, Lima, Peru. *South Sustainability*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.21142/ss-0101-2020-007>
- Díaz, M., Navarrete, J., & Suárez, T. (2019). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22(22), 64–75.

- Echavarría, F. G., Medina, G., & Ruiz, J. A. (2020). Effects of rainfall pattern changes due to global warming on soil water erosion in grasslands and other vegetation types in the state of Zacatecas, Mexico. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, *11*(2), 63–74. <https://doi.org/10.22319/RMCP.V11S2.4694>
- Estrada, R., Hidalgo, C., Guzmán, R., Almaraz, J., Navarro, H., & Etchevers, J. (2017). Soil quality indicators to evaluate soil fertility. *Agrociencia*, *51*(8), 813–831.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. In *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación* (Cuarta). file:///C:/Users/Alina Belen Ortiz/Downloads/a0541s00 (1).pdf
- Ferrer, Y., Ramírez, A., Plasencia, A., & Abasolo, F. (2024). Impact of land use and landscape fragmentation on water quality of the Teaone river in Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *40*, 15–36. <https://doi.org/10.20937/RICA.54900>
- Ganasri, B. P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, *7*(6), 953–961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>
- García, A. E., & Leal, Y. E. (2019). Análisis a la protección del Estado a los ecosistemas de páramo. *Justicia*, *24*(35). <https://doi.org/10.17081/just.24.35.3400>
- Hofstede, R., Llambí, D., Peralvo, M., Beltrán, K., Calispa, M., & Mosquera, G. (2023). El cambio climático en el páramo del Ecuador. In R. Hofstede, P. Mena, & E. Suárez (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (Vol. 1, pp. 324–353). USFQ Press.
- Izquierdo, J., & Arévalo, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, *26*, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Jaramillo, J. (2021). Diagnóstico de la erosión hídrica del suelo aplicando modelo U.S.L.E mediante herramientas SIG. *Polo Del Conocimiento*, *6*(4), 609–631. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i4.2589>
- Jaramillo, L. V., & Antunes, A. F. (2018). Detección de cambios en la cobertura vegetal mediante interpretación de imágenes Landsat por redes neuronales artificiales (RNA). Caso de estudio: Región Amazónica Ecuatoriana. *Revista de Teledetección*, *51*, 33–46.

<https://doi.org/10.4995/raet.2018.8995>

- Lianes, E., Marchamalo, M., & Roldán, M. (2009). Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 217–235. www.cia.ucr.ac.cr
- López, A., Bueno, P., Arreola, J. G., & Pérez, J. E. (2017). Conservation Activities of Soils Identified Through Indices Kappa Indices in Northeast of Durango, Mexico. *Agrociencia*, 51(6), 591–605. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000600591&lang=es%0Ahttp://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n6/1405-3195-agro-51-06-00591.pdf
- MAE. (2015). Mapa de Cobertura y Usos de la tierra. *SENPLADES/ Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo MAGAP/Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca MAE/Ministerio Del Ambiente*, 1–12. <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/06/Mapa-de-Cobertua-y-uso-de-la-Tierra.pdf>
- Mazón, M., Maita, J., & Aguirre, N. (2017). *RESTAURACIÓN DEL PAISAJE EN LATINOAMÉRICA: EXPERIENCIAS Y PERSPECTIVAS FUTURAS Memorias del Primer Congreso Ecuatoriano de Restauración del Paisaje* (Issue December).
- Mendoza, M., Giler, A., Aguilar, C., & Pimentel, R. (2021). Evaluación del uso y cobertura del suelo en la cuenca río Chico. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 8(13).
- Montatixe, C. I., & Eche, M. D. (2021). Degradación del suelo y desarrollo económico en la agricultura familiar de la parroquia Emilio María Terán, Píllaro. *Siembra*, 8(1), 0–21. <https://doi.org/10.29166/siembra.v8i1.1735>
- Montero, J. (2023). Importancia de las cuencas Cachi Mayu y Cajamarca en Sucre: una revisión basada en ecorregiones, políticas y servicios ambientales. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 10(3), 106–125. <https://doi.org/10.53287/mgso3359ju99y>
- Montoya, J., Osorno, T., Valdés, A., & Hernández, J. (2024). Environmental Characterization of Native Agaves for Ecological Restoration in a Micro-Basin of the Sierra Gorda of Guanajuato. *Digital Ciencia @UAQRO*, 17(1), 55–63.

- <https://revela.uncoma.edu.ar/index.php/Sociales/article/view/2982/59836>
- Moreira, A., Mirandola, P., Pinto, A. L., Salinas, E., & de Oliveira, I. (2020). Integrated management of river basins: Possibilities and advances in the analysis of land use and land cover. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 69–85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>
- Mosquera, G., Ochoa, A., Pesántez, J., Crespo, P., & Celleri, R. (2023). Hidrología de los páramos en el Ecuador. In R. Hofstede, P. Mena, & E. Suárez (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 76–101). USFQ PRESS. <https://doi.org/10.18272/usfqpress.71.c259>
- Novoa, J. F. (2017). Análisis de la degradación de los paramos debido a las actividades productivas en este ecosistema. *Universidad Militar Nueva Granada*, 1–12. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17229/NovoaUsaqu%E9nJeffersonFabi%E1n2017.pdf;jsessionid=2796320D77294A619A711308B393EAFC?squence=3>
- Núñez, J., Pérez, J., & Prado, J. (2023). Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(6), 1–14. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i6.3148>
- Ochoa, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(16), 4074–4089.
- Olivares, B., Lobo, D., & Verbist, K. (2015). Aplicación del modelo USLE en parcelas de erosión bajo prácticas de conservación de suelos y aguas en San Pedro de Melipilla, Chile. *Ciencia e Ingeniería*, 36(1), 3–10.
- Palacios, L., Paz, F., Oropeza, J., Figueroa, B., Martínez, M., Ortiz, C., & Exebio, C. (2018). Corrector atmosférico en imágenes Landsat. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 309–321. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.232>
- Parrado, C., & Valcárcel, F. (2013). Cuantificación de la pérdida potencial de suelos para evaluar la susceptibilidad del suelo a la erosión cuenca hidrográfica quebrada “el mochuelo.” *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 16, 171–178.

- Paz, F. (2018). Relative atmospheric corrections of satellite images: Invariant patterns and atmospheric models. *Terra Latinoamericana*, 36(1), 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.228>
- Perez, D., Segovia, J., Cabrera, P., Delgado, I., & Martins, M. (2018). Uso del suelo y su influencia en la presión y degradación de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 41–57. <https://doi.org/10.22490/21456453.2089>
- Perez, D., Solarte, G. J., Pantoja, J., & Martins, M. (2018). Dinámica espacio-temporal del uso de suelo y su efecto sobre la degradación de los recursos hídricos: caso de la cuenca del río Juqueri – Brasil. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 15–28.
- Pérez, I., & Mende, A. (2018). Análisis espacial de susceptibilidad de erosión en una cuenca hidrográfica del trópico húmedo de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(1), 1–26. <https://doi.org/10.15359/rca.52-1.1>
- Pham, T. G., Degener, J., & Kappas, M. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>
- Pinargote, J., Palma, R., & Pinargote, R. M. (2021). Erosión hídrica en la cuenca alta del río guineal, del cantón 24 de Mayo, Ecuador. *Polo Del Conocimiento*, 6(3), 1992–2004. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2487>
- Poveda, Y., Bermúdez, M. A., & Gil, P. (2022). Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 44(2), 51–72. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022002>
- Prado, J. V., Rivera, P., de León, B., Carrillo, M., & Martínez, A. (2017). Calibration of the usle and musle soil loss models in a mexican forest watershed: El malacate case study. *Agrociencia*, 51(3), 265–284.
- Ricardo, M., Gómez, A., & Cutie, V. (2022). Erosividad de las lluvias en Finca Tierra Brava de la subcuenca (S1) Río Los Palacios. *Ingeniería Agrícola*, 12(4), 13–18. https://www.researchgate.net/publication/365904426_Erosividad_de_las_lluvias_en_Finca_Tierra_Brava_de_la_subcuenca_S1_Rio_Los_Palacios

- Romoleroux, K., Muriel, P., Sklenář, P., Ulloa, C., Espinel, D., & Romoleroux, C. (2023). La flora de los páramos ecuatorianos: Orígenes, diversidad y endemismo. In R. Hofstede, P. Mena, & E. Suárez (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 104–125). USFQ Press.
- Sarmiento, E., Fandiño, S., & Gómez, L. (2018). Índices de calidad del suelo. Una revisión sistemática. *Ecosistemas*, 27(3), 130–139. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1598>
- Schürz, C., Mehdi, B., Kiesel, J., Schulz, K., & Herrnegger, M. (2020). A systematic assessment of uncertainties in large-scale soil loss estimation from different representations of USLE input factors—a case study for Kenya and Uganda. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(9), 4463–4489. <https://doi.org/10.5194/hess-24-4463-2020>
- Segarra, P. (2017). Documento de Evaluación Nacional de degradación de la tierra mediante la Metodología LADA-WOCAT. *Ministerio Del Ambiente de Ecuador; FAO*, 46–49. https://www.wocat.net/documents/1007/DOCUMENTO_DE_EVALUACIÓN_NACIONAL_DE_DEGRADACIÓN_DE_LA_TIERRA__DEL_ECUADOR_DS-SLM.pdf
- Sherwood, S., Paredes, M., Oyarzún, P., & Borja, R. (2023). Agricultura y páramos en el centro-norte del Ecuador: Cultivo de las tierras altas, amenazadas ambientales y oportunidades para el futuro. In R. Hofstede, P. Mena, & E. Suárez (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 246–281). USFQ Press.
- Singh, M. C., Sur, K., Al-Ansari, N., Arya, P. K., Verma, V. K., & Malik, A. (2023). GIS integrated RUSLE model-based soil loss estimation and watershed prioritization for land and water conservation aspects. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1136243>
- Sotelo, R., Abaunza, O., García, K., & Blanco, M. (2021). Estimation of water erosion for the current use and potential erosion of the soil in the experimental uni agricultural farm, Las Flores municipality, Masaya Departmen. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 11(2), 28–47. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v11i2.13023>
- Suárez, E., Encalada, A. C., Chimbolema, S., Jaramillo, R., Duchicela, S., Segovia-Salcedo, C., Caiza, J., Pazmiño, G., Guamán, M., Riveros, D., Hofstede, R., & Hofstede, R. (2023). Capítulo 6 Ecología de los páramos del Ecuador: un paisaje altoandino integrado por múltiples ecosistemas. In R. Hofstede, P. Mena, & E. Suárez (Eds.), *Los páramos del Ecuador: Pasado, presente y futuro* (pp. 156–187). USFQ Press.

- Tobar, R., Gao, Y., Mas, J. F., & Cambrón, V. (2023). Clasificación de uso y cobertura del suelo a través de algoritmos de aprendizaje automático: revisión bibliográfica. *Revista de Teledetección*, 62, 1–19. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.19014>
- Trespalacio, G., & Anastacio, N. J. (2023). Effects of land use and land cover on Soil-Water Infiltration: A Literature Review and Bibliometric Analysis. *Journal of Ecosystem Science and Eco-Governance*, 5(2), 45–53. <https://doi.org/10.54610/jeseg.v5i2.77>
- Valencia, R., Serrano, D., & Galárraga, R. (2014). Cambios de uso del suelo en cuencas alto andinas y consecuencias en la disponibilidad de agua. Caso de estudio en los páramos del Nevado Cayambe, Ecuador. *Revista Politécnica*, 34(2), 79. <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.22d6506442a5473ab92c82b3fe1c77d5&lang=es&site=eds-live>
- Vargas, O., & Linares, P. (2011). *Reviviendo nuestros páramos. Restauración ecológica de páramos*. 183.
- Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., & Ortiz, L. (2019). Cuencas hidrográficas. In Universidad Politécnica Salesiana (Ed.), *Jurnal Sains dan Seni ITS* (Primera). <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf> <http://fiskal.kemenkeu.go.id/ejournal> <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001> <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055> <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006> <https://doi.org/10.1>
- Zambrano, J., & Cabrera, E. (2021). Propuesta para el control y manejo de cárcavas en sectores rurales de la Provincia de Manabí. *Dominio de Las Ciencias*, 7(5), 891–911. <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/2288/4952>
- Zhang, H., Wei, J., Yang, Q., Baartman, J., Gai, L., Yang, X., Li, S. Q., Yu, J., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2017). An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds. *Geoderma*, 308, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.006>

Apéndice

Apéndice A. Fase de recolección de muestras y laboratorio

Tabla 22.

Anexo fotográfico de la fase de laboratorio



Apéndice B. Permeabilidad y orden K

Tabla 23.

Datos para obtener la permeabilidad y orden K para la figura 4 y 5

Uso de suelo	Estructura		Clase textural			Permeabilidad	Orden K
	Clase	N°	%a	%L	%A		
Páramo	Granular media o gruesa	3	58	90	12	3	0.27
Plantación forestal	Granular media o gruesa	3	66	24	10	3	0.18
Zona agropecuaria	Granular media o gruesa	3	78	18	4	3	0.20

Apéndice C. Resultados de la fase de laboratorio

Tabla 24.

Datos de las muestras de suelo obtenidas en el laboratorio

N° muestra	Coordenadas		Uso de suelo	Textura	Estructura	MO %
	X	Y				
Pr1	763069.18	9834937.36	Páramo	Franco arenoso	Granular	7.35
Pr2	763142.96	9834797.5	Páramo	Franco arenoso	Granular	6.77
Pr3	763743.56	9834661.81	Páramo	Franco arenoso	Granular	6.44
Pr4	763653.03	9834645.23	Páramo	Franco arenoso	Granular	6.60
Pr5	764162.77	9835103.48	Páramo	Arenoso franco	Granular	7.85
Pr6	764115.23	9835417.43	Páramo	Arenoso franco	Granular	7.98
Pr7	763975.83	9835720.21	Páramo	Franco arenoso	Granular	5.33
Pr8	764498.75	9837056.5	Páramo	Franco arenoso	Granular	5.86
Pr9	764831.46	9837720.15	Páramo	Franco arenoso	Granular	4.54
Pr10	764972.31	9837936.64	Páramo	Franco arenoso	Granular	5.90
Pf1	764622.58	9835732.08	Pino	Franco arenoso	Granular	6.75
Pf2	764993.39	9836412.55	Pino	Franco arenoso	Granular	6.84
Pf3	764867.38	9836529.33	Pino	Franco arenoso	Granular	2.99
Pf4	764991.75	9836749.22	Pino	Franco arenoso	Granular	4.02
Pf5	763808.91	9836413.45	Pino	Franco arenoso	Granular	3.42
Za1	764155.3	9835922.53	Pasto	Arenoso franco	Granular	2.87
Za2	764926.9	9837529.2	Pasto	Arenoso franco	Granular	4.70
Za3	764379.21	9837821.69	Pasto	Arenoso franco	Granular	4.18
Za4	763987.23	9837743.99	Pasto	Arenoso franco	Granular	2.93
Za5	764123.48	9837926.23	Pasto	Arenoso franco	Granular	4.59
Za6	764385.53	9838005.12	Cultivo	Franco arenoso	Granular	5.09
Za7	765313.18	9838427.76	Cultivo	Franco arenoso	Granular	4.58
Za8	765455.29	9838575.58	Cultivo	Arenoso franco	Granular	3.78
Za9	765453.75	9838173.13	Cultivo	Arenoso franco	Granular	3.76
Za10	765555.27	9838357.64	Cultivo	Arenoso franco	Granular	3.21