



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL**

Transiciones en los cambios de uso y cobertura del suelo de la Quebrada Hualcanga, páramo del Igualata, provincia de Tungurahua

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero
Ambiental**

Autores:

Sislema Flores Freddy Geovanny
Tapia Serna Jorge Alejandro

Tutor:

Ing. Carla Fernanda Silva Padilla Mgs

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros Freddy Geovanny Sislema Flores y Jorge Alejandro Tapia Serna, con números de cédula de ciudadanía 0605232891, 0503916686 respectivamente, autores del trabajo de investigación titulado: Transiciones en los cambios de uso y cobertura del suelo de la Quebrada Hualcanga, páramo del Igualata, provincia de Tungurahua, certificamos que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 10 de octubre de 2024.



Sislema Flores Freddy Geovanny

C.I: 0605232891



Tapia Serna Jorge Alejandro

C.I: 0503916686

ACTA FAVORABLE - INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los 19 días del mes de SEPTIEMBRE de 2024, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado los estudiantes **JORGE ALEJANDRO TAPIA SERNA** con CC: 0503916686 y **FREDDY GEOVANNY SISLEMA FLORES** con CC: **0605232891**, de la carrera **INGENIERIA AMIENTAL** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado "**TRANSICIONES EN LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO DE LA QUEBRADA HUALCANGA, PÁRAMO DEL IGUALATA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA**", por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



Ing. Carla Fernanda Silva Padilla Mgs

TUTOR(A)

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Transiciones en los cambios de uso y cobertura del suelo de la quebrada Hualcanga, páramo del Igualata, provincia de Tungurahua**”, presentado por Sislema Flores Freddy Geovanny cédula de identidad número 0605232891 y Tapia Serna Jorge Alejandro, con cédula de identidad número 0503916686, bajo la tutoría de Ing. Carla Fernanda Silva Padilla Mgs, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a la fecha 11 de octubre del 2024.


Marcel Paredes Herrera, Mgs
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Anita Ríos Rivera, Dra.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



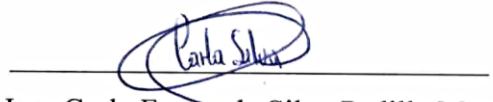
Patricio Santillán, MsC.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



C E R T I F I C A C I Ó N

Que, **SISLEMA FLORES FREDDY GEOVANNY** con CC: **0605232891** y **TAPIA SERNA JORGE ALEJANDRO** con CC: **0503916686**, estudiantes de la Carrera **AMBIENTAL**, Facultad de **INGENIERIA**; han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado ” **TRANSICIONES EN LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO DE LA QUEBRADA HUALCANGA, PÁRAMO DEL IGUALATA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA**”, cumple con el 4%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 21 de octubre de 2024



Ing. Carla Fernanda Silva Padilla Mgs
TUTOR(A)

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mis padres, Jorge y Verónica, quienes con su apoyo incondicional y enseñanzas me han mostrado que con esfuerzo y dedicación es posible lograr grandes metas y luchar por mis sueños.

A mi hermana, por ser esa fuente de motivación que me impulsa a seguir adelante y esforzarme por alcanzar nuestros sueños, y por convertirse junto a mí en el orgullo de nuestros padres.

A mis seres queridos que ya no están con nosotros, pero que siempre fueron un pilar fundamental en mi vida, dejando una huella imborrable que quedara por siempre en mi vida.

Y a toda mi familia, por estar siempre conmigo, pendientes en cada paso de este camino dándome apoyo y consejos. Su cariño y presencia han sido claves para superar los retos y alcanzar cada una de mis metas, por eso les estaré profundamente agradecido siempre.

Jorge Alejandro Tapia Serna

A mis padres José y Lucía, con todo mi amor y gratitud agradezco profundamente el apoyo incondicional y los sacrificios que hicieron para permitirme alcanzar esta nueva meta en mi vida. Sus palabras de aliento, perseverancia y, sobre todo, su ejemplo constante han sido mi mayor inspiración gracias a ustedes he llegado hasta aquí.

A mis hermanas que, a pesar de la distancia, Siempre han estado presentes en mi vida, son un Pilar fundamental en mi vida, y su amor ha sido una fuente de fortaleza

A mis primos Norma y Polivio gracias por sus valiosas enseñanzas, el trabajo que me han brindado y sus sabios consejos. Me han demostrado que, aunque la vida esté llena de obstáculos, nunca debo rendirme, su ejemplo ha sido un faro en los momentos más difíciles, y las lecciones que me han brindado quedarán connmigo para siempre.

A ti Génesis por ser una persona maravillosa, por creer en mí incluso en los momentos más oscuros, y por no dudar jamás de lo que soy capaz de lograr. Ha sido mi compañera fiel en las dificultades, con tu apoyo inquebrantable, me ha ayudado a convertirme en una mejor versión de mí mismo. Estoy profundamente agradecido con todos ustedes por todo lo que hemos compartido, los amo.

Freddy Geovanny Sislema Flores

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía y fortaleza para alcanzar un objetivo más en mi vida, por la salud y las bendiciones que nos da cada día.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a nuestra tutora, la Ing. Carlita Silva, por su apoyo incondicional y dedicación. Su conocimiento y experiencia han sido fundamentales para la realización de esta investigación. También deseo extender mi gratitud a todos los ingenieros, cuyas enseñanzas y orientación me han permitido adquirir valiosos conocimientos a lo largo de este proceso.

Agradezco a mis padres y a mi hermana, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida. Su apoyo económico y moral ha sido invaluable, brindándome la fuerza y los recursos necesarios para seguir adelante.

A mis abuelitos y a toda mi familia, quienes han sido un apoyo emocional y económico fundamental. Aunque a veces sus contribuciones parezcan pequeñas como siempre me dicen, para mí son de una ayuda inmensa y siempre las valoro profundamente.

Jorge Alejandro Tapia Serna

A Dios, quien en su infinita bondad me ha permitido llegar hasta este momento, le agradezco por ser mi refugio y mi fortaleza. El al guiado cada paso de este viaje de mi vida, derramando bendiciones a mi alrededor y presentando en mi camino a personas extraordinarias que han tocado mi corazón.

Quiero también expresar mi profundo agradecimiento a nuestra tutora, la Ing. Carla Silva, por su apoyo incondicional. Su paciencia, su tiempo y su dedicación han sido fundamentales para que este proyecto hoy sea una realidad. Gracias a sus valiosos consejos y enseñanzas, hemos podido ampliar nuestro conocimiento y crecer no solo como estudiantes, sino como personas.

A mis padres, cuya fe y apoyo incondicional han sido la base de todo esto, no encuentro palabras suficientes para expresar mi gratitud. Su esfuerzo inquebrantable para brindarme una educación sólida es un regalo que valoro más allá de lo que las palabras pueden decir. Gracias por su amor inagotable, sus sabios consejos y por enseñarme que nada llega de la noche a la mañana, que el trabajo duro y la perseverancia son claves. Ustedes son la luz que ilumina mi vida, los amo con todo mi corazón.

Finalmente, al resto de mi familia, quiero agradecerles de todo corazón. De una u otra manera siempre estuvieron ahí para brindarme su apoyo, enseñándome que nunca estamos realmente solos, y que incluso el gesto más pequeño de ayuda, cuando viene de corazón tiene un valor inmenso. Siempre los llevaré conmigo

Freddy Geovanny Sislema Flores

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS.	
ÍNDICE DE FIGURAS.	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. INTRODUCCION.....	16
1.1. Planteamiento del problema	16
1.2. Justificación	17
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. General	18
1.3.2. Específicos	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Sistema de Información Geográfica (SIG).....	19
2.2. Teledetección	19
2.3. Análisis espacial	19
2.4. Fotointerpretación.....	19
2.5. Uso y cobertura de suelo.....	20
2.6. Estudios multitemporales.....	20
2.7. Modelos para analizar los cambios de uso de suelo	20
2.8. Métodos para la clasificación de imágenes satelitales.....	20
2.9. Clasificación orientada a objetos	20
2.10. Validación de clasificación	21
2.11. Matriz de confusión.....	21
2.12. Coeficiente Kappa.....	22
2.13. Matriz de tabulación cruzada	22
2.14. Análisis de intensidad.....	23
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....	25
3.1. Diseño de Investigación.....	25
3.2. Delimitación del área de estudio.....	26

3.3.	Obtención y tratamiento de imágenes satelitales	26
3.3.1.	Corrección error de bandeaamiento	27
3.3.2.	Corrección radiométrica y atmosférica	27
3.3.3.	Georreferenciación y mejoramiento de resolución	28
3.4.	Clasificación orientada a objetos	28
3.5.	Validación de la clasificación	28
3.6.	Confiabilidad de la clasificación.....	29
3.7.	Detección de cambios significativos.....	29
3.8.	Análisis de intensidad	30
	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1.	Clasificación y delimitación de los usos de suelo en el área de estudio	33
4.2.	Establecimiento de puntos de control y estratificación.....	33
4.3.	Validación de la clasificación	34
4.4.	Cambio de uso del suelo de la quebrada Hualcanga.....	38
4.5.	Dinámica de cambio de uso del suelo.....	42
4.6.	Análisis de Intensidad.....	44
4.6.1.	Nivel de rapidez	44
4.6.2.	Nivel de naturaleza.....	45
4.6.3.	Nivel de Trascendencia	48
4.6.3.1.	Trascendencia en términos de ganancias	48
4.6.3.2.	Trascendencia en términos de perdidas	50
	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	53
5.1.	Conclusiones	53
5.2.	Recomendaciones	54
6.	BIBLIOGRÁFIA	55
7.	ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Matriz de confusión	21
Tabla 2. Valoración del coeficiente Kappa	22
Tabla 3. Matriz de tabulación cruzada.....	23
Tabla 4. Características de las imágenes satelitales	27
Tabla 5. Parámetros de la validación de la clasificación supervisada	29
Tabla 6. Ecuaciones para el análisis del nivel de rapidez.....	30
Tabla 7. Ecuaciones para el análisis del nivel de naturaleza	31
Tabla 8. Ecuaciones para el análisis del nivel de trascendencia en términos de ganancias	32
Tabla 9. Ecuaciones para el análisis del nivel de trascendencia en términos de perdidas	32
Tabla 10. Matriz de confusión 2004	35
Tabla 11 . Matriz de confusión 2014	36
Tabla 12 . Matriz de confusión 2023	37
Tabla 13. Índice Kappa para los 3 años de estudio.....	38
Tabla 14. Uso y cobertura de suelo quebrada Hualcanga.....	40
Tabla 15. Matriz de tabulación cruzada en términos porcentuales para periodo 2004-2014 de la zona de estudio.....	41
Tabla 16. Matriz de tabulación cruzada en términos porcentuales para periodo 2014-2023 de la zona de estudio.....	42
Tabla 17. Índices de cambio del intervalo de tiempo 2004-2014.....	42
Tabla 18. Índices de cambio del intervalo de tiempo 2014-2023.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de la metodología.....	25
Figura 2. Ubicación Quebrada Hualcanga.....	26
Figura 3 . Usos y cobertura de suelo del área de estudio.	33
Figura 4 . Puntos de control tomados en la zona de estudio.....	34
Figura 5. Mapas de uso y cobertura del suelo quebrada Hualcanga	40
Figura 6. Pérdidas vs ganancias periodo 2004-2014.....	43
Figura 7. Pérdidas vs ganancias periodo 2014-2023.....	44
Figura 8. Rapidez de cambio interanual del área de estudio.	45
Figura 9. Análisis de intensidad a nivel de naturaleza para ganancias y pérdidas periodo 2004 - 2014.....	46
Figura 10. Análisis de intensidad a nivel de naturaleza para ganancias y pérdidas periodo 2014 - 2023.....	47
Figura 11. Trascendencia en términos de ganancias para la categoría Plantación forestal.	49
Figura 12. Trascendencia en términos de ganancias para la categoría Zona agropecuaria.	50
Figura 13. Trascendencia en términos de pérdidas para la categoría de Plantación forestal	51
Figura 14. Trascendencia en términos de ganancia para la categoría de Zona agropecuaria	52

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue analizar las transiciones en los cambios de uso y cobertura del suelo de la quebrada Hualcanga, páramo del Igualata, provincia de Tungurahua, durante los años 2004, 2014 y 2023, identificando cuatro categorías de uso del suelo: Plantación forestal, Páramo, Área antrópica y Zona agropecuaria, abarcando un total de 4880.61 hectáreas. Se recolectaron 589 puntos de control distribuidos uniformemente en el área de estudio, los cuales sirvieron para validar las clasificaciones anuales obtenidas mediante el método de clasificación supervisada orientada a objetos. Las matrices de confusión correspondientes a 2004, 2014 y 2023 mostraron precisiones globales del 92.83%, 93.93% y 94%, respectivamente. El índice Kappa evidenció una concordancia casi perfecta, alineándose a la investigación propuesta por Landis & Koch (1997), lo que indica una alta confiabilidad en la clasificación.

Entre 2004 y 2023, los ecosistemas de la quebrada Hualcanga experimentaron significativos cambios en el uso del suelo. El páramo se redujo en 205.02 ha, mientras que la superficie ocupada por plantación forestal disminuyó en 296.46 ha. En contraste, la Zona agropecuaria creció, alcanzando el 85.53% de la superficie en 2023. De igual manera el área antrópica mostró un crecimiento, aunque en menor magnitud. Los principales factores fueron la expansión agrícola y ganadera, afectando los servicios ecosistémicos. Las matrices de tabulación cruzada revelaron una mayor persistencia en la zona agropecuaria, con mayor ganancia de terreno registrada en esta categoría.

Durante el período 2004-2023, el páramo mostró fluctuaciones notables en los tres niveles de análisis. En el nivel de rapidez, el cambio fue significativo entre 2004-2014 con una pérdida activa del 3,21% atribuida a la expansión agrícola y urbana, pero disminuyó entre 2014-2023. A nivel de naturaleza, el páramo experimentó pérdidas activas por encima del umbral en ambos periodos, aunque también registró pequeñas ganancias. Finalmente, a nivel de trascendencia, las pérdidas del páramo fueron dirigidas y crecieron significativamente en el segundo periodo, evidenciando una mayor presión por actividades humanas.

Palabras claves: Análisis espacial, análisis multitemporal, clasificación supervisada, índice, matriz, kappa, intensidad.

ABSTRACT

The objective of the research was to analyze the transitions in land use and land cover changes in the Hualcanga creek, Igualata páramo, Tungurahua province, during the years 2004, 2014 and 2023. Four land use were identified: forest plantation, páramo, anthropic area and agricultural zone, covering a total of 4880.61 hectares. A total of 589 control points, uniformly distributed throughout the study area, were collected and used to validate the annual classifications obtained through the object-oriented supervised classification method. The confusion matrices corresponding to 2004, 2014 and 2023 showed overall accuracies of 92.83%, 93.93% and 94%, respectively. The Kappa index evidenced an almost perfect agreement, aligning with the research proposed by Landis & Koch (1997), indicating high reliability in the classification.

Between 2004 and 2023, the ecosystems of the Hualcanga creek experienced significant changes in land use. The páramo was reduced by 205.02 ha, while the area occupied by forest plantations decreased by 296.46 ha. In contrast, the agricultural zone expanded, reaching 85.53% of the area in 2023. Similarly, the anthropic area also showed growth, although to a lesser extent. The main factors driving the changes were agricultural and livestock expansion, which affected ecosystem services. The cross-tabulation matrices revealed greater persistence in the agricultural zone, with the highest land gain recorded in this category.

During the 2004-2023 period, the páramo showed notable fluctuations in all three levels of analysis. At the level of rapidity, the change was significant between 2004 and 2014, with an active loss of 3.21% attributed to agricultural and urban expansion; however, this loss decreased between 2014 and 2023. At the level of nature, the páramo experienced active losses above the threshold in both periods, although small gains were also recorded. Finally, at the level of transcendence, páramo losses were directed and showed a significant increase in the second period, evidencing greater pressure from anthropogenic activities.

Key words: spatial analysis, multitemporal analysis, supervised classification, index, matrix, kappa, intensity.



Reviewed by:

Mg. Lourdes del Rocío Quinata Encarnación

ENGLISH PROFESSOR

C.C 1803476215

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.

Los páramos son sistemas ecológicos de alta montaña prevalentes en la región neotropical, localizados a altitudes que varían entre 3 000 y 4 700 m.s.n.m. En Ecuador, los ecosistemas de páramo cubren una superficie aproximada de 1 833 834 hectáreas, lo que equivale aproximadamente al 5% del territorio nacional. Estos ecosistemas desempeñan una función esencial como fuentes de agua de gran importancia, además de actuar como reservas significativas de carbono en el suelo. Asimismo, presentan altos niveles de diversidad biológica y han servido como medio de sustento para las comunidades humanas a lo largo del tiempo (García et al., 2019).

En las últimas décadas, se ha reconocido la relevancia del uso del suelo como un factor primordial en la investigación del cambio climático a nivel mundial. Los ecosistemas terrestres sufren impactos considerables por modificaciones en la cobertura del suelo. Las actividades humanas, generan efectos directos sobre los ecosistemas terrestres y aumentan su susceptibilidad a las consecuencias del cambio climático (Damian et al., 2018).

Según Pinos (2016), el Ecuador ha sido testigo de transformaciones significativas en su vegetación natural y en el uso del suelo. El desplazamiento de la frontera agrícola, caracterizado por un rápido y desordenado crecimiento de la población, sumado a la presión ejercida por estas áreas sobre el territorio, ha conducido al desplazamiento de las áreas de cultivos y ganadería. En los páramos, se han observado cambios significativos en la cobertura y el uso del suelo, estos procesos están estrechamente vinculados a la deforestación, la expansión agrícola, la ganadería y la construcción de infraestructura vial (Anzoategui & Gil, 2023)

El objetivo del presente estudio es analizar las transiciones en los cambios de uso y cobertura del suelo de la Quebrada Hualcanga en el Páramo del Igualata, para identificar de una manera más precisa los ecosistemas que han experimentado una mayor amenaza y aquellos que son susceptibles a degradación durante el período de análisis contemplado (Damian et al., 2018). El conocimiento adquirido a partir de esta investigación servirá como base sólida para implementar medidas específicas de conservación y protección en el futuro, con el fin de salvaguardar este valioso ecosistema.

1.1. Planteamiento del problema

A lo largo de la historia, el ecosistema del páramo ha experimentado una serie de perturbaciones derivadas principalmente de actividades antropogénicas, tales como el pastoreo, agricultura, quema de tierras y extracción de minerales (Chulde, 2014). Estas acciones humanas han generado un impacto significativo en la capacidad de regulación hídrica y la acumulación de carbono orgánico en el páramo y su intensificación ha conducido a una rápida expansión de la frontera agrícola (Ortega & Arias, 2022). El cambio y uso del suelo conlleva consecuencias adversas, como la fragmentación, deforestación y degradación de los ecosistemas. Estos procesos son responsables de la pérdida de cobertura vegetal en los ecosistemas naturales del páramo.

La modificación en el patrón de uso y cobertura del suelo provocada por actividades humanas intensivas puede acarrear una serie eventos que impactarán a

diversos actores y sectores de la sociedad, dando lugar al deterioro y disminución de la diversidad biológica (García, 2022). Según Kindu et al. (2013), las alteraciones de la cobertura y uso del suelo pueden tener consecuencias sustanciales en aspectos humanos, económicos y ambientales. Estas modificaciones conducen al aumento de erosión del suelo, reducción de riqueza biológica, y perturbaciones de servicios ecosistémicos esenciales. Como resultado, se interrumpen las prácticas socioeconómicas y se observa un incremento en la frecuencia de los desastres naturales.

Según García et al. (2019), los páramos ecuatorianos tienen la capacidad de almacenar entre 506 y 933 mm de agua al año, lo que equivale a aproximadamente dos tercios de la precipitación anual. Esto los convierte en una fuente crucial de suministro de agua potable para numerosas ciudades importantes de Ecuador. Sin embargo, los cambios en el uso del suelo y la cobertura terrestre representan una amenaza para los páramos, ya que pueden resultar en la degradación del suelo y verse agravados por el cambio climático. Estos factores pueden tener un impacto significativo en los seres humanos, la economía y el medio ambiente en general.

Se utilizó herramientas de análisis geoespacial y teledetección para delimitar y caracterizar los usos del suelo en el páramo en diferentes momentos temporales. Empleando técnicas de comparación visual, clasificación supervisada y análisis de series temporales para detectar y mapear las transiciones de uso del suelo. Por último, se realizó un análisis estadístico para identificar patrones temporales y determinar si los cambios han sido gradualmente acumulativos o han ocurrido de manera más acelerada en ciertos períodos.

1.2. Justificación

Los páramos desempeñan un papel fundamental como ecosistema proveedor y regulador de agua para todas las comunidades, ciudades y asentamientos ubicados en áreas más bajas. Ante esta situación, resulta de vital importancia contar con propuestas de gestión enfocadas en la preservación de las fuentes hídricas con el propósito de optimizar el bienestar socioeconómico de la población humana que reside en el páramo y se beneficia de los recursos y servicios que éste proporciona (Chulde, 2014).

La conservación de estos servicios ecosistémicos frente a los cambios ambientales y antrópicos se ha convertido en una prioridad clave, por lo tanto, el conocimiento sobre la resiliencia del páramo tiene implicaciones directas para la gestión y conservación a largo plazo (García et al., 2019). Por ende, el análisis de páramos beneficia a diversas partes interesadas, incluyendo a comunidades locales, organizaciones ambientales, gobiernos y entidades reguladoras, así como empresas y sectores productivos. Cada una de estas partes interesadas puede utilizar la información obtenida para tomar decisiones informadas y contribuir a la conservación y el uso sostenible de los páramos.

Con el fin de mejorar la comprensión de la dinámica del uso y la cobertura del suelo, se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta de análisis, lo que permitió identificar los cambios significativos y secuenciales en el patrón de uso del suelo.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

- Analizar las transiciones en los cambios de uso y cobertura del suelo de la Quebrada Hualcanga, páramo del Igualata, provincia de Tungurahua.

1.3.2. Específicos

- Delimitar y estratificar los usos del suelo en el área de estudio
- Cuantificar los cambios que han ocurrido en los usos de suelo para identificar las ganancias, perdidas e intercambios.
- Analizar la intensidad de los cambios de uso y cobertura de suelo

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Chuvieco (1990) describe que los "Sistemas de Información Geográfica" (SIG) son reconocidos en la geografía y en varias disciplinas científicas, cuyo objetivo consiste en proporcionar datos fiables que respalden la toma de decisiones, permitiendo a los usuarios comprender las características de un área geográfica específica. Gracias a sus capacidades informáticas, los SIG permiten realizar operaciones complejas como la generalización cartográfica y la integración de variables espaciales, que serían difíciles de lograr con métodos convencionales. Además, integran dispositivos físicos especializados, diseñados para la gestión de datos espaciales, en conjunto con diversas aplicaciones interconectadas que posibilitan la ejecución de múltiples procesos de transformación de las variables espaciales introducidas en el sistema.

2.2. Teledetección

Chuvieco (1990) y Olaya (2017) mencionan que la teledetección se refiere al estudio y medición de las características de objetos sin necesidad de contacto físico directo con los mismos, lo que implica tanto la adquisición de imágenes desde altitudes terrestres o espaciales como su posterior procesamiento para fines específicos. En este contexto, la teledetección se convierte en una fuente esencial de información para los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que utiliza diversas técnicas que permiten obtener datos valiosos para el análisis y la comprensión de áreas geográficas.

2.3. Análisis espacial

Baxendale y Buzai (2011) y Rodríguez y Cabrera (2017) mencionan que el análisis espacial comprende un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas en el tratamiento de datos, lo que permite la representación, identificación de vínculos y el estudio de aspectos de un área geográfica. Este análisis de la información y su distribución geográfica posibilita, mediante representaciones gráficas, mapas y medidas de conexión espacial, comprender el fenómeno estudiado, explicando su causa en una ubicación particular y evaluando sus efectos en zonas adyacentes y viceversa. Así, se puede examinar ubicaciones, relaciones, características y cercanías en datos geoespaciales con el propósito de extraer información y conocimiento mediante la construcción de modelos.

2.4. Fotointerpretación.

Castro et al. (2023) y Flores (2017) en su investigación, mencionan que la fotointerpretación es el conjunto de principios y técnicas que permiten a identificar y deducir características de los fenómenos fotográficos, tomados de aviones de reconocimiento y satélites de observación. Esta técnica implica principios para deducir características de fenómenos capturados en fotos aéreas con el fin de reconocer áreas de cultivo, paisajes, territorios o características vegetativas, mediante criterios de color, textura y estructura.

2.5. Uso y cobertura de suelo

El uso de suelo en el contexto geográfico y territorial según, Rico y Rico (2019), se refiere a cómo las personas utilizan y ocupan el terreno para diferentes actividades. Estas actividades incluyen prácticas agrícolas, actividades ganaderas, asentamientos urbanos y espacios destinados al entretenimiento y recreación. Los aspectos socioeconómicos y culturales de una comunidad son los que determinan cómo se aprovechan los recursos naturales disponibles en un área determinada.

Por otro lado Suárez et al., (2017) menciona que la cobertura del suelo se refiere a la caracterización de los diferentes materiales y elementos físicos de la superficie terrestre. Esta información incluye detalles sobre los tipos de suelos, rocas, vegetación, cuerpos de agua y cualquier otro componente presente en la capa superficial de la tierra.

2.6. Estudios multitemporales

Condori et al. (2018) mencionan que el análisis multitemporal se refiere a un procedimiento de análisis digital que implica el uso de dos o más imágenes satelitales capturadas en la misma ubicación geográfica en diferentes momentos. Este proceso permite identificar cambios y variaciones en el paisaje a lo largo del tiempo, y brinda información sobre el uso del suelo y su evolución. Con este análisis, se pueden identificar áreas con cambios, tanto en ganancias como en pérdidas de cobertura terrestre, durante un periodo específico. Además, proporciona la capacidad de inferir la evolución del entorno natural o evaluar el impacto de las actividades humanas en el mismo.

2.7. Modelos para analizar los cambios de uso de suelo

Pinos (2016) y Reynoso et al. (2016) afirman que, en la actualidad los modelos de cambio de uso de suelo se han convertido en herramientas importantes para analizar los factores que provocan o alteran la dinámica del cambio de uso de suelo. Estos modelos ayudan a establecer patrones de transformación de cambio de uso de suelo, determinados por variables biofísicas, espaciales y socioeconómicas. Además, ayudan a la evaluación de la influencia de políticas de uso de tierra, permitiendo modificarlas y lograr un ordenamiento territorial más adecuado.

2.8. Métodos para la clasificación de imágenes satelitales

Según lo descrito por Suárez et al. (2017), las técnicas de clasificación de imágenes satelitales facilitan la elaboración de mapas temáticos de la cobertura del suelo. Los métodos tradicionales implican la interpretación visual de imágenes satelitales, así mismo, al implementar enfoques computacionales estos ayudan a tener una clasificación automática, rápida, precisa y rentable de las coberturas terrestres en las imágenes satelitales. La clasificación es vital para el estudio del cambio climático y el monitoreo de los servicios ecosistémicos

2.9. Clasificación orientada a objetos

Según Torrijos (2013) en su investigación describe a la clasificación orientada a objetos como un método de organizar datos en el que agrupamos objetos con características únicas que están interconectados. Por ejemplo, cuando analizamos una

imagen tomada por un satélite, la dividimos en varios objetos, cada uno representando algo específico y con atributos distintivos para su descripción. Al combinar estos atributos, creamos una estructura de significado que nos permite comprender las relaciones entre los objetos en la imagen. Esto nos ayuda a discernir la forma y la ubicación de los objetos en función de sus relaciones espaciales.

2.10. Validación de clasificación

La validación consiste en sacar una parte de los datos de la muestra de entrenamiento para usarlos como una prueba y verificar si los datos de los estimadores son efectivos y confiables dentro del proceso de clasificación en términos de su capacidad para asignar correctamente las clases geográficas correspondientes (Beltrán, 2019; Perea et al., 2009).

2.11. Matriz de confusión

Tal y como plantea Chuvieco (1990), después de realizar el muestreo, se obtiene un grupo de puntos de prueba, en los cuales se dispone de información sobre su cobertura real y la que se ha deducido a partir de la clasificación. Utilizando estos datos, es posible crear una matriz conocida como matriz de confusión, que registra los conflictos que surgen entre las diferentes categorías. Esta matriz es bidimensional, con las filas representando las clases de referencia y las columnas representando las categorías deducidas de la clasificación. Ambas filas y columnas tendrán el mismo número y significado, lo que significa que la matriz es cuadrada con una dimensión de $n \times n$, donde "n" es el número de categorías presentes

Tabla 1

Matriz de confusión

CLASES DE MAPA	CLASES DE CAMPO			Total	Precisión de usuario (UA)	Error de comisión
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3			
Categoría 1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{1+}	$\frac{P_{11}}{P_{+1}}$	$1 - (\frac{P_{11}}{P_{1+}})$
Categoría 2	P_{21}	P_{22}	P_{11}	P_{2+}	$\frac{P_{22}}{P_{+2}}$	$1 - (\frac{P_{11}}{P_{2+}})$
Categoría 3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{3+}	$\frac{P_{33}}{P_{+3}}$	$1 - (\frac{P_{11}}{P_{3+}})$
Total	P_{+1}	P_{+2}	P_{+3}			
Precisión del productor (PA)	$\frac{P_{11}}{P_{+1}}$	$\frac{P_{22}}{P_{+2}}$	$\frac{P_{33}}{P_{+3}}$			
Error de omisión	$1 + (\frac{P_{11}}{P_{+1}})$	$1 + (\frac{P_{22}}{P_{+2}})$	$1 + (\frac{P_{33}}{P_{+3}})$			

Nota. La tabla presenta una matriz de confusión utilizada para comparar clases de referencia del campo con las categorías obtenidas del mapa, tomada de Pontius et al. (2004).

2.12. Coeficiente Kappa

Según la investigación propuesta por Cohen (1960), el coeficiente kappa es un indicador que muestra el grado de acuerdo entre diferentes observadores y puede calcularse en tablas de cualquier tamaño, siempre y cuando se comparan dos observadores. El coeficiente kappa puede variar entre -1 y +1. Cuando se acerca a +1, indica un alto grado de concordancia entre los observadores. En cambio, si se acerca a -1, muestra un alto grado de discordancia entre los observadores. Un valor de $\kappa = 0$ indica que la concordancia observada es igual a la que se esperaría al azar.

El coeficiente K es simplemente la proporción de desacuerdos esperados por el azar que no ocurren, o alternativamente, es la proporción de acuerdos después de que el acuerdo por azar se elimina de la consideración, y es calculado por la siguiente expresión:

$$k = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

K= coeficiente Kappa;

p_o = la proporción de concordancia observada en las que los jueces;

p_e = la proporción de concordancia que se espera al azar;

$1 - p_e$ = grado de acuerdo entre los jueces debido al azar (Cohen, 1960).

Tabla 2

Valoración del coeficiente Kappa

Coeficiente kappa	Nivel de concordancia
0.81 – 1.00	Casi perfecta
0.61 – 0.80	Considerable
0.41 – 0.60	Moderada
0.21 – 0.40	Aceptable
0.00 – 0.20	Leve
<0.00	Pobre

Nota. La tabla presenta la escala del coeficiente kappa, utilizada para cuantificar el nivel de concordancia entre observadores, propuesta por Landis & Koch (1997).

2.13. Matriz de tabulación cruzada

De acuerdo al estudio propuesto por Pontius et al. (2004), define a la matriz de tabulación cruzada como una herramienta analítica fundamental para cuantificar las transiciones entre categorías de cobertura/uso de tierra en diferentes momentos temporales, permitiendo así caracterizar los patrones de cambio territorial. Esta matriz compara las clases temáticas presentes en dos mapas correspondientes a fechas distintas, donde las filas representan las categorías en el tiempo inicial y las columnas las categorías

en el tiempo final. Los valores de la diagonal principal indican la superficie que permaneció sin cambios para cada clase.

A un nivel de síntesis, el vector fila "Total" muestra la superficie ocupada por cada categoría en la fecha final, mientras que el vector columna "Total" contiene esas superficies, pero referidas al tiempo inicial. La diferencia entre ambos totales se denomina "cambio neto" y aunque aporta información valiosa, un cambio neto nulo no implica necesariamente ausencia total de modificaciones, ya que pueden haberse producido redistribuciones espaciales compensadas dentro de una misma categoría, con pérdidas en unas zonas, pero ganancias en otras. Este fenómeno de reorganización territorial intracategórica, donde el cambio de ubicación no altera la superficie total, se conoce como "intercambio" y no queda reflejado en las simples cifras de cambio neto (Pontius et al., 2004).

Tabla 3

Matriz de tabulación cruzada

		Tiempo 2				Tiempo	Perdida
		Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	total 1	
Tiempo 1							
Categoría 1		P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{1+}	$P_{1+} - P_{11}$
Categoría 2		P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{2+}	$P_{2+} - P_{22}$
Categoría 3		P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}	P_{3+}	$P_{3+} - P_{33}$
Categoría 4		P_{41}	P_{42}	P_{43}	P_{44}	P_+	$P_{4+} - P_{44}$
Tiempo total 2		P_{+1}	P_{+2}	P_{+3}	P_{+4}	1	
Ganancias		$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	$P_{+3} - P_{33}$	$P_{+4} - P_{44}$		

Nota. La tabla presenta la matriz de tabulación cruzada utilizada para cuantificar las ganancias y pérdidas de las categorías obtenidas del mapa en diversos períodos, tomada de Pontius et al. (2004).

2.14. Análisis de intensidad

Según Aldwaik y Pontius (2012) en su investigación describieron que el análisis de intensidad de cambio es un marco jerárquico cuantitativo que permite estudiar las ganancias y pérdidas de categorías a través de cálculos separados. Esto determina si una transición importante de una categoría “A” a una categoría “B” se puede explicar por un proceso intensivo, donde “A” gana sistemáticamente de B y/o “B” pierde sistemáticamente frente a “A”

Aldwaik y Pontius (2012) proponen que este análisis sigue una estructura jerárquica que comienza a nivel de intervalos de tiempo también conocida como nivel de rapidez, luego a nivel de categorías denominada también como naturaleza y finalmente a nivel de transiciones conocida también como trascendencia. Las áreas iniciales y finales de las categorías establecen una línea base uniforme para comparar los cambios

observados con los esperados. Esto permite definir con mayor claridad los patrones de cambio entre intervalos temporales y aproximarse a los posibles factores impulsores del proceso.

a) Rapidez

En su investigación Aldwaik & Pontius (2012) abordan el análisis a nivel de intervalo, también conocida como rapidez, en el que se evalúa la tasa de cambio total para cada segmento temporal. Se examina cómo la magnitud y la tasa de cambio anual fluctúan en los diferentes intervalos de tiempo. El resultado se contrasta con una tasa uniforme que existiría si los cambios anuales estuvieran distribuidos uniformemente a través del tiempo. Esta estimación permite determinar si los cambios son rápidos o lentos.

b) Naturaleza

Aldwaik & Pontius (2012a) señalan que el análisis a nivel de categoría denominada también como naturaleza examina la intensidad de cada categoría dentro de cada intervalo temporal con respecto a la tasa de cambio total revelada por el análisis a nivel de intervalo. Se evalúa cada categoría para medir cómo varían la intensidad y la magnitud de las pérdidas brutas y las ganancias brutas en el espacio. Si la intensidad de cambio de la categoría es superior al cambio uniforme, entonces la categoría se activa durante el intervalo. Por el contrario, si la intensidad de cambio es inferior a este, entonces la categoría se encuentra en estado latente.

c) Trascendencia

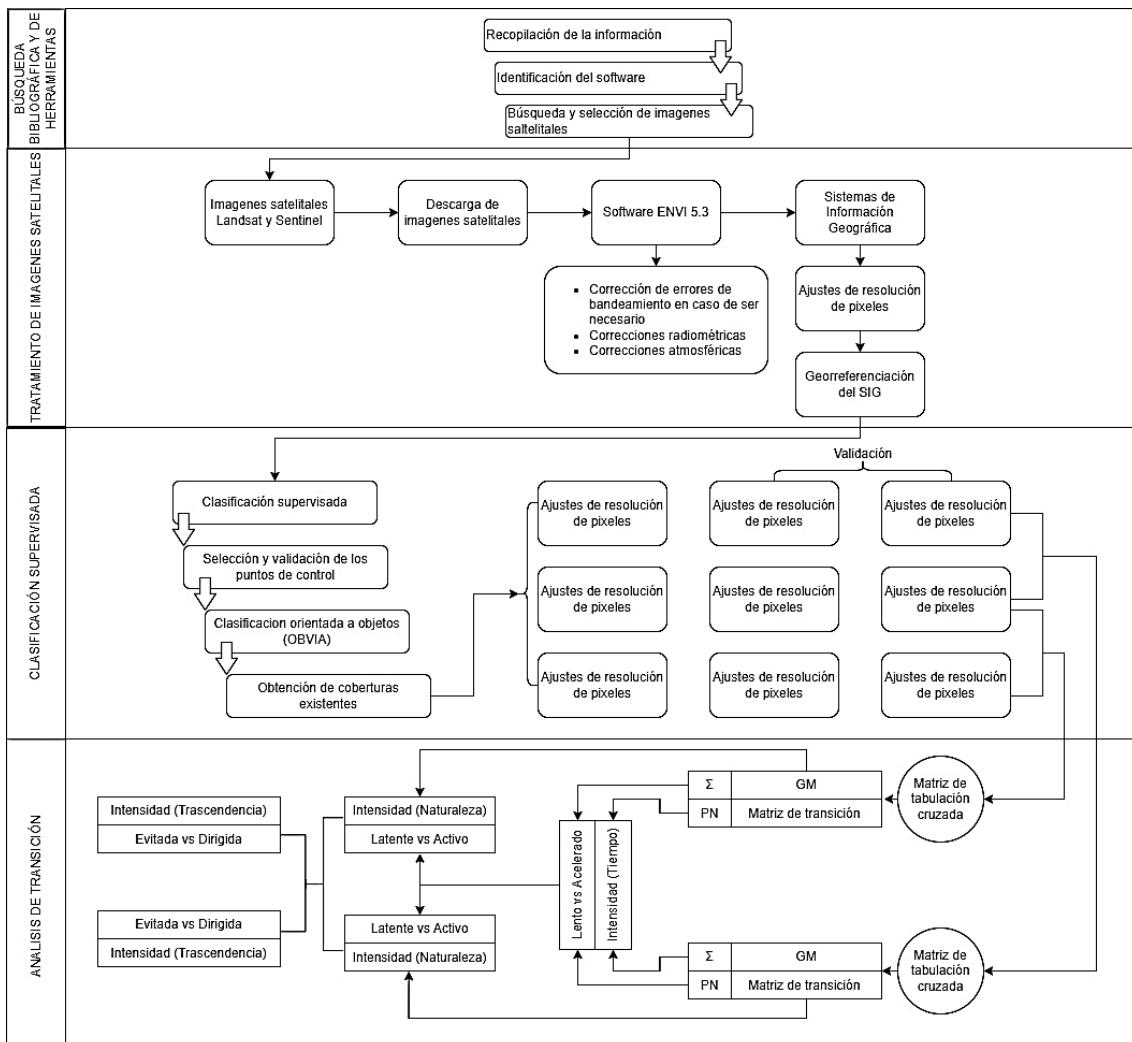
Aldwaik & Pontius (2012) indican que el análisis a nivel de transición nombrada también trascendencia evalúa la intensidad de la transición con respecto a la magnitud de las categorías y en relación con los resultados obtenidos de los análisis a nivel de categoría. Se considera cada transición de forma particular para examinar cómo varían la magnitud y la intensidad de dicha transición entre las categorías disponibles para esa transición. Cuando una categoría gana o pierde, este análisis puede identificar qué otras categorías están siendo intensivamente evitadas o dirigidas.

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

La Figura 1 presenta el esquema general de la metodología aplicada en la investigación, que se desarrolló en cuatro fases claramente detalladas. Esta metodología fue adaptada de la propuesta realizada por Aldwaik y Pontius (2012), y se ajustó a las necesidades específicas de la investigación, proporcionando una estructura ordenada y sistemática para guiar el proceso de análisis y obtención de resultados.

Figura 1

Esquema general de la metodología



Nota. La figura presenta el esquema metodológico seguido en la investigación, adaptado según las indicaciones de Aldwaik y Pontius (2012)

3.1.Diseño de Investigación.

3.1.1. Diseño Experimental

En el desarrollo del análisis multitemporal de cambios de uso y cobertura del suelo, se empleó un enfoque mixto que integra tanto elementos cuantitativos como

cualitativos. Esta combinación de métodos busca una comprensión minuciosa de los patrones y procesos relacionados con el uso del suelo en el tiempo.

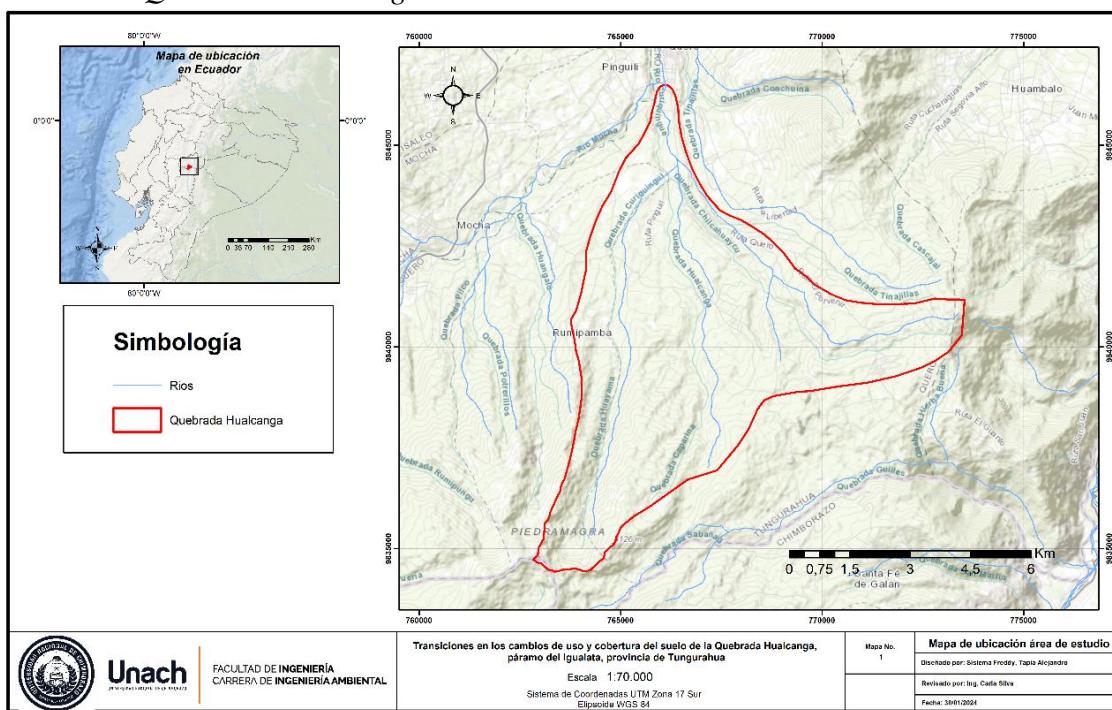
La investigación presentó un diseño correlacional debido a la comparación y contraste de imágenes satelitales y datos geoespaciales obtenidos en diferentes momentos temporales. Además, adoptó un enfoque experimental en el que se realizó el manejo controlado de variables independientes, como factores naturales, humanos y temporalidad por variables dependientes, como el cambio de cobertura y uso del suelo, para establecer relaciones causales y comprender los mecanismos subyacentes que impulsan estos cambios.

3.2. Delimitación del área de estudio

El área seleccionada para el desarrollo del trabajo de investigación fue la Quebrada Hualcanga en el Páramo del Igualata provincia de Tungurahua, ubicada dentro de la subcuenca del río Patate, como se muestra en la Figura 2. La quebrada abarca una extensión de 4.880,61 hectáreas y se encuentra a una altitud de aproximadamente 4,450 m.s.n.m. Su ubicación geográfica está en las coordenadas X=762958.73 e Y=9833493.06. Para la delimitación del área de estudio se utilizó cartografía temática obtenida del Instituto Geográfico Militar (IGM).

Figura 2

Ubicación Quebrada Hualcanga



3.3. Obtención y tratamiento de imágenes satelitales

Para la obtención de las imágenes satelitales necesarias en este estudio, se empleó el portal web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Se adquirieron imágenes del satélite Landsat, con una frecuencia de captura de 10 años, cubriendo el primer periodo de 2004 a 2014. Para el segundo periodo, de 2014 a 2023, se obtuvieron

imágenes con una frecuencia de captura de 9 años, empleando las imágenes de Landsat del 2014 y las imágenes del satélite Sentinel de la Agencia Espacial Europea para el 2023. Luego, se realizaron los respectivos tratamientos para su corrección mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el software de manejo de datos ráster, los cuales ayudaron a obtener una mejor calidad visual.

En la Tabla 4 se detalla la información de las imágenes satelitales obtenidas para los años 2004, 2014 y 2023.

Tabla 4

Características de las imágenes satelitales

Características	2004	2014	2023
Fecha de adquisición	2004-01-28 15:15:46	2014-10-30 15:26:51	2023-09-08 15:43:41
Sensor	Landsat 7 ETM+	Landsat 8 OLI	Sentinel 2B
Resolución espacial	30 m ²	30 m ²	10m ²
Proyección	UTM – WGS 84	UTM – WGS 84	UTM–WGS 84
Nubosidad	16%	40%	11%
Azimut (grados)	119.43	119.84	72.24
Elevación (grados)	53.38	64.09	58.46

Nota. La Tabla 4 presenta las características de las imágenes satelitales de 2004, 2014 y 2023, detallando fecha, sensor y resolución.

3.3.1. Corrección error de bandeamiento

Las imágenes capturadas por el sensor ETM+ en el satélite Landsat 7 a menudo exhiben errores conocidos como bandas o líneas, que resultan en la pérdida de información. Para la corrección de error de bandeamiento se empleó la herramienta llamada “*Gap Fill*” o “*Método de llenado de vacíos*”. Esta es una técnica que ha demostrado ser efectiva dentro de la investigación realizada por González, (2018), en la cual se logró llenar los datos faltantes mediante un algoritmo de triangulación para interpolar los pixeles vecinos y así completar las áreas sin información y corregir las distorsiones generadas por el sensor.

3.3.2. Corrección radiométrica y atmosférica

Mediante las correcciones radiométricas se eliminó las interferencias en los niveles digitales (ND) de las imágenes satelitales Landsat 7 (2004) y Landsat 8 (2014). Para eso se utilizó la herramienta “*Radiometric Calibration*” del software ENVI 5.3. Esta herramienta ayudo a convertir los niveles digitales en valores de radiancia espectral (Heileen et al., 2014).

Una vez que se determinó los valores de radiancia se realizaron las correcciones atmosféricas, para esto se utilizó la herramienta “*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH)*”, la cual utiliza información de los metadatos de la imagen como la fecha y hora de captura, la altura del sensor, ángulo de elevación, etc. Con esta herramienta se logró la minimización de la influencia de la atmósfera en la reflectancia

de la información de la imagen satelital, mediante la corrección de longitudes de onda en la región perceptible a través del infrarrojo cercano y de onda corta (Rani et al., 2017).

3.3.3. Georreferenciación y mejoramiento de resolución

Una vez realizada las correcciones radiométricas y atmosféricas se cargaron las imágenes resultantes al software ArcMap 10.5. Para la georreferenciación de las imágenes satelitales se procedió a la proyección a coordenadas UTM 17S mediante la herramienta “*Project Ráster*”.

Las imágenes satelitales proporcionadas por el sensor Landsat tienen un tamaño de pixel de 30x30m. Para el mejoramiento de la resolución se aplicó la metodología propuesta por Jaramillo (2015), el cual dentro de su investigación utilizó la herramienta “*Resample*” del software ArcMap y demostró ser efectiva para mejorar la resolución de las imágenes en este proceso.. Dentro de esta herramienta se seleccionó el método “*Nearest Neighbor*” el cual no afecta los niveles digitales de las imágenes, con esto no se afectan las categorías. De esta manera, se logró corregir la resolución a 15x15m. Finalmente se realizó el corte de las 3 imágenes satelitales en el área de estudio con el uso de la herramienta “*Clip*”.

3.4. Clasificación orientada a objetos

Inicialmente se evaluó los diferentes usos y coberturas de suelo presentes en la zona de estudio mediante información proporcionada por el GADM Quero (2020). Esta información ayudó a tener una idea clara sobre las coberturas y uso de suelo del área de estudio. Así mismo el informe del Ministerio del Ambiente (2013) sobre los principales usos de suelo permitieron definir las coberturas que son de interés para esta investigación: Páramo, Plantación forestal, Zona agropecuaria y Área antrópica. Posteriormente se llevaron a cabo 4 salidas de campo con el objetivo de establecer los puntos de control e información sobre las coberturas del suelo ya determinadas, las cuales ayudaron a validar los correspondientes análisis visuales de las imágenes satelitales.

Una vez que se estableció los puntos de control para cada categoría se trabajó con el método de Clasificación Orientada a Objetos (OBIA). Nemmaoui et al. (2017) & Vicente (2016), mencionan que OBIA consta de dos etapas principales. En la primera etapa, conocida como segmentación, se crean objetos al integrar píxeles similares entre sí. En la segunda etapa, denominada clasificación, se utilizó las características de los objetos generados anteriormente para asignar estos segmentos a diferentes categorías de cobertura del suelo mediante un proceso de clasificación. Si la segmentación es precisa, los objetos generados a partir de los píxeles de la imagen representarán de manera fiable los elementos del mundo real que son de interés

3.5. Validación de la clasificación

Para evaluar la precisión de la clasificación en cada escena, se calcularon muestras mínimas estadísticamente representativas para las coberturas de Páramo, Área antropogénica, Zona agropecuaria y Plantación forestal. Estos cálculos se realizaron con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%. Para selección de los puntos de validación del año 2004 se utilizó la aplicación Google Earth donde se determinaron

un total de 492 puntos de control. En cuanto al 2014 se usaron cartas topográficas y cartografía temática obtenida del Instituto Geográfico Militar (IGM), donde se obtuvieron 644 puntos de control. Finalmente, para el 2023 se determinaron 589 puntos de control con la salida de campo y la aplicación Google Earth.

Con esta información, se creó una matriz de confusión para evaluar el rendimiento de la clasificación supervisada, situando en las filas las clases o coberturas y en las columnas las mismas clases con datos reales de campo. Esta metodología de evaluación, utilizada también por Damián et al. (2018) y García et al. (2019) resultó ser efectiva en sus investigaciones.

3.6. Confiabilidad de la clasificación

Con el propósito de verificar la confiabilidad de la clasificación se realizó la matriz de confusión, donde se evaluaron diferentes parámetros que ayudaron a determinar el coeficiente Kappa. La precisión global (OA) es la probabilidad de que los pixeles estén clasificados correctamente. La precisión del productor (PA) indica la probabilidad de que una clase sea registrada adecuadamente. Finalmente la Precisión del usuario (UA), la cual indica la probabilidad de que el usuario asigne un pixel correcto para la clase específica a evaluar (Ayala et al., 2017). Estos datos se los obtuvo de los procesos de clasificación realizados en el software ArcMap, y se aplicaron las fórmulas detalladas en la Tabla 5.

Tabla 5

Parámetros de la validación de la clasificación supervisada

Precisión global (OA)	Precisión del productor	Precisión del usuario (UA)	Coeficiente kappa (K)
$OA = \frac{\sum_{i=1}^m P_{ii}}{N}$	$PA = \frac{P_{ii}}{P_{+j}}$	$UA = \frac{P_{ii}}{P_{i+}}$	$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$

Nota. Los parámetros han sido adaptados de Pontius et al. (2004), donde "P_{ii}" indica el número elementos de la diagonal de la matriz de confusión, "P_{+j}" es la suma de los pixeles de la clase "j", "P_{i+}" muestra la suma de los pixeles clasificados como la clase "i", "P_o" representa las concordancias observadas, "P_e" expresa las concordancias esperadas al azar, "N" = representa el número total de observaciones.

3.7. Detección de cambios significativos

Para detectar las transformaciones que experimentaron los diferentes tipos de cobertura terrestre en un lapso temporal determinado Se utilizó el enfoque de la matriz de tabulación cruzada, sugerido por Pontius et al. (2004), donde se analizó las pérdidas y ganancias de las cuatro categorías de cobertura del suelo en el sitio de estudio, durante los intervalos de tiempo de 2004-2014 y 2014-2023. Los datos fueron expresados como porcentajes del área total cubierta por cada tipo de cobertura terrestre.

Para evaluar los cambios en el uso del suelo, se emplearon los indicadores propuestos por Pontius et al.(2004), que se detallan en las ecuaciones 2,3,4,5 y 6. Estos indicadores contemplan el análisis de las ganancias, pérdidas, cambio total, cambio neto

e intercambio entre clases para cada categoría de cobertura terrestre identificada en los dos períodos de tiempo examinados como se muestra en la siguientes ecuaciones.

$$\text{Ganancias} \quad G_j = P_{+j} - P_{ii} \quad (\text{Ec.02})$$

$$\text{Pérdidas} \quad L_i = P_{i+} - P_{ii} \quad (\text{Ec.03})$$

$$\text{Cambio total} \quad D_{Tj} = G_j + L_i \quad (\text{Ec.04})$$

$$\text{Cambio neto} \quad D_j = |L_i - G_j| \quad (\text{Ec.05})$$

$$\text{Intercambio} \quad S_j = 2 \times \text{MIN}(P_{i+} - P_{ii}, P_{+j} - P_{ii}) \quad (\text{Ec.06})$$

3.8. Análisis de intensidad

Para el análisis de intensidad, en donde se muestra cómo cambia la cobertura del suelo, se empleó la metodología propuesta por Aldwaik & Pontius (2012), que evalúa la dinámica de estos cambios en tres niveles. El primer nivel es la rapidez, que puede ser lenta o acelerada; el segundo es la naturaleza, que puede ser latente o activa; y el tercero es la trascendencia, que se clasifica en cambios que son evitados o dirigidos intencionalmente.

En la Tabla 6 se muestran las fórmulas empleadas para el análisis de Rapidez, donde se examina la tasa global de cambio para cada período de tiempo, en el cual se analiza cómo varían el tamaño y la velocidad anual del cambio en los diferentes intervalos. Estas fórmulas, utilizadas de manera efectiva en las investigaciones de Aldwaik y Pontius (2012) y Huang et al. (2012), permiten comparar los resultados con una tasa uniforme que se observaría si los cambios anuales se distribuyeran de manera constante a lo largo del tiempo.

Aldwaik y Pontius (2012) y Huang et al. (2012) en sus investigaciones utilizaron con éxito las ecuaciones que se presentan en la Tabla 6, donde la primera ecuación calcula el porcentaje de cambio anual en el área de estudio para cada intervalo. La segunda calcula el valor de cambio anual uniforme, que ocurriría si el cambio total se distribuyera uniformemente entre el inicio y el final. Si la intensidad de un intervalo es menor que la uniforme, el cambio fue relativamente lento. Si es mayor, fue relativamente rápido.

Tabla 6

Ecuaciones para el análisis del nivel de rapidez

$$St = \frac{\frac{\text{Superficie de cambio durante el intervalo } Y}{\text{Superficie total}}}{\text{Duracion del intervalo}} * 100\% \quad St = \frac{\frac{\sum_{j=1}^J [(\sum_{i=1}^J P_{tij}) - P_{tjj}]}{\{\sum_{j=1}^J (\sum_{i=1}^J P_{tij})\}}}{Y_{t+1} - Y_t} * 100\%$$

$$U = \frac{\frac{\text{Superficie de cambio durante todos los intervalos}}{\text{Superficie total}}}{\text{Duracion de todos los intervalos}} * 100\% \quad U = \frac{\frac{\sum_{t=1}^{T-1} \{\sum_{j=1}^J [(\sum_{i=1}^J P_{tij}) - P_{tjj}]\}}{\{\sum_{j=1}^J (\sum_{i=1}^J P_{tij})\}}}{Y_T - Y_1} * 100\%$$

Nota. Ecuaciones utilizadas para el análisis de la rapidez de cambio de suelo, que permiten determinar la velocidad que estos varían, definiéndolos a ser lentos o rápidos, tomado de Aldwaik y Pontius (2012) .

Las ecuaciones presentadas en la Tabla 7, utilizadas eficazmente por Aldwaik y Pontius (2012) y Huang et al. (2012), se emplean para el análisis a nivel de Naturaleza, donde este estudia la intensidad de cada categoría dentro de cada intervalo respecto a la tasa total de cambio del análisis de intervalos. Examina cómo varían espacialmente la intensidad y tamaño de las pérdidas y ganancias brutas, comparándolos con una tasa de cambio anual uniforme. Una categoría se considera “activa” si su ganancia o pérdida supera el promedio anual, y “latente” si está por debajo.

Tabla 7

Ecuaciones para el análisis del nivel de naturaleza

$$G_{tj} = \frac{\frac{G_{tj}}{\text{Duración del intervalo } Y}}{\frac{\text{Superficie de ganancia bruta de categoría } j \text{ en el intervalo } Y}{\text{Superficie de categoría } j \text{ en la última fecha del intervalo } Y} * 100\%} = \frac{\frac{\sum_{j=1}^J [(\sum_{i=1}^J P_{tij}) - P_{tjj}]}{\{Y_{t+1} - Y_t\}}}{\sum_{j=1}^J (\sum_{i=1}^J P_{tij}) * 100\%}$$

$$L_{ti} = \frac{\frac{L_{ti}}{\text{Duración del intervalo } Y}}{\frac{\text{Superficie de pérdida bruta de categoría } i \text{ en el intervalo } Y}{\text{Superficie de categoría } i \text{ en la primera fecha del intervalo } Y} * 100\%} = \frac{\frac{\{(\sum_{i=1}^J P_{tij}) - P_{tii}\}}{\{Y_{t+1} - Y_t\}}}{\sum_{j=1}^J P_{tii} * 100\%}$$

Nota. Ecuaciones utilizadas para el análisis a nivel de naturaleza, que ayudan a la determinación de cambios, estos sean son latentes o activos. La primera formula corresponde a variaciones relacionadas con las ganancias, mientras que la segunda se refiere a las pérdidas, tomado de Aldwaik y Pontius (2012).

Las ecuaciones de las Tablas 8 y 9, utilizadas por Aldwaik y Pontius (2012) y Huang et al. (2012) , se aplican para el análisis de transición, o *Trascendencia*. Este análisis examina la intensidad de las transiciones en relación con el tamaño de las categorías y los resultados obtenidos del análisis de categorías. Si la intensidad anual de transición desde una categoría supera la intensidad uniforme, se considera que dicha transición es dirigida; si es menor, se considera evitada.

Tabla 8*Ecuaciones para el análisis del nivel de trascendencia en términos de ganancias*

$$R_{tin} = \frac{\frac{Superficie\ de\ transicion\ de\ i\ a\ n\ en\ el\ intervalo\ Y}{Duracion\ del\ intervalo\ Y}}{\frac{Superficie\ de\ categoria\ i\ en\ la\ fecha\ inicial\ del\ intervalo\ Y}{*100\%}}$$

$$R_{tin} = \frac{\frac{C_{tin}}{(Y_{t+1} - Y_t)}}{\frac{(\sum_{j=1}^J P_{tij})}{*100}}$$

$$W_{tn}$$

$$= \frac{\frac{Superficie\ de\ ganancia\ bruta\ de\ categoria\ n\ en\ el\ intervalo\ Y}{Duracion\ del\ intervalo\ Y}}{\frac{Superficie\ que\ no\ es\ categoria\ n\ en\ la\ fecha\ inicial\ del\ intervalo\ Y}{*100\%}}$$

$$W_{tn}$$

$$= \frac{\frac{\{(\sum_{i=1}^J P_{tin}) - P_{tnn}\}}{\{Y_{t+1} - Y_t\}}}{\frac{\sum_{j=1}^J [(\sum_{i=1}^J P_{tij}) - P_{tnj}]}{*100}}$$

Nota. Ecuaciones utilizadas para el análisis a nivel de Trascendencia, que ayudan a la determinación de cambios, estos sean son evitados o dirigidos. Estas fórmulas corresponde a variaciones relacionadas con la trascendencia en términos de ganancias, tomado de Aldwaik y Pontius (2012).

Tabla 9*Ecuaciones para el análisis del nivel de trascendencia en términos de perdidas*

$$Q_{tmj}$$

$$= \frac{\frac{Superficie\ de\ transicion\ m\ a\ j\ en\ el\ intervalo\ Y}{Duracion\ del\ intervalo\ Y}}{\frac{Superficie\ de\ la\ categoria\ j\ en\ la\ fecha\ final\ del\ intervalo\ Y}{*100\%}}$$

$$Q_{tmj} = \frac{\frac{C_{tmj}}{(Y_{t+1} - Y_t)}}{\frac{(\sum_{j=1}^J P_{tij})}{*100}}$$

$$V_{tm}$$

$$= \frac{\frac{Superficie\ de\ la\ perdida\ bruta\ de\ categoria\ m\ en\ el\ intervalo\ Y}{Duracion\ del\ intervalo\ Y}}{\frac{Superficie\ que\ no\ es\ categoria\ m\ en\ la\ fecha\ final\ del\ intervalo\ Y}{*100\%}}$$

$$V_{tm}$$

$$= \frac{\frac{\{(\sum_{i=1}^J P_{tmj}) - P_{tmm}\}}{\{Y_{t+1} - Y_t\}}}{\frac{\sum_{i=1}^J [(\sum_{j=1}^J P_{tij}) - C_{tim}]}{*100}}$$

Nota. Ecuaciones utilizadas para el análisis a nivel de Trascendencia, que ayudan a la determinación de cambios, estos sean son evitados o dirigidos. Estas fórmulas corresponde a variaciones relacionadas con la trascendencia en términos de perdidas, tomado de Aldwaik y Pontius (2012).

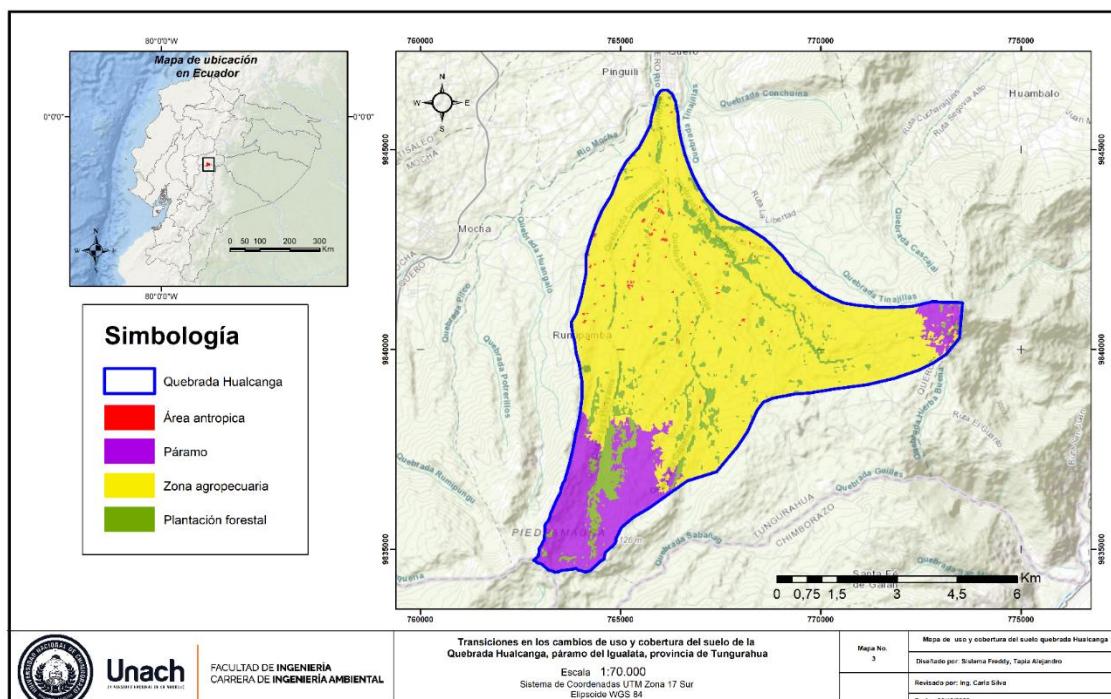
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Clasificación y delimitación de los usos de suelo en el área de estudio

En la primera fase de la investigación, se identificaron los tipos de cobertura y usos del suelo predominantes en la quebrada Hualcanga. Para establecer los usos de suelo se tomó como referencia el informe del Ministerio del Ambiente (2013), con el cual se determinaron 4 categorías: Plantación forestal (Pf); Páramo (Pr); Área antrópica (Aa); Zona agropecuaria (Za), que constituyan una superficie total aproximada de 4880.61 hectáreas, como se muestra en la Figura 3. Usando estas clases definidas y el método de clasificación supervisada, junto con la clasificación orientada a objetos, se obtuvo una clasificación de los usos y coberturas de suelo para cada año de estudio.

Figura 3

Usos y cobertura de suelo del área de estudio.



4.2. Establecimiento de puntos de control y estratificación

Para establecer los puntos de control se realizaron salidas de campo hacia la zona de estudio, seleccionando áreas de fácil acceso que permitieran el ingreso y la adquisición de datos sin restricciones. Estas visitas de campo fueron cruciales para complementar y validar la información obtenida a través de fuentes remotas, como imágenes satelitales y ortofotos.

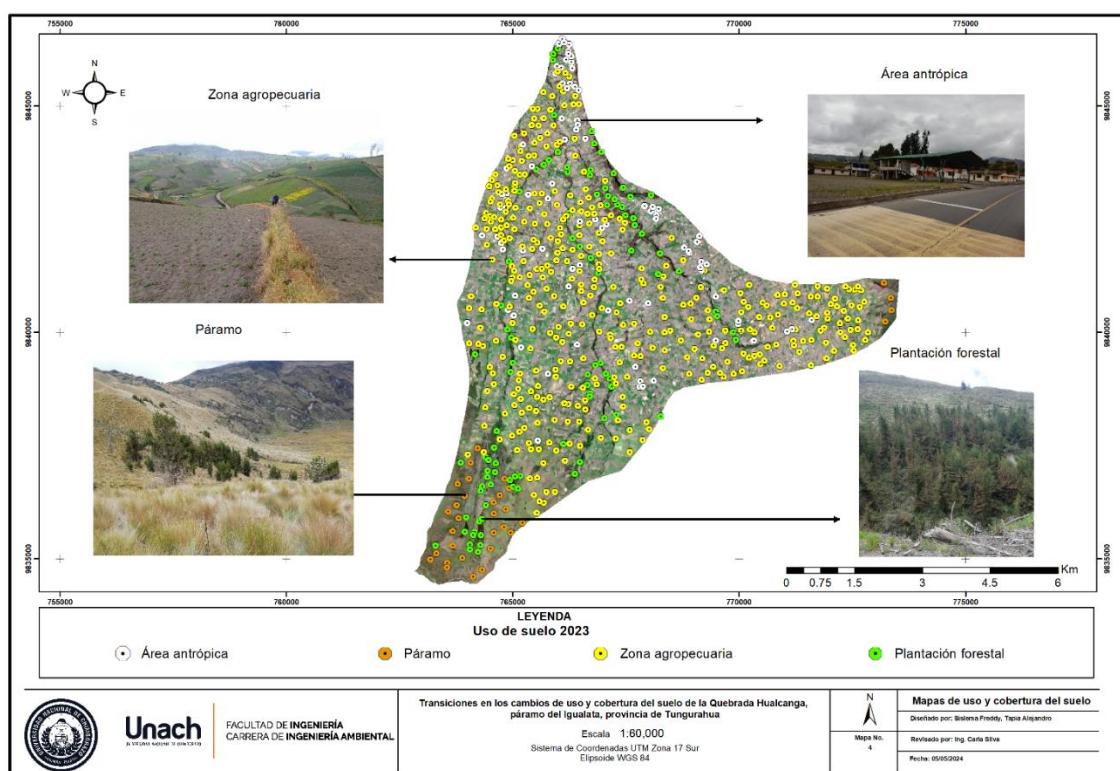
Durante las salidas de campo, se utilizó una aplicación GPS (UTM Geo Map) para dispositivos móviles con el objetivo de registrar las coordenadas geográficas de diversos puntos de control representativos de las diferentes clases y usos de suelo presentes en el área de estudio. Según Bolstad, (2016), es importante que estos puntos de control se distribuyan de manera uniforme en toda el área de datos. Además, se debe recolectar una

cantidad suficiente de puntos de control, lo cual mejora la calidad y precisión de las funciones de transformación estadísticamente ajustadas.

En este sentido, se alcanzaron alrededor de 589 puntos de control distribuidos de la siguiente manera: 85 puntos en Área Antrópica (AA), que incluye infraestructuras, zonas urbanizadas, áreas industriales, etc.; 32 puntos en Páramo (Pr), abarcando todos los tipos de vegetación propia de páramo, como herbazales, matorrales, turberas, entre otros; 387 puntos en Zona Agropecuaria (ZA), que comprende actividades agrícolas, cultivos y áreas destinadas a la ganadería; y 85 puntos en Plantación Forestal (Pf), detallados en la Figura 4.

Figura 4

Puntos de control tomados en la zona de estudio



4.3. Validación de la clasificación

Para validar los resultados de la clasificación supervisada se realizaron las matrices de confusión, que se detallan a continuación. En la Tabla 10 se presenta la matriz de confusión para el año 2004 en la cual se usaron 492 puntos de validación, con una precisión global de 92.83% en todas las categorías. En la Tabla 11 correspondiente al año 2014 se emplearon 644 puntos de validación, alcanzando una precisión global de 93.93%. Así mismo, en la Tabla 12 del año 2023 se usaron 606 puntos de validación logrando alcanzar una precisión global de 94%. Estos resultados sugieren que existe una alta probabilidad de que los pixeles hayan sido clasificados correctamente (Ayala et al., 2017).

Tabla 10*Matriz de confusión 2004*

Clases reales	Clases predichas				Total	Precisión	Error de comisión	Sensibilidad (Precisión de usuario)
	Área antrópica	Páramo	Zona agropecuaria	Plantación forestal				
Área antrópica	38	0	0	0	38	100	0	100%
Páramo	0	55	0	4	59	93,22	4	93,22%
Zona agropecuaria	12	1	204	10	227	89,87	23	89,87%
Plantación forestal	0	0	8	156	164	95,12	8	95,12%
Total	50	56	212	170	488			
Error de omisión	12	1	8	14				
Precisión (Precisión de productor)	76%	98,21%	96,23%	91,76%				
Precisión global	0,928	92,83%						
Proporción esperada	0,341	34,10%						
Kappa	0,891	89,12%						

Tabla 11*Matriz de confusión 2014*

Clases reales	Clases predichas				Total	Precisión	Error de comisión	Sensibilidad (Precisión de usuario)
	Área antrópica	Páramo	Zona Agropecuaria	Plantación forestal				
Área antrópica	42	0	4	0	46	91,30	4	91%
Páramo	0	55	2	2	59	93,22	4	93,22%
Zona agropecuaria	6	1	399	13	419	95,23	20	95,23%
Plantación forestal	0	1	10	107	118	90,68	11	90,68%
Total	48	57	415	122	642			
Error de omisión	6	2	16	15				
Precisión (Precisión de productor)	88%	96,49%	96,14%	87,70%				
Precisión global	0,939	93,93%						
Proporción esperada	0,470	47,03%						
Kappa	0,885	88,53%						

Tabla 12*Matriz de confusión 2023*

Clases reales	Clases predichas				Total	Precisión	Error de comisión	Sensibilidad (Precisión de usuario)
	Área antrópica	Páramo	Cultivo	Plantación forestal				
Área antrópica	76	0	0	0	76	100,00	0	100%
Páramo	0	27	8	7	42	64,29	15	64,29%
Cultivo	9	2	378	9	398	94,97	20	94,97%
Plantación forestal	0	3	1	69	73	95	4	94,52%
Total	85	32	387	85	589			
Error de omisión	9	5	9	16				
Precisión (Precisión de productor)	89%	84,38%	97,67%	81,18%				
Precisión global	0,934	93,38%						
Proporción esperada	0,484	48,44%						
Kappa	0,872	87,16%						

El grado de confiabilidad evaluado con el coeficiente Kappa para los 3 años de estudio se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

Índice Kappa para los 3 años de estudio

Año	Índice Kappa	Kappa (%)
2004	0,891	89,12%
2014	0,885	88,53%
2023	0,872	87,16%

Los porcentajes de confiabilidad de los años mencionados anteriormente obtenidos a partir del cálculo del índice Kappa muestran una fuerza de concordancia casi perfecta debido a que se encuentran en el rango de 0,81 a 1, lo cual concuerda con lo reportado por Landis & Koch, (1997).

4.4. Cambio de uso del suelo de la quebrada Hualcanga.

En la Tabla 14 y Figura 5 se muestra las categorías de uso y cobertura de suelo de cada año, con sus respectivas áreas y porcentajes. Los resultados para el primer periodo 2004-2014 muestran que la vegetación de páramo disminuyó considerablemente, en 2004 el páramo presentaba una superficie de 706,95 ha, y para el 2014 llegó a 535,03 ha, dando una reducción de 171 ha, en los 10 años posteriores esta categoría siguió presentando reducciones, alcanzando en el año 2023 una superficie de 501,93 ha, en consecuencia, se redujo alrededor de 33,10 ha.

En las últimas décadas, los ecosistemas de páramo han experimentado pérdidas superiores al 4% de su extensión original, como resultado de una creciente intervención humana, marcada por el desplazamiento de los pueblos originarios a regiones más altas para desarrollar actividades como la deforestación, forestación, avance agrícola, pastoreo excesivo, y construcción vial caótica están afectando los servicios naturales, en especial ante la creciente demanda de agua (Quichimbo et al., 2012). La ganadería es uno de los principales factores en la alteración de los ecosistemas de páramo, especialmente en la degradación y fragmentación del hábitat, un proceso que es continuo e imparable. La cría de ganado vacuno ha ocasionado daños significativos y devastadores, a esto se le suma que el uso recurrente de fuego para eliminar matorrales ha tenido consecuencias graves en el entorno y la ganadería local, impactando la cultura y el paisaje de los páramos andinos (Ministerio del Ambiente, 2013; Romo & Calero, 2022). Ante esto, los efectos que tendrían este ecosistema debido a su fragilidad estarían relacionados principalmente con la erosión del suelo y la eventual disminución de la capacidad de almacenamiento de agua (Chuncho & Chuncho, 2019)

En 2004, la plantación forestal tenía una extensión de 456,89 ha, pero para el 2014 se disminuyó considerablemente a 256,16 ha, lo cual implica una pérdida de 200,73 ha equivalente al 4.11%. No obstante, en el 2023 la plantación forestal se redujo a 160,43 ha, lo que representa una disminución de 95,73 ha. Según el Ministerio del Ambiente (2021) en el país, la deforestación está estrechamente relacionada con la expansión de la frontera agrícola y la colonización de las áreas forestales. En los últimos años, la Fundación Fondo de Páramos Tungurahua y Lucha contra la Pobreza (FMPLPT) ha

reducido significativamente los porcentajes de erosión y desgaste vegetal. Hasta 2023, la fundación ha plantado 70,000 árboles nativos en 83 hectáreas en el área del cerro Igualata, abordando la erosión hídrica y la degradación del suelo (Fondo de Páramos Tungurahua y Lucha contra la Pobreza, 2023).

Para la categoría área antrópica el incremento constante de esta clase de uso de suelo que va desde las 21,53 ha en el año 2004 ocupando un 0,44% de la superficie del área de estudio, hasta las 43,74 ha 2023, representando un 0,90% de la superficie.

Resulta evidente que en las últimas décadas se produjeron cambios significativos en los esquemas de asentamiento de la población en esta zona de estudio. En base a ciertas perspectivas empíricas se puede afirmar que el crecimiento del área antropogénica en zonas rurales ocurre cuando la expansión de estas áreas supera el ritmo de aumento de la población total (Obdulio & Quiroa, 2014). Esto implica que el desarrollo de áreas modificadas por el ser humano en estas regiones rurales se está produciendo a un ritmo más acelerado que el aumento de la población que las habita. Según (Pombo, 2017) el aumento de superficie antropogénica se origina generalmente por el crecimiento de la población ya sea por altas tasas de natalidad, movimientos migratorios o la combinación de ambos que normalmente conducen a la utilización ineficiente de recursos.

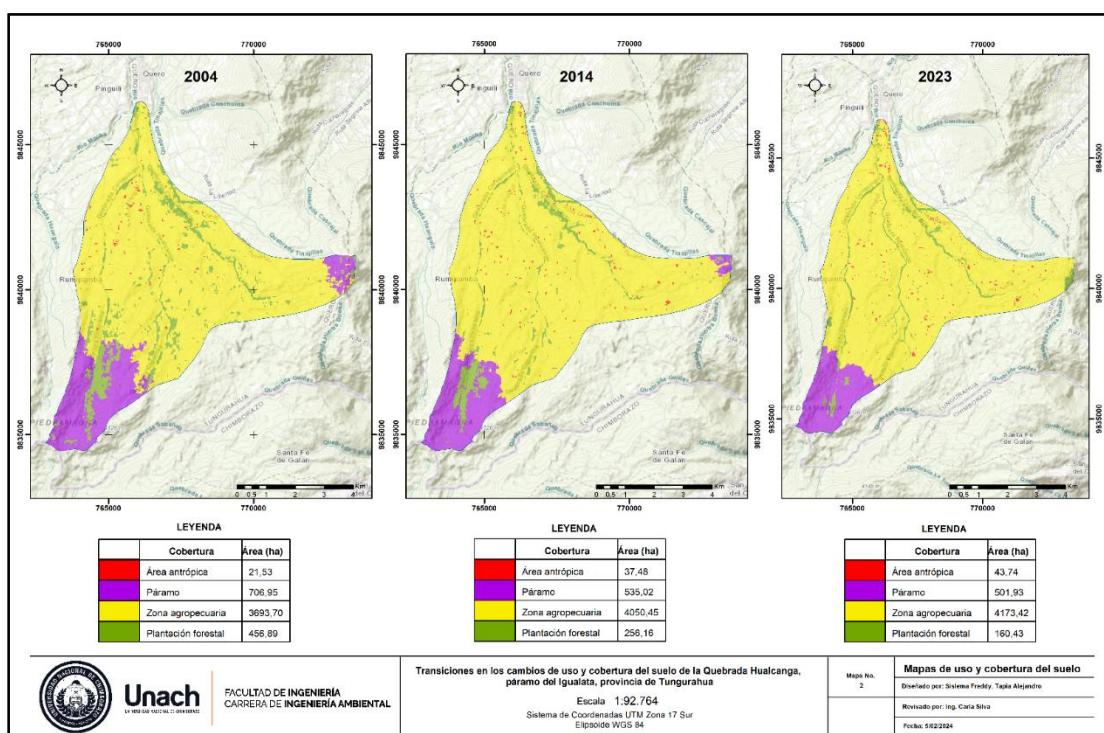
La categoría zona agropecuaria es la predominante de esta área de estudio, abarca el 85,53% del territorio en 2023, representando un total de 4173,42 hectáreas. Esta cifra ha experimentado un notable aumento desde el 75,70% registrado en 2004, cuando las hectáreas dedicadas a la agricultura eran 3693,70, lo que sugiere una expansión continua de las áreas destinadas a la agricultura en la región. Este incremento podría estar vinculado al crecimiento continuo de la población y la búsqueda de nuevos espacios para la obtención de alimentos, generando transformaciones en los usos del suelo e intensificando los sistemas de producción. En estas zonas se cultivan en productos básicos como la papa, la cebolla, la zanahoria y diversas hortalizas, lo que demuestra una diversificación agrícola en respuesta a la demanda creciente. Esto no solo crea problemas a nivel local, sino que también tiene repercusiones regionales y globales, dado que la producción de alimentos se ha convertido en el principal factor de presión sobre el suelo. (Vazquez et al., 2019). La conversión de ecosistemas naturales en tierras agrícolas y ganaderas conlleva consecuencias negativas, como la destrucción de los hábitats naturales y la reducción de la diversidad de especies vegetales y animales. Además, disminuye la capacidad de los ecosistemas para proporcionarnos servicios beneficiosos y altera significativamente el paisaje del territorio (Farfán et al., 2020).

Tabla 14*Uso y cobertura de suelo quebrada Hualcanga*

Clases	Año 2004		Año 2014		Año 2023	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Área antrópica	21,53	0,44	37,49	0,77	43,74	0,90
Páramo	706,95	14,49	535,03	10,97	501,93	10,29
Zona agropecuaria	3693,702	75,70	4050,46	83,02	4173,42	85,53
Plantación forestal	456,89	9,36	256,16	5,25	160,43	3,29
Total	4879,08	100	4879,14	100	4879,52	100

Nota. Los porcentajes mostrados en la tabla es una aproximación de cada categoría de uso y cobertura de suelo estudiados en la quebrada Hualcanga.

En la Figura 5, se puede apreciar los mapas de uso y cobertura de suelo para los años 2004-2014-2023, donde se evidencia claramente los cambios en las diferentes categorías, a través de estos periodos de tiempo.

Figura 5*Mapas de uso y cobertura del suelo quebrada Hualcanga*

En la Tabla 15 se presenta la matriz de tabulación cruzada para el intervalo del 2004-2014, la cual ayudo a evaluar las ganancias y pérdidas de los diferentes usos y coberturas de suelo del área de estudio. En la investigación de Gómez, (2021), menciona que la matriz resultante muestra, en los valores diagonales resaltados con negrilla, a aquellos pixeles que se han mantenido invariables en el tiempo, mientras que los que se encuentran fuera de esta diagonal son los pixeles que han cambiado o han sufrido una transición de una cobertura a otra. La categoría de Zona agropecuaria es la que presenta mayor persistencia respecto a las demás categorías, con un 74,14 %. Mientras que el área antrópica muestra un menor grado de persistencia con un 0,01 %.

Tabla 15

Matriz de tabulación cruzada en términos porcentuales para periodo 2004-2014 de la zona de estudio.

		2014				TOTAL 2004 (P_{i+})	Perdidas
		Área antrópica	Páramo	Zona agropecuaria	Plantaci ón forestal		
2004	Área antrópica	0,01	0,00	0,43	0,00	0,441	0,43
	Páramo	0,00	9,83	3,82	0,84	14,484	4,65
	Zona agropecuaria	0,74	0,13	74,14	0,69	75,710	1,57
	Plantación forestal	0,01	0,99	4,64	3,71	9,36	5,65
	TOTAL 2014 (P_{+J})	0,76	10,96	83,02	5,25	100	
	Ganancias	0,76	1,13	8,89	1,54		

Nota. La persistencia se denota en los valores marcados en negrilla.

En la Tabla 16 de la matriz tabulación cruzada para el intervalo de 2014-2023 se presenta de forma diagonal principal la permanencia de cada categoría de cobertura donde el valor más alto es el de la Zona Agropecuaria con un 79,80 % y el mínimo de 0,10 % para el Área Antrópica los que permanecieron sin cambios. Los valores porcentuales presentados reflejan cómo se distribuyeron las diferentes coberturas de tierra dentro de esa misma área de estudio, pero proyectados para el año 2023.

Tabla 16

Matriz de tabulación cruzada en términos porcentuales para periodo 2014-2023 de la zona de estudio.

		2023				TOTAL 2004 (P_{i+})	Perdidas
		Área antrópica	Páramo	Zona agropecuaria	Plantación forestal		
2014	Área antrópica	0,10	0,00	0,66	0,01	0,77	0,67
	Páramo	0,00	8,84	1,80	0,32	10,95	2,12
	Zona agropecuaria						
	a	0,99	0,26	79,80	1,98	83,02	3,22
	Plantación forestal	0,00	1,40	1,82	2,03	5,25	3,22
	TOTAL 2014						
	(P_{+J})	1,09	10,49	84,07	4,34	100,00	
	Ganancias	0,99	1,66	4,27	2,31		

Nota: La persistencia se denota en los valores marcados en negrilla.

4.5. Dinámica de cambio de uso del suelo

En la Tabla 17 y la Figura 6 se muestran las pérdidas y ganancias durante el primer periodo de 2004 a 2014. Durante este lapso, la Zona Agropecuaria destacó con un mayor intercambio de 3,15% y una ganancia de 8,88%, mientras que tanto el Páramo como la Plantación Forestal experimentaron notables pérdidas, con porcentajes del 4.65% y 5.65% respectivamente.

Tabla 17

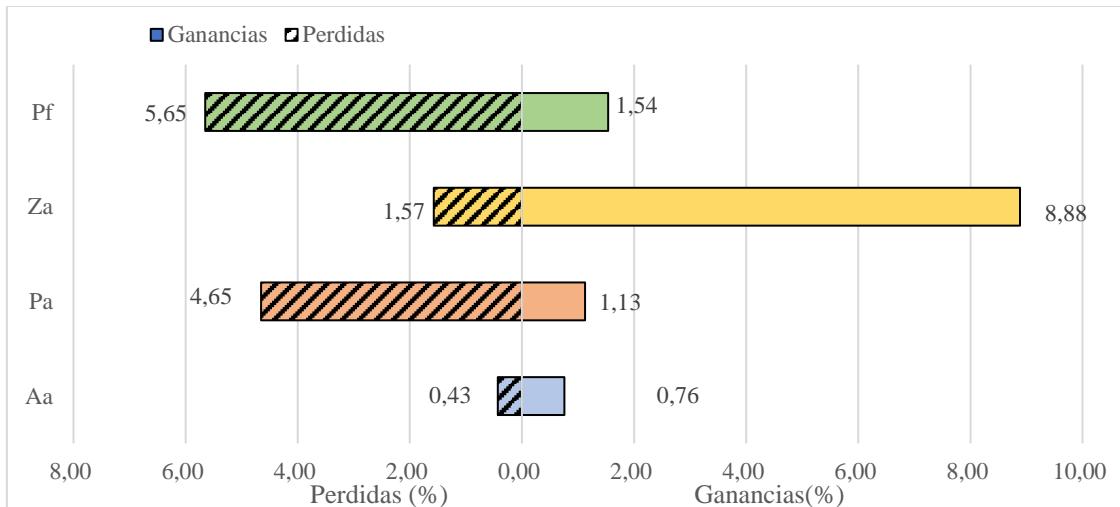
Índices de cambio del intervalo de tiempo 2004-2014

Categorías	Ganancias	Perdidas	Cambio neto	Intercambio	Cambio total
Área antrópica	0,76	0,43	0,33	0,86	1,19
Páramo	1,13	4,65	3,53	2,25	5,78
Zona agropecuaria	8,88	1,57	7,31	3,15	10,46
Plantación forestal	1,54	5,65	4,11	3,08	7,19

Nota. Los valores de los índices de cambio están expresados en porcentaje.

Figura 6

Pérdidas vs ganancias periodo 2004-2014



Nota. Las categorías están representadas por sus siglas: Plantación forestal (Pf), Zona agropecuaria (Za), Paramo (Pa), Área antrópica

En la Tabla 18 y Figura 7 se muestra las ganancias y pérdidas de las distintas categorías de uso de suelo. Para el segundo periodo, se puede apreciar que la categoría Zona agropecuaria exhibe la mayor ganancia con 4,27%, seguida por las categorías Plantación forestal y Paramo con valores de 2,31% y 1,66% respectivamente. En cuanto a la categoría Área antrópica, no presenta cambios significativos respecto a ganancias. Para las pérdidas, las categorías que presentan un valor más alto son las de Plantación forestal con 3,22% y Zona agropecuaria con 3,22%, y el valor más bajo es de la categoría Área antrópica con 0,67%.

Tabla 18

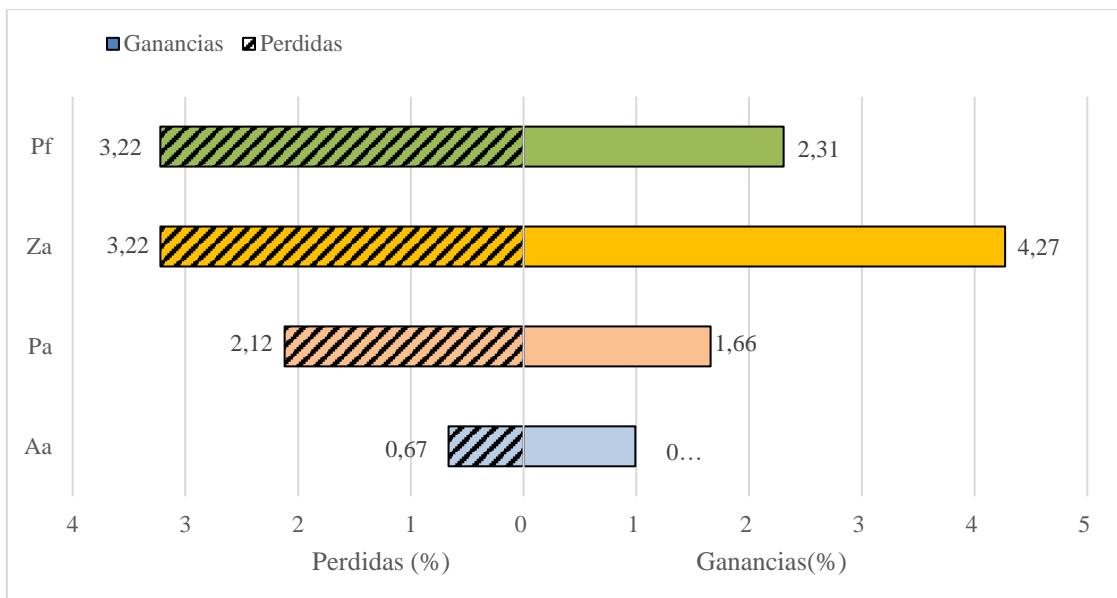
Índices de cambio del intervalo de tiempo 2014-2023

Categorías	Ganancias	perdidas	Cambio neto	Intercambio	Cambio total
Área antrópica	0,99	0,67	0,33	1,33	1,66
Páramo	1,66	2,12	0,46	3,32	3,78
Zona agropecuaria	4,27	3,22	1,05	6,44	7,49
Plantación forestal	2,31	3,22	0,92	4,61	5,53

Nota. Los valores de los índices de cambio están expresados en porcentaje.

Figura 7

Pérdidas vs ganancias periodo 2014-2023



Nota. Las categorías están representadas por sus siglas: Plantación forestal (Pf), Zona agropecuaria (Za), Paramo (Pa), Área antrópica

4.6. Análisis de Intensidad

4.6.1. Nivel de rapidez

En la Figura 8 se presenta gráficamente la rapidez de cambio porcentual experimentada en la quebrada Hualcanga durante un período de estudio que abarca 19 años, desde 2004 hasta 2023. Para determinar esta intensidad, se calculó el porcentaje anual de cambio uniforme, obteniendo un valor de 1,13%. Según Aldwaik & Pontius (2012), los valores que superan este umbral se consideran cambios rápidos, mientras que valores inferiores indican cambios lentos.

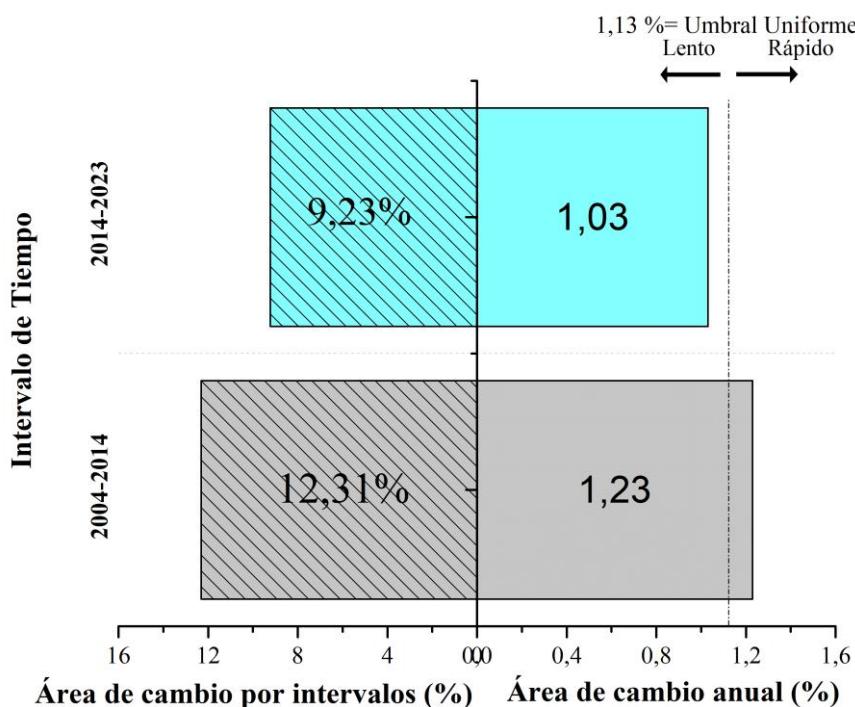
Los resultados muestran que durante el primer intervalo de tiempo (2004-2014) se observó un cambio rápido ya que la tasa de cambio anual promedio fue del 1,23%, mostrando un cambio en el 12,31% de la superficie total del área de estudio. En muchos lugares de los Andes ecuatorianos, incluida Tungurahua, hubo una expansión significativa de la agricultura, impulsada por la demanda de productos agrícolas y la presión sobre la tierra para cultivos como maíz, papa, y hortalizas. Esto puede haber sido un factor clave en el cambio de uso del suelo durante este período. El crecimiento de la población y la expansión urbana pueden haber ejercido presión sobre las áreas rurales y naturales, fomentando la conversión de tierras para vivienda, infraestructura y servicios.

En contraste, durante el segundo período (2014-2023) las transiciones se dieron de manera lenta, con un área de cambio anual de 1,03%, menor al umbral uniforme, modificando el 9,23% del área de estudio. Durante este período, es posible que se hayan implementado políticas más estrictas de conservación y manejo de tierras. Ecuador ha aumentado sus esfuerzos de conservación en los últimos años, lo que podría haber contribuido a reducir la tasa de cambio de uso del suelo.

La reducción en la intensidad de cambio de uso del suelo en la quebrada Hualcanga entre los períodos 2004-2014 y 2014-2023 sugiere una estabilización en el uso del suelo. Esto podría estar relacionado con una combinación de factores como la implementación de políticas de conservación, una mayor conciencia ambiental, y posiblemente una desaceleración económica que redujo la presión sobre el uso de nuevas tierras.

Figura 8

Rapidez de cambio interanual del área de estudio.



Nota. Cambio porcentual en quebrada Hualcanga (2004-2023), mostrando la transición de cambios rápidos a lentos en el uso del suelo durante el período de estudio

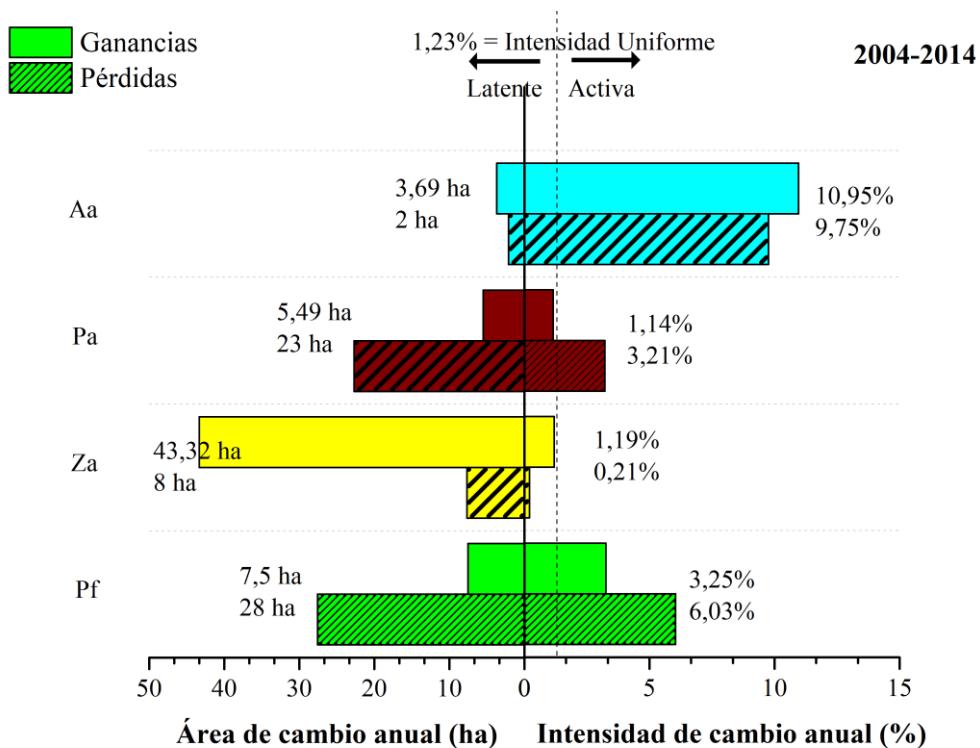
4.6.2. Nivel de naturaleza

Para el nivel de naturaleza, también se calculó un umbral que nos permite determinar si estas transiciones fueron latentes o activas. En la Figura 9 se muestra que durante el primer periodo (2004-2014) las categorías Área antrópica (Aa) y Plantación forestal (Pf) experimentaron cambios que superaron el umbral de 1,23%, clasificándose como procesos activos en términos de ganancia con valores de 10,95% y 3,25 respectivamente, por otro lado. Las categorías que muestran un proceso latente en términos de ganancia son Páramo (Pa) y Zona agropecuaria (Za) con valores de 1,14% y 1,19% , ya que no superan el umbral. En cuanto a las categorías en procesos activos en términos de pérdidas se encuentran Área antrópica (Aa) con un porcentaje de 9,75%, Páramo (Pa) con 3,21% y Plantación forestal (Pf) con un 6,03% mientras tanto, la categoría Zona agropecuaria (Za) presenta un valor de 0,21%, por lo que la define como una categoría en estado latente debido a que no supera el umbral. Los resultados muestran que el páramo tuvo una pequeña expansión en cuanto a su superficie, con un incremento del 1,14%. Sin embargo, este aumento fue inferior al umbral de 1,23% que se emplea

para clasificar estas áreas como activos. Esto significa que, aunque el Páramo ganó un poco de área, no fue un cambio significativo. Posiblemente, hubo esfuerzos de conservación o regeneración natural, pero estos no lograron grandes resultados en este período. Por otro lado, el Páramo experimentó una disminución notable de su superficie con una reducción del 3,21% cifra que superó el umbral del 1,23%. Esto indica que la disminución del área fue rápida y significativa. Las causas de esta pérdida pueden estar vinculadas con actividades humanas, como la agricultura, la expansión urbana o la ganadería, que ocupan e invaden tierras que anteriormente eran páramos. En general el páramo está perdiendo más terreno del que gana. Aunque ha habido una ligera recuperación (ganancia latente), las pérdidas son mucho más grandes (pérdida activa). Esto sugiere que el Páramo está en riesgo y se está viendo afectado por factores externos que están reduciendo su superficie significativamente.

Figura 9

Análisis de intensidad a nivel de naturaleza para ganancias y pérdidas periodo 2004 - 2014



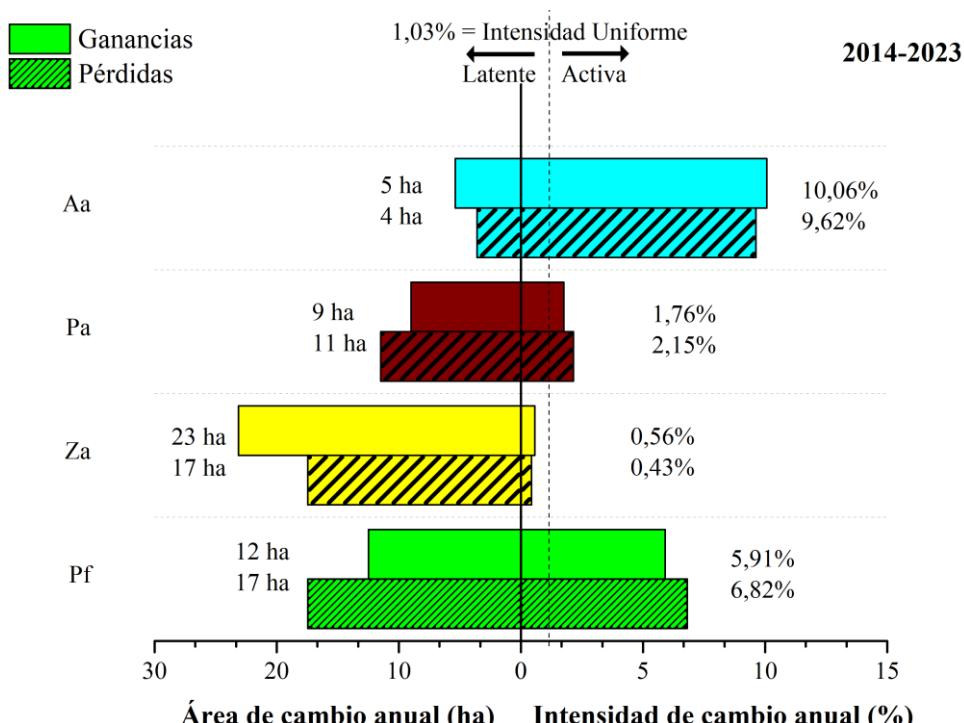
Nota. Transición e intensidad de cambio en uso del suelo a nivel de naturaleza (2004-2014), de ganancias y pérdidas de las cuatro categorías estudiadas Área antrópica (Aa), Plantación forestal (Pf), Zona agropecuaria (Za), Plantación forestal (Pf) cuyos valores se presentan en hectáreas y porcentajes para determinar si estas son activas o latentes.

En la Figura 10 se presenta los resultados del nivel de naturaleza para el segundo período (2014-2023) las categorías Área antrópica (Aa), Páramo (Pa) y Plantación forestal (Pf) con respecto a ganancias experimentaron cambios que excedieron umbral de 1,03%, clasificándose, así como procesos activos en términos de ganancia, con valores de 10,06%, 1,76% y 3,25% respectivamente. En contraste la categoría Zona agropecuaria

(Za), con un porcentaje de 0,56 %, se considera un proceso latente en términos de ganancia, ya que no superan el umbral. En cuanto a las categorías respecto a términos de pérdidas se encuentran en procesos activos Área antrópica (Aa) con un porcentaje de 9,62%, Páramo (Pa) con 2,15% y Plantación forestal (Pf) con un 6,82%. Por otro lado Zona agropecuaria (Za) presenta un valor de 0,43%, por lo que se clasifica como una categoría en estado latente debido a que no sobrepasa el umbral. Los resultados muestran que el páramo tuvo ganancias en porcentajes de 1.76% esto significa que, en algunas áreas, el Páramo está recuperando terreno o aumentando su cobertura. Esto puede deberse a ciertas políticas de conservación o planes de restauración que estén funcionando o que algunas zonas nativas del páramo están creciendo de forma natural sin embargo también presenta pérdidas con un porcentaje de 2 15% lo cual indica que el páramo está disminuyendo o siendo afectado en otras áreas por las actividades humanas, como la agricultura, el pastoreo, la urbanización o la tala. Estas actividades causan una pérdida de la cobertura reduciendo su extensión; el hecho de que el páramo tenga tantas ganancias como pérdidas por encima del umbral indica que se encuentra en un estado de cambio constante. Es decir, en algunas partes el páramo está ganando terreno (quizás gracias a proyectos de reforestación o restauración), pero en otras lo está perdiendo (debido a actividades como la agricultura) es por eso que se define al Páramo como un proceso activo ya que no se presenta de forma estable, sino que está cambiando de forma notable.

Figura 10

Análisis de intensidad a nivel de naturaleza para ganancias y pérdidas periodo 2014 - 2023



Nota. Transición e intensidad de cambio en uso del suelo a nivel de naturaleza (20014-2023), de ganancias y pérdidas de las cuatro categorías estudiadas Área antrópica (Aa),

Plantación forestal (Pf), Zona agropecuaria (Za), Plantación forestal (Pf) cuyos valores se presentan en hectáreas y porcentajes para determinar si estas son activas o latentes.

4.6.3. Nivel de Trascendencia

Aldwaik & Pontius (2012), proponen el análisis del nivel de trascendencia para evaluar la importancia relativa de las transiciones en el uso del suelo en términos de pérdidas y ganancias, considerando la intensidad de las transiciones dadas de una categoría a otra.

Para analizar la transcendencia en términos de ganancia y perdidas se consideró a las categorías que presentaron una mayor intensidad, de las cuales las categorías de Plantación forestal (Pf) y Área antrópica (Aa), siendo las que tuvieron una mayor intensidad en el nivel de naturaleza.

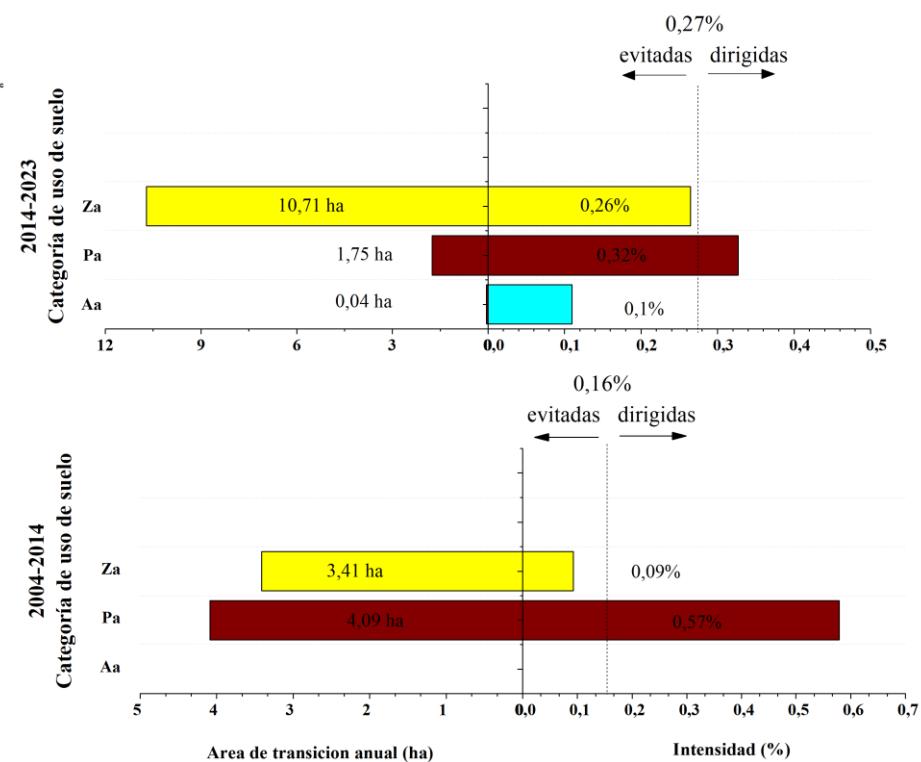
4.6.3.1. Trascendencia en términos de ganancias

En la Figura 11 se muestra la dinámica de cambios en los usos de suelo de la categoría Plantación Forestal (Pf) durante los intervalos estudiados: 2004-2014 y 2014-2023. El umbral calculado para el primer período se define en 0,16%, mientras que para el segundo período se establece en 0,27%. Esto implica que cualquier cambio que supere este umbral se considera como dirigido; por el contrario, si los cambios están por debajo del umbral, se consideran evitados. De esta manera, se observa que para el período 2004-2014, la única categoría que supera el umbral de 0,16% es el Páramo (Pa), con una intensidad anual del 0,57%, definiéndose como un proceso dirigido. Así, se puede observar que la categoría Páramo (Pa) cede anualmente 4,09 ha a la categoría Plantación Forestal (Pf). Por el contrario, la categoría Zona Agropecuaria (Za) presenta una intensidad del 0,09%, por debajo del umbral, lo que indica que cede 3,41 ha a través de un proceso evitado.

Para el segundo período (2014-2023), el comportamiento es similar al primero, donde Páramo (Pa) supera el umbral de 0,27%, con una intensidad del 0,32% definiéndose también como un proceso dirigido. Por lo tanto, la categoría Plantación forestal (Pf) se beneficia de 1,75 ha de la superficie de Páramo (Pa). El área antrópica (Aa) muestra una menor área de transición, con 0,04 ha y una intensidad de 0,1%, por debajo del umbral, lo que la define como un proceso evitado.

Figura 11

Trascendencia en términos de ganancias para la categoría Plantación forestal.



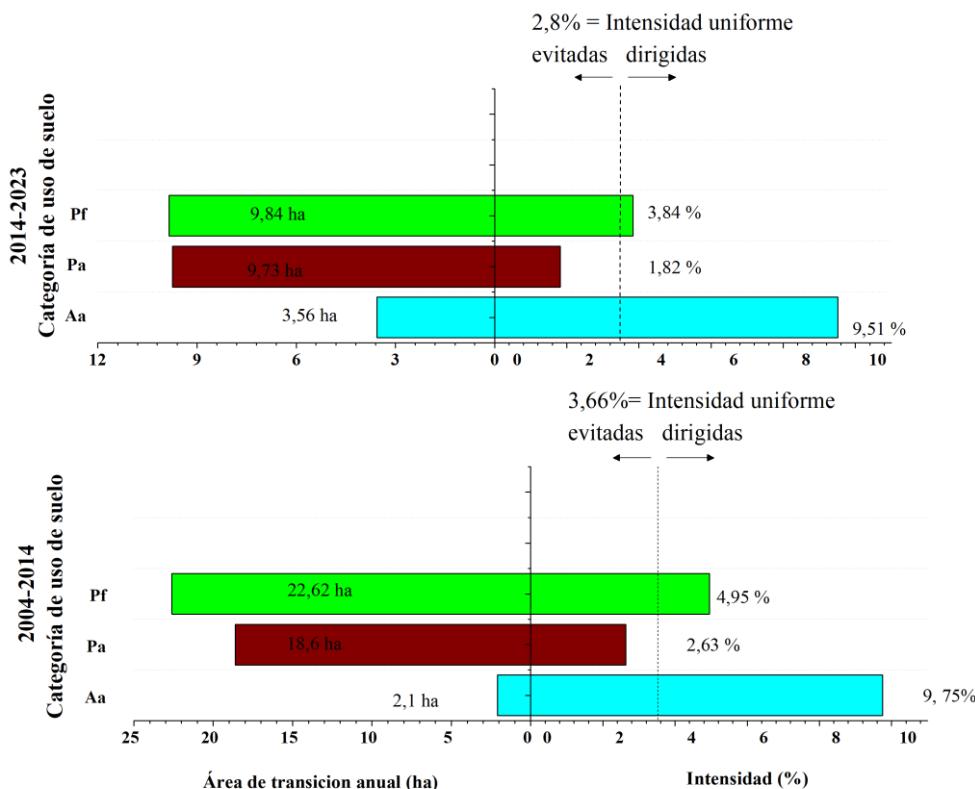
Nota. Transición e intensidad de cambio en uso del suelo (2004-2023), mostrando variaciones en la Zona agropecuaria (Za), Páramo (Pa), Área antrópica (Aa), con cambios dirigidos y evitados según los umbrales establecidos.

En la Figura 12 se muestra la dinámica de la categoría Zona antrópica (Za) donde el umbral se fijó en 0,16% en el primer período de 2004 – 2014. Las categorías que superan el umbral son Plantación forestal (Pf) y Área antrópica (Aa) con una intensidad de transición anual de 4,95% y 9,75% respectivamente, categorizándolo como un proceso dirigido, cediendo 9,84 ha de Plantación forestal (Pf) y 2,1 ha de Área antrópica (Aa) a Zona agropecuaria (Za). Además, se observa que páramo presenta una intensidad de 2,63%, por lo que se vincula a un proceso evitado que de igual manera cede 18,6 ha a Zona agropecuaria (Za).

En el segundo período 2014 – 2023 se puede apreciar que el umbral establecido para este es de 2,8%. Las categorías que superaron el umbral nuevamente son Plantación forestal (Pf) con una intensidad de 3,84% y área antrópica (Aa) 9,51%, lo que lo caracteriza como procesos dirigidos, dando a entender que plantación forestal y área antrópica ceden 9,84 ha y 3.56 ha respectivamente, a Zona agropecuaria (Za). En cuanto a la categoría Páramo (Pa) presenta una intensidad de 2,63% , por debajo del umbral por lo que se considera como un porceso evitado, que de igual manera cede 9,73 ha a Zona agropecuaria(Za).

Figura 12

Trascendencia en términos de ganancias para la categoría Zona agropecuaria.



Nota. Transición e intensidad de cambio en uso del suelo (2004-2023), mostrando variaciones en la Plantación forestal (Pf), Páramo (Pa), Área antrópica (Aa), con cambios dirigidos y evitados según los umbrales establecidos.

4.6.3.2. Trascendencia en términos de perdidas

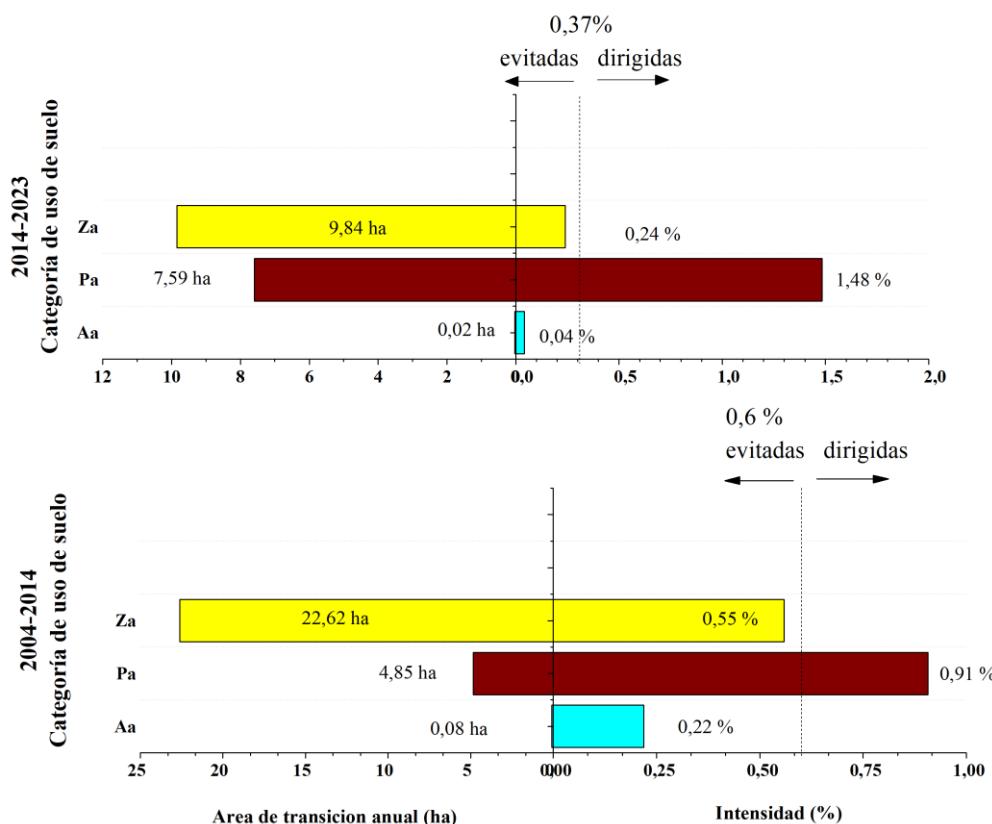
La Figura 13 presenta datos sobre la transición y la intensidad de cambio de uso del suelo en tres categorías: Zona agropecuaria (Za), Páramo (Pa), y Área antrópica (Aa), comparando dos períodos: 2004-2014 y 2014-2023. El umbral de intensidad se establece en 0.6% para el período 2004-2014 y 0.37% para el segundo intervalo 2014-2023. Esto significa que cualquier cambio en la intensidad por encima de estos umbrales se consideran cambio dirigidos, mientras que los cambios por debajo de este valor se consideran evitados.

Durante el primer período de 2004 a 2014, el Páramo (Pa) experimentó una transición de 4.85 hectáreas con una intensidad del 0.91%, superando el umbral del 0.6%, lo que sugiere una presión moderada sobre este ecosistema. Por otro lado, la Zona agropecuaria (Za) mostró una transición anual de 22.62 hectáreas con una intensidad del 0.55%, ligeramente por debajo del umbral, lo que indica una expansión significativa de las actividades agropecuarias, aunque no lo suficientemente grande como para ser clasificada como dirigida. El Área antrópica (Aa) presentó la menor área de transición con 0.08 hectáreas y una intensidad del 0.22%, también por debajo del umbral, indicando cambios mínimos.

Durante el segundo período de 2014 a 2023, el Páramo (Pa) registró una transición de 7.59 hectáreas con una intensidad del 1.48%, superando considerablemente el umbral ajustado de 0.37%, lo que indica una creciente presión y un cambio dirigido en este ecosistema. La Zona agropecuaria (Za) tuvo una transición anual de 9.84 hectáreas y una intensidad del 0.24%, que se mantiene por debajo del umbral, sugiriendo una desaceleración en la expansión agrícola. El Área antrópica (Aa) mostró la menor área de transición con 0.02 hectáreas y una intensidad del 0.04%, también por debajo del umbral, lo que refleja cambios mínimos en estas áreas.

Figura 13

Trascendencia en términos de pérdidas para la categoría de Plantación forestal



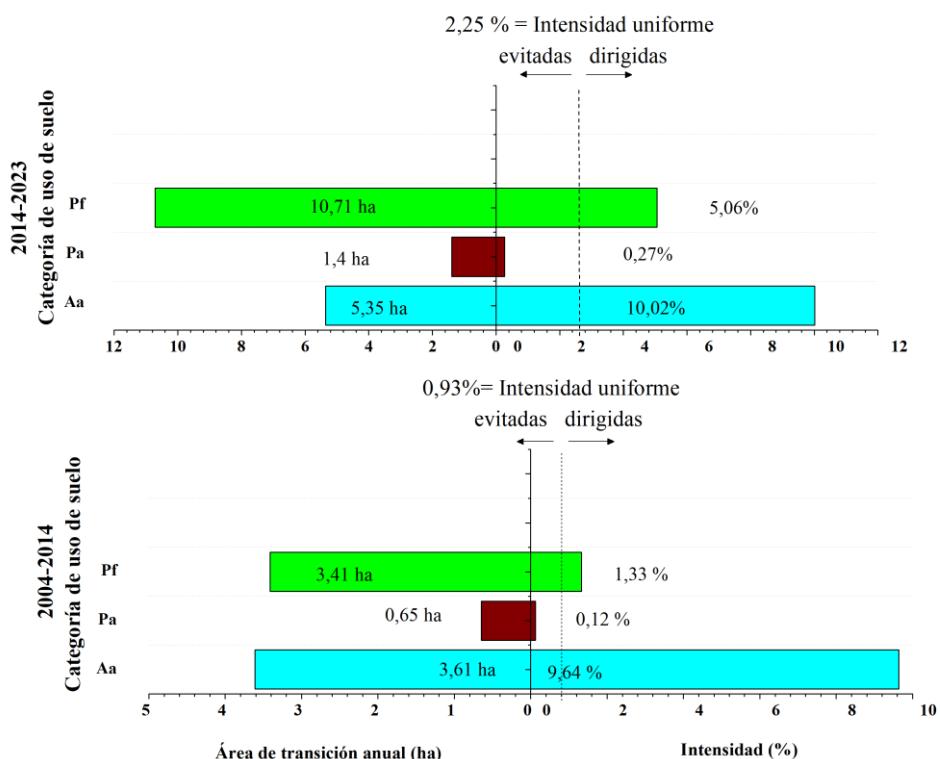
Nota. Transición e intensidad de cambio en uso del suelo (2004-2023), mostrando variaciones en la Zona agropecuaria (Za), Páramo (Pa), Área antrópica (Aa), con cambios dirigidos y evitados según los umbrales establecidos.

La Figura 14 muestra que durante el 2004-2014, el umbral de intensidad se fijó en 0,93%. La Plantación Forestal (Pf) mostró una transición de 3,41 hectáreas y una intensidad del 1.33%, superando el umbral, lo que indica un cambio dirigido en la expansión de plantaciones forestales. El Páramo (Pa) tuvo una transición de 0,65 hectáreas y una intensidad del 0,12%, claramente por debajo del umbral, lo que sugiere una mínima conversión de este ecosistema, clasificada como evitada. El Área Antrópica (Aa) presentó una transición significativa de 3,61 hectáreas y una alta intensidad del 9,64%, muy por encima del umbral, reflejando un cambio dirigido hacia usos antropogénicos del suelo.

En el período 2014-2023, el umbral de intensidad se ajustó a 2,25%. La Plantación Forestal (Pf) mostró un incremento notable con una transición de 10,71 hectáreas y una intensidad del 5,06%, lo que sugiere un cambio dirigido significativo. El Páramo (Pa) registró una transición de 1,4 hectáreas con una intensidad del 0,27%, nuevamente por debajo del umbral, indicando que los cambios en este ecosistema fueron mínimos y clasificados como evitados. El Área Antrópica (Aa) tuvo una transición de 5,35 hectáreas y una intensidad del 10,02%, superando ampliamente el umbral y reflejando una expansión dirigida significativa de las áreas antrópicas.

Figura 14

Trascendencia en términos de ganancia para la categoría de Zona agropecuaria



Nota. Transición e intensidad de cambio en uso del suelo (2004-2023), mostrando variaciones en la Plantación forestal (Pf), Paramo (Pa), Área antrópica (Aa), con cambios dirigidos y evitados según los umbrales establecidos.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Para la primera fase de la investigación se logró una clasificación detallada de los usos del suelo, obteniendo como resultado de esa clasificación cuatro categorías las cuales presentaron cambios significativos a lo largo del tiempo. La distribución estratégica de puntos de control permitió validar la precisión de los datos y garantizar su confiabilidad. Los resultados evidenciaron una transformación constante en las coberturas, resaltando la interacción entre actividades antrópicas y los ecosistemas.
- En la quebrada Hualcanga, entre 2004 y 2023, se observaron cambios significativos en el uso del suelo. La vegetación de páramo y la plantación forestal disminuyeron, reflejando una pérdida de más de 266 hectáreas de ecosistemas naturales. El área antrópica creció, indicando una mayor urbanización y asentamiento humano, mientras que la zona agropecuaria se ganó territorio notablemente, evidenciando una mayor presión para la producción de alimentos. Estos resultados enfatizan la necesidad de gestionar sosteniblemente los recursos naturales y mitigar los impactos ambientales.
- Para los análisis de rapidez y naturaleza la quebrada experimentó un cambio en la velocidad de transformación de sus usos del suelo entre 2004 y 2023. En el primer periodo, 2004-2014, la tasa de cambio anual promedio fue del 1,23%, considerada rápida, impulsada por la expansión agrícola y el crecimiento poblacional. En contraste, de 2014 a 2023, la tasa disminuyó a 1,03%, señalando una estabilización, posiblemente debido a políticas de conservación. Las categorías de Área antrópica y Plantación forestal mostraron cambios más activos en términos de ganancia y pérdida, mientras que el páramo experimentó fluctuaciones significativas, reflejando tanto regeneración como degradación.
- La evaluación de la trascendencia de las transiciones en el uso del suelo en la quebrada Hualcanga, revela que las categorías de Plantación Forestal (Pf) y Área Antrópica (Aa) exhiben transiciones dirigidas de alta intensidad, especialmente en términos de ganancia, superando consistentemente los umbrales de referencia establecidos para cada periodo. Por otro lado, la categoría de zona agropecuaria mostró transiciones evitadas en gran parte del análisis, con intensidades por debajo de los umbrales, sugiriendo una expansión más contenida en comparación con otros usos del suelo.

5.2. Recomendaciones

- Para estudios futuros, es fundamental considerar la calidad y características de las imágenes satelitales que se utilizarán. La altura y la resolución espacial de las imágenes son factores críticos a tener en cuenta, las imágenes satelitales antiguas tienden a presentar una resolución espacial baja, lo que resulta una menor claridad de los píxeles y una resolución inadecuada para aplicaciones detalladas. Para garantizar una precisión óptima en identificación y análisis de características geoespaciales se recomienda utilizar imágenes satelitales con alta resolución espacial las cuales permiten una mejor diferenciación de los píxeles individuales y proporcionan una representación más precisa del terreno y características de interés.
- Implementar un conjunto de medidas más eficaces para proteger el Páramo y frenar la expansión agrícola, que incluyan la educación ambiental, el fortalecimiento de la participación comunitaria, el apoyo a prácticas agroecológicas y la implementación de políticas públicas adecuadas. Es fundamental que estas medidas se ejecuten de manera coordinada y sostenible a largo plazo involucrando a todos los actores y promoviendo la conciencia ambiental y responsabilidad social en la comunidad.
- Continuar con estudios y monitoreos del área para evaluar si el comportamiento del suelo es el mismo, es decir, sí la reducción del Páramo continua, ya que este ecosistema desempeña un papel fundamental en la provisión de recursos hídricos, por lo que cualquier alteración en su estado puede traer implicaciones significativas para la disponibilidad y calidad de este.

6. BIBLIOGRÁFIA

- Aldwaik, S., & Pontius, R. (2012). *Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition.*
- Anzoategui, L., & Gil, P. A. (2023). *Frontera agrícola y multitemporalidad de cobertura vegetal en Páramo del Parque Regional Natural Cortadera (Boyacá , Colombia) Agricultural frontier and multi-temporality of vegetation cover in moorland of the Cortadera Regional Natural Park (Boyacá ,.. 44(1), 159–170. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000100159>*
- Ayala, J., Márquez, C., García, V., Recalde, C., Rodríguez, M., & Damián, D. (2017). Land cover classification in an ecuadorian mountain geosystem using a random forest classifier, spectral vegetation indices, and ancillary geographic data. *Geosciences (Switzerland)*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences7020034>
- Baxendale, C., & Buzai, G. (2011). Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica. Aportes de la Geografía para la elaboración del Diagnóstico en el Ordenamiento Territorial. *Fronteras*, 10, 25–38.
- Beltrán, I. (2019). *Una revisión de las técnicas de clasificación supervisada en la clasificación automática de textos.*
- Bolstad, P. (2016). GIS Fundamentals : A First Text on Geographic Information System5 th Edition. In *Manual of Geospatial Science and Technology, Second Edition.*
- Castro, A., Poo, A., & Mujica, F. (2023). Cultivo actual del manzano en Chiloé: una fotointerpretación histórico-agronómica. *Idesia (Arica)*, 41(1), 7–16. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292023000100007>
- Chulde, D. (2014). *Plan de manejo participativo del páramo comunal para el cuidado de las fuentes de agua dentro de la organización UCCI BT.*
- Chuncho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71–83. <https://www.researchgate.net/publication/344180955>
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. In (*Fundamentals of remote sensing from space.*
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46 ST-A coefficient of agreement for nominal. <http://epm.sagepub.com>
- Condori, I., Loza, M., Mamani, F., & Solíz, H. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 - 2014. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 25–44. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2018.090100025>
- Damian, D., Márquez, C., García, V., Rodriguez, 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.
- Damián, D., Márquez, C., García, V., Rodriguez, 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.

- Farfán, M., Forero, S., & Avellaneda, L. (2020). Evaluation of impacts of potato crops and livestock farming in Neotropical high Andean Páramo soils, Colombia | Evaluación de impactos del cultivo de papa y la explotación ganadera en suelos de Páramo Neotropical alto Andino, Colombia. *Acta Agronomica*, 69(2), 106–116.
- Flores, G. (2017). *Notas del curso de fotointerpretación ingeniero en geomática*.
- Fondo de Páramos Tungurahua y Lucha contra la Pobreza. (2023). *Cerro la igualata*.
- GADM Quero. (2020). Plan de Desarrollo de Ordenamiento Territorial del Cantón Santiago de Quero. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Aguarico*, 157.
- García, K. (2022). *Ánálisis del cambio de uso y cobertura de suelo en la Región Este del Cantón Cuenca*.
- García, V., Márquez, C., Isenhart, T., Rodríguez, M., Crespo, S., & Cifuentes, A. (2019). Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador. *Heliyon*, 5(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02701>
- Gómez, L. (2021). *Análisis de indicadores de cambio de usos del suelo y vulnerabilidad de cambio en la ciudad de Goya, Corrientes, Argentina, entre 1990 y 2016*. 25(1).
- González, A. (2018). *Desarrollo de una aplicación para la reparación de huecos (gapfilling) de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+*. 48. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2819018%0Ahttps://rei.iteso.mx/handle/11117/5723>
- Heileen, A., Mora, R., & Vargas, C. (2014). Metodología Para La Corrección Atmosférica De Imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 Y Landsat 8 Con El Módulo Flaash Del Software Envi. Atmospheric Correction Methodology for Aster, Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 Images With Envi Flaash Module Software. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53). <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Huang, J., Pontius, R., Li, Q., & Zhang, Y. (2012). Use of intensity analysis to link patterns with processes of land change from 1986 to 2007 in a coastal watershed of southeast China. *Applied Geography*, 34, 371–384. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.01.001>
- Jaramillo, D. (2015). *Determinación de zonas aptas para restauración a partir de imágenes de sensores remotos, para una zona de los llanos orientales colombianos, afectada por la sequía*. 26. https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6278/ARTICULO_TESIS_DJTT.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kindu, M., Schneider, T., Teketay, D., & Knoke, T. (2013). Land use/land cover change analysis using object-based classification approach in Munessa-Shashemene landscape of the ethiopian highlands. *Remote Sensing*, 5(5), 2411–2435. <https://doi.org/10.3390/rs5052411>
- Landis, R., & Koch, G. (1997). *An Application of Hierarchical Kappa-type Statistics in the Assessment of Majority Agreement among Multiple Observer*. 33(2), 363–374.
- Ministerio del Ambiente. (2013). Beneficios del manejo sostenible de la tierra. *Ministerio Del Ambiente*, 1–32. <https://bit.ly/3vCtklf>
- Ministerio del Ambiente. (2021). Programa Nacional de Reforestación con Fines de

- Conservación Ambiental, Protección de Cuencas Hidrográficas y Beneficios Alternos. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue February).
- <https://doi.org/10.1080/09638288.2019.1595750> <https://doi.org/10.1080/17518423.2017.1368728> <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2020.103766> <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1689076>
- Nemmaoui, A., Aguilar, M., Novelli, A., & Aguilar, F. (2017). *Mapeado de invernaderos mediante teledetección orientada a objetos: relación entre la calidad de la segmentación y precisión de la clasificación*. April.
- Obdulio, H., & Quiroa, F. (2014). Cambios de uso del suelo y crecimiento urbano: Estudio de caso en los municipios conurbados de la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos, Quetzaltenango, Guatemala / Changes in land use and urban growth: Case study in the neighboring municipalities of the Co. *Revista Tecnología En Marcha VO - 27, 1*, 104.
- Olaya, V. (2017). Sistemas de Información Geográfica. *Экономика Региона*, 32.
- Ortega, J., & Arias, D. (2022). Análisis de los efectos del cambio de uso de suelo en el paisaje del bosque húmedo: una visión al año 2022 en la cuenca del río Cayapas-Ecuador. *Sathiri*, 17(1), 288–311. <https://doi.org/10.32645/13906925.1116>
- Perea, A., Meroño, J., & Aguilera, M. (2009). Application of Numenta® Hierarchical Temporal Memory for land-use classification. *South African Journal of Science*, 105(9–10), 370–375. <https://doi.org/10.4102/sajs.v105i9/10.114>
- Pinos, N. (2016). Prospective land use and vegetation cover on land management - Case canton Cuenca. *Estoa*, 005(009), 7–19. <https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.02>
- Pombo, D. G. (2017). Expansión urbana acelerada en una ciudad intermedia: causas y consecuencia. Santa Rosa-La Pampa. *Universidad Nacional de Córdoba*, 114.
- Pontius, R., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. 101, 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Céller, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138–153.
- Rani, N., Mandla, V., & Singh, T. (2017). Evaluation of atmospheric corrections on hyperspectral data with special reference to mineral mapping. *Geoscience Frontiers*, 8(4), 797–808. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.06.004>
- Reynoso, R., Valdez, J., Escalona, M., de los Santos, H., & Pérez, M. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 72–81. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=113195823&language=es&site=eds-live>
- Rico, F., & Rico, H. (2019). El uso del suelo, ¿Un problema de capacidad productiva y de políticas públicas? *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 5(2). <https://doi.org/10.22335/rct.v5i2.121>

- Rodríguez, L., & Cabrera, J. (2017). Análisis espacial de las dinámicas de crecimiento económico en México (1999-2009). *Economía Sociedad y Territorio*, xvii(1), 709. <https://doi.org/10.22136/est2017913>
- Romo, M., & Calero, E. (2022). Degradación de la vegetación de páramo por efecto de la ganadería en el Parque Nacional Llanganates, Ecuador. *Revista Verde de Agroecología e Desenvolvimento Sustentável*, 17(1), 27–34. <https://doi.org/10.18378/rvads.v17i1.9093>
- Suárez, A., Jiménez, A., Castro, M., & Cruz, A. (2017). *Clasificación y mapeo automático de coberturas del suelo en imágenes satelitales utilizando Redes Neuronales Convolucionales*. 21(1).
- Vazquez, P., Zulaica, L., Sequeira, N., & Daga, D. Y. (2019). Agricultural expansion and potential implications on ecosystem services in the landscapes of Necochea county, Buenos Aires, Argentina. *Revista Acta Geografica*, 13(31), 171–196.
- Vicente, C. (2016). *Calidad de la Segmentación y precisión de la Clasificación en Teledetección Orientada a Objetos. Caso de los invernaderos de Almería*.

7. ANEXOS

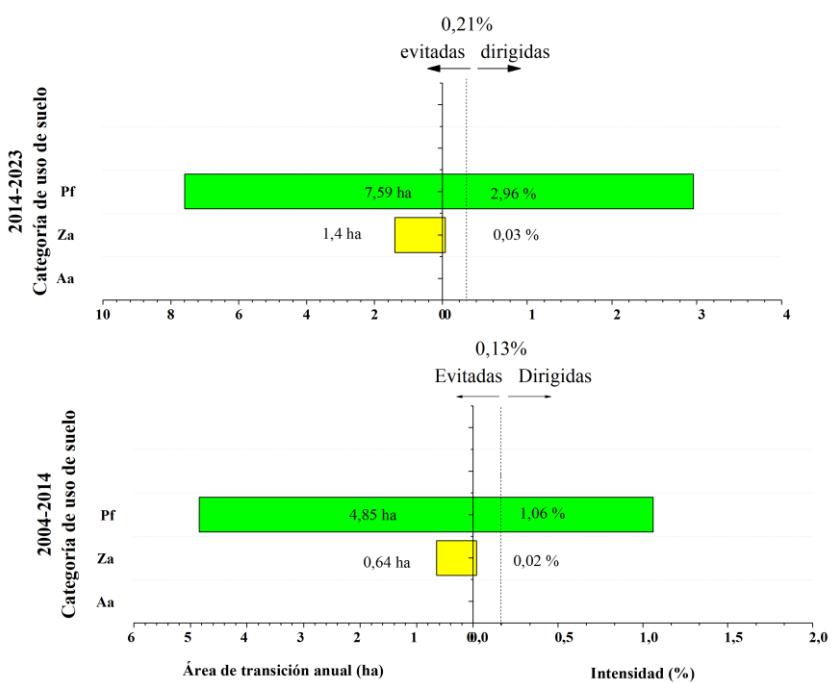
Anexo 1. Puntos de control tomados en la quebrada Hualcanga

FID	X	Y	USO	FID	X	Y	USO
0	764066,327	9834462,9	PARAMO	59	765251,608	9842440,85	ZONA
1	763544,614	9834905,04	PARAMO	60	766841,37	9843249,82	AGROPECUARIA
2	764751,054	9836535,47	PARAMO	61	766814,942	9843383,84	ZONA
3	764119,555	9834597,8	PARAMO	62	766662,268	9843667,91	AGROPECUARIA
		ÁREA					ZONA
4	769447,826	9839854,15	ANTRÓPICA	63	766522,384	9843879,11	PLANTACION
		ÁREA					
5	767982,374	9840642,65	ANTRÓPICA	64	766569,527	9844780,18	FORESTAL
		ÁREA					ÁREA
6	767374,343	9841026,28	ANTRÓPICA	65	767971,098	9842715,67	ANTRÓPICA
		ZONA					ÁREA
7	765759,025	9841483,18	AGROPECUARIA	66	769490,109	9842263,15	ANTRÓPICA
		ÁREA					ZONA
8	765193,596	9841766,7	ANTRÓPICA	67	768503,073	9842081,7	AGROPECUARIA
		ZONA					ZONA
9	764991,004	9840201,01	AGROPECUARIA	68	768881,103	9841699,29	AGROPECUARIA
		ZONA					ZONA
10	765945,63	9839022,62	AGROPECUARIA	69	769176,061	9841376,64	AGROPECUARIA
		ZONA					ÁREA
11	764021,787	9838197,42	AGROPECUARIA	70	769554,507	9840775,34	ANTRÓPICA
		PLANTACION					ZONA
12	764437,117	9836593,79	FORESTAL	71	768759,267	9840605,56	AGROPECUARIA
		PLANTACION					ZONA
13	764257,016	9835823,36	FORESTAL	72	768153,324	9841094,63	AGROPECUARIA
		PLANTACION					ZONA
14	764303,05	9836135,79	FORESTAL	73	768272,91	9841318,32	AGROPECUARIA
		PLANTACION					ZONA
15	764496,366	9836799,92	FORESTAL	74	769149,279	9840997,46	AGROPECUARIA
		PLANTACION					ZONA
16	764534,585	9837084,67	FORESTAL	75	769427,829	9839703,62	AGROPECUARIA
		ZONA					ZONA
17	764705,224	9837637,32	AGROPECUARIA	76	769659,886	9840928,63	AGROPECUARIA
		ZONA					ZONA
18	765029,975	9838391,13	AGROPECUARIA	77	770210,655	9839437,89	AGROPECUARIA
		ZONA					ZONA
19	764028,991	9839752,82	AGROPECUARIA	78	770036,383	9840445,21	AGROPECUARIA
		ZONA					ZONA
20	764247,273	9840523,04	AGROPECUARIA	79	770036,383	9840445,21	AGROPECUARIA
		ZONA					ZONA
21	764621,76	9839809,66	AGROPECUARIA	80	771239,351	9840062,21	AGROPECUARIA
		ZONA					ZONA
22	764572,32	9838850,7	AGROPECUARIA	81	771322,197	9839563,6	AGROPECUARIA
		ZONA					
23	764386,588	9838336,48	AGROPECUARIA	82	764897,481	9836706,6	PARAMO

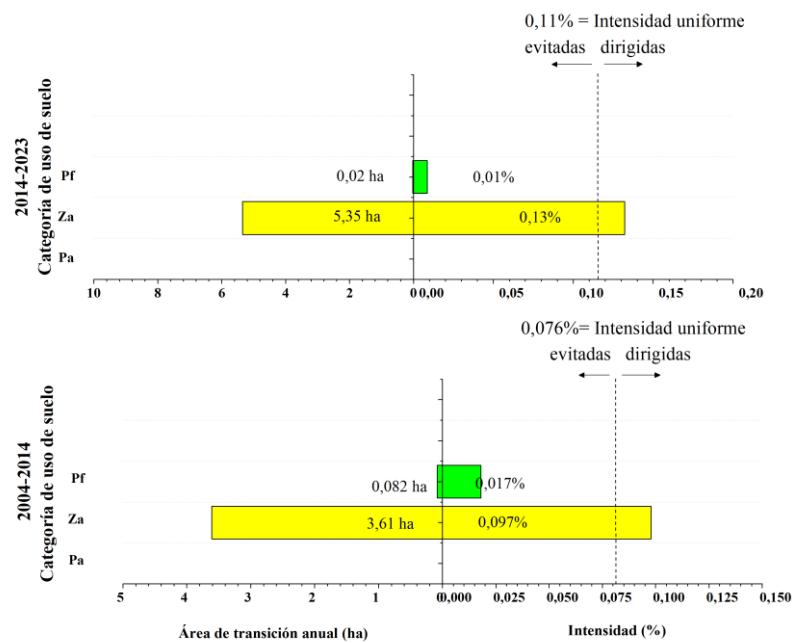
24	764061,396	9837119,35	PARAMO ZONA		83	763666,322	9835286,04	PARAMO
25	764002,902	9837303,7	AGROPECUARIA PLANTACION		84	763750,927	9836186,22	PARAMO
26	764914,088	9837443,61	FORESTAL PLANTACION		85	764574,64	9835576,76	PARAMO PLANTACION
27	764409,475	9837579,9	FORESTAL PLANTACION		86	766205,064	9844045,31	FORESTAL PLANTACION
28	764370,511	9837350,33	FORESTAL ZONA		87	766205,064	9844045,31	FORESTAL PLANTACION
29	764373,553	9837390,15	AGROPECUARIA PLANTACION		88	768245,548	9841739,83	FORESTAL PLANTACION
30	764459,056	9838548,1	FORESTAL ZONA		89	769477,45	9840501,58	FORESTAL PLANTACION
31	768894,743	9839080,63	AGROPECUARIA ÁREA		90	767159,696	9842838,38	FORESTAL PLANTACION
32	767102,767	9840478,5	ANTRÓPICA PLANTACION		91	767159,696	9842838,38	FORESTAL PLANTACION
33	767159,696	9842838,38	FORESTAL PLANTACION		92	766205,064	9844045,31	FORESTAL PLANTACION
34	767917,509	9842161,94	FORESTAL PLANTACION		93	767712,147	9842508,18	FORESTAL PLANTACION
35	766904,486	9844010,41	FORESTAL PLANTACION		94	767159,696	9842838,38	FORESTAL PLANTACION
36	766870,754	9843180,96	FORESTAL PLANTACION		95	765805,026	9843801,47	FORESTAL PLANTACION
37	766499,737	9843920,83	FORESTAL ÁREA		96	765805,026	9843801,47	FORESTAL PLANTACION
38	766220,216	9846325,96	ANTRÓPICA PLANTACION		97	765805,026	9843801,47	FORESTAL PLANTACION
39	767357,314	9843329,97	FORESTAL PLANTACION		98	765805,026	9843801,47	FORESTAL PLANTACION
40	766341,837	9845325,38	FORESTAL PLANTACION		99	765274,649	9843385,99	FORESTAL PLANTACION
41	766320,734	9845741,02	FORESTAL PLANTACION		100	764923,417	9842620,04	FORESTAL ZONA
42	766058,176	9846307,7	FORESTAL PLANTACION		101	766460,845	9838027,06	AGROPECUARIA ZONA
43	765888,978	9846141,01	FORESTAL ZONA		102	765952,844	9839881,26	AGROPECUARIA ZONA
44	766132,783	9845323,17	AGROPECUARIA ZONA		103	765886,363	9840546,63	AGROPECUARIA ZONA
45	766252,034	9845438,5	AGROPECUARIA ZONA		104	767317,232	9838057,42	AGROPECUARIA ZONA
46	766306,826	9844217,02	AGROPECUARIA PLANTACION		105	766672,312	9840811,25	AGROPECUARIA ZONA
47	766205,064	9844045,31	FORESTAL ÁREA		106	767356,788	9839334,07	AGROPECUARIA ZONA
48	765864,122	9843278,34	ANTRÓPICA ÁREA		107	766905,035	9840017,49	AGROPECUARIA ÁREA
49	765774,093	9842949,04	ANTRÓPICA		108	766421,3	9844680,25	ANTRÓPICA

			ZONA			ZONA
50	765424,672	9841840,42	AGROPECUARIA	109	765605,399	9844456,14
			PLANTACION			ZONA
51	764895,415	9841318,99	FORESTAL	110	765176,617	9844102,93
			ZONA			ZONA
52	765759,946	9841477,4	AGROPECUARIA	111	764531,998	9842947,25
			ZONA			ZONA
53	766170,272	9841491,11	AGROPECUARIA	112	764542,581	9841603,17
			PLANTACION			ZONA
54	766819,359	9841375,34	FORESTAL	113	772396,471	9840297,04
			ZONA			ZONA
55	766913,253	9841740,75	AGROPECUARIA	114	772396,471	9840297,04
			ZONA			ZONA
56	766510,12	9842399,01	AGROPECUARIA	115	771004,406	9840834,9
			ZONA			ZONA
57	766672,312	9842436,85	AGROPECUARIA	116	765739,06	9836475,54
			ZONA			ZONA
58	766981,235	9842455,89	AGROPECUARIA	117	765802,56	9837565,63

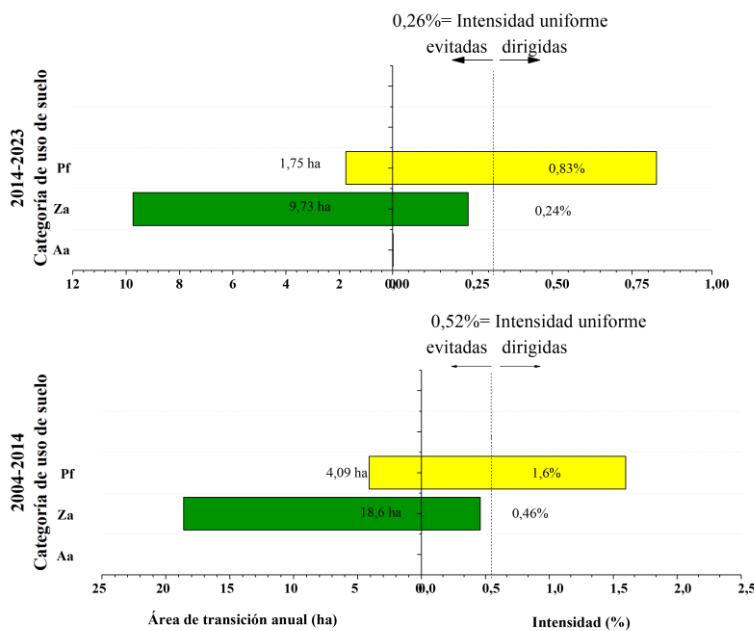
Anexo 2. Trascendencia en términos de ganancia para la categoría Páramo



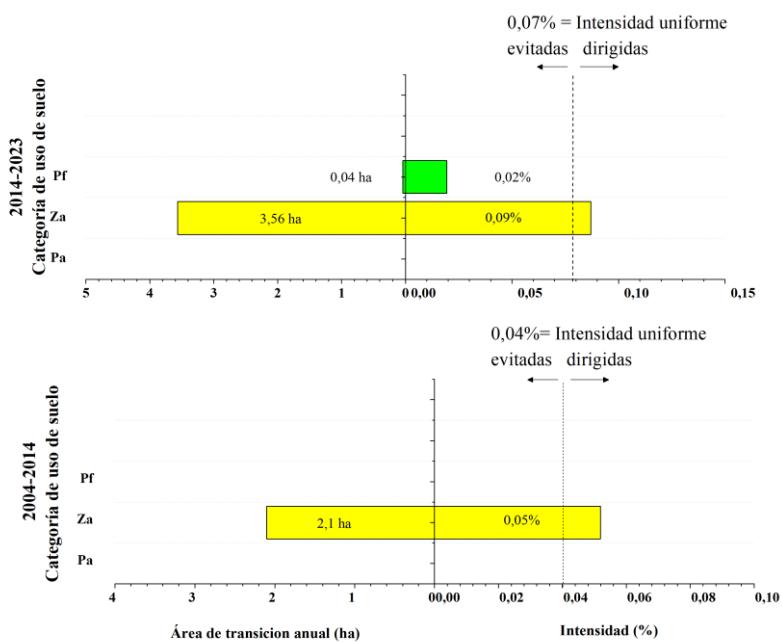
Anexo 3. Trascendencia en términos de ganancia para la categoría Área antrópica



Anexo 4. Trascendencia en términos de pérdidas para la categoría Páramo



Anexo 5. Trascendencia en términos de pérdidas para la categoría Área antrópica



Anexo 6. Toma de puntos de control de Páramo



Anexo 7. Toma de puntos de control de la Plantación forestal



Anexo 8. Toma de puntos de control de Zona agropecuaria



Anexo 9. Toma de puntos de control de Área antrópica

