



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería Agrícola

Análisis multitemporal de los cambios de uso de suelo, de las microcuencas productoras de agua, en los sistemas de riego públicos de la Cuenca Superior del Río Catamayo.

Trabajo de Titulación, previo a la
obtención del título de Ingeniera
Agrícola

AUTORA:

Kathya Daniela Agurto Mendoza

DIRECTOR:

Aníbal Eduardo González González, M.Sc.

Loja – Ecuador

2024

Educamos para **Transformar**

Certificación

Loja, 30 de marzo de 2023

Ing. Anibal Eduardo González, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **“Análisis multitemporal de los cambios de uso de suelo, de las microcuencas productoras de agua, en los sistemas de riego públicos de la Cuenca Superior del Río Catamayo.”**, previo a la obtención del título de Ingeniera Agrícola, de la autoría de la estudiante Kathy Daniela Agurto Mendoza, con cédula de identidad Nro. 1150084877, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Atentamente,



Ing. Anibal Eduardo González, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Kathya Daniela Agurto Mendoza**, declaro ser autora del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido de la misma. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



Firma:

Cédula de identidad: 1150084877

Fecha: Loja 01 de julio del 2024

Correo electrónico: kathya.agurto@unl.edu.ec

Celular: 0997060979

Carta de Autorización por parte de la autora para la consulta, reproducción parcial y/o total, y publicación electrónica de texto completo, del Trabajo de Titulación

Yo, **Kathya Daniela Agurto Mendoza**, declaro ser autora del Trabajo de Titulación denominado: “**Análisis multitemporal de los cambios de uso de suelo, de las microcuencas productoras de agua, en los sistemas de riego públicos de la Cuenca Superior del Río Catamayo**”, como requisito para optar por el título de **Ingeniera Agrícola**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo con el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, al primer día del mes de julio de dos mil veinticuatro.



Firma:

Autora: Kathya Daniela Agurto Mendoza

Cedula de identidad: 1150084877

Dirección: Loja, Benjamín Carrión y Julio Ordoñez

Correo Electrónico: kathya.agurto@unl.edu.ec

Celular: 0997060979

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Trabajo de Titulación: Ing. Aníbal Eduardo González González, Mg. Sc.

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios por haberme brindado sabiduría y perseverancia para culminar mis estudios académicos y alcanzar mis sueños de forma honesta, y ser mi acompañante en cada uno de mis pasos.

A mis padres Rober y Mariana quienes con amor, paciencia y esfuerzo supieron sembrar en mí valores que me han hecho ser una persona de bien que lucha por sus sueños con esfuerzo y valentía, cumpliendo una meta más siendo ellos el pilar fundamental en mi vida y mi carrera.

Kathya Daniela Agurto Mendoza

Agradecimiento

Culminar los estudios universitarios para un joven lleno de emociones y metas es un orgullo y un placer único el saber que ha logrado algo tan importante, por ello en primer lugar agradezco a Dios por ser un guía espiritual en todo este trayecto llamado vida.

A la Universidad Nacional de Loja y a la Carrera de Ingeniería Agrícola por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y cumplir uno de mis sueños que es ser una profesional.

A mi director de tesis al Ing. Aníbal González Mg. Sc. por su apoyo y orientación para la elaboración de la presente investigación, siendo el principal colaborador durante todo este proceso.

A mis padres Rober Agurto y Mariana Mendoza, por ser mis pilares fundamentales en todo este trayecto de estudio, por sus palabras de apoyo y confianza que hicieron que cada instante siga esforzándome por cumplir una meta que es de ellos también, por que se esforzaron en que tenga todo lo necesario para poder culminar mis estudios, tenga un título universitario y sobresalir en la vida.

Al Ingeniero Cesar Benavides, quien contribuyó trascendentalmente en el proceso de esta investigación con su orientación y sugerencias. De igual manera al Ingeniero José Merino y Fabián Sotomayor, quienes contribuyeron de gran manera con la información necesaria para la elaboración de la presente investigación.

Kathya Daniela Agurto Mendoza

Índice de contenidos

Portada.....	i
Certificación	ii
Autoría..	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de anexos	xiii
1. Título.....	1
2. Resumen.....	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco Teórico	7
4.1. Uso del suelo.....	7
4.1.1. Bosque nativo	7
4.1.2. Cuerpos de agua natural.....	7
4.1.3. Erial.....	7
4.1.4. Páramo	7
4.1.5. Pastizal.....	8
4.1.6. Plantación Forestal.....	8
4.1.7. Tierra Agropecuaria.....	8
4.1.8. Vegetación Arbustiva y Herbácea	8
4.2. Cambio de uso de suelo	9
4.2.1. Efectos del cambio de uso del suelo	9
4.2.2. Importancia de los estudios de cambio de uso del suelo	9
4.2.3. Deforestación	10
4.3. Importancia del suelo y vegetación en la regulación hídrica.....	10
4.4. Ciclo hidrológico	10
4.5. Ortofotos	11
4.5.1. Ajuste radiométrico de las ortofotos.....	11
4.5.2. Métodos de unión de ortofotos	11

4.6.	Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados a la modelación de escenarios de deforestación	12
4.7.	Análisis Multitemporal	12
4.7.1.	Herramientas para realizar los análisis multitemporales	12
4.8.	Modelos para analizar los cambios de uso del suelo	13
4.8.1.	Modelado de cambios de uso del suelo	14
4.8.2.	Análisis de cadenas de Markov	15
4.8.3.	Datos generales necesarios para la modelación	15
5.	Metodología	16
5.1.	Ubicación de la Cuenca Superior del Rio Catamayo.....	16
5.2.	Metodología para el primer objetivo	18
5.2.1.	Recopilación de información.....	18
5.2.2.	Trabajo de campo	18
5.2.3.	Clasificación supervisada	18
5.2.4.	Determinación del cambio de uso del suelo y la tasa de deforestación.....	19
5.2.4.1.	Identificación del cambio de uso del suelo.....	19
5.2.4.2.	Análisis de la tasa de deforestación	21
5.3.	Metodología para el segundo objetivo.....	21
5.3.1.	Generación de escenario de deforestación al año 2030	22
5.3.1.1.	Variables explicativas	23
5.3.1.2.	Proceso de predicción de cambios en LCM	23
5.3.1.3.	Evaluación de cambios	23
5.3.1.4.	Predicción del cambio de uso del suelo	24
5.3.1.5.	Calibración y Validación del modelo	24
6.	Resultados.....	26
6.1.	Cambio del uso del suelo actual mediante un análisis multitemporal para los periodos comprendidos de 2010 a 2022	26
6.1.1.	Estado actual del uso del suelo	26
6.1.2.	Análisis de los cambios del uso del suelo en las microcuencas productoras de agua para los sistemas de riego públicos.....	31
6.1.2.1.	Áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010 – 2022	31
6.1.3.	Cambio de Uso del Suelo entre el año 2010 – 2022.....	35
6.1.4.	Pérdidas y ganancias de los usos del suelo en las microcuencas.....	36
6.1.5.	Contribución de cambio neto en bosque.....	45
6.1.6.	Deforestación total anual promedio y tasa anual de cambio de las microcuencas productoras de agua para los sistemas de riego públicos	52

6.1.7.	Variables explicativas	53
6.2.	Modelación de los cambios futuros de deforestación en las microcuencas de estudio, en base al modelo de las ortofotos, de TerrSet	53
7.	Discusión	61
7.1.	Cambio de uso del suelo y tasa de deforestación periodo 2010 – 2022	61
7.2.	Escenarios de deforestación al 2060	63
8.	Conclusiones	65
9.	Recomendaciones	67
10.	Bibliografía	68
11.	Anexos	75

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de los sistemas de riego públicos de la Cuenca Superior del Río Catamayo.	17
Tabla 2. Clases de cobertura.	18
Tabla 3. Tipos de cambio identificados en las microcuencas, en el período 2010 - 2022.....	20
Tabla 4. Características de los tipos de cambio identificados en las microcuencas, en el período 2010-2022.....	20
Tabla 5. Matriz de cambios utilizada para el cruce de mapas.....	21
Tabla 6. Matriz de confusión de 2x2.....	25
Tabla 7. Porcentajes de cobertura de las microcuencas de estudio para los años 2010 y 2022.	26
Tabla 8. Áreas de cambio de uso del suelo del período 2010-2022 en las microcuencas de estudio.....	32
Tabla 9. Porcentaje de cambios de uso del suelo por microcuencas de los períodos 2010 – 2022.	35
Tabla 10. Deforestación anual y tasa de deforestación por microcuenca.	52
Tabla 11. Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río Mazanamaca (sistema de riego Quinara).	54
Tabla 12. Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río Capamaco (sistema de riego Vilcabamba).	55
Tabla 13. Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río Campana (sistema de riego Campana-Malacatos).	56
Tabla 14. Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río San Agustín (sistema de riego La Era).....	58
Tabla 15. Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río Aguacolla (sistema de riego La Palmira).	59

Índice de figuras

Figura 1. Mapa base de ubicación de las microcuencas de estudio.....	17
Figura 2. Modelamiento para determinar el cambios de cobertura.	19
Figura 3. Módulo de Change Analysis de TerrSet.....	22
Figura 4. Mapa de Usos del Suelo de la microcuenca del río Mazanamaca (años 2010-2022).	29
Figura 5. Mapa de Uso del Suelo de la microcuenca del río Capamaco (años 2010-2022). ...	29
Figura 6. Mapa de Uso del Suelo de la microcuenca del río Campana (años 2010-2022).	30
Figura 7. Mapa de Uso del Suelo de la microcuenca del río San Agustín (años 2010-2022).	30
Figura 8. Mapa de Uso del Suelo de la microcuenca del río Aguacolla (años 2010-2022). ...	31
Figura 9. Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Mazanamaca.	33
Figura 10. Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Capamaco.	33
Figura 11. Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Campana.	34
Figura 12. Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río San Agustín.	34
Figura 13. Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Aguacolla.....	35
Figura 14. Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río Mazanamaca.	36
Figura 15. Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Mazanamaca.	37
Figura 16. Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río Capamaco. ...	38
Figura 17. Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Capamaco.....	39
Figura 18. Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río Campana.	40
Figura 19. Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Campana.	41
Figura 20. Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río San Agustín. 42	
Figura 21. Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río San Agustín.....	43
Figura 22. Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río Aguacolla.....	44
Figura 23. Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 Microcuenca del río Aguacolla.....	45
Figura 24. Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río Mazanamarca.	46

Figura 25. Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río Mazanamaca.	46
Figura 26. Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río Capamaco.	47
Figura 27. Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río Capamaco.	48
Figura 28. Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río Campana.	48
Figura 29. Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río Campana...49	
Figura 30. Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río San Agustín.....	50
Figura 31. Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río San Agustín.	50
Figura 32. Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río Aguacolla.	51
Figura 33. Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río Aguacolla..52	
Figura 34. Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río Mazanamaca.	54
Figura 35. Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río Capamaco.	56
Figura 36. Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río Campana.	57
Figura 37. Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río San Agustín.....	58
Figura 38. Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río Aguacolla.	60

Índice de anexos

Anexo 1. Área deforestada en las microcuencas que integran la Cuenca Superior del Río Catamayo.	75
Anexo 2. Tablas de las unidades de cobertura de cada microcuenca periodo 2010-2022.....	75
Anexo 3. Matriz de Tabulación cruzada para cada microcuenca.	77
Anexo 4. Tablas de las transiciones entre los usos del suelo en las microcuencas.	79
Anexo 5. Validación Roc de cada microcuenca.	83
Anexo 6. Tabla de rangos de clasificación del cambio	83
Anexo 7. Áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2022 – 2030 en cada microcuenca.	84
Anexo 8. Áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2022 – 2060 en cada microcuenca.	85
Anexo 9. <i>Fotografías de salidas de campo a las microcuencas.</i>	87
Anexo 10. Certificación de traducción Abstract.....	88

1. Título

Análisis multitemporal de los cambios de uso de suelo, de las microcuencas productoras de agua, en los sistemas de riego públicos de la Cuenca Superior del Río Catamayo.

2. Resumen

La continua intervención humana produce impactos negativos en la vegetación original de las cuencas hidrográficas, generando cambios de uso de suelo que conllevan a la pérdida de cobertura boscosa provocando disminución de los aportes hídricos, en consecuencia, reducen la producción agrícola. El análisis multitemporal permite detectar cambios entre diferentes fechas de referencia, deduciendo la evolución del medio natural. El objetivo de esta investigación fue analizar los cambios de usos del suelo para el período 2010 - 2022 y predecir los usos de suelo para el 2030 y 2060. La metodología partió de la fotointerpretación y digitalización de ortofotos con el fin de conocer la evolución de los ecosistemas mediante los sistemas de información geográfica, analizando los cambios con el módulo Intersec de la herramienta Geoprocessing del programa ArcGIS y la matriz de cambios utilizada para el cruce de mapas; para el efecto se utilizó la herramienta LCM del programa TerrSet, para realizar proyecciones a futuro de los cambios de usos del suelo, donde se valoró variables restrictivas e incentivos para los cambios de uso de suelo que afectan en mayor medida este proceso. El estudio muestra que de un total de 187.70 km² de superficie que suman todas las microcuencas en estudio, el 92.31 % se han mantenido intactas, es decir no se han generado cambios de cobertura durante este período; sin embargo, 17.09 km² (16.98 %) han experimentado cambios a otro tipo de cobertura, ya sea por la deforestación provocada por la acción humana para la ampliación de pastos para ganado y la extensión de tierra agropecuaria para la producción agrícola. En cuanto a la modelación, se obtuvo para el 2030 una reducción de 44.05 % de bosque, y para el 2060 de 42.24 %; al contrario, los pastizales y tierra agropecuaria, indican un incremento de 17.56 % para el 2030 y de 19.15 % al 2060, entre toda la zona de estudio. Los resultados obtenidos detallan, que en las microcuencas Campana y Capamaco se tiene un bajo grado de intervención, en las microcuencas Mazanamaca y Aguacolla se tiene un grado de intervención medio, sin embargo, en la microcuenca de San Agustín se determinó un alto grado de intervención, debido al incremento de las tierras agropecuarias, y la disminución de la vegetación natural.

Palabras clave: Análisis multitemporal, cambios de uso del suelo, deforestación, Land Change Modeler.

Abstract

The continuous human intervention in the hydrographic basins has negative effects on their original vegetation, with changes in land use resulting in the loss of forest cover and a reduction in water resources, thereby affecting agricultural production. Multitemporal analysis is a tool that allows identifying these changes over time, helping to understand the evolution of the natural environment. This study focused on analyzing changes in land use between 2010 and 2022, and projecting these changes for 2030 and 2060. Using techniques such as photointerpretation and orthophoto digitization, along with geographic information systems, these changes were examined using tools like the Intersec module of ArcGIS and the change matrix, as well as the LCM model of TerrSet for future projections. The results indicate that, in the total area of 187.70 km² in the studied microbasins, 92.31% remained unchanged in their coverage, while 16.98% experienced changes to other types of coverage, such as deforestation for the expansion of pastures and agricultural lands. The modeling shows a reduction of forest by 44.05% for 2030 and 42.24% for 2060, while pastures and agricultural lands show an increase of 17.56% and 19.15% respectively in the study area. It is observed that the Campana and Capamaco microbasins have a low degree of intervention, while Mazanamaca and Aguacolla show a medium degree, and San Agustín presents a high degree of intervention due to the increase in agricultural lands and the decrease in natural vegetation.

Keywords: Multitemporal analysis, land use changes, deforestation, Land Change Modeler.

3. Introducción

El análisis multitemporal permite detectar cambios de un medio natural o antrópico, en el tiempo. Los cambios se deben a las actividades que se desarrollan en dicho medio (Ruiz et al., 2014). Estos análisis se realizan mediante la comparación de las coberturas vegetales interpretadas en dos imágenes de satélite o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas (Ramírez, 2015). Como interface entre la información espacial y el Sistema de Información Geográfica (SIG) se encuentra la fotointerpretación, que es una técnica que identifica y cuantifica áreas (objetos) de interés, como, por ejemplo, un catastro de vegetación, en que se categorizan ciertas áreas diferenciadas por un patrón de vegetación y se delimitan sus respectivas superficies (Condori et al., 2018).

La cuenca, es la unidad que se utiliza para la gestión integrada de los recursos hídricos. Las políticas para utilizar el territorio de una cuenca como base para la gestión del agua han tenido diferentes enfoques y una desigual evolución en los países de América Latina y el Caribe. Desde fines de los años treinta, en muchos de ellos se ha tratado de adoptar los modelos de gestión del agua a nivel de cuenca, sin embargo los resultados no han sido satisfactorios y actualmente aún existe una serie de dificultades políticas y ambientales (Dourojeanni et al., 2002).

Las cuencas hidrográficas del Ecuador, en su mayoría no tienen un manejo adecuado de conservación, por tal razón se encuentran en un gran porcentaje degradadas (50 %), lo que ocasiona que el ciclo hidrológico del agua se vea afectado, provocando poca retención de humedad, erosión e inundaciones en las épocas de lluvias y escasez de agua en los periodos de estiaje (Dourojeanni et al., 2002) (Jaya-Santillán, 2023). Aun así Ecuador cuenta con recursos hídricos para el abastecimiento de agua, sin embargo, el deterioro de las fuentes de agua avanza aceleradamente siendo necesario organizar su uso y conservación con gestión integral que garantice la disponibilidad del recurso para las futuras generaciones y el desarrollo (Cisneros et al., 2008).

Dentro del territorio que comprende la provincia de Loja, se ubican algunas cuencas importantes, siendo una de ellas la cuenca del río Catamayo. Esta cuenca es de vital importancia para la producción agrícola y pecuaria de la provincia de Loja y el norte del Perú. (Cuenca, 2015). En lo que comprende la Cuenca Superior del Río Catamayo se encuentran las microcuencas de captación de agua para los sistemas de riego: Campana-Malacatos, La Era, La

Palmira, Vilcabamba y Quinara, las cuales son sustanciales para los agricultores que aprovechan el recurso agua que provienen de las cuencas de captación con fines de riego (Municipio de Loja, 2014).

El agua es uno de los recursos más importantes de la Tierra, por sus diversos usos. Una cuenca hidrográfica es el área de terreno que contribuye al flujo del agua en un río o quebrada. Estas cuencas de captación son elemento fundamental en la obtención del agua para atender las necesidades de los diferentes usuarios, a largo plazo. Por eso es importante mantener las cuencas hidrográficas saludables para así garantizar una mejor calidad de agua en nuestros ríos y embalses, ya que disipan las inundaciones, aumentan la fertilidad de nuestros suelos y disminuyen el daño a la vida, la propiedad y los cuerpos de agua (Altamirano, 2017).

Los cambios de uso del suelo producen impactos negativos en las cuencas productoras de agua, reducen la capacidad de infiltración y disminuyen los aportes hídricos. En consecuencia, reducen la producción agrícola y ocasionan pérdidas económicas en los agricultores (Cotler, 2004). Estos procesos con el paso del tiempo son más notables y ocurren con rapidez, con ello generan pérdida de cobertura boscosa y disminuye la cantidad y calidad del recurso hídrico y del suelo (Ortega et al., 2018). Mientras se cuente con mayor cantidad de espacios con vegetación, existirá mayor infiltración y consecuentemente mayor recarga de los acuíferos, lo que podrá garantizar una disponibilidad del recurso hídrico en épocas de estiaje, periodo en el cual los cultivos necesitan agua de riego.

El presente estudio de análisis multitemporal se realizó con el fin de conocer los cambios en el uso del suelo que ha experimentado cada una de las microcuencas en los últimos 12 años, y modelar los escenarios futuros de deforestación en las zonas de estudio, tomando como herramienta el Modelador de Cambios en el Terreno (LCM, por sus siglas en inglés), del Sistema de Información Geográfica TerrSet.

El estudio se desarrolló dando cumplimiento a los siguientes objetivos:

Objetivo general

Analizar los cambios de uso de suelo, de las microcuencas productoras de agua, de los sistemas de riego públicos de la Cuenca Superior del Río Catamayo, mediante un análisis multitemporal.

Objetivo específico

- Determinar los cambios de uso de suelo de las microcuencas productoras de agua, de los sistemas de riego: Campana-Malacatos, La Palmira, La Era, Vilcabamba y Quinara, a través de un análisis multitemporal para los periodos comprendidos entre 2010 a 2022.
- Modelar la tendencia de cambio en el uso de suelo de las microcuencas estudiadas para los años 2030 y 2060.

4. Marco Teórico

4.1. Uso del suelo

El uso del suelo se refiere a la manera en la cual las coberturas son utilizadas por el hombre, para satisfacer sus necesidades materiales y espirituales. En otro contexto el uso de suelo describe las actividades del hombre que se desarrollan sobre la superficie terrestre y al influir el humano en el ambiente para producir bienes y servicios este uso tiende a transformarse (Pineda, 2011).

La cobertura vegetal puede disminuir la evaporación directa de agua. Así mismo, con sus raíces, las plantas estabilizan estos suelos, previniendo la erosión y ayudando a mantener en su sitio a la esponja que representan los suelos. Además, las plantas participan en la formación del suelo (Llambi et al., 2012). En las cuencas hidrográficas suelen haber diferentes tipos de uso del suelo, entre ellos encontramos:

4.1.1. Bosque nativo

Los bosques nativos constituyen importantes productores de servicios ecosistémicos (también llamados servicios ambientales). Entre estos servicios se incluyen la regulación y provisión de agua en calidad y cantidad, la captura de carbono, la conservación de suelos y de la diversidad biológica, y las oportunidades para el turismo y la recreación (Lara et al., 2010).

4.1.2. Cuerpos de agua natural

Comprende los depósitos de agua entre los que se considera los humedales, lagunas, ríos y quebradas, que se encuentran especialmente en las partes altas de las cordilleras y son mapeados dependiendo de su superficie (Prefectura de Loja, 2014).

4.1.3. Erial

Erial es terreno que no se cultiva ni se labra, especialmente cuando se abandona y se desarrolla en él vegetación espontánea, es un desierto abandonado. El erial es el lugar, cosa, que no tiene nada que se pueda aprovechar (Álvarez Vallejo, 2018).

4.1.4. Páramo

Los páramos son ecosistemas frágiles neotropicales de alta montaña. En Ecuador tienen una altura promedio de 3300 m.s.n.m., y cubre el 7 % de su territorio, y proveen servicios

ecosistémicos como: recursos hídricos de calidad y sumideros de carbono principalmente. Sus suelos con densidad aparente baja, estructura abierta y porosa posibilitan retención de agua y conductividad hidráulica altas, donde se desarrollan plantas endémicas y diversidad faunística (Chuncho, 2019).

4.1.5. Pastizal

Los pastizales son ecosistemas caracterizados por presentar una vegetación abierta dominada por especies herbáceas y cuya producción primaria es aprovechada directamente por los herbívoros. Suelen estar situados en zonas con productividad relativamente baja que no son adecuadas para usos agrícolas intensivos. En ellas, el pastoreo es un procedimiento eficaz para recolectar y transformar su dispersa producción primaria en productos para uso o consumo humano (Rebollo & Sal, 2003).

4.1.6. Plantación Forestal

Una plantación forestal es un ecosistema boscoso establecido por medio de la instalación en el terreno de plántulas, semillas o ambos, en el proceso de forestación o reforestación. Las plantaciones forestales aportan a la captura de carbono, mejora de la calidad del agua y mantenimiento o incremento de la biodiversidad local natural (Llerena et al., 2007).

4.1.7. Tierra Agropecuaria

Es aquel que se utiliza en el ámbito de la productividad para hacer referencia a un determinado tipo de suelo que es apto para todo tipo de cultivos y plantaciones, es decir, para la actividad agrícola o agricultura. El suelo agrícola debe ser en primer lugar un suelo fértil que permita el crecimiento y desarrollo de diferentes tipos de cultivo que sean luego cosechados y utilizados por el hombre, por lo cual también debe ser apto por sus componentes para el ser humano (Bembibre, 2011).

4.1.8. Vegetación Arbustiva y Herbácea

La vegetación arbustiva es una formación dominada por especies de plantas leñosas generalmente ramificadas desde la base de un tronco que en este caso es una estructura no muy bien definida. La vegetación herbácea se define como las formaciones conformadas por especies de plantas no lignificadas, sin ramificación y sin tronco definido cuyas hojas pueden ser anuales o perennifolias (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012).

4.2. Cambio de uso de suelo

El cambio de uso del suelo o de la vegetación en un ecosistema generalmente asume otro cambio en las relaciones funcionales que determinan el comportamiento hidrológico del suelo (Gutiérrez et al., 2014).

El estudio del cambio en los patrones de uso de la cuenca y su relación con los procesos naturales que definen el sistema, particularmente a nivel de paisaje, es de interés y utilidad para definir medidas y programas para el manejo de estos espacios. Esta temática ha sido abordada de forma sectorial e integrada desde distintos enfoques, tanto desde la perspectiva de las ciencias sociales como de las ciencias naturales, en especial la geografía y la ecología (Peña et al., 2011).

4.2.1. Efectos del cambio de uso del suelo

Las tendencias de cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) son procesos espaciales que siguen un comportamiento estocástico y son el resultado de interacciones complejas entre elementos físicos, biológicos y sociales (Chu et al., 2010). Además, son un producto derivado de la acción sinérgica de múltiples factores endógenos y exógenos que interactúan desde diferentes niveles de organización y se encuentran relacionados con cambios tecnológicos y ambientales, desarrollo económico, crecimiento poblacional y políticas públicas, que inducen cambios debido a programas de subsidio para actividades agropecuarias (Lambin et al., 2003)

La continua intervención humana ha modificado de una manera permanente la vegetación original; muchas especies nativas han desaparecido al urbanizarse grandes áreas y otras debido a las actividades agropecuarias, obteniendo una elevada concentración urbana y rural de la población; por tal razón en esta zona quedan pequeños espacios cubiertos de vegetación nativa (Carretero Poblete et al., 2020).

4.2.2. Importancia de los estudios de cambio de uso del suelo

Los estudios de cambio de uso del suelo y vegetación son herramientas diseñadas para establecer precisamente las tendencias de los procesos de deforestación, degradación y desertificación de una región, coadyuvando además a establecer posibles pérdidas en la diversidad (Lambin et al., 2001).

4.2.3. Deforestación

La deforestación es el proceso de desaparición de los bosques y la conversión de la tierra a usos no forestales, directamente causada por la acción del hombre sobre la naturaleza. La deforestación es normalmente un cambio drástico del uso de la tierra, a menudo caracterizado por la tala de árboles y la conversión a otros usos de la tierra, principalmente la agricultura. Entre los factores que llevan a la deforestación en gran escala se cuentan: el descuido y desconocimiento del valor intrínseco, la falta de valor atribuido, el manejo poco responsable de los bosques y leyes medioambientales deficientes (Ovalles U., 2011).

La degradación del bosque es la reducción de la capacidad de un bosque de proporcionar los bienes y servicios. Se está degradando un bosque cuando la madera, la leña y otros productos del bosque se extraen de una manera insostenible, y cuando se están disminuyendo los valores del bosque (Ovalles U., 2011).

4.3. Importancia del suelo y vegetación en la regulación hídrica

La vegetación constituye un factor regulador en los procesos hidrológicos porque actúa de barrera capaz de interceptar las precipitaciones, variando su flujo y distribución bajo el área de su cobertura. Parte de la precipitación es interceptada por la vegetación, otra parte cae al suelo y dependiendo de las condiciones de cobertura del suelo, del tipo de suelo y de la pendiente del terreno, esta agua puede quedar encharcada, escurrir superficialmente o infiltrarse (Ramos et al., 2010).

4.4. Ciclo hidrológico

Es la interminable circulación que siguen las partículas de agua en cualquiera de sus tres estados físicos (sólido, líquido y gaseoso), cuya circulación se efectúa en forma natural, sufriendo transformaciones físicas. A ciencia cierta no se sabe dónde se inicia el ciclo hidrológico, pero se considera que por ocupar los mares y océanos el 70% de la superficie terrestre, es ahí donde se inicia el ciclo, ya que la evaporación proveniente de ellos es mucho más alta que la de la tierra y la de algunas partes de la atmósfera (Gámez, 2009).

Los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico son: evaporación, condensación, precipitación, intercepción, infiltración, percolación, afloramiento, almacenamiento, escurrimiento, transpiración, y otros como convección adiabática, etc. También hay factores

que intervienen en el ciclo hidrológico que son: temperatura, radiación, viento, contaminación y factores orográficos (Gámez, 2009).

4.5. Ortofotos

Una ortofoto es una representación fotográfica de la superficie del terreno, que son rectificadas para corregir las distorsiones debidas al movimiento e inclinación de la cámara aérea, el desplazamiento por el relieve, la altura de vuelo y el trayecto del avión, teniendo las mismas características métricas de un mapa, incluyendo una escala conocida (Manuel & Luis, 2006).

4.5.1. Ajuste radiométrico de las ortofotos

Se aplica el ajuste radiométrico sobre todo a las ortofotos que componen un ortofotomosaico, de manera que equilibren sus diferencias de brillo y contraste para que el mosaico resultante sea lo más homogéneo posible.

Las diferencias radiométricas y cromáticas pueden originarse por varias causas: por el degradado óptico, por las variaciones ambientales y de luminosidad de una toma a otra, etc. (Soria, 2014).

4.5.2. Métodos de unión de ortofotos

Dentro de los métodos de unión automática de ortofotos se distinguen dos grupos:

Por una parte, los métodos que no determinan las líneas de unión, sino que la unión se efectúa entre los píxeles coincidentes en toda el área de solape:

- Mezclando el valor de los píxeles coincidentes
- Dándole mayor peso al píxel más claro
- Dándole mayor peso al píxel más oscuro

Por otra parte, están los métodos que determinan automáticamente líneas de unión. Sobre este tipo de métodos los más interesantes son los que utilizan criterios geométricos:

- Según la proximidad al centro de la ortofoto
- Según la distancia a los límites de la ortofoto
- Según la distancia al centro de la ortofoto y a los límites de la ortofoto (Soria, 2014).

4.6. Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados a la modelación de escenarios de deforestación

Para Llopis (2010) los SIG son una nueva tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial, y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.

Un Sistema de Información Geográfica es una herramienta que permite la integración de bases de datos espaciales y la implementación de diversas técnicas de análisis de datos. Por tanto, cualquier actividad relacionada con el espacio, puede favorecerse del trabajo con los SIG, entre las aplicaciones más usuales destacan:

- Científicas: ciencias medioambientales y relacionadas con el espacio, desarrollo de modelos empíricos, modelización cartográfica, modelos dinámicos y teledetección.
- Gestión: cartografía automática, información pública, catastro, planificación física, ordenación territorial, planificación urbana, estudios de impacto ambiental, evaluación de recursos y seguimiento de actuaciones (Llopis, 2010).

Uno de los procedimientos de gestionar la información, de mayor interés en el campo de los SIG, es el de modelizar la realidad, de acuerdo a prototipo o paradigma, que reproduzca las bases del funcionamiento real, y permita adelantar o deducir conclusiones sobre el pasado o el futuro. Una de las técnicas de investigación más usada es la de simulación (Santos, 2020).

4.7. Análisis Multitemporal

El objetivo principal de los estudios multitemporales es encontrar una forma de combinar o integrar en el proceso varias imágenes correspondientes a diferentes fechas, con distintos estados fenológicos en la vegetación, de cara a la obtención de un incremento en la precisión de la clasificación (Sacristán, 2006).

4.7.1. Herramientas para realizar los análisis multitemporales

El cambio de cobertura y uso del suelo es un proceso dinámico, originado por acción del hombre, siendo más evidente en las cuencas hidrográficas, quebradas y ríos, así como en las partes altas de las montañas (Muñoz et al., 2008). Estos procesos de cambio son cada vez mayores y ocurren con rapidez, generando la pérdida de la cobertura boscosa y disminución en

cantidad y calidad del recurso hídrico y suelo. Estos demandan el desarrollo y la utilización de métodos capaces de representar su constante evolución.

Los siguientes programas son ejemplos de software libres y con licencia pública, desarrollados por diferentes organizaciones para el análisis de imágenes digitales:

- MultiSpec: está disponible para las plataformas de Windows y Macintosh. Fue diseñado originalmente como una herramienta de enseñanza, pero ahora es utilizada por muchos usuarios de la percepción remota. MultiSpec ofrece algunas herramientas sofisticadas de la clasificación de imágenes (Landgrebe & Biehl, 2018).
- OSSIM: usa algoritmos, herramientas y paquetes existentes para construir una herramienta integrada para el procesamiento de imágenes y análisis espacial (Karg et al., 2003)
- QGIS: es un Sistema de Información Geográfica de fácil uso, gratis y de código abierto, que permite manejar formatos raster y vectoriales, así como bases de datos, y posibilita la creación, visualización, análisis, edición y publicación de información geoespacial (Sutton, 2002) (Gutiérrez, 2022).

Los siguientes programas son ejemplos de software comerciales comúnmente usados:

- Image Analysis de ArcGIS: se utiliza para procesar imágenes, y posteriormente analizar y extraer información de ellas. permite al usuario extraer la información actualizada de imágenes directamente en una estructura tipo Geodatabase de ESRI (Esri, 1999) (Beard, 2008).
- IDRISI: es un software integrado de SIG y de procesamiento de imágenes, que proporciona más de 250 módulos para el análisis y exhibición de información espacial digital. Herramientas para la planificación espacial, la toma de decisiones, y el análisis de riesgo son incluidas junto con herramientas para la estadística espacial, el análisis superficial, y modelamiento espacial (Eastman, 2012) (Beard, 2008).

4.8. Modelos para analizar los cambios de uso del suelo

El cambio de uso del suelo está causado por múltiples factores que interactúan entre sí. Los análisis de cambios de usos sirven para monitorear cambios en los cultivos, valorar el impacto de deforestaciones, estudiar cambios en la fenología de la vegetación, detectar el estrés

hídrico de cultivos, etc. La transformación de estos cambios por la acción humana puede afectar la integridad de los recursos naturales y la producción de bienes y servicios y, por ende, su análisis debería ser una parte fundamental para el planeamiento de un desarrollo sostenible (Gallardo, 2018).

En el estudio de los cambios de usos del suelo se pueden diferenciar varios tipos de modelos. Una primera distinción que puede hacerse es entre modelos no espaciales y modelos espaciales. Algunos modelos se centran en predecir tasas o cantidades de cambio, mientras que otros ponen más énfasis en los patrones espaciales. El desarrollo de las diferentes técnicas que permiten elaborar modelos de cambios de usos del suelo y/o de simulaciones a futuro ha estado directamente relacionado con el avance de la teledetección, de los sistemas de información geográfica y de nuevos softwares que han permitido la captura y el tratamiento de grandes conjuntos de datos (Gallardo, 2018).

El modelamiento se ha convertido en una herramienta cada vez más importante para el análisis de los impactos que se producen por los cambios de uso de suelo. Modelar los cambios en el uso y cobertura de la tierra es importante para formular políticas ambientales y estrategias de manejo efectivas. Actualmente, existen numerosas aproximaciones tanto desde lo teórico como desde lo metodológico, que pueden o no incorporar la dimensión espacial de forma explícita. Sin embargo, debido a que estas transiciones constituyen procesos complejos que ocurren en múltiples escalas espaciales y temporales, al tiempo que exhiben propiedades emergentes que resultan de la acción acumulada de múltiples agentes, cualquier iniciativa para modelar siempre tendrá implícito un alto grado de simplificación. Por definición cualquier modelo se queda corto al tratar de incorporar todos los aspectos de la realidad, pero también provee información valiosa acerca del comportamiento del sistema dentro de un rango de condiciones (Sarmiento López et al., 2011).

4.8.1. Modelado de cambios de uso del suelo

El Land Change Modeler (LCM) para la sostenibilidad ecológica de IDRISI es un modelo de análisis del cambio en la cobertura y uso del suelo y también de predicción. Este modelo proporciona un completo análisis de los cambios en el suelo mediante la creación de mapas y gráficos del cambio del suelo, transiciones y tendencias de los tipos de suelo. En cuanto al módulo de predicción, este modelo es capaz de crear escenarios de cambio del uso

del suelo con la integración de los factores biofísicos y socioeconómicos que influyen en el cambio de uso de la tierra (Eastman, 2006) (Oñate Valdivieso & Bosque, 2010).

4.8.2. *Análisis de cadenas de Markov*

Las cadenas de Markov son una herramienta que permite, determinar la probabilidad con la cual el proceso puede entrar en algún estado; sin embargo, un fenómeno más interesante, es que después de ocurridas varias transiciones, estas probabilidades convergen a valores particulares (Bedoya & Barrera, 2006).

4.8.3. *Datos generales necesarios para la modelación*

El modelamiento espacial es un conjunto de operaciones analíticas y comandos interactivos, que buscan identificar la magnitud y distribución espacial de los cambios, proyectar y representar cartográficamente su probabilidad de ocurrencia en un futuro cercano, suponiendo que las técnicas de manejo de las variables ambientales continuarán siendo similares o tendrán un ritmo de comportamiento semejante al pasado cercano (Padilla et al., 2015).

Los modelos de cambio de uso de la tierra deben representar parte de la complejidad de los sistemas de uso de la tierra. Ofrecen la posibilidad de probar la sensibilidad de los patrones de uso de la tierra a los cambios en las variables seleccionadas. También permiten probar la estabilidad de los sistemas sociales y ecológicos vinculados, a través de la construcción de escenarios (Veldkamp & Lambin, 2001).

5. Metodología

En el siguiente capítulo se describen los materiales y la metodología utilizadas para la realización de la presente investigación.

5.1. Ubicación de la Cuenca Superior del Río Catamayo

La investigación se llevó a cabo en la Cuenca superior del Río Catamayo ubicada en la zona geográfica 17 S entre las coordenadas planas: 9 552 502 m – 9 501 498 m N; y, 711 117 m – 675 869 m E, específicamente en las microcuencas Mazanamaca, Capamaco, Campana, San Agustín y Aguacolla (Figura 1). En estas se encuentran los sistemas de riego públicos: Quinara, Vilcabamba, Campana-Malacatos, La Era y La Palmira.

Ubicación de la microcuenca del río Mazanamaca (sistema de riego Quinara)

La microcuenca del río Mazanamaca tiene un área de 43.078 km² desde el sitio de captación. De esta microcuenca se toma el agua para el sistema de riego Quinara, que riega aproximadamente 1.91 km².

Ubicación de la microcuenca del río Capamaco (sistema de riego Vilcabamba)

La microcuenca del río Capamaco tiene un área de 26.46 km² desde el punto de captación. De esta microcuenca se toma el agua para el sistema de riego Vilcabamba, que riega aproximadamente 2.01 km².

Ubicación de la microcuenca del río Campana (sistema de riego Campana-Malacatos)

La microcuenca del río Campana tiene un área de 34.67 km² desde el punto de captación. Esta microcuenca es la que abastece de agua para el funcionamiento del sistema de riego Campana-Malacatos, que riega aproximadamente 7.72 km².

Ubicación de la microcuenca del río San Agustín (sistema de riego La Era)

La microcuenca del río San Agustín tiene un área de 29.30 km² desde el punto de captación. Esta microcuenca es la que genera el agua para el funcionamiento del sistema de riego La Era, que riega aproximadamente 2.52 km².

Ubicación de la microcuenca del río Aguacolla (sistema de riego La Palmira)

La microcuenca del río Aguacolla tiene un área de 71.27 km² desde el sitio de captación. De esta microcuenca se toma el agua para el sistema de riego La Palmira, que riega 1.83 km².

El estudio se realizó desde el sitio de captación del agua para riego en cada una de las microcuencas (Tabla 1).

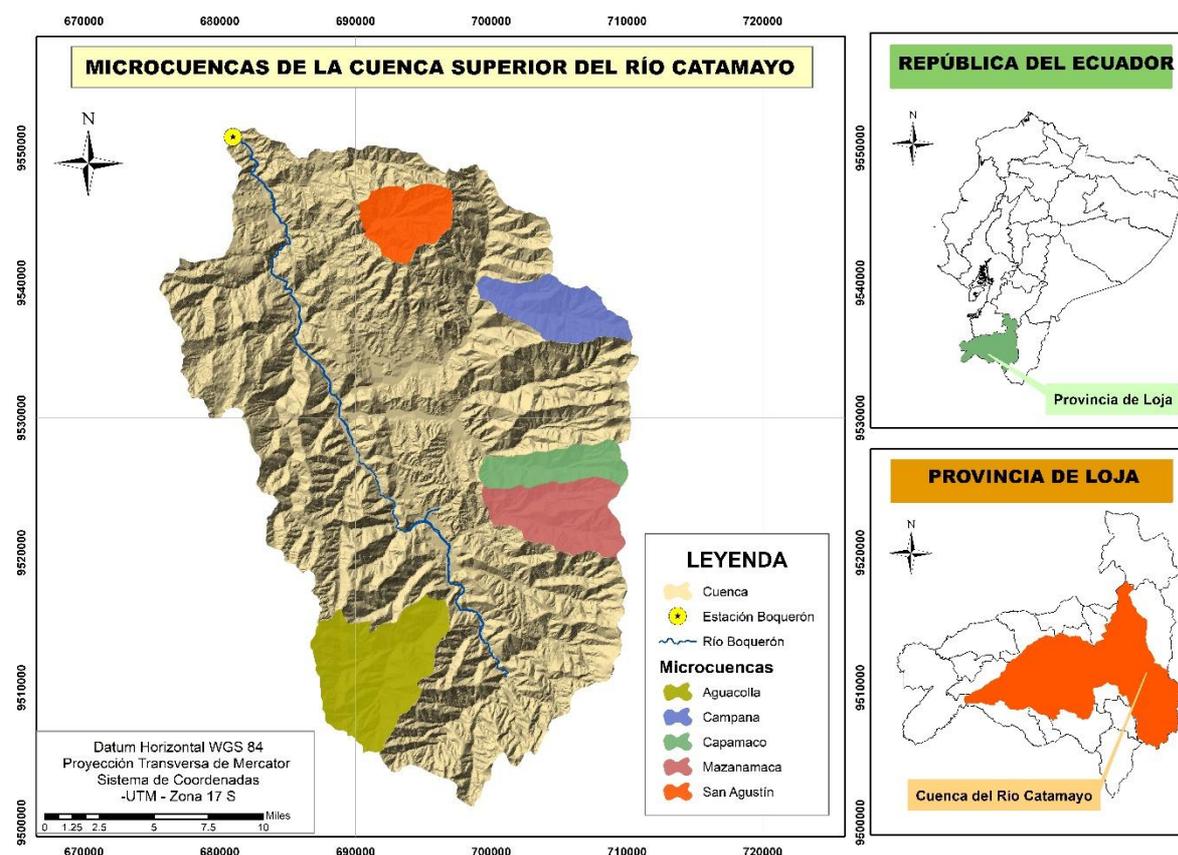
Tabla 1.

Descripción de los sistemas de riego públicos de la Cuenca Superior del Río Catamayo.

Sistema de Riego	Estado Actual	Río	Área Regable (km ²)	Usuarios
Quinara	Operación	Mazanamarca	1.91	233
Vilcabamba	Operación	Capamaco	2.01	192
Campana-Malacatos	Operación	Campana	7.72	1016
La Era	Operación	San Agustín	2.52	164
La Palmira	Operación	Aguacolla	1.83	106

Figura 1.

Mapa base de ubicación de las microcuencas de estudio.



5.2. Metodología para el primer objetivo

“Determinar los cambios de uso de suelo de las microcuencas productoras de agua, de los sistemas de riego: La Palmira, Quinara, Vilcabamba, La Era y Campana-Malacatos, a través de un análisis multitemporal para los periodos comprendidos entre 2010 a 2022”

5.2.1. Recopilación de información

Para el análisis multitemporal se utilizaron ortofotos 1:25 000, y se las obtuvo del programa SIGTIERRAS (<http://www.sigtierras.gob.ec/>) y del programa Planet (<http://planet.com>). La información cartográfica secundaria, se la recopiló en el centro de Investigaciones Territoriales CIT de la Universidad Nacional de Loja.

5.2.2. Trabajo de campo

Antes de la fotointerpretación de las ortofotos, se realizaron salidas de campo a cada una de las microcuencas de estudio para reconocer los usos de suelo que no se lograron visualizar correctamente en las ortofotos para proceder a clasificar. Para el recorrido se utilizó las ortofotos y un mapa de ubicación para situar los puntos GPS en las observaciones realizadas.

5.2.3. Clasificación supervisada

Para la clasificación se obtuvo el conocimiento previo de las áreas de estudio, y mediante técnicas de fotointerpretación fueron analizados los elementos de interpretación de la imagen como: tono, color, tamaño, forma, textura, patrón, sombras, altura y profundidad, volumen y asociación; de esta forma se digitalizó y delimitó los usos de suelo sobre las ortofotos, creando dos capas tipo polígonos para cada año. Para poder clasificar las coberturas se definió previamente la escala de trabajo y las clases de coberturas (Tabla 2), de acuerdo a la codificación del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador 2020 (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2020).

Tabla 2.
Clases de cobertura.

CODcob	Cobertura
1	Bosque Nativo
2	Cuerpo de agua natural
3	Erial
4	Páramo

- 5 Pastizal
- 6 Plantación Forestal
- 7 Tierra Agropecuaria
- 8 Vegetación Arbustiva y Herbácea

Fuente: Adaptado del (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2020)

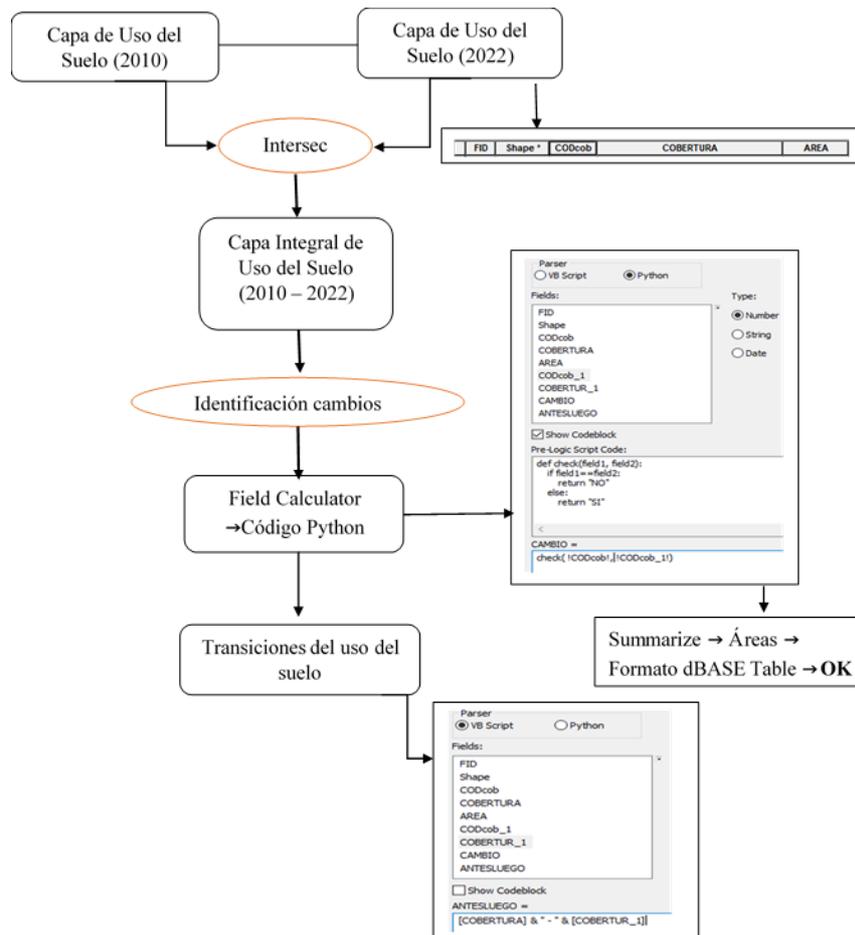
5.2.4. Determinación del cambio de uso del suelo y la tasa de deforestación

A continuación, se detalla el procedimiento que se empleó para el análisis de los cambios de uso del suelo y la tasa de deforestación.

5.2.4.1. Identificación del cambio de uso del suelo

La identificación se realizó con el módulo Intersect del software ArcMap 10.5, sobreponiendo las capas del año 2010 y 2022, las tablas de ambas capas contienen la misma estructura de datos (FID, Shape, CODcob, COBERTURA, AREA), con la finalidad de obtener el mapa con los cambios que se han generado entre los dos periodos de estudio (Figura 2).

Figura 2.
Modelamiento para determinar el cambio de cobertura.



Los tipos de cambio de coberturas se los definieron con base a la información bibliográfica revisada. En la tabla 3 y tabla 4 se detallan los tipos de cambio que se identificaron:

Tabla 3.

Tipos de cambio identificados en las microcuencas, en el período 2010 - 2022.

Tipo de Cambio
Deforestación
Degradación de Ecosistema Natural
Desarrollo Agrícola
Desarrollo Forestal
Movimiento de Cuerpos de Agua
Regeneración Natural
Sin Cambios

Nota: Tipos de cambio que se generan en la zona de estudio.

Tabla 4.

Características de los tipos de cambio identificados en las microcuencas, en el período 2010-2022.

TIPO DE CAMBIO	DESCRIPCIÓN
Deforestación	Áreas de superficie forestal que han sido destruidas por la acción humana, debido a talas, quemas para adquirir madera o ganar suelo para agricultura y ganadería.
Degradación de Ecosistema Natural	Áreas de ecosistemas natural que se han degradado durante el paso del tiempo por causas antrópicas.
Desarrollo Agrícola	Áreas que se son producidas para obtener ganancias de tipo económico y alimenticio.
Desarrollo Forestal	Actividad que permite en un largo plazo una mejor calidad de vida, protección y conservación de los recursos y el ambiente.
Movimiento de Cuerpos de Agua	Son aquellas áreas donde los cuerpos de agua han cambiado, debido a efectos climáticos.
Regeneración Natural	Áreas que se han recuperado naturalmente en el tiempo, en ausencia de la intervención humana, luego de haber presentado alteraciones.
Sin Cambios	Categoría que se le otorga aquellas areas que no han sufrido algún cambio en el periodo de estudio.

Nota: Descripción de los tipos de cambio que se identifican en las zonas de estudio.

En la Tabla 5 se muestra la matriz utilizada para el análisis de cambios entre las fechas establecidas.

Tabla 5.
Matriz de cambios utilizada para el cruce de mapas.

Cambios	Cobertura 2022							
Cobertura 2010	1	2	3	4	5	6	7	8
Bosque Nativo	1							
Cuerpo de Agua Natural	2							
Erial	3							
Páramo	4							
Pastizal	5							
Plantación Forestal	6							
Tierra Agropecuaria	7							
Vegetación Arbustiva y Herbácea	8							

Nota: Matriz de tabulación cruzada utilizada para la identificación de los cambios (transiciones de uso de suelo) y la superficie que cambia cada cobertura.

5.2.4.2. Análisis de la tasa de deforestación

Para el análisis de las distintas métricas de deforestación, se utilizó las fórmulas empleadas en el estudio “Estimación de la Tasa de Deforestación del Ecuador Continental” propuesta por Puyravaud (Socio Bosque, 2012), en la que R corresponde a la deforestación total anual promedio para un periodo determinado, siendo:

$$R = \frac{A1 - A2}{t2 - t1}$$

Donde, A2 y A1 son las áreas de bosque en la fecha final (t2) e inicial (t1), respectivamente.

También se realizó el cálculo de la tasa de cambio anual, la cual se obtuvo por medio de la comparación del área cubierta por bosque en la misma zona en épocas diferentes. La fórmula que se utilizó es la que resulta de una tasa porcentual anual.

$$q = \left(\frac{A2}{A1}\right)^{1/(t2-t1)} - 1$$

Donde, q es la tasa de cambio anual; A2 y A1 son las áreas de bosque en la fecha final (t2) e inicial (t1), respectivamente.

5.3. Metodología para el segundo objetivo

“Modelar la tendencia de cambio en el uso de suelo de las microcuencas estudiadas para los años 2030 y 2060”

Para el modelamiento de los cambios futuros se lo realizó mediante un procedimiento que implica un análisis de variables determinadoras de cambios y la construcción de un modelo que emplee esas variables; y, de esta manera generar el escenario futuro de cambios para cada una de la zona de estudio.

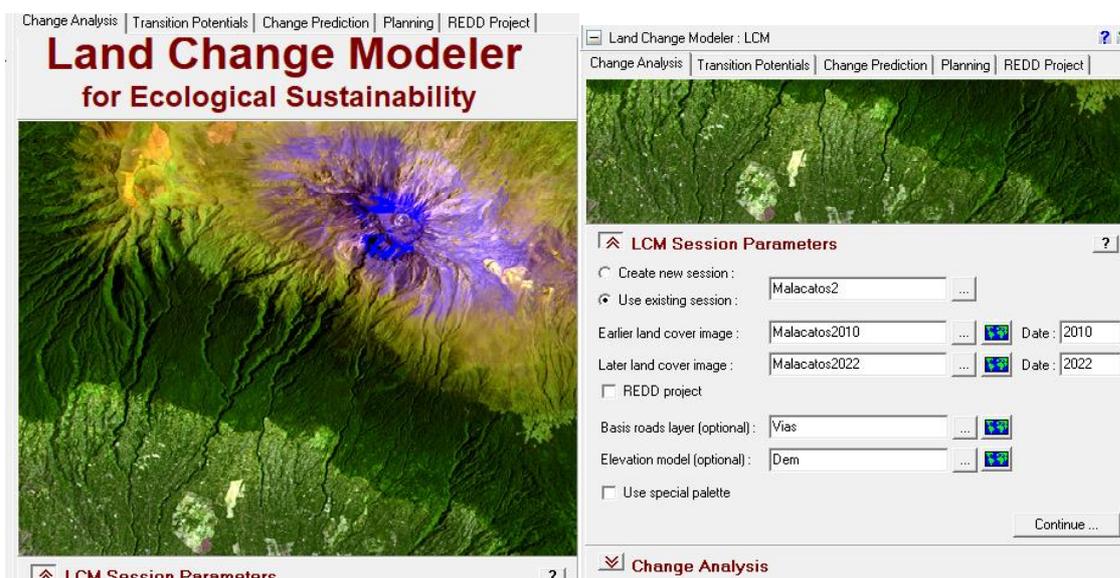
5.3.1. Generación de escenario de deforestación al año 2030

La predicción de cambios terrestres se elaboró mediante el Modelador de Cambios en el Terreno (LCM) para Sustento Ecológico. El mismo que es un software integrado dentro de TerrSet, que está orientado al problema de la conversión acelerada del terreno y a las necesidades analíticas de la conservación de la biodiversidad.

El proceso constó de tres pasos: el análisis de cambio, el modelador del potencial de transición y la predicción de cambios. El cual se basa en los cambios históricos de los mapas de las superficies terrestres, para la proyección a futuros escenarios.

Se elaboró un escenario de cambios históricos entre el período 2010 al 2014, luego se evaluó los cambios de ese período para crear una imagen de uso del suelo estimada para el año 2022. Esta imagen se validó con la imagen real de uso de suelo actual 2022, ya que con eso se pudo obtener el porcentaje de certeza de la estimación, tomando un criterio matemático de validación con un umbral de 0.80 % para los métodos ROC (AUC) y Kappa; y, con ello proceder a realizar las proyecciones al 2030 y 2060, en periodos de ocho y treinta años.

Figura 3.
Módulo de Change Analysis de TerrSet.



5.3.1.1. Variables explicativas

Mediante las variables se pudo simular donde ocurrirá la deforestación, ya que se podrá asumir la distribución espacial de los factores biofísicos y socioeconómicos, siendo estos importantes para obtener los sitios de explotación del paisaje.

La cobertura vegetal y uso de suelo, permiten generar mapas de cambio de uso de cobertura y uso de la tierra (CCUT), y también las matrices de cambio que se utilizan para calcular las tasas de deforestación para los periodos 2010 – 2022.

La elevación y la pendiente, son factores que sirven para la ubicación de actividades productivas, sobre todo el efecto topográfico sobre la temperatura, por la gradiente térmica, la humedad (Painter et al., 2013).

Para las microcuencas de estudio se preparó las siguientes variables:

- Mapa de cobertura vegetal del año 2010
- Mapa de cobertura vegetal del año 2014
- Mapa de cobertura vegetal del año 2022
- Evidencia de cambio (Evidence Likelihood)
- Modelo de elevación digital del terreno (Dem)

5.3.1.2. Proceso de predicción de cambios en LCM

Se realizó un proceso integrado en Land Change Modeler (LCM), el cual ayudó a obtener datos de cambios ocurridos en las dos diferentes fechas de estudio en este caso 2010 al 2022. Los cambios se los obtuvo entre categorías de clases de uso del suelo, y la tendencia del cambio como una representación espacial de los sitios de cambio. Con los datos se adquirió los potenciales de transición que ocurren en las fechas y se agregaron variables para una mejor descripción de los procesos de cambio. También se realizó la predicción de uso del suelo a futuro, el cual se validó con una imagen de uso del suelo de fecha actual 2022, para obtener el dato cuanto se predijo en forma adecuada el uso del suelo actual.

5.3.1.3. Evaluación de cambios

La evaluación del cambio se la realizó entre las categorías de los mapas del periodo en estudio, en donde se consiguió las ganancias, pérdidas, cambio neto, persistencia y mapeo de

transiciones entre las clases de cobertura, también se pudo obtener mapas de tendencia en donde se explica espacialmente los cambios en el territorio. En este proceso se pasó por varias etapas, en la primera se analizaron los cambios de uso del suelo clasificados de 2010 y 2022; en la segunda etapa, se modeló las transiciones de usos, empleando las variables explicativas ya mencionadas; y en la tercera etapa se especificó la fecha final de predicción de cambios, eligiendo el modelo de predicción suave.

5.3.1.4. Predicción del cambio de uso del suelo

La predicción se la realizó en el panel Change Prediction, en donde se generaron los mapas de uso del suelo al 2030 y 2060, estimando los periodos de tiempo en intervalos de ocho y treinta años. Se produjeron dos mapas, uno que es de variable discreta que representa el uso del suelo y el otro en escala continua que representa el riesgo de cambio.

5.3.1.5. Calibración y Validación del modelo

Dentro del proceso de calibración, se evaluó el potencial de cambio que tiene cada categoría, el potencial de cambio de una transición determinada hacia otro uso puede ser representado a través de dos aproximaciones diferentes: la idoneidad de una localización de un uso de suelo dado desde la transición y la probabilidad de representar dicha transición. Se espera que el cambio de uso tome lugar en localizaciones con alta probabilidad de conversión a un tipo de uso específico. Esta propensión depende de características biofísicas de localización.

La validación se la realizó utilizando el módulo ROC y el índice de Kappa; con el módulo se calculó la característica operativa relativa al otorgar una medida de la correspondencia entre una imagen cuantitativa modelada en donde se muestra la probabilidad de que haya una clase particular y una imagen booleana (Tabla 6); en la validación con la observación, se compararon la imagen actual de cobertura, obteniendo como resultado un mapa con la distribución espacial de los errores y aciertos del modelo. Con este mapa se obtuvo el porcentaje de certeza, utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Porcentaje de certeza (\%)} = \frac{\text{Hits}}{\text{Hits} + \text{False Alarma}}$$

Donde, Hits es el número de celdas acertadas; False alarma es el número de falsos cambios.

Tabla 6.
Matriz de confusión de 2x2.

	Realidad	Imagen referencia
Simulado por umbral	1	0
1	TP (Acierto)	FP (Error tipo 1)
0	FN (Error tipo 2)	TN (Acierto)

Nota: Matriz de confusión utilizada para la validación ROC.

Dónde: *Verdadero Positivo (TP)*: el modelo predice correctamente la clase positiva; *Verdadero Negativo (TN)*: el modelo predice correctamente la clase negativa; *Falso positivo (FP)*: el modelo predice incorrectamente la clase positiva cuando en realidad es negativa; *Falso negativo (FN)*: el modelo predice incorrectamente la clase negativa cuando en realidad es positiva.

La obtención de la tasa de deforestación, se la elaboró a través de la implementación de la técnica de la matriz de tabulación cruzada, usando la fórmula propuesta por Puyravaud, (2003), la misma que ha sido empleada por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) para la determinación de la tasa de deforestación para el Ecuador continental.

6. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados importantes que se obtuvieron durante la investigación.

6.1. Cambio del uso del suelo actual mediante un análisis multitemporal para los periodos comprendidos de 2010 a 2022

6.1.1. Estado actual del uso del suelo

Mediante la aplicación de la metodología utilizada en la presente investigación se obtuvieron los siguientes resultados sobre el uso actual del suelo y cobertura vegetal de cada una de las microcuencas de estudio.

En la tabla 7 se presentan las categorías de uso y los respectivos porcentajes para cada tiempo evaluado para las microcuencas de estudio.

Tabla 7.

Porcentajes de cobertura de las microcuencas de estudio para los años 2010 y 2022.

Cobertura	Mazanamarca		Capamaco		Campana		San Agustín		Aguacolla	
	2010	2022	2010	2022	2010	2022	2010	2022	2010	2022
Bosque Nativo	55.6	54.7	47.9	47.4	61.8	61.8	38.5	32.2	28.1	28.1
Cuerpos de Agua Natural	0.03	0.03	0.09	0.09	0.3	0.4	---	---	---	---
Erial	1.7	0.1	0.2	0.19	1.5	0.03	0.01	0.00	0.02	0.02
Páramo	10.2	11.6	10.8	10.8	9.8	10.9	0.001	0.001	7.8	7.9
Pastizal	2.4	2.5	6.3	6.6	6.8	7.2	49.0	55.7	0.4	0.2
Plantación Forestal	0.3	0.2	1.5	1.4	0.09	0.09	0.3	0.3	0.05	0.4
Tierra Agropecuaria	0.2	0.1	1.0	1.1	0.3	0.3	5.97	5.7	3.3	4.3
Vegetación Arbustiva y Herbácea	29.5	30.5	32.0	32.3	19.0	18.9	6.01	5.9	60.1	58.9
TOTAL (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

En la microcuenca Mazanamaca evidentemente se puede observar una reducción de bosque nativo, de 23.95 km² en 2010, a 23.60 km² en 2022; es decir, una disminución del 0.83 % respectivamente. La causa principal es la conversión de esta cobertura a pastizales,

vegetación arbustiva y herbácea que en el periodo de 2010 a 2022, paso de 1.02 km² a 1.07 km² y de 12.70 km² a 13.13 km², por lo tanto, muestran un incremento del 0.12 % y 1 %. De la misma manera con la tierra agropecuaria, hubo un incremento del 0.26%; debido al aumento de la producción agrícola en la zona. La misma proyección se muestra para el erial con una reducción de 0.75 km² a 0.39 km², asumiendo una pérdida del 1.66%, las causas evidentes serian la transformación a pastizales mostrando una ganancia del 1 % en 2022. No obstante, el páramo ha incrementado de 4.41 km² a 5.01 km², evidenciando un aumento del 1.38 % para el año 2022 (Tabla 16, Anexo 2) (Figura 4).

En la microcuenca Capamaco se puede observar una disminución de bosque nativo, de 12.67 km² en 2010 a 12.56 km² en 2022; es decir, una baja del 0.45% respectivamente. El motivo más importante es la transformación de esta cobertura a pastizales, vegetación arbustiva y herbácea que en el periodo de 2010 a 2022, paso de 1.68 km² a 1.74 km² y de 8.47 km² a 8.55 km², por lo tanto, muestra un incremento del 0.24 % y 0.28 %. De igual manera, el páramo ha incrementado de 2.86 km² a 2.87 km², evidenciando un ascenso del 0.05 % para el año 2022. La misma posición se muestra para el erial con una reducción de 0.60 km² a 0.51 km², asumiendo una pérdida del 0.04 %, las causas evidentes serian la transformación a pastizales mostrando un incremento del 0.24 % en 2022. Para la tierra agropecuaria, hubo un descenso no tan significativo del 0.03%; debido a que la agricultura es una actividad de subsistencia junto a la ganadería, estimulando el declive de ecosistemas el cual su proceso de regeneración es lento (Tabla 17, Anexo 2) (Figura 5).

Para la microcuenca Campana se puede observar una reducción de bosque nativo, de 21.47 km² en 2010 a 21.45 km² en 2022; es decir una disminución de 0.01 %. la principal causa es la conversión de esta cobertura a pastizal y vegetación arbustiva y herbácea que en el periodo de 2010 a 2022 paso de 2.34 km² a 2.51 km² y de 6.60 km² a 6.58 km², un incremento del 1.1 % en pastizales y una reducción del 0.30 % en vegetación arbustiva y herbácea. En el caso de tierra agropecuaria se evidencio un incremento del 1.28 %, de forma que para el sector la agricultura y ganadería son las actividades de subsistencia. Para el páramo la tendencia ha ido en incremento, de 3.43 km² a 3.81 km², con 1.1 % de ganancias y, mientras para el erial la tendencia ha ido en descenso, de 0.53 km² a 0.0088 km² asumiendo una disminución del 1.25%, debido a que en estas zonas la intervención humana ha generado varios cambios que les favorecen para realizar sus actividades agropecuarias (Tabla 18, Anexo 2) (Figura 6).

A través de la tabla, en la microcuenca San Agustín se puede observar una reducción de bosque nativo, de 11.29 km² en 2010 a 9.44 km² en 2022; es decir, una disminución del 6.33 %. La razón es el cambio de esta cobertura a pastizales que paso de 14.38 km² a 16.32 km² del 2010 al 2022, decir tuvo un incremento de 6.63 %. La tierra agropecuaria y vegetación arbustiva y herbácea que en el periodo de 2010 a 2022 presentaron un descenso del 0.18 % y 0.11 % respectivamente. De igual forma, la plantación forestal cambia de 0.11 km² a 0.10 km², evidenciando un leve descenso para el año 2022, asumiendo que estas coberturas de diferentes especies se transforman en cultivos. El mismo comportamiento se muestra para el erial con una reducción de 0.0036 km² a 0.0002 km², ocupando una pérdida del 0.1 %, la causa evidente sería la transformación a pastizales (Tabla 19, Anexo 2) (Figura 7).

En la tabla para la microcuenca Aguacolla podemos observar la pérdida del bosque nativo, de 20.04 km² en 2010 a 20.03 km² en 2022, que representa un descenso del 0.01 %. La causa más importante es el cambio de esta cobertura a tierra agropecuaria y paramo que en el periodo de 2010 a 2022 paso de 2.38 km² a 3.06 km² mostrado un incremento del 0.95 % y seguidamente el páramo paso de 5.59 km² a 5.67 km², por lo tanto, muestra un aumento del 0.12 % respectivamente. La misma posición presenta la vegetación arbustiva y herbácea, mostrando un descenso de 42.85 km² a 42.02 km², demostrando una caída del 1.17 % para el año 2022. Para los pastizales, hubo una disminución del 0.24 %; debida producción agrícola que existe en esta zona (Tabla 20, Anexo 2) (Figura 8).

Figura 4.
 Mapa de Uso del Suelo de la microcuenca del río Mazanamaca (años 2010-2022).

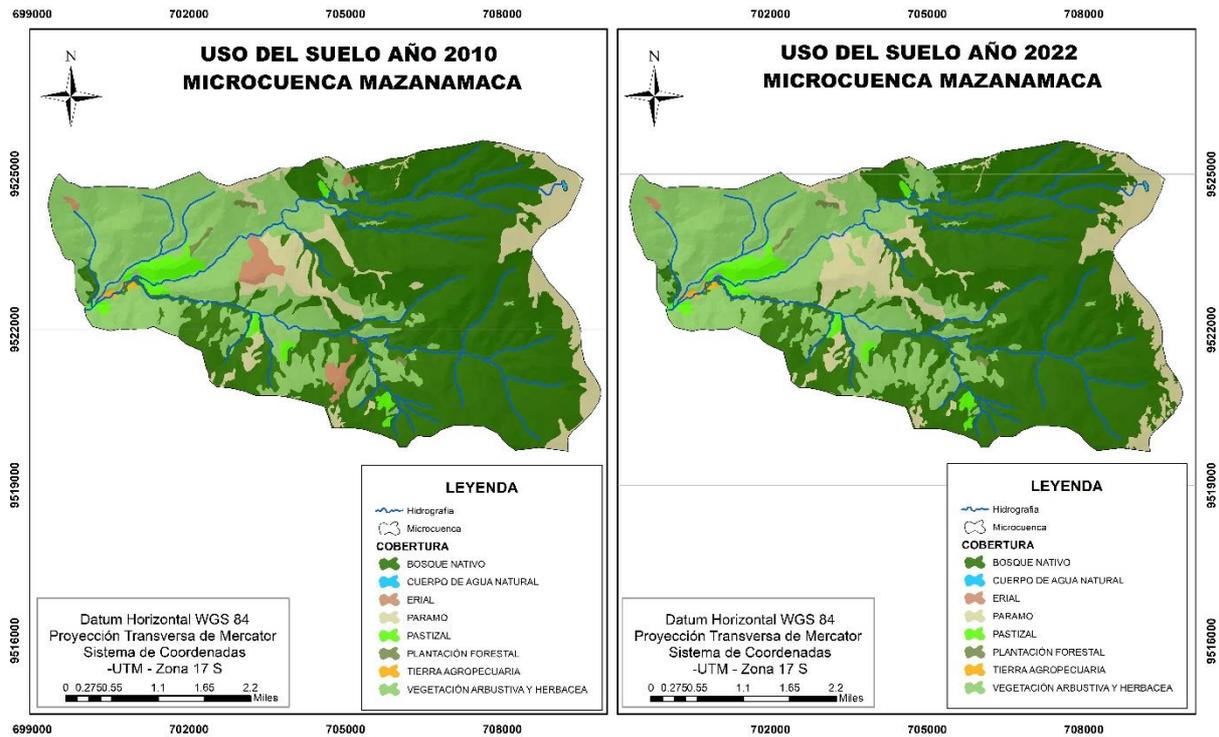


Figura 5.
 Mapa de Uso del Suelo de la microcuenca del río Capamaco (años 2010-2022).

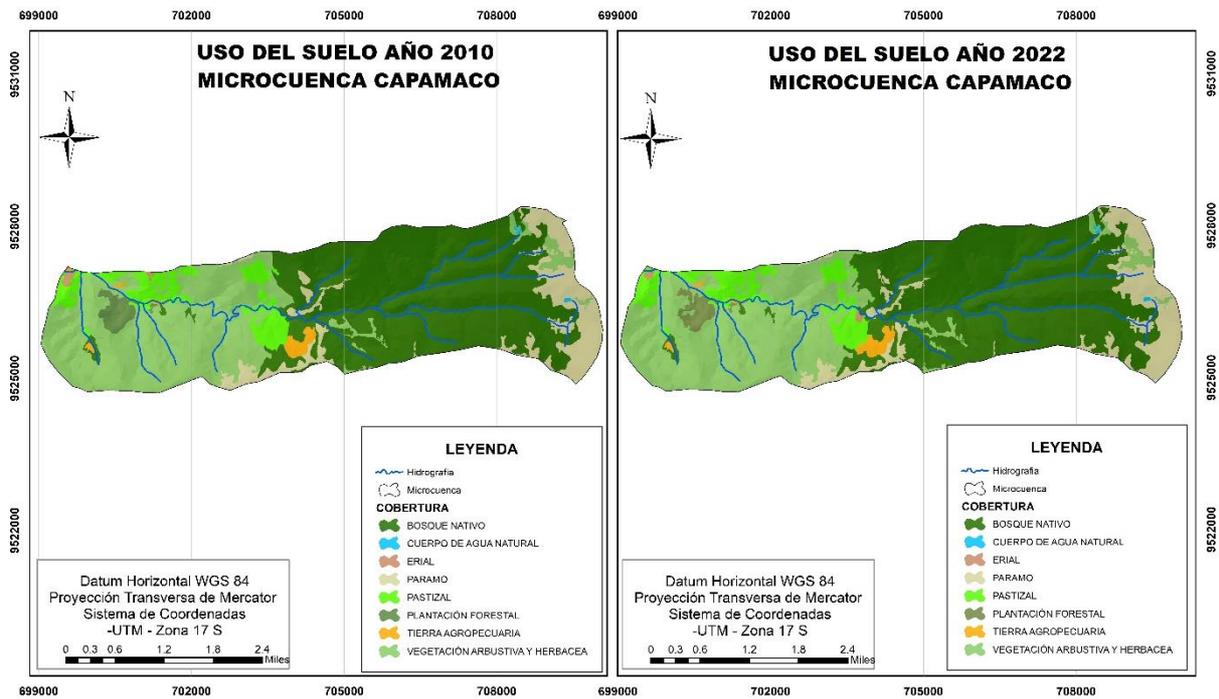


Figura 6.
 Mapa de Uso del Suelo de la microcuenca del río Campana (años 2010-2022).

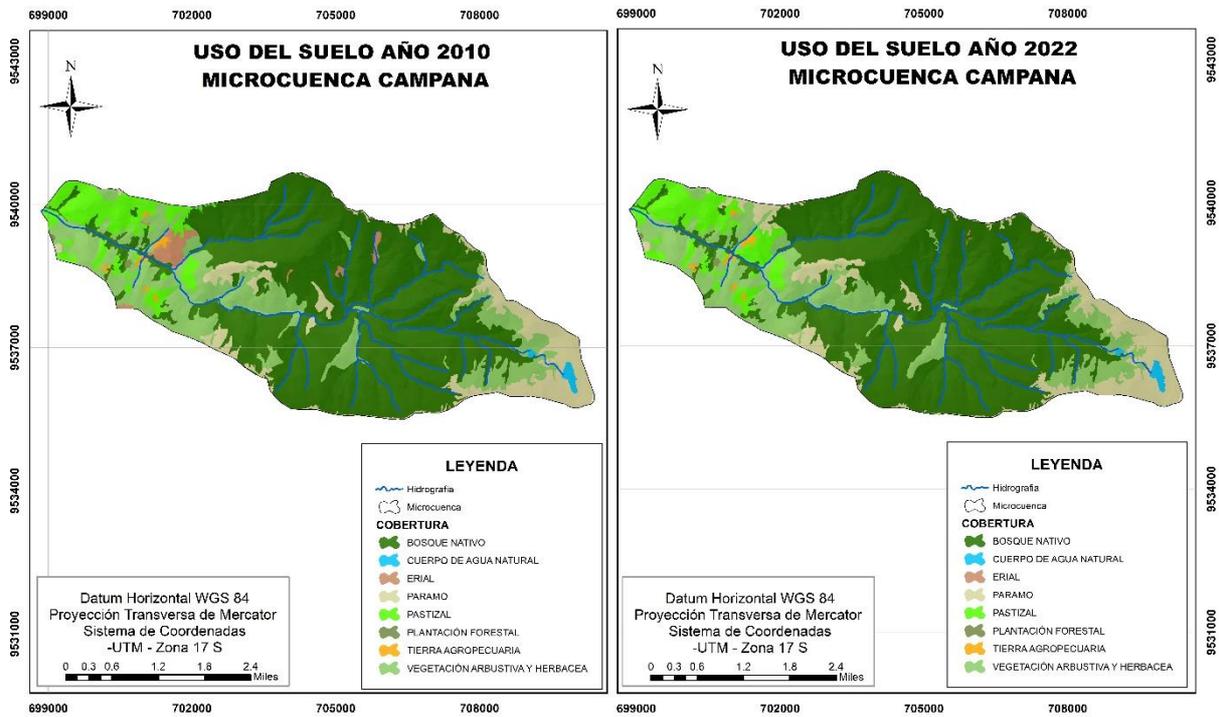


Figura 7.
 Mapa de Uso del Suelo de la microcuenca del río San Agustín (años 2010-2022).

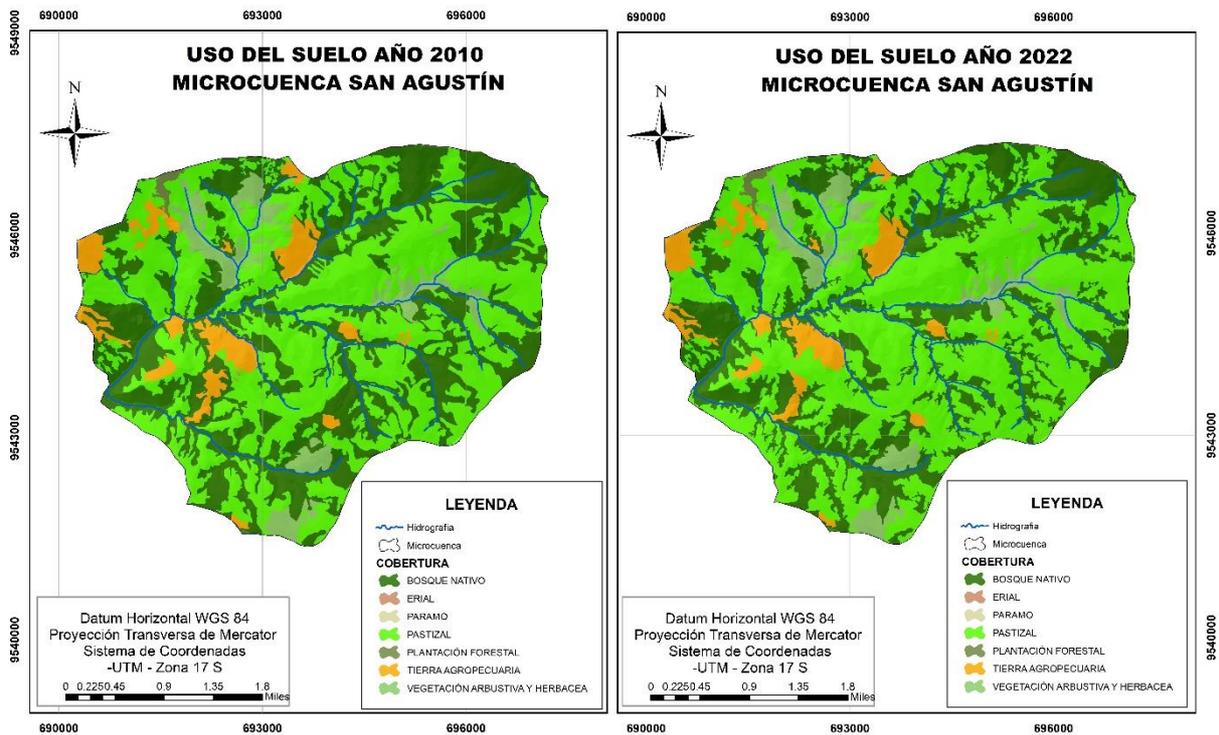
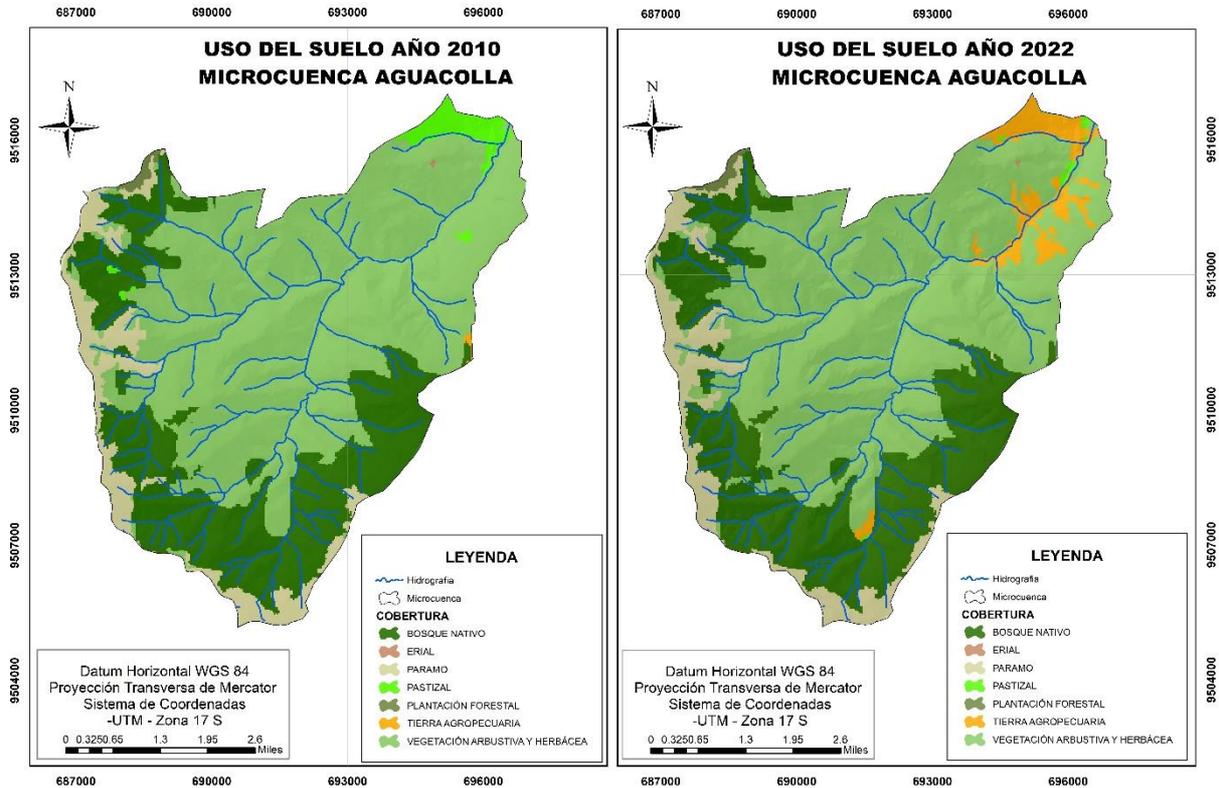


Figura 8.

Mapa de Uso del Suelo de la microcuenca del río Aguacolla (años 2010-2022).



6.1.2. Análisis de los cambios del uso del suelo en las microcuencas productoras de agua para los sistemas de riego públicos

Los mapas de cobertura vegetal y uso de suelo que se desarrollaron permitieron interpretar el análisis de los cambios de uso de suelo que surgieron para el período de estudio establecido, los resultados se han descrito en tablas y representados en mapas, como se muestra a continuación:

6.1.2.1. Áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010 – 2022

En la microcuenca Mazanamaca en los doce años estudiados, el 94.88 % de su superficie no presenta ningún cambio, y el porcentaje restante (5.12 %) presentaron transformaciones, que han sido provocadas por el hombre para aprovechar las zonas bajas para incrementar sus zonas de producción (Tabla 8 y Figura 9).

En la microcuenca Capamaco en los doce años estudiados, el 97.57 % de la superficie se ha mantenido sin cambios, siendo el porcentaje restante (2.43 %) donde se han producido cambios no muy significativos provocados tanto por el hombre o por factores de la naturaleza mismo (Tabla 8 y Figura 10).

En la microcuenca Campana, en los doce años de estudio, el 94.97 % de su superficie se mantuvo sin cambios, y el porcentaje restante de 5.05 % es donde se produjeron cambios. No se puede inferir que estos cambios son del todo negativos, ya que han experimentado cambios como la deforestación provocada por el ser humano que ha realizado la ampliación de pastos para ganado y agricultura, hasta la regeneración que se produce naturalmente en los ecosistemas (Tabla 8 y Figura 11).

En la microcuenca San Agustín en el período de estudio, el 85.81 % de la superficie se han mantenido sin cambios, mientras que el 14.19 % de la misma ha sufrido transformaciones, debido a que las permutaciones producidas en la zona han sido provocadas por la acción humana en su necesidad de ampliar las zonas de pastos y cultivos para la producción agrícola y pecuaria (Tabla 8 y Figura 12).

La microcuenca Aguacolla ha mantenido un cambio reducido con el paso de los años mostrando una superficie de 93.84 % que se ha mantenido intacta, por otro lado, solo el 6.16 % de la misma ha sufrido cambios, es decir, las transformaciones en menor cantidad son causadas por la intervención humana, mientras que en su mayoría son causadas por la interacción de la naturaleza sobre estos ecosistemas (Tabla 8 y Figura 13).

Tabla 8.
Áreas de cambio de uso del suelo del período 2010-2022 en las microcuencas de estudio.

Microcuencas	Sin Cambios	%	Cambios	%
Mazanamarca	40.87	94.88	2.20	5.12
Capamaco	25.82	97.57	0.64	2.43
Campana	32.92	94.97	1.75	5.05
San Agustín	25.14	85.81	4.15	14.19
Aguacolla	66.88	93.84	4.39	6.16

Figura 9.

Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Mazanamaca.

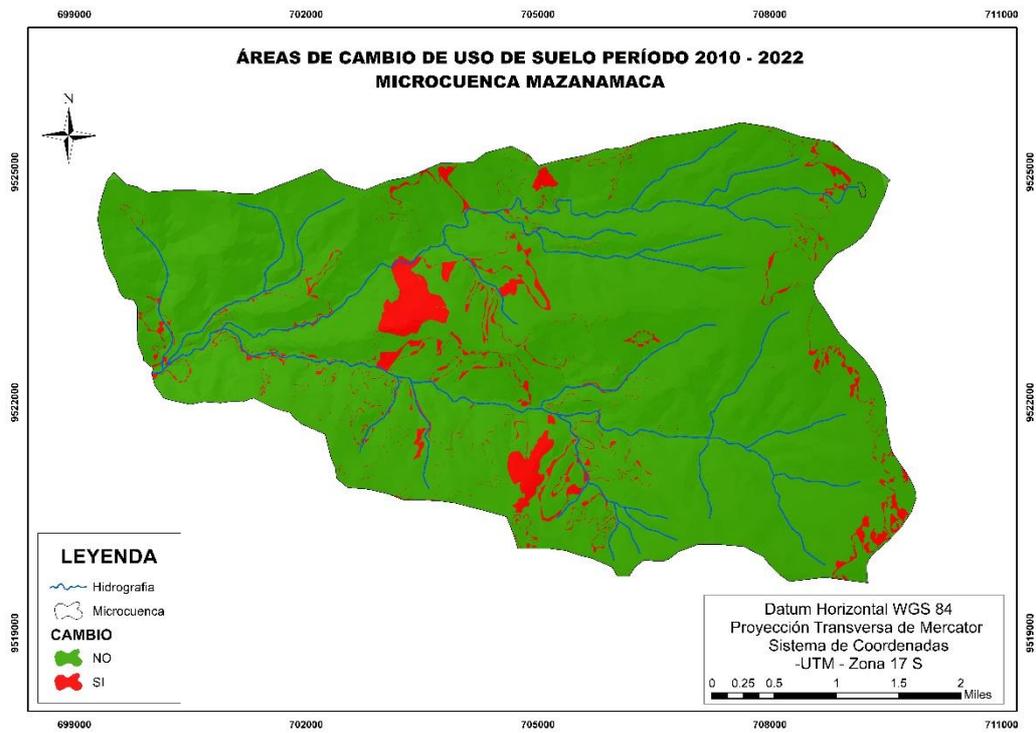


Figura 10.

Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Capamaco.

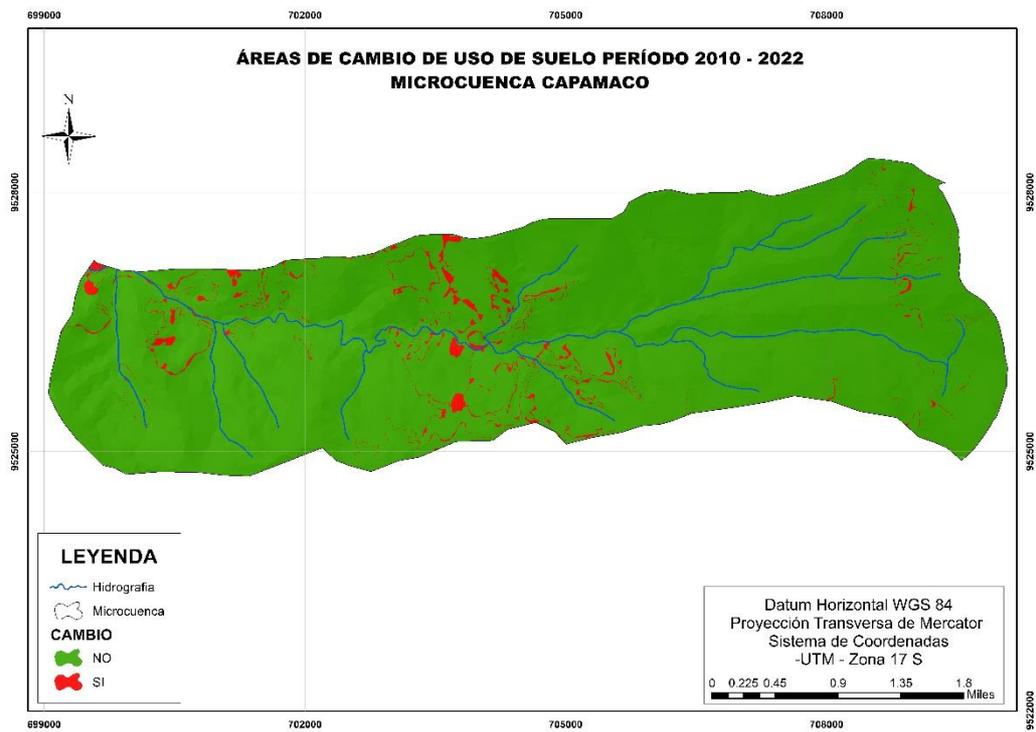


Figura 11.

Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Campana.

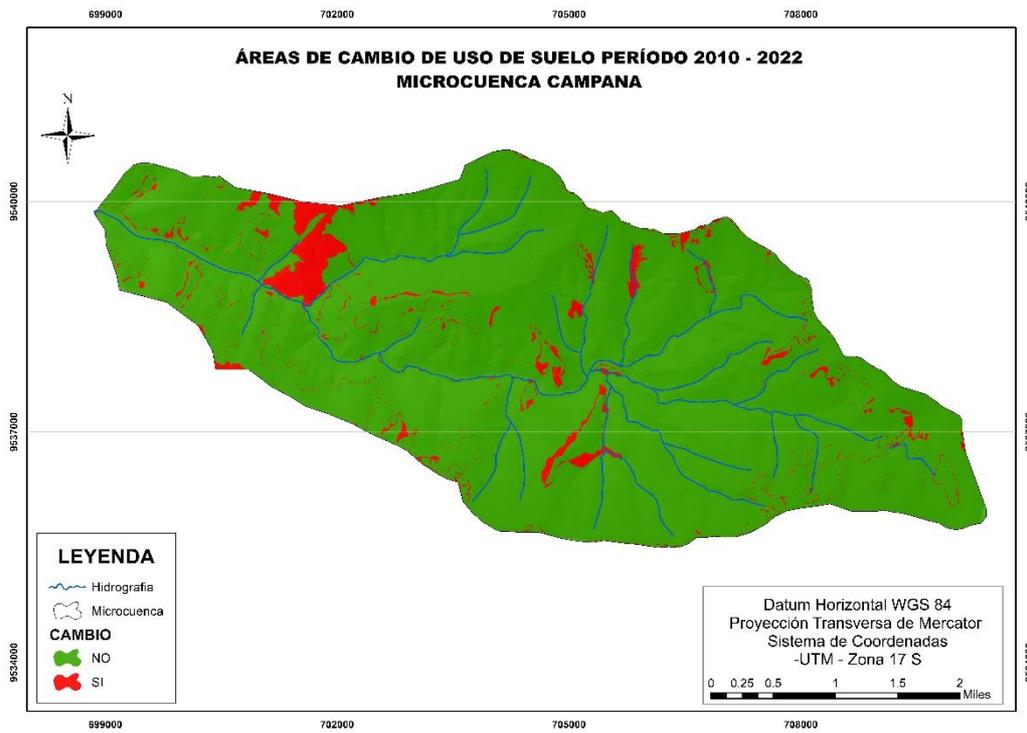


Figura 12.

Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río San Agustín.

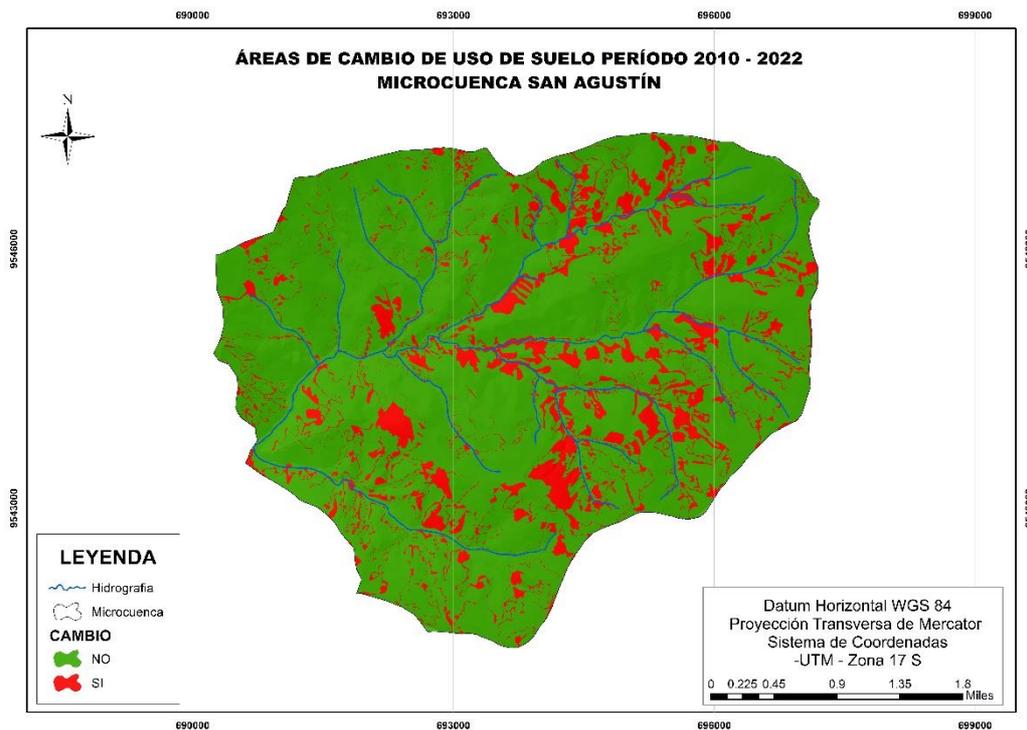
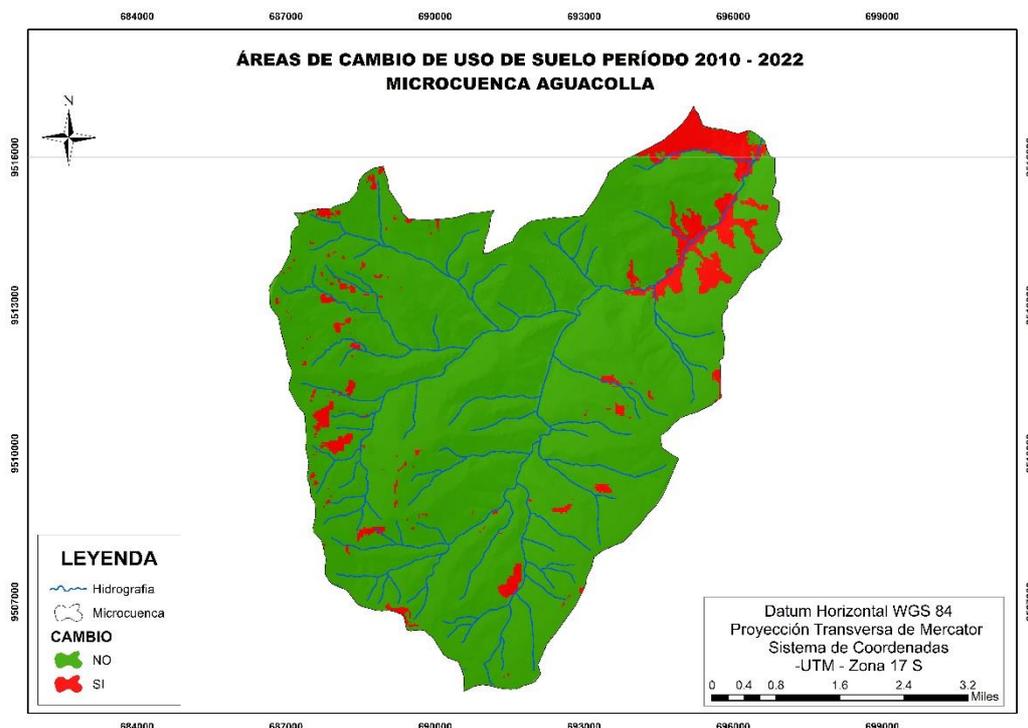


Figura 13.

Mapa de áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Aguacolla.



6.1.3. Cambio de Uso del Suelo entre el año 2010 – 2022

Los tipos de cambios de uso del suelo se los delimitó en base a la siguiente clasificación, considerando las características de cada área, como se detalla a continuación, y como se observan en las figuras 15, 17, 19, 21, 23.

Los valores ilustrados en la Tabla 9, permiten saber los tipos de cambio que se han definido durante el periodo estudiado.

Tabla 9.

Porcentaje de cambios de uso del suelo por microcuencas de los períodos 2010 – 2022.

MICROCUENCAS	Quinara		Vilcabamba		Campana		La Era		La Palmira	
CAMBIOS	(km ²)	%								
Deforestación	0.77	1.79	0.23	0.89	0.38	1.10	2.87	9.82	0.19	0.27
Degradación de Ecosistema	0.13	0.32	0.081	0.31	0.090	0.26	0.022	0.08	0.41	0.59
Desarrollo Agrícola	0.049	0.12	0.13	0.51	0.45	1.30	0.16	0.57	3.10	4.35

Desarrollo Forestal	0.010	0.02	0.012	0.05	0.17	0.50	0.0035	0.01	0.043	0.06
Movimiento de Cuerpos de Agua	0.0007	0.002	0.0008	0.003	0.0076	0.02	---	---	---	---
Regeneración Natural	1.23	2.87	0.17	0.68	0.65	1.89	1.08	3.72	0.63	0.89
Sin Cambios	40.87	94.88	25.82	97.57	32.92	94.95	25.14	85.81	66.88	93.84

DTA	0.029 km ² /año	0.0097 km ² /año	0.0017 km ² /año	0.15 km ² /año	0.048 km ² /año
TCA	0.082 %	0.083 %	0.083 %	0.07 %	0.080 %

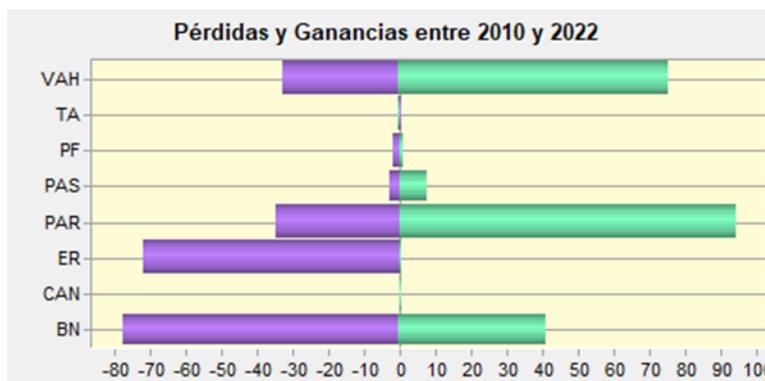
6.1.4. Pérdidas y ganancias de los usos del suelo en las microcuencas

- **Microcuenca del río Mazanamaca (sistema de riego Quinara)**

En la figura 14 se representa las pérdidas y ganancias de las clases identificadas en la microcuenca.

Figura 14.

Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río Mazanamaca.



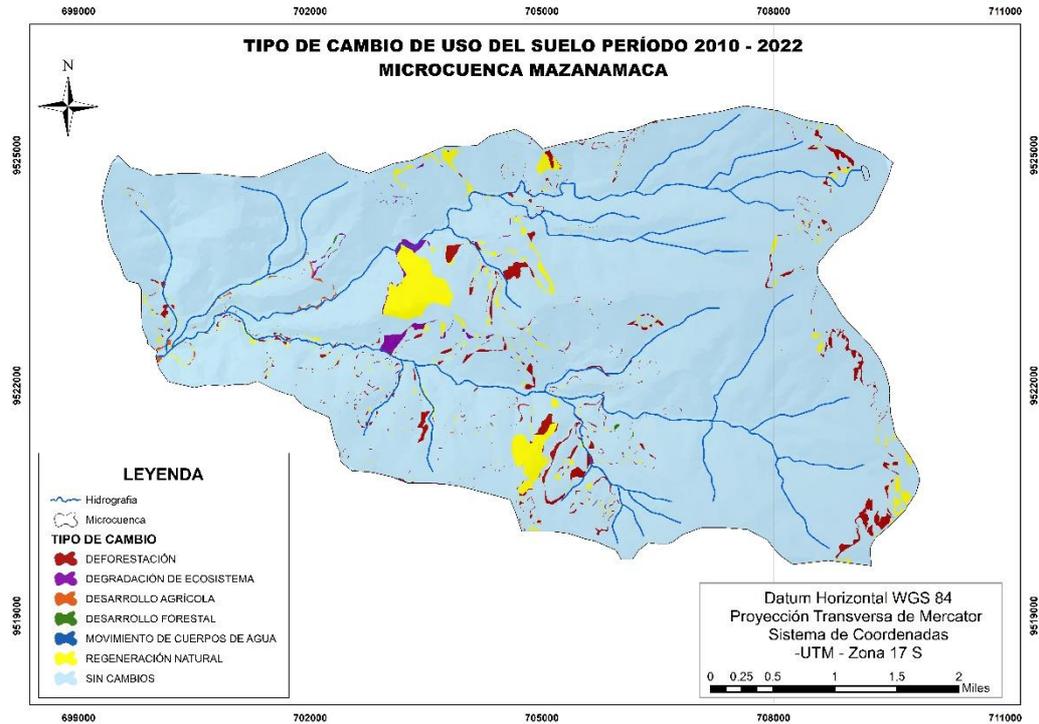
Se puede observar que en el Bosque y Erial se han dado transformaciones significativas con respecto a estas métricas, en cuanto a Bosque Natural, se han generado más pérdidas de 0.77 km² y de ganancia se tiene 0.42 km². Para la clase Erial se ha tenido más pérdidas de aproximadamente 0.72 km².

En lo referente a Páramo se observa más ganancias con una superficie de 0.94 km², seguido por la Vegetación Arbustiva y Herbácea que en 12 años ha ganado 0.76 km² en comparación a las pérdidas que son de 0.33 km². Otro análisis significativo es el de Pastizales que se han mostrado más ganancias por el aumento de actividades agrícolas con una superficie de 0.08 km².

Las coberturas de Plantación Forestal, Tierra Agropecuaria y Cuerpos de Agua Natural no presentan mucha diferencia en las superficies que han perdido y ganado; sin embargo, no deja de ser importante. En la matriz de tabulación cruzada se pueden visualizar los datos, esta es presentada en el capítulo de Anexos (Tabla 21, Anexo 3).

Figura 15.

Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Mazanamaca.



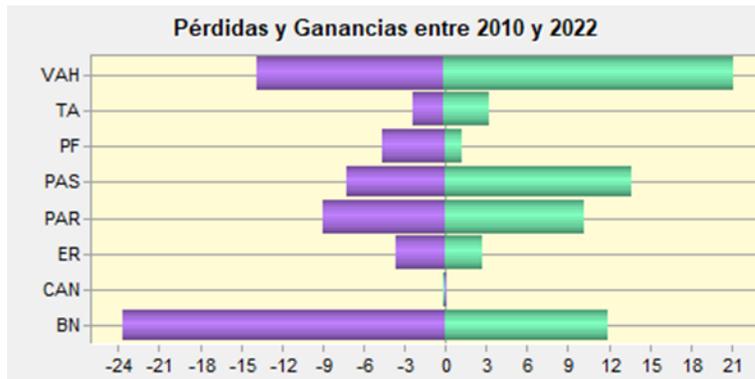
En la tabla 26 (Anexo 4), se puede observar que cada una de las categorías sufrieron cambios, por lo que se refleja que la microcuenca Mazanamaca presenta una dinámica de cambio muy considerable. Uno de estos cambios significativos ha ocurrido en el bosque nativo con una pérdida de 0.77 km² siendo esta reemplazada por vegetación arbustiva y herbácea, páramo y pastizal. Se observa también pérdidas y ganancias en los demás usos de suelo que han sufrido transiciones entre clases.

- **Microcuenca del río Capamaco (sistema de riego Vilcabamba)**

En la figura 16 se representa la pérdidas y ganancias de las clases identificadas en la microcuenca.

Figura 16.

Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río Capamaco.



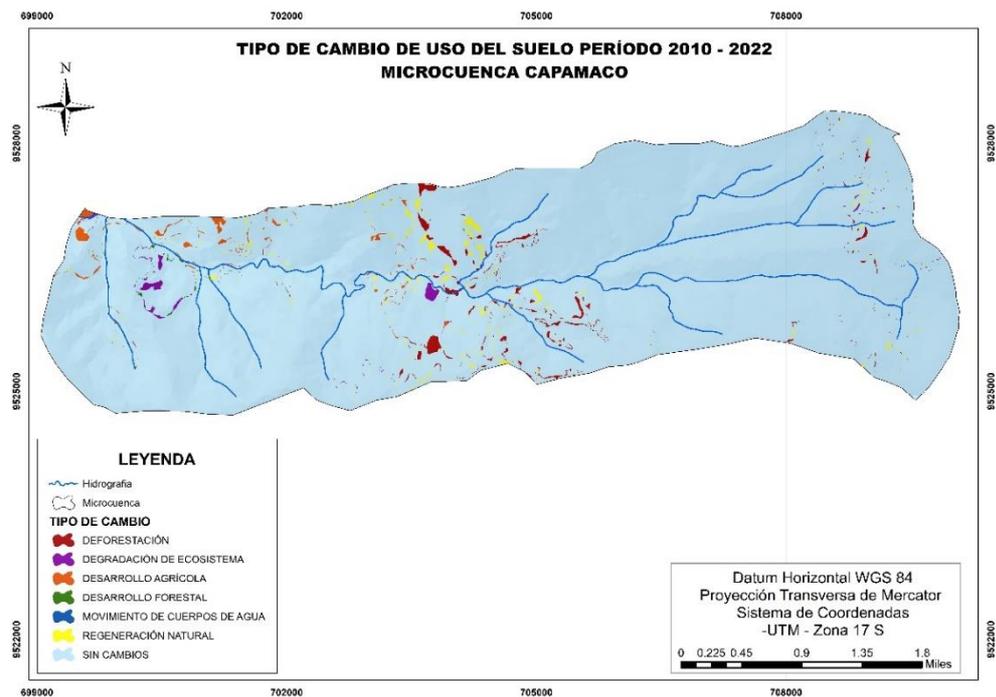
Se puede observar que en el Bosque Natural y Vegetación Arbustiva y Herbácea se han producido transiciones muy significativas, en cuanto a Bosque natural, se han generado pérdidas de aproximadamente 0.24 km² y 0.12 km² son las ganancias. La Vegetación Arbustiva y Herbácea ha tenido ganancias de aproximadamente 0.21 km².

Para la clase Pastizal se han dado ganancias con una superficie de 0.14 km², seguido por la clase Páramo que ha ganado 0.10 km² en comparación a sus pérdidas que son de 0.09 km². En lo concerniente a Tierra Agropecuaria se presentan ganancias de 0.03 km² por el aumento de las actividades agrícolas, la clase Erial ha tenido más pérdidas de aproximadamente 0.04 km², y para la clase de Plantación Forestal en los 12 años ha perdido 0.05 km².

Los Cuerpos de Agua Natural no ha sufrido tanta diferencia en la superficie que ha perdido y ganando, no obstante, no deja de ser importante. En la matriz de tabulación cruzada o matriz de cambio se puede ver los datos, es presentada en el capítulo de Anexos (Tabla 22, Anexo 3).

Figura 17.

Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Capamaco.



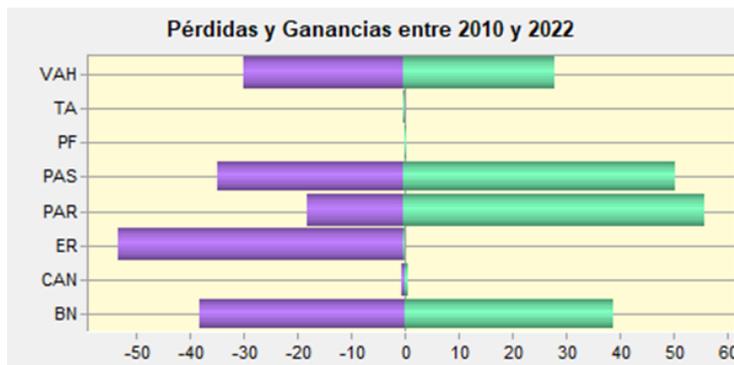
En la tabla 27 (Anexo 4), se observa los usos de suelo que sufrieron cambios durante el periodo de estudio, por lo que se muestra que el área de estudio presenta una dinámica de cambio un poco considerable en esta microcuenca. El cambio más significativo e importante es de bosque nativo pasando a vegetación arbustiva y herbácea siendo un total de 0.11 km², pero también en este ecosistema se han dado transiciones indicadoras de pérdidas trascendentes de 0.13 km². En las demás categorías también se pueden observar pérdidas y ganancias en las transiciones entre clases.

- **Microcuenca del río Campana (sistema de riego Campana-Malacatos)**

En la figura 18 se representa las pérdidas y ganancias de las clases identificadas.

Figura 18.

Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río Campana.



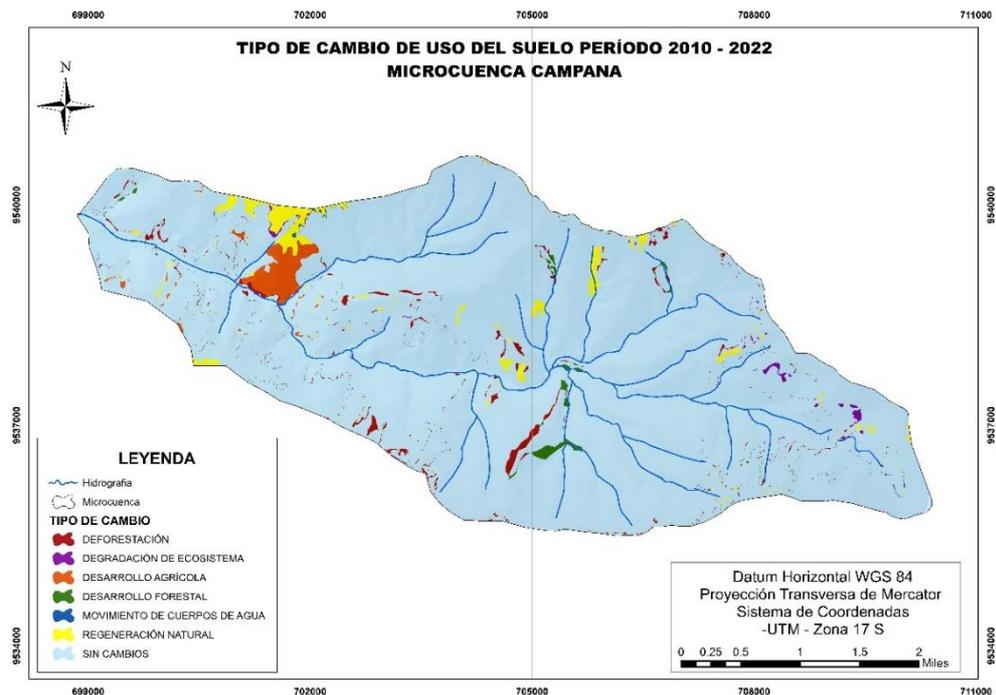
Se puede observar que en el Bosque Natural y Erial se han producido transiciones con respecto a estas métricas, en cuanto al Bosque Natural, se ha dado más ganancias de aproximadamente 0.39 km^2 y pérdidas de 0.38 km^2 . En Erial se ha tenido más pérdidas de aproximadamente 0.53 km^2 .

En lo concerniente a Páramo se ha demostrado que se dan más ganancias con una superficie de 0.56 km^2 , seguido de la clase Pastizal que en 12 años ha ganado 0.51 km^2 en comparación a las pérdidas que son de 0.35 km^2 , y para la clase Vegetación Arbustiva y Herbácea se presentan más pérdidas con un valor de 0.30 km^2 y ganancias de 0.28 km^2 .

Los Cuerpos de Agua Natural, Plantación Forestal y Tierra Agropecuaria no presentan mucha diferencia en la superficie perdida y ganada, pero estas transiciones no dejan de ser importantes. En la matriz de tabulación cruzada se pueden observar los datos, es presentada en el capítulo de Anexos (Tabla 23, Anexo 3).

Figura 19.

Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río Campana.



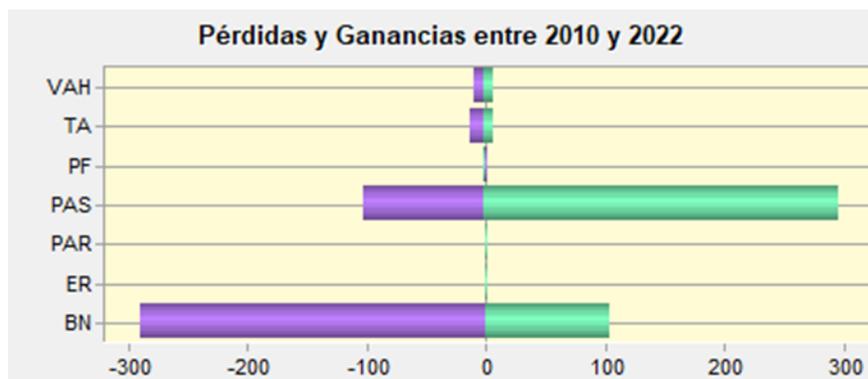
En la tabla 28 (Anexo 4) se puede observar las categorías que presentaron cambios, lo que demuestra que en la microcuenca Campana hubo una dinámica de cambio considerable. Uno de estos cambios significativos es de bosque nativo a paramo y vegetación arbustiva y herbácea con un total de 0.31 km², mientras esta vegetación a la vez presenta transiciones indicadoras de pérdidas de 0.055 km² a pastizal y cultivos. Otra transición importante es de erial a bosque nativo con 0.10 km², a pastizal con 0.39 km² y a vegetación arbustiva y herbácea con 0.031 km². Observándose de la misma forma pérdidas y ganancias en los demás usos del suelo que han sufrido transiciones.

- **Microcuenca San Agustín (sistema de riego La Era)**

En la figura 20 se representa las pérdidas y ganancias de las clases identificadas.

Figura 20.

Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río San Agustín.



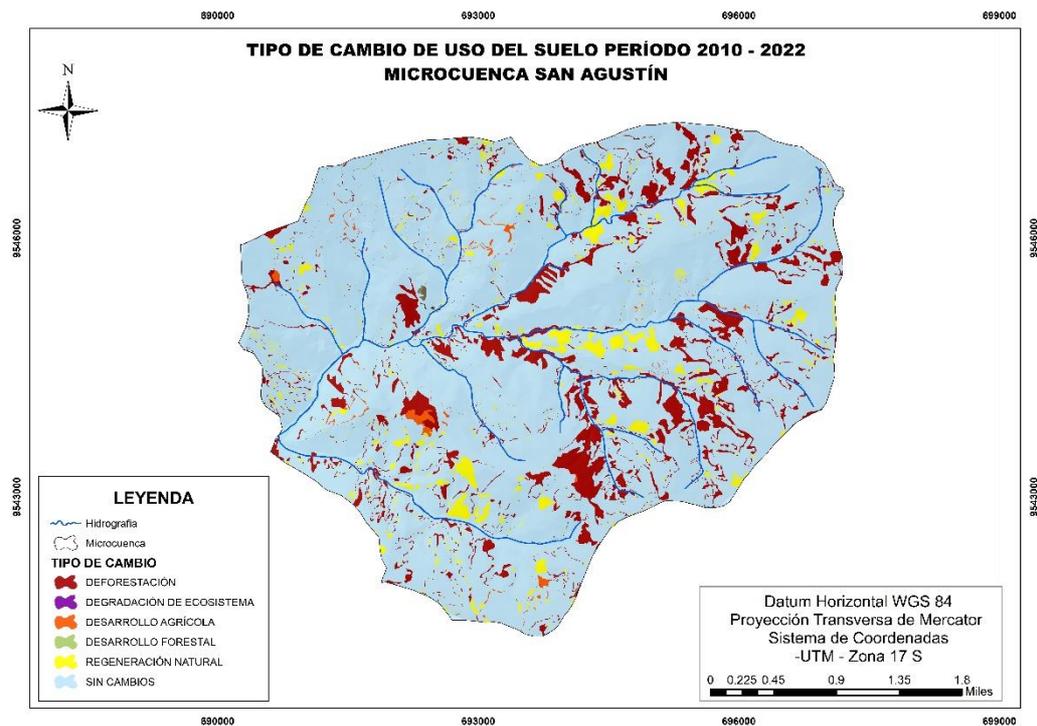
Se puede observar que en el Bosque Natural y Pastizal se han producido pérdidas significativas con respecto a estas medidas, en cuanto a Bosque Natural, se han dado más pérdidas de aproximadamente 2.90 km² y solo 1.04 km² de ganancias. Cabe marcar que para la clase Pastizal ha tenido más ganancias de aproximadamente 2.97 km².

En lo relativo a la clase Tierra agropecuaria se demuestra que se dan más pérdidas con una superficie de 0.13 km² y 0.08 km² se ha ganado, seguido por la clase Vegetación Arbustiva y Herbácea que en 12 años ha perdido 0.10 km² en comparación a sus pérdidas que son de 0.07 km².

El Erial, Páramo y Plantación Forestal no han sufrido mucha diferencia en la superficie que han perdido y ganado, a pesar de ello no dejan de ser importante. En la matriz de tabulación cruzada se puede visibilizar los datos, es presentada en Anexos (Tabla 24, Anexo 3).

Figura 21.

Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 microcuenca del río San Agustín.



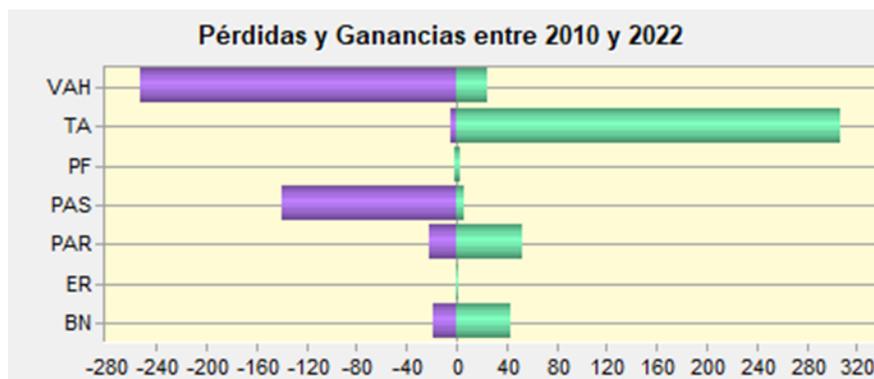
En la tabla 29 (Anexo 4), podemos observar a las categorías que sufrieron cambios, por lo que se muestra que esta microcuenca presenta una dinámica de cambio muy considerable. Uno de los cambios significativos e importante se ha dado de bosque nativo, es decir una superficie total pérdida de 2.81 km² que han sido reemplazadas por pastizales, pero también en este último se dan transiciones indicadoras de pérdidas trascendentes de 0.016 km²; que han pasado a tierra agropecuaria. Observándose también de la misma forma pérdidas y ganancias en los demás usos.

- **Microcuenca del río Aguacolla (sistema de riego La Palmira)**

En la figura 22 se muestran las pérdidas y ganancias de las clases identificadas

Figura 22.

Pérdidas y ganancias entre 2010 y 2022 en la microcuenca del río Aguacolla.



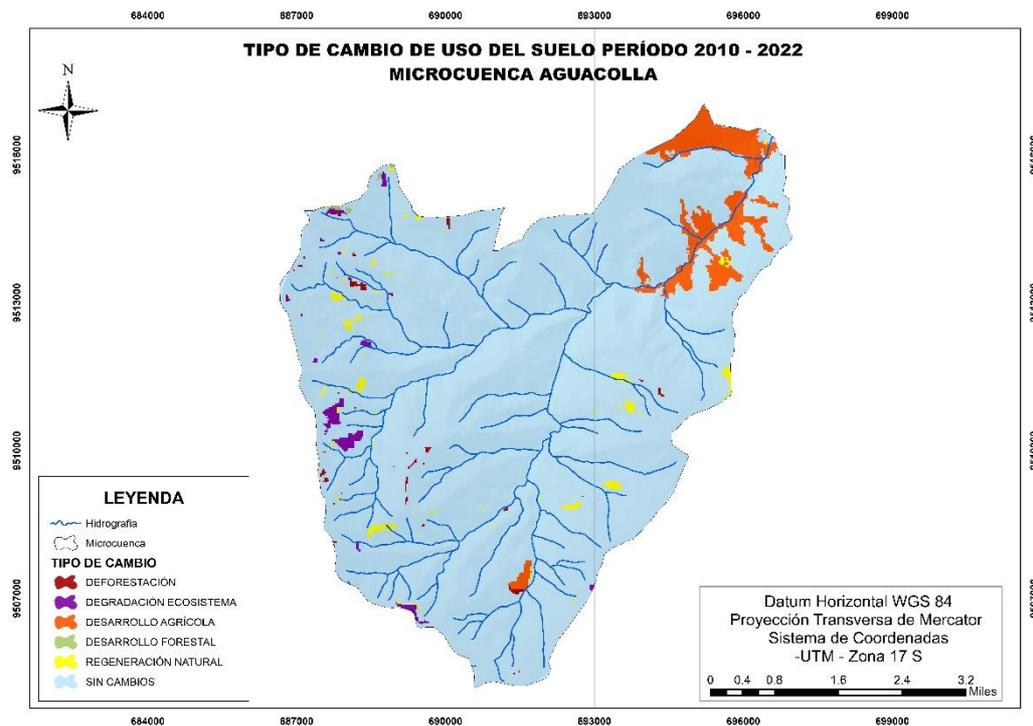
En la figura 28 se muestran las pérdidas y ganancias que se han producido en la microcuenca Aguacolla. Se puede observar que en la Vegetación Arbustiva y Herbácea y Tierra Agropecuaria se han ocasionado transiciones significativas con respecto a estas clases, en cuanto a la Vegetación Arbustiva y herbácea, se han proporcionado más pérdidas de 2.53 km² y 0.26 km² de ganancias. Para Tierra Agropecuaria se ha tenido más ganancias de aproximadamente 3.07 km².

En lo referente a Páramo se prueba que se dan más ganancias con una superficie de 0.52 km², seguido por la clase Bosque Nativo que en los 12 años ha ganado 0.44 km² en comparación de las pérdidas de 0.19 km², para la clase Pastizal se han generado pérdidas de 1.39 km² con ganancias de 0.06 km², y por ultima la Plantación Forestal demuestran pérdidas de 0.01 km².

El Erial no ha sufrido diferencia en la superficie perdida y ganada, aunque es importante esta transición. En la matriz de tabulación cruzada se puede ver los datos, y es presentada en Anexos (Tabla 25, Anexo 3).

Figura 23.

Mapa de áreas de tipo de cambio de uso del suelo entre el año 2010-2022 Microcuenca del río Aguacolla.



En la tabla 30 (Anexo 4), se evidencian las categorías que han sufrido intercambios, por lo que se muestra que la microcuenca presenta una dinámica de cambio considerable. Uno de los cambios significativos se ha dado en vegetación arbustiva y herbácea que dan una superficie total perdida de 2.52 km² siendo reemplazadas por páramo, pastizal y tierra agropecuaria, y en este se dan transiciones indicadoras de pérdidas.

6.1.5. Contribución de cambio neto en bosque

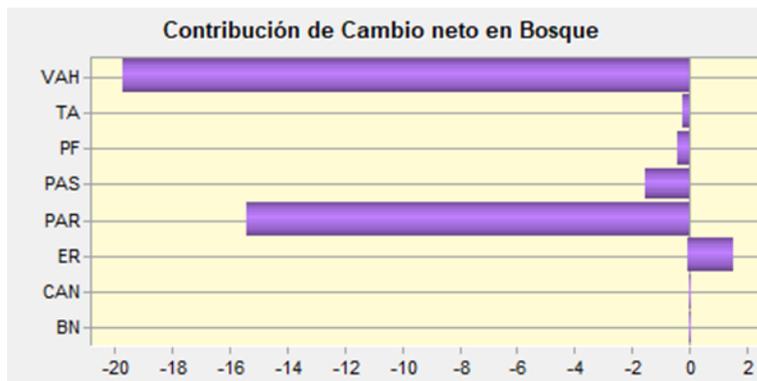
- **Microcuenca del río Mazanamaca (sistema de riego Quinara)**

Entre el año 2010 y 2022 se deforestaron dentro de la microcuenca cerca de 0.08 km² de bosque (0.19 %), es decir, 0.02 km²/año, lo que representa una tasa de deforestación anual de -0.082 %.

Como se muestra en la Figura 24, las coberturas que mayormente han contribuido para el cambio en bosque, son la vegetación arbustiva y herbácea, seguido del páramo y en una pequeña porción los pastizales y tierra agropecuaria.

Figura 24.

Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río Mazanamaca.



La degradación del ecosistema natural es una cobertura que se degrada en los últimos años ($0.13 \text{ km}^2 - 0.32 \%$) (Ver tabla 9), debido por el incremento de las tierras agropecuarias (4.97%) que se realizan para las actividades agrícolas y así incrementar la producción.

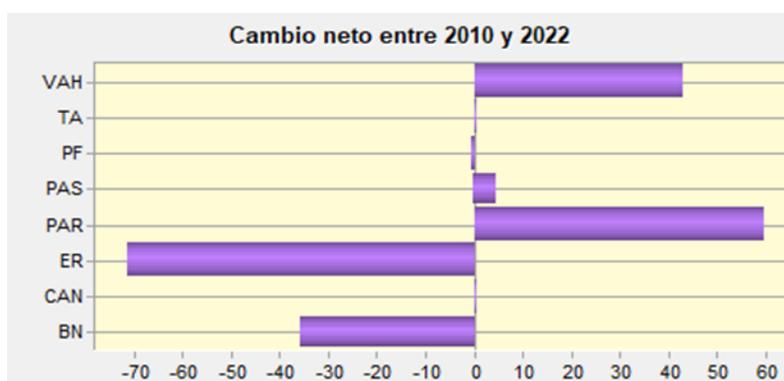
El desarrollo socioeconómico que representa el desarrollo forestal ($0.01 \text{ km}^2 - 0.02 \%$) (Ver tabla 9), aunque no presenta un cambio importante durante el tiempo analizado es un proceso significativo para el mantenimiento de la microcuenca.

Algo bueno que se produce en las áreas degradadas por la carencia de la actividad humana, es la regeneración natural, la cual optimiza el estado de la vegetación en 40.87 km^2 (94.88%) (Ver tabla 9). Esto se puede dar debido a que las personas han cambiado las actividades agropecuarias por la migración a la ciudad o también la población sea participe en proyectos de conservación que contribuyen a mejorar los bosques.

Resumiendo, los resultados mencionados, en la figura 25 se observa el cambio neto en bosque, para el periodo 2010 – 2022.

Figura 25.

Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río Mazanamaca.



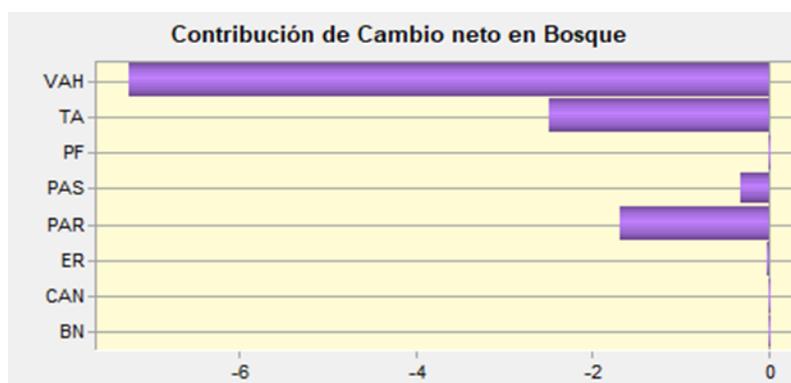
- **Microcuenca del río Capamaco (sistema de riego Vilcabamba)**

Entre el año 2010 y 2022 dentro de la microcuenca se deforestaron cerca de 0.23 km² de bosque (0.89 %), es decir, 0.0097 km² /año, lo que simboliza una tasa de deforestación anual de -0.083 %. Esto representando un uso incorrecto de los recursos naturales que la comunidad ha ejecutado para uso comercial y agropecuario.

Como se refleja en la figura 26 las clases que han contribuido mayormente para el cambio en bosque, son la vegetación arbustiva y herbácea, seguido de tierra agropecuaria y páramo, siendo en menos proporción los pastizales.

Figura 26.

Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río Capamaco.



La degradación del ecosistema natural es una cobertura que ha sido degradada en los últimos años (0.08 km² – 0.31 %) (Ver tabla 9), característicamente por consecuencia de la actividad agrícola (0.51 %) que en la zona se realiza para la producción.

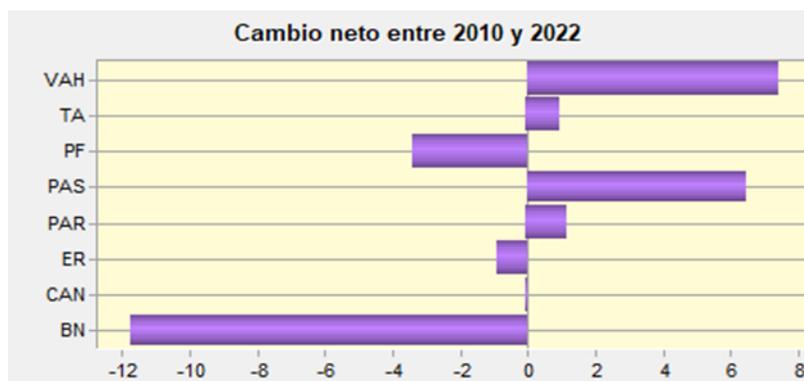
Para el desarrollo socioeconómico representado por el desarrollo forestal (0.01 km² – 0.05 %) (Ver tabla 9), no presenta un cambio significativo durante el tiempo analizado es un proceso que influye en el progreso del cuidado de la microcuenca.

Un estado positivo que se causa en las áreas degradadas por la falta de actividades humanas, es la regeneración, siendo así una mejora en el estado de la vegetación en 25.82 km² (97.57 %) (Ver tabla 9). Considerándose que la población ha cambiado las actividades agropecuarias por la migración hacia la ciudad, o también puede deberse a la participación e proyectos de conservación para la mejora de la calidad de bosques.

Sintetizando los resultados anteriores, en la figura 27, se detalla el cambio neto en bosque, entre el periodo 2010 – 2022.

Figura 27.

Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río Capamaco.



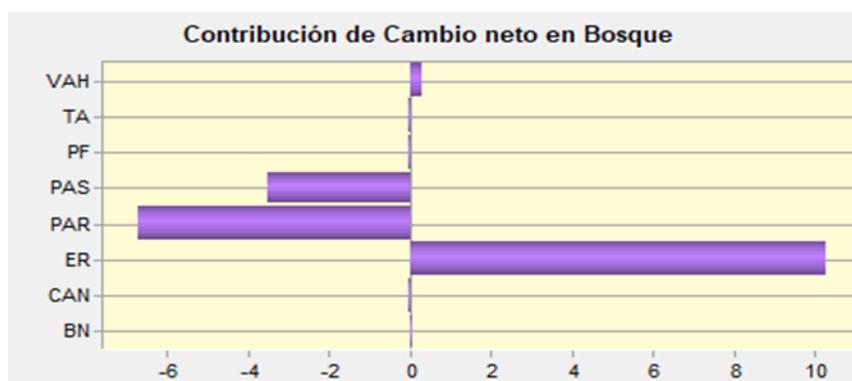
- **Microcuenca del río Campana (sistema de riego Campana-Malacatos)**

Entre el año 2010 y 2022, se deforestaron dentro de la microcuenca Campana cerca de 0.38 km² de bosque (1.10 %), esto es, 0.0017 km² /año, representando una tasa de deforestación anual de -0.083. Esta cifra muestra poco uso inadecuado de los recursos naturales por parte de su comunidad.

Como se muestra en la Figura 28, las coberturas que presentan mayor contribución para el cambio en bosque, son paramo, seguido de pastizal y en menor cantidad la tierra agropecuaria, plantación forestal y cuerpos de agua natural. Mientras que la cobertura Erial ha contribuido para el aumento de Bosque Natural.

Figura 28.

Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río Campana.



La degradación del ecosistema natural sigue siendo una cobertura que se ha degradado en los últimos años ($0.9 \text{ km}^2 - 0.26 \%$) (Ver tabla 9), esto debido mayormente al efecto del desarrollo agrícola (1.30%) que se efectúan para la producción en la zona.

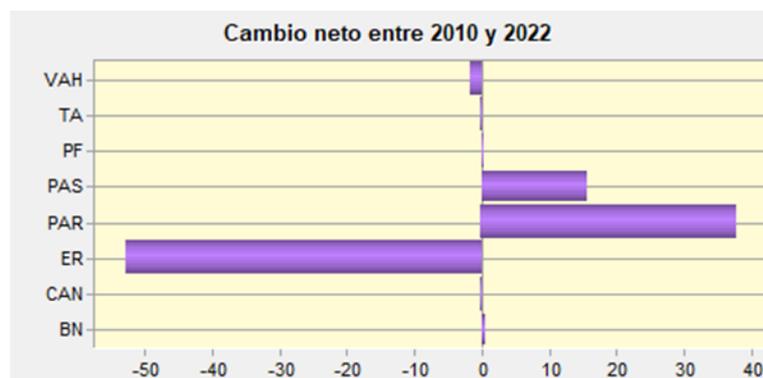
El desarrollo forestal ($0.17 \text{ km}^2 - 0.50 \%$) (Ver tabla 9), presentando un cambio importante durante el periodo analizado, siendo así un proceso que presenta un progreso en el mantenimiento de la calidad de bosques.

Un dato importante que se genera en las áreas degradadas por la escasez de la mano del hombre, es la regeneración natural, la cual mejora el estado de la vegetación en 32.92 km^2 (94.95%). Esto posiblemente se deba a la migración de la comunidad y participación de la población en proyectos de conservación, o al área protegida que se encuentra en la parte alta de la microcuenca.

Abreviando los resultados mencionados, en la Figura 29, se detalla el cambio neto en bosque, entre el periodo 2010 – 2022.

Figura 29.

Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río Campana.



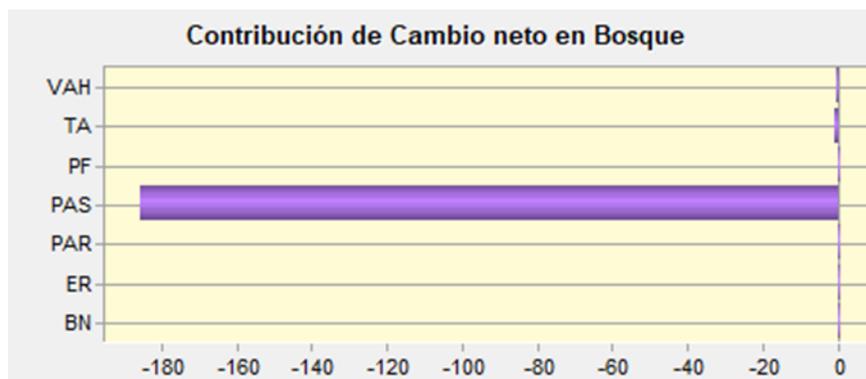
- **Microcuenca San Agustín (sistema de riego La Era)**

Entre el año 2010 y 2022 dentro de la microcuenca se deforestaron cerca de 2.87 km^2 de bosque (9.82%), o sea, $0.15 \text{ km}^2 / \text{año}$, lo que figura una tasa de deforestación anual de -0.07% . Esta cifra muestra el uso inadecuado de los recursos naturales que la comunidad ha ejercido sobre la microcuenca para uso comercial y agropecuario.

Como se expone en la Figura 30, la cobertura que especialmente ha contribuido para el cambio en bosque, es pastizal y en menor proporción tierra agropecuaria y vegetación arbustiva y herbácea.

Figura 30.

Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río San Agustín.



La degradación del ecosistema natural siendo una cobertura que se ha degradado en los últimos años ($0.022 \text{ km}^2 / \text{año} - 0.08 \%$) (Ver tabla 9), especialmente por las actividades agrícolas (0.57%) que se realizan para producción.

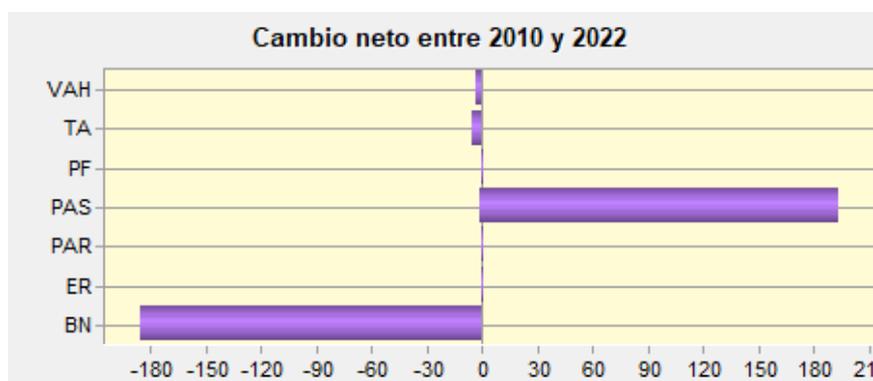
El desarrollo económico representado por el desarrollo forestal ($0.0035 \text{ km}^2 - 0.01 \%$) (Ver tabla 9), no presenta un cambio significativo en el transcurso del tiempo analizado siendo un proceso que actualmente comprende la conservación y uso de los recursos naturales.

Algo positivo que se ocasiona en las áreas degradadas por ausencia de las actividades humanas, es la regeneración natural, dando la mejora del estado de la vegetación en 25.14 km^2 (85.81%) (Ver Tabla 9). Todo esto se puede dar por la migración de la población hacia la ciudad o también, tiene que ver la participación en proyectos de conservación para los bosques.

Simplificando los resultados mencionados, en la Figura 31, se muestra el cambio neto en bosque, entre el período 2010 – 2022.

Figura 31.

Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río San Agustín.



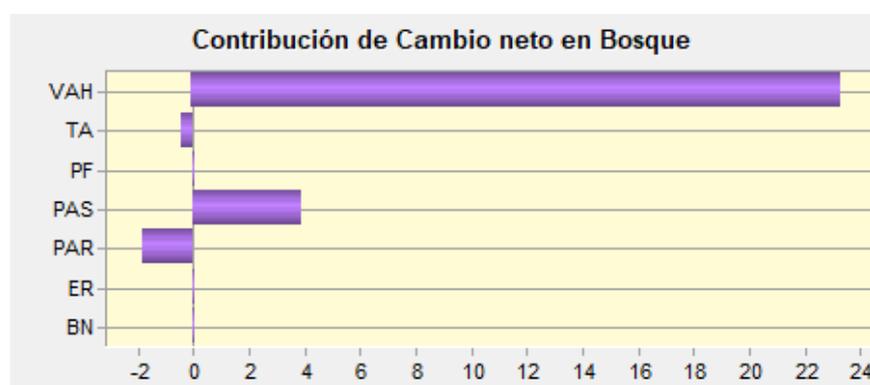
- **Microcuenca del río Aguacolla (sistema de riego La Palmira)**

Entre el año 2010 y 2022 dentro de la microcuenca La Palmira se deforestaron cerca de 0.19 km² de bosque (0.27 %), o sea, 0.04 km² /año, lo que figura una tasa de deforestación anual de -0.08 %. Esta cifra muestra el uso inadecuado de los recursos naturales que la comunidad ha ejercido sobre la microcuenca para uso comercial y agropecuario.

Como se expone en la Figura 32, la cobertura que especialmente ha contribuido para el cambio en bosque, es páramo y tierra agropecuaria.

Figura 32.

Contribución de las coberturas en el cambio de bosque en la microcuenca del río Aguacolla.



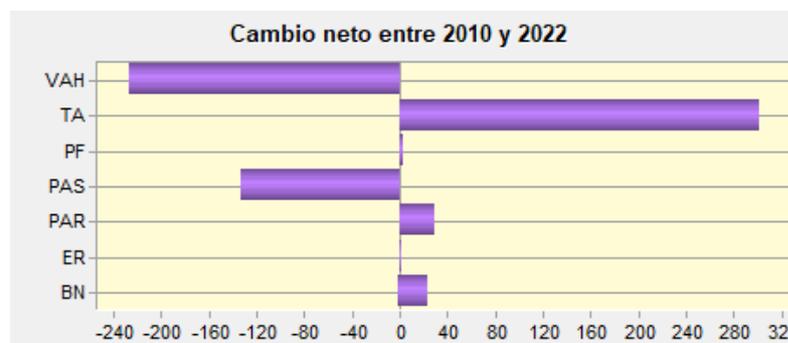
La degradación del ecosistema natural ha sido una cobertura que se ha degradado en los últimos años (0.41 km² – 0.56 %) (Ver tabla 9), principalmente por el efecto del desarrollo agrícola (4.35 %) para la producción.

El desarrollo forestal (0.043 km² – 0.06 %) (Ver tabla 9), presenta un cambio importante durante el transcurso de tiempo analizado, ya que es un proceso que actualmente presenta una mayor conservación de los recursos naturales de la microcuenca.

Un punto importante que se produce en las áreas degradadas por falta de la actividad humana, es la regeneración natural, siendo el estado de la vegetación en 66.88 km² (93.84 %) (Ver tabla 9). Esto puede ser posible por la migración de la población aledaña a la microcuenca.

Figura 33.

Cambio Neto en Bosque entre 2010-2022 en la microcuenca del río Aguacolla.



6.1.6. Deforestación total anual promedio y tasa anual de cambio de las microcuencas productoras de agua para los sistemas de riego públicos

Tabla 10.

Deforestación anual y tasa de deforestación por microcuenca.

MICROCUENCAS	ÁREA DE BOSQUE EN 2010 (km ²)	ÁREA DE BOSQUE EN 2022 (km ²)	DEFOREST. TOTAL ANUAL	TASA DEFOR. (%)
Mazanamarca	23.95	23.60	2.98	-0.082
Capamaco	12.67	12.56	0.97	-0.083
Campana	21.47	21.45	0.17	-0.083
San Agustín	11.29	9.44	15.46	-0.069
Aguacolla	20.03	20.03	0.05	-0.080
TOTAL	89.41	87.09	19.63	

En la tabla 10 se exponen los cálculos de deforestación en las diferentes microcuencas productoras de agua para los sistemas de riego públicos de la cuenca Superior del Río Catamayo. Las microcuencas con mayor deforestación son San Agustín (15.46 %) y Mazanamaca (2.98 %), siendo San Agustín la que registra mayor tasa de deforestación (-0.069 %). Así mismo, San Agustín una de las microcuencas con un alto grado de desarrollo socioeconómico (0.16 km²), seguido de Campana Malacatos con 0.62 km².

Cabe mencionar que en la microcuenca San Agustín, una de las actividades productivas es la agricultura, ya que es patente que muchos pobladores deforestan áreas de bosque para crear sus parcelas, aunque, la actividad agrícola es extensiva, en otras palabras, hay grandes áreas de pasto con poco sembrío, por lo que es una microcuenca con mayor área regenerada tiene (3.72 %)

Las microcuencas con menor área deforestada son Capamaco, Campana y Aguacolla con 0.97, 0.17 y 0.05 % respectivamente, esto es debido a que Campana es una de las microcuencas con menor degradación del ecosistema (0.26 %) seguido de Capamaco (0.31 %).

La microcuenca Mazanamaca también registra una tasa de deforestación alta de -0.082 % debido a que se relaciona con un considerable porcentaje de desarrollo agrícola (0.12 %) que se ha dado en los últimos años, conllevando a una degradación del ecosistema (0.32 %), sin embargo, se presenta una regeneración natural (2.87 %), puesto que la microcuenca cuenta con un ingreso restringido. Aguacolla también es una microcuenca que tiene un porcentaje alto de desarrollo agrícola (4.35 %) lo que conlleva a una degradación del ecosistema impresionante (0.59), a pesar de ello muestra una regeneración natural (0.89 %).

6.1.7. Variables explicativas

Las variables que se emplearon para calibrar el modelo fueron: el modelo digital de terreno (DEM), evidencia del cambio, distancias a áreas de cambios, distancias a vías, distancia areas protegidas y distancia a perturbaciones.

6.2. Modelación de los cambios futuros de deforestación en las microcuencas de estudio, en base al modelo de las ortofotos, de TerrSet

Con los modelos se pudo alcanzar la predicción de cambios para los dos periodos establecidos para cada microcuenca; como se muestra a continuación:

- **Microcuenca del río Mazanamaca (sistema de riego Quinara)**

Para el año 2030 y 2060 como indican la tabla 11 y figura 34, se predice que el bosque en la microcuenca Quinara disminuya su superficie en un 0.53 % y 1.60 % respectivamente (0.22 y 0.68 km²) en relación al año 2022. Pero consecuentemente la clase agropecuaria presenta crecimientos moderados y con los periodos modelados, el uso del suelo aumentará 0.0026 y 0.0049 km². De la misma manera el pastizal muestra un crecimiento porcentual del 0.08 % y 0.25 % para los años 2030 y 2060. En el erial se observa una importante disminución de (0.033 y 0.0027 km²).

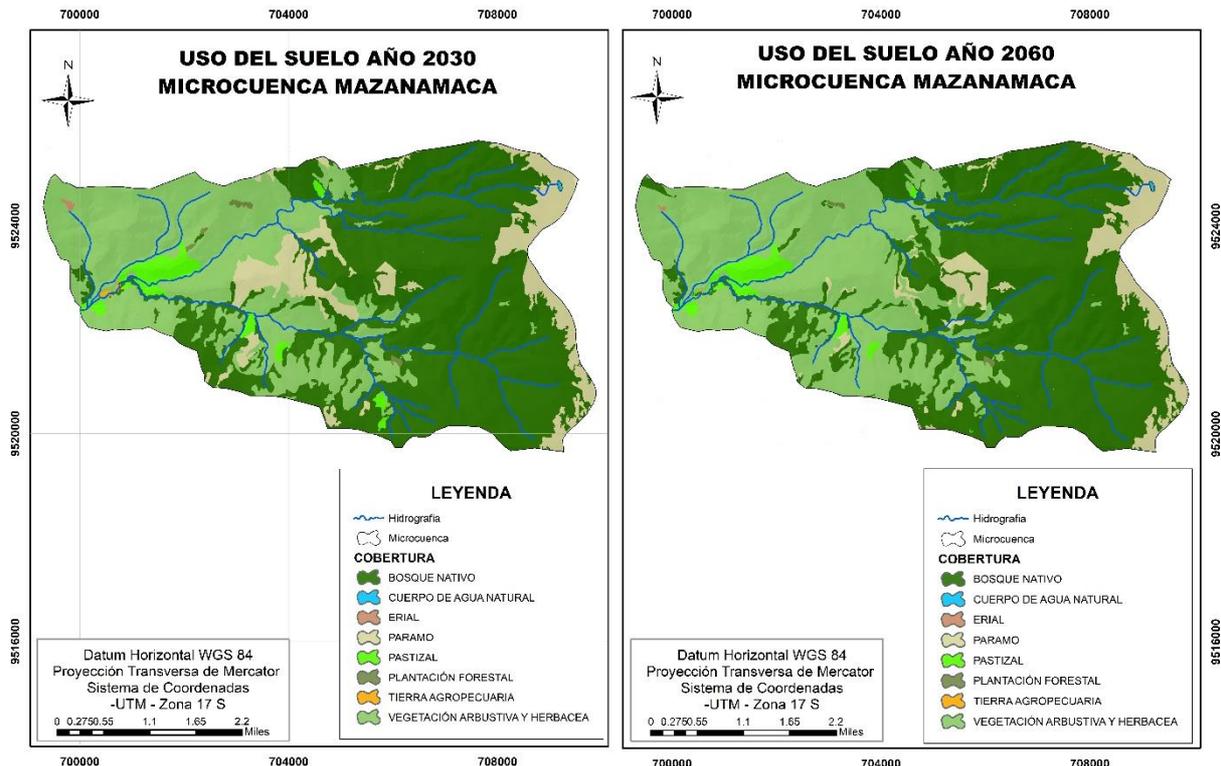
Tabla 11.

Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río Mazanamaca (sistema de riego Quinara).

N°	Uso del suelo	Año 2010		Año 2022		Año 2030		Año 2060	
		km ²	%						
1	Bosque Nativo	23.95	55.62	23.60	54.79	23.37	54.26	22.68	52.66
2	Cuerpo de Agua Natural	0.012	0.03	0.012	0.03	0.013	0.03	0.014	0.03
3	Erial	0.75	1.75	0.039	0.09	0.0054	0.013	0.002	0.006
4	Páramo	4.41	10.26	5.01	11.64	5.12	11.90	5.37	12.47
5	Pastizal	1.02	2.38	1.07	2.50	1.10	2.58	1.22	2.83
6	Plantación Forestal	0.12	0.29	0.11	0.27	0.11	0.26	0.10	0.24
7	Tierra Agropecuaria Vegetación	0.075	0.17	0.077	0.18	0.08	0.19	0.085	0.20
8	arbustiva y herbácea	12.70	29.50	13.13	30.50	13.25	30.77	13.59	31.55

Figura 34.

Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río Mazanamaca.



- **Microcuenca del río Capamaco (sistema de riego Vilcabamba)**

Para el año 2030 y 2060 como señala la tabla 12 y figura 35, el bosque presenta un descenso de (0.07 y 0.25 km²) respectivamente. Por otro lado, las tierras agropecuarias presentan un cambio significativo de 0.03 % a 0.07% representando un total de (0.0064 y 0.018 km²) respectivamente para cada año. De igual manera, para la vegetación arbustiva y herbácea el crecimiento se presenta de forma porcentual siendo 0.19 % y 0.56 %, por lo tanto, observamos que a diferencia del porcentaje las 0.049 y 0.14 km² son las más representativas para los diferentes años mencionados.

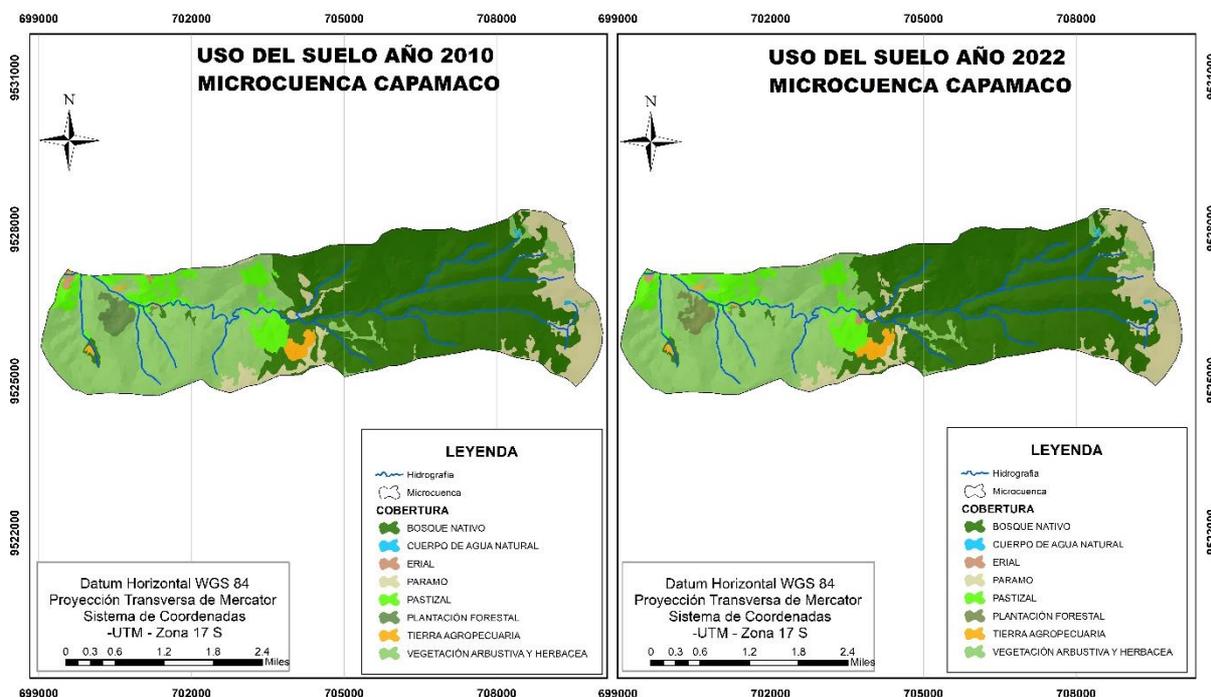
Tabla 12.

Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río Capamaco (sistema de riego Vilcabamba).

N°	Uso del suelo	Año 2010		Año 2022		Año 2030		Año 2060	
		km ²	%						
1	Bosque Nativo	12.67	47.91	12.56	47.46	12.48	47.17	12.22	46.20
2	Cuerpo de Agua Natural	0.024	0.09	0.024	0.09	0.025	0.09	0.026	0.10
3	Erial	0.060	0.23	0.051	0.19	0.049	0.19	0.047	0.18
4	Páramo	2.86	10.82	2.87	10.87	2.88	10.89	2.90	10.98
5	Pastizal	1.68	6.37	1.74	6.61	1.78	6.76	1.91	7.23
6	Plantación Forestal	0.40	1.53	0.37	1.40	0.35	1.32	0.29	1.10
7	Tierra Agropecuaria	0.27	1.03	0.28	1.06	0.28	1.09	0.30	1.16
8	Vegetación arbustiva y herbácea	8.47	32.03	8.55	32.31	8.60	32.50	875.02	33.06

Figura 35.

Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río Capamaco.



- **Microcuenca del río Campana (sistema de riego Campana-Malacatos)**

Para el año 2030 y 2060 como señala la tabla 13 y figura 36, el bosque representa un descenso de 0.06 y 0.18 km² dando porcentajes del 0.19 % y 0.53 % en los dos años ya mencionados. Por otro lado, pero con la misma representación, los pastizales muestran un declive evidente con 0.17 y 0.48 km² perdidas en los próximos años. Al contrario del páramo que presenta un crecimiento específico de 0.26 y 0.71 km² siendo este el resultado más notorio

Tabla 13.

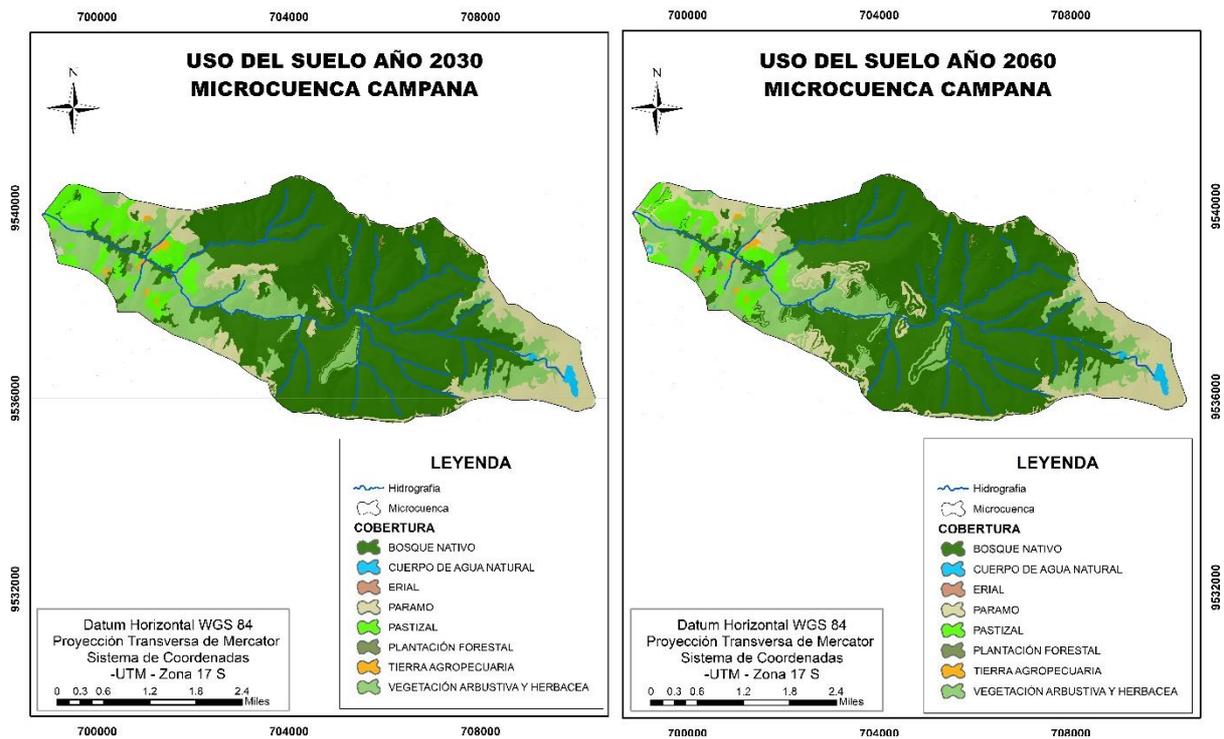
Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río Campana (sistema de riego Campana-Malacatos).

N°	Uso del suelo	Año 2010		Año 2022		Año 2030		Año 2060	
		km ²	%						
1	Bosque Nativo	21.47	61.94	21.45	61.88	21.39	61.69	21.20.8	61.16
2	Cuerpo de Agua Natural	0.13	0.39	0.13	0.40	0.13	0.40	0.13	0.40
3	Erial	0.53	1.55	0.0088	0.03	0.013	0.04	0.013	0.04
4	Páramo	3.43	9.89	3.81	10.99	4.07	11.76	4.79	13.83
5	Pastizal	2.34	6.77	2.51	7.26	2.33	6.74	1.85	5.36
6	Plantación Forestal	0.030	0.09	0.029	0.09	0.029	0.09	0.029	0.08

7	Tierra Agropecuaria Vegetación arbustiva y herbácea	0.11	0.34	0.13	0.38	0.13	0.38	0.14	0.42
8		6.60	19.03	6.58	18.99	6.55	18.90	6.48	18.71

Figura 36.

Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río Campana.



- **Microcuenca del río San Agustín (sistema de riego La Era)**

Para el año 2030 y 2060 como indica la tabla 14 y figura 37, el bosque representa un cambio para estos años, disminuyendo en 0.93 y 1.72 km². De la misma forma, las tierras agropecuarias muestran un descenso, aunque no tan notorio de 0.14 % y 0.45 % representando (0.038 y 0.13 km²) de pérdida respectivamente. Los pastizales por otro lado, muestran un crecimiento bastante evidente dentro de este contexto con 0.99 y 1.91 km² para los próximos años modelados.

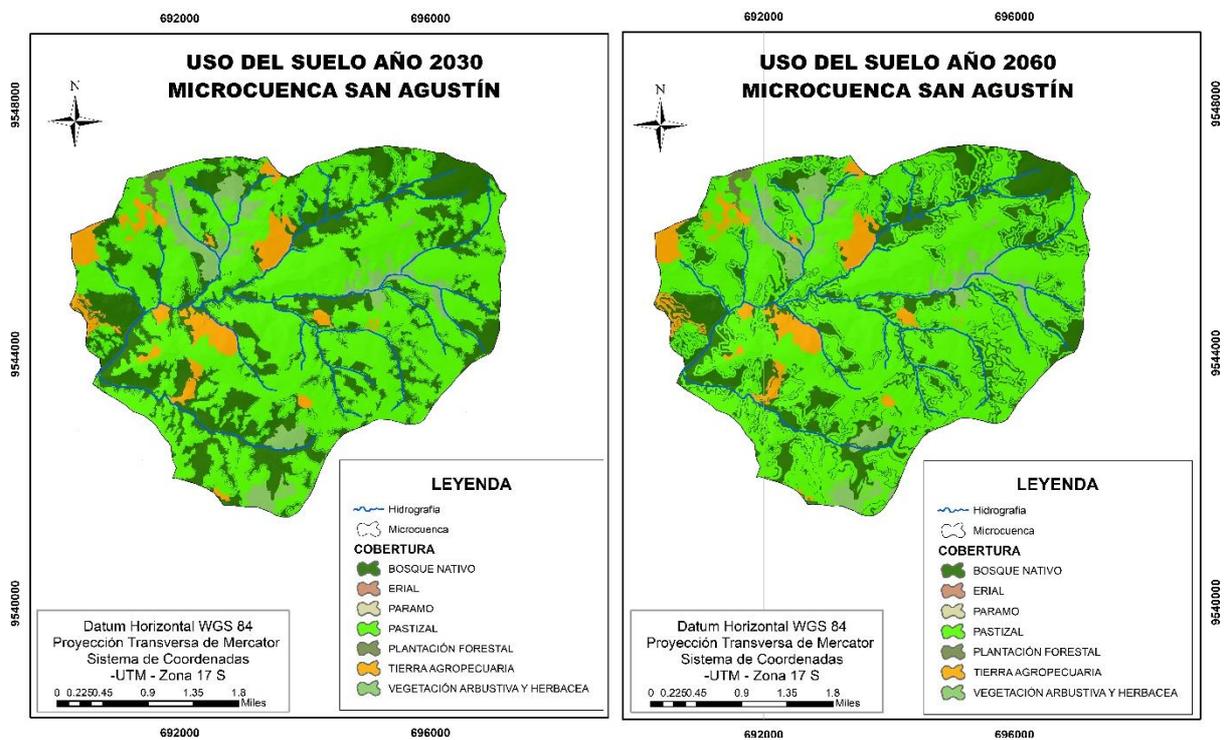
Tabla 14.

Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río San Agustín (sistema de riego La Era).

N°	Uso del suelo	Año 2010		Año 2022		Año 2030		Año 2060	
		km ²	%						
1	Bosque Nativo	11.29	38.56	9.44	32.23	8.50	29.03	6.77	23.13
2	Erial	0.0036	0.01	0.0002	0.00	0.0002	0.00	0.0002	0.00
3	Páramo	0.0003	0.00	0.0002	0.00	0.0001	0.00	0.00002	0.00
4	Pastizal	14.38	49.09	16.32	55.72	17.32	59.13	19.23	65.66
5	Plantación Forestal	0.10	0.36	0.10	0.36	0.10	0.35	0.10	0.35
6	Tierra Agropecuaria	1.74	5.97	1.69	5.79	1.65	5.65	1.52	5.20
7	Vegetación arbustiva y herbácea	1.76	6.01	1.72	5.90	1.71	5.84	1.65	5.66

Figura 37.

Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río San Agustín.



- **Microcuenca del río Aguacolla (sistema de riego La Palmira)**

Para el año 2030 y 2060 como indica la tabla 15 y figura 38, se predice que el bosque nativo disminuya en un 0.02 y 0.05 % respectivamente (0.01 y 0.038 km²) en relación al año 2022. Pero la cobertura tierra agropecuaria presenta crecimientos reveladores y a los periodos modelados, este uso crecerá 0.66 y 1.74 km². El páramo aumentara en términos porcentuales al 2060 en un 0.43 %. La plantación forestal se presagia que a partir del año 2010 al 2060 aumenta 0.31 km² (0.44 %). En pastizal y vegetación arbustiva y herbácea se observa disminuciones del 0.45 % (0.32 km²) y 4.67 % (3.32 km²) respectivamente, esto se debe al aumento de tierra agropecuaria.

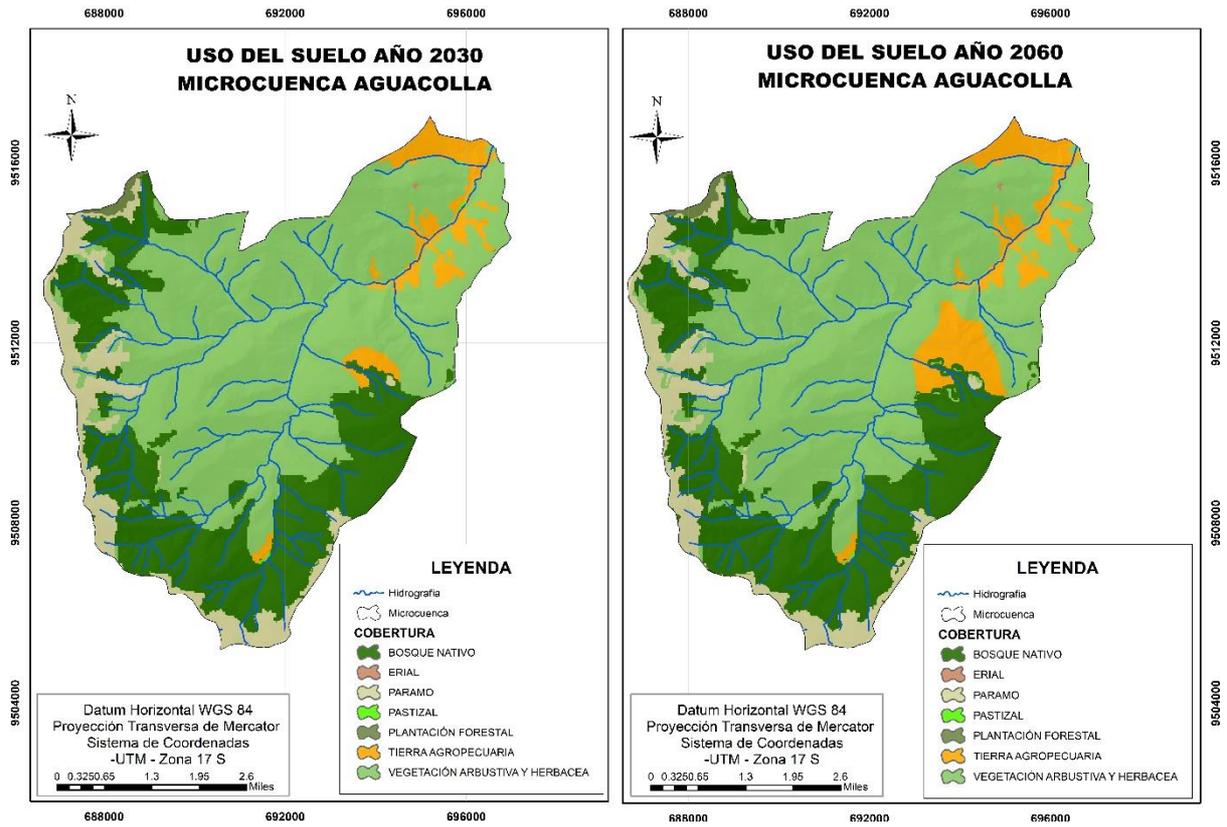
Tabla 15.

Modelación a los años 2030 y 2060 de los diferentes usos de suelo, microcuenca del río Aguacolla (sistema de riego La Palmira).

N°	Uso del suelo	Año 2010		Año 2022		Año 2030		Año 2060	
		km ²	%						
1	Bosque Nativo	20.04	28.11	20.03	28.10	20.01	28.08	19.97	28.03
2	Erial	0.0126	0.02	0.012	0.02	0.012	0.02	0.012	0.02
3	Páramo	5.59	7.85	5.67	7.97	5.72	8.03	5.90	8.28
4	Pastizal	0.35	0.49	0.17	0.25	0.042	0.06	0.028	0.04
5	Plantación Forestal	0.034	0.05	0.28	0.40	0.30	0.42	0.34	0.49
6	Tierra Agropecuaria	2.38	3.35	3.06	4.30	3.73	5.24	5.47	7.69
7	Vegetación arbustiva y herbácea	42.85	60.13	42.02	58.96	41.44	58.15	39.53	55.46

Figura 38.

Mapa de uso del suelo para los años 2030 y 2060 microcuenca del río Aguacolla.



7. Discusión

Desde el análisis de la información obtenida para la investigación, se pudo comprender el comportamiento progresivo de cambio de uso de suelo, en un periodo de 12 años (2010 – 2022) en cada una de las microcuencas productoras de agua para los sistemas de riego públicos.

7.1. Cambio de uso del suelo y tasa de deforestación periodo 2010 – 2022

En algunos estudios, se ha observado una creciente transformación de áreas cubiertas por vegetación natural hacia usos antrópicos, como la agricultura (Pinos, 2015). En el caso del páramo, su expansión puede estar relacionada con la degradación del suelo y la disminución de la vegetación nativa, además, por los proyectos de conservación de la biodiversidad de los páramos. La vegetación herbácea y arbustiva puede reemplazar a la vegetación natural en áreas degradadas, lo que puede afectar la capacidad de retención de agua y la estabilidad del suelo (Beltrán et al., 2009).

La cobertura vegetal de bosque nativo desde el año inicial y final de estudio en las microcuencas Mazanamaca, Capamaco, Campana y Aguacolla tuvo un descenso de un 0.83%, 0.45 %, 0.06 %, y 0.36 % respectivamente, catalogando estos datos como un cambio muy bajo como lo describe González Fuertes (2014) en la cuenca Superior del Río Catamayo con un valor de 3.59 %; sin embargo, en la microcuenca San Agustín se tiene un valor de 6.33 % de descenso, lo que significa que es un valor preocupante para la zona, ya que se pueden presentar efectos erosivos significativos y un cambio en la regulación hídrica debido a la poca cobertura vegetal.

En la clase páramo las microcuencas Mazanamaca, Campana y Aguacolla evidencian una variación muy baja de 0.59 km² (1.38 %), 0.38 km² (1.10 %) y 2.03 km² (2.96 %) respectivamente, resultados similares a los obtenidos por Siguencia (2022) en la Microcuenca del río Atapo Pomachaca provincia de Chimborazo con un valor de 4.39 km² (10.08 %).

Para la cobertura Erial en los años 2010 – 2022 en las microcuencas Mazanamaca, Capamaco, Campana y San Agustín se evidencian pérdidas muy bajas de 0.71 km² (1.66 %), 0.009 km² (0.04 %), 0.52 (1.52 %) y 0.0016 km² respectivamente. Sin embargo, en la microcuenca Aguacolla se muestra un incremento de 0.012 km² (0.02 %) de erial; este aspecto es importante, ya que al generarse pérdidas de esta cobertura existe desarrollo forestal, desarrollo agrícola o regeneración natural.

Observando las coberturas que han ganado superficie en las microcuencas, encontramos un incremento del 7.63 % total en pastizales con 2.33 km² y del 1.10 % total a la cobertura tierra agropecuaria con 0.70 km², resultados comparados a los expuestos por González Fuertes (2014) con un incremento de 207.30 % a la cobertura cultivos con un crecimiento de 4.89 km² en la cuenca Superior del Río Catamayo en el periodo 1996-1999.

Mientras que en este periodo de estudio existió una disminución en la cobertura de plantación forestal en las microcuencas Mazanamaca que fue del 0.29 % al 0.27 %, Capamaco de 1.53 % a 1.40 %, Campana de 0.09 % a 0.08 %, mientras en la microcuenca San Agustín se mantiene, en cambio en la de Aguacolla se presenta un aumento de plantación forestal que fue de 0.05 % a 0.40 %. Estas pérdidas, aunque no son muy significativas pueden disminuir la velocidad de infiltración del suelo, generando una depreciación en la recarga de agua en el subsuelo.

La pérdida de bosques es un problema que afecta gravemente al Ecuador desde hace casi tres décadas. Según Bolier Torres, en los últimos 26 años el país ha perdido más de 2 millones de hectáreas de bosque tropical, es decir, cerca del 7,8 % de la superficie total del Ecuador (Torres et al., 2013). En Ecuador la causa más común de la deforestación es la expansión de la frontera agrícola. Los investigadores del proyecto LaForeT encontraron que la población que vive en los bosques tropicales, o cerca de ellos, se ha visto obligada a convertir ciertas áreas forestales en sistemas agropecuarios (Montaño, 2021).

La deforestación total anual promedio a nivel del cantón Catamayo según el estudio realizado por Peña-Villalta (2018), da un área deforestada de 47.54 km²/año, siendo El tambo la parroquia con más porcentaje (38.93 %) con una deforestación total anual de 0.51 km²/año y -0.02 la tasa de deforestación desde el año 1996 – 2015, para las microcuencas de estudio, se obtuvo un área deforestada de 3.26 km², siendo la microcuenca con mayor porcentaje San Agustín (90.23 %) con una deforestación total anual de 0.15 km²/año y -0.069 la tasa de deforestación.

En otras microcuencas, la cobertura natural se ha recuperado por restauración natural o pasiva, una de ellas la microcuenca Mazanamaca (2.87 %) no obstante de tener un alto porcentaje de degradación del ecosistema (0.32 %) se han venido dando buenas prácticas sostenibles y tecnificadas en cuanto al campo productivo, esto se observa en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento del Territorio de la parroquia Quinara 2014 – 2019. (GAD, 2015).

Aunque, hay que precisar que esta es una de las microcuencas con una menor área deforestada $0.029 \text{ km}^2/\text{año}$ con una tasa anual de -0.082% , debido a que la parroquia ha practicado la producción agrícola y ganadera para la obtención de recursos económicos.

Los resultados obtenidos detallan, que en las microcuencas Campana y Capamaco se tiene un bajo grado de intervención, y en las microcuencas Mazanamaca y Aguacolla se tiene un grado de intervención medio, sin embargo, en la microcuenca de San Agustín podemos determinar que presenta un alto grado de intervención, debido al incremento de las tierras agropecuarias, y la disminución de la vegetación natural.

7.2. Escenarios de deforestación al 2060

Al analizar los resultados que se generaron en el módulo Land Change Modeler (LCM) para las microcuencas Mazanamaca, Capamaco, Campana, San Agustín y Aguacolla, el primer resultado como se observan en la figuras 19, 21, 23, 25, 27 respectivamente, es la estadística gráfica del cambio de uso del período de estudio, en las cuales se presentan las ganancias y pérdidas netas de cada una de las clases de uso de suelo, en el cual el bosque ha perdido en relación a lo que ha ganado en cada área, resultados similares a los obtenidos por Peña-Villalta (2018), las clases de pastizales y tierra agropecuaria en el periodo gana frente a lo que ha perdido; estas son las clases influyentes en los modelos de deforestación. Para el periodo 2010 - 2022, la microcuenca de San Agustín es donde se localizan las actividades productivas y el impacto de deforestación es mayor en comparación a las otras microcuencas de estudio.

Los modelos de deforestación generados al 2030 para las zonas de estudio, valúan que las pérdidas de bosque nativo continuarán afectando en este período, donde los cambios principales serán provocados por la expansión de la actividad agrícola (pastizales y tierra agropecuaria). La tasa de deforestación estimada para esta fecha es de -0.04% en Mazanamaca, Capamaco, Campana, Aguacolla y de -0.03% en San Agustín.

Para el año 2060 la tasa de deforestación estimada será de -0.03 para las microcuencas Mazanamaca, Capamaco, Campana y Aguacolla y de -0.02% para la de San Agustín, pero esto tal vez se podría elevarse por los cambios que se presenten en las microcuencas, sobre todo por lo ya mencionado anteriormente la intensificación de la producción agrícola.

Para los años 2030 y 2060 en las microcuencas Mazanamaca y San Agustín se pronosticó que el bosque presenta una reducción media de superficie de $0.53 - 1.60 \%$ y $3.2 -$

9.1 % respectivamente, valores similares a los obtenidos por Arias y otros autores (2024) en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador siendo de 6.84 % para la proyección 2018 -2030. Sin embargo, las microcuencas Capamaco, Campana y Aguacolla evidenciaron una reducción baja de superficie de 0.07 - 0.25 %, 0.19 – 0.53 % y 0.02 – 0.05 % respectivamente para los años 2030 y 2060, valores cercanos a los obtenidos por Peña-Villalta (2018), en el cantón Catamayo.

La metodología empleada, los resultados de calibración de los modelos implementados en la investigación presentan buenos resultados, en donde los índices de Kappa y ROC, mostraron valores equivalentes a 84.49 – 94.75 % y 0.78 – 0.99 %, resultados similares a los obtenidos por Benavidez (2018) en Chile para el periodo 1992 – 2080. Los modelos obtenidos a futuros presentaron disminuciones constantes en la cobertura bosque en todas las microcuencas de estudio, proceso recurrente en todo Ecuador, como lo menciona Arias y otros autores (2024).

8. Conclusiones

Del presente trabajo de investigación se puede concluir lo siguiente:

- El análisis multitemporal vectorial de las ortofotos en ArcGIS es una herramienta que permitió monitorear los cambios e impactos ambientales significativos a través del tiempo y espacio en cada una de las microcuencas, permitiendo conocer las interrelaciones existentes que lo componen y su relación con la intervención humana.
- La metodología empleada para la investigación, a partir de los SIG y análisis estadístico simple, se ha evidenciado que para los estudios en cambios de usos de suelo es efectiva, por la razón de que permite, a más de obtener imágenes categorizadas de las coberturas, también se puede cuantificar los cambios que se han producido en un período de estudio y observar su dinámica a diferentes niveles de detalle.
- Entre el año 2010 y 2022 las coberturas que disminuyeron sus áreas son el bosque nativo en un 0.83 % en Quinara, 0.45 % en Vilcabamba, 0.06 % en Campana-Malacatos, 6.33 % en La Era, 0.01 % en Palmira; las plantaciones forestales en un 0.13 % en Vilcabamba y la vegetación arbustiva y herbácea en un 1.17 % en Palmira, y las coberturas que mayormente han aumentados son los pastos y tierra agropecuaria en 0.13 % en Quinara, 0.27 % en Vilcabamba, 0.53 % en Campana-Malacatos, 6.63 % en La Era, y 0.95 % en Palmira; estos valores nos demuestran que en las microcuencas durante este período la actividad agrícola y ganadera han sido las principales actividades económicas que se desarrollan más y las que han ocasionado los principales cambios en las coberturas, lo que ha ocasionado la pérdida de bosques, incrementando la fragmentación y deterioro del paisaje.
- El módulo de Land Change Modeler de Idrisi, posibilita el análisis de cambio para el año 2030 y 2060; a más de generar tablas de probabilidad de cambio, produce mapas que favorecen la interpretación de donde se realizan esos cambios, resultando una interpretación más fácil.
- El módulo de Land Change Modeler, permite incorporar restricciones para la simulación de cambio de la cobertura obteniendo escenarios futuros confiables que ayudan a evidenciar el efecto que pueden provocar las modificaciones en los usos de suelo.

- Las variables utilizadas para la predicción, evaluación y validación del modelo fueron validas, puesto que contribuyeron significativamente a la explicación de la distribución especial de las categorías en estudio, además el proceso de calibración del modelo mostró un ajuste por encima del 50 %.
- Los modelos fueron satisfactorios puesto que el índice de Kappa y ROC con valores superiores al 70 %, lo que permitió evaluar con facilidad las tasas de deforestación y el tipo de cubierta en cada una de las microcuencas.
- El estudio realizado es relevante debido a que nos permite realizar procesos de planificación del territorio, entendiendo la evolución de las problemáticas y buscando a través de procesos planificados la solución de las mismas, además las cuencas hidrográficas que se encuentran rodeadas de plantas y árboles se mantienen en buen estado, y, con ello se puede garantizar un aumento de la infiltración y la evaporación, reducción de la escorrentía, erosión y sedimentación.

9. Recomendaciones

Para finalizar esta investigación se recomienda:

- Para realizar un estudio de análisis multitemporal se requieren imágenes, ortofotos, fotografías aéreas e inclusive vectores geoespaciales de varias fechas con las cuales poder construir y discutir la temática del estudio requerido.
- Para obtener los cambios de usos de suelo con la herramienta Intersec en el ArcGis, se recomienda emplear códigos para las coberturas, con el fin de facilitar el cruce de mapas y obtener las transiciones de los usos de suelo en las diferentes fechas.
- Sería de gran importancia ampliar la información con un enfoque socioeconómico y establecer áreas estratégicas para la conservación de las microcuencas con el fin de desarrollar un potencial turístico y de bienestar ambiental.
- Obtener información actualizada de las variables que se utilizan para el modelo de predicción de cambios y de la infraestructura a desarrollarse a futuro ya que esto nos permitirá tener mejores resultados en estas zonas de estudio.
- Los procesos de modelación de cambio de uso del suelo deben ser calibrados de forma adecuada para disminuir la incertidumbre que se generan en los resultados de la predicción.
- El uso de ortofotos de alta resolución fundamenta una mayor precisión, lo cual garantiza una mejor interpretación de los escenarios de los usos del suelo, para actualizar la información disponible.
- El método utilizado fue útil y en otras investigaciones se podría utilizar otros métodos de simulación de cambios, para contar con una mayor disponibilidad de información con otros modelos de probabilidad de cambio.

10. Bibliografía

- Altamirano, F. (2017). Calibración de parámetros del hidrograma unitario sintético de servicio de conservación de suelos y elaboración del mapa de número de curva de la cuenca del río Virú. *Universidad Privada Antenor Orrego*.
<https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/3586>
- Álvarez Vallejo, A. (2018). Desierto y erial. *Cuadernos Fronterizos*, 44, Article 44.
<https://doi.org/10.20983/cuadfront.2018.44.3>
- Arias, P., Saz, M., & Escolano, S. (2024). Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador. *Investigaciones Geográficas*.
- Beard, R. (2008). *Introducción a Aplicaciones de Técnicas Espaciales para la Conservación de la Biodiversidad*. Universidad Tecnológica de Panamá.
- Bedoya, J. C., & Barrera, M. (2006). Convergencia de las cadenas de markov. *Scientia et Technica*, 3(32), Article 32.
<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6195>
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León-Yáñez, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., Cárdenas, A., & Velástegui, A. (2009). Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. *EcoCiencia*.
<https://biblio.flacsoandes.edu.ec/catalog/resGet.php?resId=43576>
- Bembibre, C. (2011). *Definición de Suelo Agrícola*. <https://significado.com/suelo-agricola/>
- Benavidez, C. (2018). *Modelamiento y simulación espacial de escenarios futuros de uso de suelo en Chile para el periodo 1992—2080*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Carretero Poblete, P. A., Quishpi, F., Quevedo, L., Puli, M., Herrera, N., García, Á., Giuseppina, M., Vanga Arvelo, M., Liliana, S., Muñoz, C., Manuel, J., Gil, C., José, M., Granizo, J., Rubén, M., Carrasco, C., Lucero, K., Ramírez, A., Javier, J., & Cabrera, V. (2020). *De lo rural a lo urbano en Ecuador*. Centro de Estudios Sociales de América Latina.

- Chu, H.-J., Lin, Y.-P., Huang, C.-W., Hsu, C.-Y., & Chen, H.-Y. (2010). Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model. *Hydrological Processes*, 24(18), 2538-2554. <https://doi.org/10.1002/hyp.7667>
- Chuncho, C. (2019). *Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión*. 9, 71-83.
- Cisneros, F., Galarza, L., & Sáenz, M. (2008). *Agua y Energía: Actualidad y futuro*. 1, 40.
- Condori, I., Loza, M., Mamani, F., & Soliz, 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*. 20.
- Cotler, H. (2004). *El manejo integral de cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Instituto Nacional de Ecología.
- Cuenca, A. (2015). *Análisis de la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Catamayo, hasta la estación en PTE. Vicin, con fines de aprovechamiento y conservación*. Universidad Nacional de Loja.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: Teoría y práctica*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6407/1/S028593_es.pdf
- Eastman, J. R. (2006). *IDRISI Andes: Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs. https://gis.fns.uniba.sk/vyuka/DTM_ako_sucast_GIS/Kriging/1/Andes_Manual.pdf
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Clark Labs. <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf>
- Esri. (1999). *ArcGIS Image Analyst for ArcGIS Pro*. <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-image/options/arcgis-image-analyst>
- GAD. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Quinara*. 161.

- Gallardo, M. (2018). Revisión y análisis de estudios de modelos de cambios de usos del suelo y de escenarios a futuro. *Geographicalia*, 1-26.
https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2018703278
- Gámez, W. (2009). *Texto Básico de Hidrología* (Primera). Universidad Nacional Agraria.
- González Fuertes, M. J. (2014). *Análisis de los coeficientes de escorrentía y su relación con el cambio de cobertura vegetal de la cuenca superior del río Catamayo* [bachelorThesis, Loja: Universidad Nacional de Loja].
<https://dspace.unl.edu.ec//handle/123456789/11972>
- Gutiérrez, M. (2022). *Sistema de Información Geográfico QGIS*. UNA Managua.
<https://cenida.una.edu.ni/textos/NU40G984.pdf>
- Gutiérrez, R., Macias, H., Muñoz, J., Sánchez, I., & Velásquez, M. (2014). *Impacto hidrológico del cambio de uso del suelo de una pastizal nativo a praderas de Zacate Buffel (Pennisetum ciliare L.)*. XIII(2).
<https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545055002.pdf>
- Jaya-Santillán, J. (2023). Altos niveles de erosión hídrica en una microcuenca tropical calculado mediante el modelo USLE. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 15(1), 26-39. <https://doi.org/10.29166/revfig.v15i1.4269>
- Karg, D., Jesús Muñoz, Gil, González, S., & Casal, J. (2003). *OSSIM Gestión de información de seguridad de código abierto Descripción General del Sistema*.
https://www.academia.edu/7289777/OSSIM_Open_Source_Security_Information_Management
- Lambin, E., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dinámica del cambio de uso y cobertura del suelo en las regiones tropicales. *Revisión Anual de Medio Ambiente y Recursos*, 28(1), 205-241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>

- Lambin, E., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., ... Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change, 11*(4), 261-269.
[https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
- Landgrebe, D., & Biehl, L. (2018). *MultiSpec*. Purdue Research Foundation.
<https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>
- Lara, A., Urrutia, R., Little, C., & Martínez, A. (2010). Servicios ecosistémicos y ley de bosque nativo: No basta con definirlos. *Bosque Nativo, 47*, 3-9.
- Llambi, L., Soto, A., Célleri, R., Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos*.
- Llerena, C., Melgar, R., & Llerena, L. M. (2007). Plantaciones forestales, agua y gestión de cuencas. *Debate Agrario-Analisis Y Alternativas*.
- Llopis, J. P. (2010). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Editorial Club Universitario.
- Manuel, J., & Luis, J. (2006). *La estereo-ortofoto digital en la elaboración de mapas temáticos*. 47.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2020). *Sistema de Información Pública Agropecuaria*. <https://www.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2012). *Sistema de clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEYENDA-ECOSISTEMAS_ECUADOR_2.pdf
- Montaño, D. (2021, marzo 18). *Nuevo estudio: En los últimos 26 años Ecuador ha perdido más de 2 millones de hectáreas de bosque*. Noticias ambientales.
<https://es.mongabay.com/2021/03/nuevo-estudio-en-los-ultimos-26-anos-ecuador-ha-perdido-mas-de-2-millones-de-hectareas-de-bosque/>

- Municipio de Loja. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*.
<https://www.loja.gob.ec/files/image/LOTAIP/podt2014.pdf>
- Muñoz, D., Rodríguez, M., & Romero, M. (2008). *Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo y coberturas, en la microcuenca Las Minas, Corregimiento de La Laguna, Municipio de Pasto, departamento de Nariño*. 10.
- Oñate Valdivieso, F., & Bosque, J. (2010). Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 395(3), 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.033>
- Ortega, D. J. P., Ortega, J. A. S., Moncayo, P. C. C., Vargas, I. A. D., & Pompêo, M. L. M. (2018). Uso del suelo y su influencia en la presión y degradación de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.22490/21456453.2089>
- Ovalles U., P. J. (2011). *Identificación de las causas de la deforestación y la degradación de los bosques en la República Dominicana: Informe final*.
<https://bvearmb.do/handle/123456789/1441>
- Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilcamagua, S., & Astudillo, S. (2015). *Utilización de autónomas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal*. 8(1).
- Painter, L., Siles, T., Reinaga, A., & Wallace, R. (2013). *Escenarios de Deforestación en el gran paisaje Madidi-Tambopata* (Consejo Indígena del Pueblo Tacana & Wildlife Conservation Society, Eds.). <https://doi.org/10.13140/2.1.2197.4086>
- Peña, F., Escalona, M., Pincheira, J., & Rebolledo, G. (2011). *Cambio de uso del suelo en los geosistemas de la cuenca costera del río Boroa (Chile) entre 1994 y 2004*. 20.
- Peña-Villalta, E. (2018). *Análisis multitemporal para la detección de cambios de uso del suelo, en el cantón Catamayo, provincia de Loja*. [bachelorThesis, Loja].
<https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/20290>

- Pineda, O. (2011). *Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el Municipio de Valle de Santiago*. CentroGeo.
- Pinos, N. (2015). *Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial*. Universidad de Cuenca.
- Prefectura de Loja. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Loja 2015—2025*. <https://prefecturaloja.gob.ec/documentos/lotaip/2019/PDOT-2019.pdf>
- Puyravaud, J.-P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1), 593-596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)
- Ramírez, A. (2015). *Análisis multitemporal mediante sensores remotos de cobertura de la tierra para el periodo de tiempo 1999—2011 en el municipio de San Jacinto, Bolívar*. <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/6318>
- Ramos, L., Moreno, F., Roldán, J., & Cienfuegos, I. (2010). *Influencia de la vegetación en el balance hídrico superficial de la cuenca hidrológica del «El Cabril»*. <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2011/pdf/p498.pdf>
- Rebollo, R., & Sal, A. G. (2003). Aprovechamiento sostenible de los pastizales: *Ecosistemas*, 12(3), Article 3. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/231>
- Ruiz, V., Savé, R., & Herrera Herrera, A. (2014). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Mirafior Moropotente Nicaragua, 1993 – 2011. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 11, 57-68. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i11.1605>
- Sacristán, F. (2006). La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Universidad Complutense de Madrid*, 24, 29.
- Santos, J. M. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Editorial UNED.

- Sarmiento López, A. H., Etter Rothlisberger, A. A., González Arenas, J. J., & Orrego Suaza, S. A. (2011). *Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia*. <http://repositorio.corpouraba.gov.co:8082/xmlui/handle/123456789/225>
- Siguencia, H. E. (2022). *Análisis multitemporal de la cobertura boscosa y páramos aplicando la metodología teledetección espacial y sig en la microcuenca del río Atapo Pomachaca provincia de Chimborazo*.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16100>
- Socio Bosque. (2012). *Estimación de la Tasa de Deforestación del Ecuador continental*.
<https://silos.tips/download/estimacion-de-la-tasa-de-deforestacion-del-ecuador-continental#>
- Soria, M. (2014). *Metodología para ejecución y control de calidad para ortofotos, mediante combinación de sensor digital con LIDAR en zonas rurales* [PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.30860>
- Sutton, T. (2002). *Guía de usuario de QGIS*. SourceForge.
https://docs.qgis.org/2.18/es/docs/user_manual/preamble/foreword.html
- Torres, B., Günter, S., Jadán, O., Kieckbusch, M., & Ehrmantraut, L. (2013). *Variación en el almacenamiento de carbono, conservación de la biodiversidad y productividad en dos sistemas productivos, comparados con bosques primarios en la Amazonía ecuatoriana*.
- Veldkamp, A., & Lambin, E. F. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1), 1-6. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2)

11. Anexos

Anexo 1.

Área deforestada en las microcuencas que integran la Cuenca Superior del Río Catamayo.

MICROCUCENCA	AREA DEFORESTADA (ha)	%
Quinara	77.12	17.30
Vilcabamba	23.65	5.30
Campana-Malacatos	38.24	8.58
La Era	287.79	64.55
La Palmira	19.03	4.27
Total	445.83	

Anexo 2.

Tablas de las unidades de cobertura de cada microcuenca periodo 2010-2022.

Tabla 16.

Unidades de cobertura de la microcuenca del río Mazanamaca (años 2010-2022).

Cobertura	2010		2022	
	AREA (km ²)	%	AREA (km ²)	%
Bosque Nativo	23.95	55.62	23.60	54.79
Cuerpo de Agua Natural	0.012	0.03	0.012	0.03
Erial	0.75	1.75	0.039	0.09
Páramo	4.41	10.26	5.01	11.64
Pastizal	1.02	2.38	1.07	2.50
Plantación Forestal	0.12	0.29	0.117	0.27
Tierra Agropecuaria	0.075	0.17	0.077	0.18
Vegetación Arbustiva y Herbácea	12.70	29.50	13.13	30.50
TOTAL	43.07	100	43.07	100

Tabla 17.

Unidades de cobertura de la microcuenca del río Capamaco (años 2010-2022).

Cobertura	2010		2022	
	AREA (km ²)	%	AREA (km ²)	%
Bosque Nativo	12.67	47.91	12.56	47.46
Cuerpo de Agua Natural	0.024	0.09	0.024	0.09
Erial	0.060	0.23	0.0512	0.19
Páramo	2.86	10.82	2.87	10.87
Pastizal	1.68	6.37	1.74	6.61
Plantación Forestal	0.40	1.53	0.37	1.40
Tierra Agropecuaria	0.27	1.03	0.28	1.06

Vegetación Arbustiva y Herbácea	8.47	32.03	8.55	32.31
TOTAL	26.46	100	26.46	100

Tabla 18.

Unidades de cobertura de la microcuenca del río Campana (años 2010-2022).

Cobertura	2010		2022	
	AREA (km²)	%	AREA (km²)	%
Bosque Nativo	21.47	61.87	21.45	61.88
Cuerpo de Agua Natural	0.13	0.39	0.13	0.40
Erial	0.53	1.55	0.008	0.03
Páramo	3.43	9.89	3.81	10.99
Pastizal	2.34	6.81	2.51	7.26
Plantación Forestal	0.030	0.09	0.029	0.09
Tierra Agropecuaria	0.112	0.37	0.13	0.38
Vegetación Arbustiva y Herbácea	6.60	19.03	6.58	18.99
TOTAL	34.67	100	34.67	100

Tabla 19.

Unidades de cobertura de la microcuenca del río San Agustín (años 2010-2022).

Cobertura	2010		2022	
	AREA (km²)	%	AREA (km²)	%
Bosque Nativo	11.29	38.56	9.44	32.23
Erial	0.0036	0.01	0.0002	0.00
Páramo	0.0003	0.00	0.0002	0.001
Pastizal	14.38	49.09	16.32	55.72
Plantación Forestal	0.10	0.36	0.10	0.36
Tierra Agropecuaria	1.74	5.97	1.69	5.79
Vegetación Arbustiva y Herbácea	1.76	6.01	1.72	5.9034
TOTAL	29.30	100	29.30	100

Tabla 20.

Unidades de cobertura de la microcuenca del río Aguacolla (años 2010-2022).

Cobertura	2010		2022	
	AREA (km²)	%	AREA (km²)	%
Bosque Nativo	20.03	28.11	20.03	28.10
Erial	0.01	0.02	0.012	0.02
Páramo	5.59	7.85	5.67	7.97

Pastizal	0.35	0.49	0.17	0.25
Plantación Forestal	0.034	0.05	0.28	0.40
Tierra Agropecuaria	2.38	3.35	3.067	4.30
Vegetación Arbustiva y Herbácea	42.85	60.13	42.02	58.96
TOTAL	71.27	100	71.27	100.00

Anexo 3.

Matriz de Tabulación cruzada para cada microcuenca.

Tabla 21.

Matriz de tabulación cruzada de los usos de suelo en el periodo 2010-2022 en el S.R. Quinara.

USO DEL SUELO	AÑO 2022									
	BN	CAN	ER	PAR	PAS	PF	TA	VAH	T1	
AÑO 2010	BN	2318.53	0.00	0.00	39.12	2.79	0.42	0.31	34.68	2395.85
	CAN	0.00	1.20	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	1.24
	ER	1.60	0.00	3.72	42.42	0.00	0.00	0.00	27.55	75.29
	PAR	23.69	0.06	0	407.35	0.00	0.00	0.00	10.65	441.75
	PAS	1.23	0.00	0.00	0.01	99.96	0.00	0.001	1.44	102.641
	PF	0.001	0.00	0.00	0.08	0.39	10.74	0.00	1.17	12.381
	TA	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.36	0.09	7.52
	VAH	14.96	0.00	0.19	12.47	4.45	0.55	0.10	1238.16	1270.88
T2	2360.081	1.26	3.91	501.49	107.59	11.71	7.771	1313.74		

Tabla 22.

Matriz de tabulación cruzada de los usos de suelo en el periodo 2010-2022 en el S.R. Vilcabamba.

USO DEL SUELO	AÑO 2022									
	BN	CAN	ER	PAR	PAS	PF	TA	VAH	T1	
AÑO 2010	BN	1244.21	0.00	0.01	8.97	0.46	0.00	3.18	11.01	1267.84
	CAN	0.00	2.34	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.008	2.388
	ER	0.00	0.00	2.40	0.00	3.63	0.00	0.00	0.00	6.03
	PAR	7.32	0.06	0.00	277.44	0.01	0.00	0.01	1.52	286.36
	PAS	0.15	0.00	2.70	0.00	161.27	0.09	0.03	4.24	168.48
	PF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	35.96	0.01	4.43	40.61
	TA	0.68	0.00	0.00	0.07	1.53	0.005	24.76	0.08	27.125
	VAH	3.77	0.01	0.00	1.04	7.80	1.09	0.13	833.74	847.58
T2	1256.13	2.41	5.11	287.56	174.91	37.145	28.12	855.028		

Tabla 23.

Matriz de tabulación cruzada de los usos de suelo en el periodo 2010-2022 en el S.R. Campana-Malacatos.

AÑO 2022

USO DEL SUELO	AÑO 2010									T1
	BN	CAN	ER	PAR	PAS	PF	TA	VAH	T2	
BN	2107.25	0.008	0.47	17.08	5.74	0.008	0.017	14.9	2145.473	
CAN	0.069	12.99	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.05	13.489	
ER	10.73	0.00	0.40	0.04	39.29	0.00	0.02	3.18	53.66	
PAR	10.35	0.70	0.00	325.02	0.009	0.00	0.00	6.99	343.069	
PAS	2.21	0.00	0.00	29.56	201.19	0.00	0.14	2.95	236.05	
PF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.93	0.00	0.06	2.99	
TA	0.01	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	12.60	0.066	12.816	
VAH	15.21	0.05	0.00	9.01	5.31	0.04	0.21	630.15	659.98	
T2	2145.829	13.748	0.87	381.09	251.679	2.978	12.987	658.346		

Tabla 24.

Matriz de tabulación cruzada de los usos de suelo en el periodo 2010-2022 en el S.R. La Era.

USO DEL SUELO	AÑO 2022									T1
	BN	CAN	ER	PAR	PAS	PF	TA	VAH	T2	
BN	840.28	0.00	0.01	0.0001	281.22	0.00	6.09	2.25	1129.8501	
CAN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	
ER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.35	
PAR	0.014	0.00	0.00	0.017	0.0002	0.00	0.00	0.0006	0.0318	
PAS	95.74	0.00	0.00	0.00	1336.1	0.30	1.60	4.75	1438.51	
PF	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	10.09	0.018	0.00	10.558	
TA	5.45	0.00	0.00	0.00	7.48	0.039	161.81	0.004	174.783	
VAH	2.90	0.00	0.00	0.00	7.13	0.00	0.007	165.96	175.997	
T2	944.384	0.00	0.01	0.0171	1632.75	10.429	169.525	172.9646		

Tabla 25.

Matriz de tabulación cruzada de los usos de suelo en el periodo 2010-2022 en el S.R. La Palmira.

USO DEL SUELO	AÑO 2022									T1
	BN	CAN	ER	PAR	PAS	PF	TA	VAH	T2	
BN	1959.11	0.00	0.00	10.39	1.35	0.00	1.44	5.85	1978.14	
CAN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	
ER	0.00	0.00	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26	
PAR	8.58	0.00	0.00	515.53	0.00	3.25	0.00	10.51	537.87	
PAS	5.22	0.00	0.00	0.00	11.33	0.00	128.86	4.95	150.36	
PF	0.00	0.00	0.00	1.08	0.00	24.00	0.00	0.00	25.08	
TA	0.99	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	4.16	5.21	
VAH	29.17	0.00	0.00	40.89	5.13	1.04	176.36	4177.12	4429.71	
T2	2003.07	0	1.26	567.95	17.81	28.29	306.66	4202.59		

Dónde: **BN:** Bosque Nativo; **CAN:** Cuerpo de Agua Natural; **ER:** Erial; **PAR:** Páramo; **PAS:** Pastizal; **PF:** Plantación Forestal; **TA:** Tierra Agropecuaria; **VAH:** Vegetación Arbustiva y Herbácea.

Anexo 4.

Tablas de las transiciones entre los usos del suelo en las microcuencas.

Tabla 26.

Transiciones entre usos del suelo en la microcuenca de río Mazanamaca, período 2010-2022.

N°	TRANSICIONES DE USOS DE SUELO
1	Bosque Nativo a Páramo
2	Bosque Nativo a Pastizal
3	Bosque Nativo a Plantación Forestal
4	Bosque Nativo a Tierra Agropecuaria
5	Bosque Nativo a Vegetación arbustiva y Herbácea
6	Cuerpo de Agua Natural a Páramo
7	Erial a Bosque Nativo
8	Erial a Páramo
9	Erial a Vegetación Arbustiva y Herbácea
10	Páramo a Bosque Nativo
11	Páramo a Cuerpo de agua Natural
12	Páramo a Pastizal
13	Páramo a Plantación Forestal
14	Páramo a Vegetación Arbustiva y Herbácea
15	Pastizal a Bosque Nativo
16	Pastizal a Páramo
17	Pastizal a Tierra Agropecuaria
18	Pastizal a Vegetación Arbustiva y Herbácea
19	Plantación Forestal a Bosque Nativo
20	Plantación Forestal a Páramo
21	Plantación Forestal a Pastizal
22	Plantación Forestal a Vegetación Arbustiva y Herbácea
23	Tierra Agropecuaria a Bosque Nativo
24	Tierra Agropecuaria a Pastizal
25	Tierra Agropecuaria a Vegetación Arbustiva y Herbácea
26	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Bosque Nativo
27	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Erial
28	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Páramo
29	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Pastizal
30	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Plantación Forestal
31	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Tierra Agropecuaria

Tabla 27.

Transiciones entre usos del suelo en la microcuenca de río Capamaco, período 2010-2022.

N°	TRANSICIONES DE USOS DE SUELO
1	Bosque Nativo a Erial

- 2 Bosque Nativo a Páramo
 - 3 Bosque Nativo a Pastizal
 - 4 Bosque Nativo a Tierra Agropecuaria
 - 5 Bosque Nativo a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 6 Cuerpo de Agua Natural a Páramo
 - 7 Cuerpo de Agua Natural a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 8 Erial a Pastizal
 - 9 Páramo a Bosque Nativo
 - 10 Páramo a Cuerpo de Agua Natural
 - 11 Páramo a Pastizal
 - 12 Páramo a Tierra Agropecuaria
 - 13 Páramo a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 14 Pastizal a Bosque Nativo
 - 15 Pastizal a Erial
 - 16 Pastizal a Plantación Forestal
 - 17 Pastizal a Tierra Agropecuaria
 - 18 Pastizal a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 19 Plantación Forestal a Pastizal
 - 20 Plantación Forestal a Tierra Agropecuaria
 - 21 Plantación Forestal a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 22 Tierra Agropecuaria a Bosque Nativo
 - 23 Tierra Agropecuaria a Páramo
 - 24 Tierra Agropecuaria a Pastizal
 - 25 Tierra Agropecuaria a Plantación Forestal
 - 26 Tierra Agropecuaria a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 27 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Bosque Nativo
 - 28 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Cuerpo de Agua Natural
 - 29 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Páramo
 - 30 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Pastizal
 - 31 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Plantación Forestal
 - 32 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Tierra Agropecuaria
-

Tabla 28.

Transiciones entre usos del suelo en la microcuenca de río Campana, período 2010-2022.

N°	TRANSICIONES DE USOS DE SUELO
1	Bosque Nativo a Cuerpo de Agua Natural
2	Bosque Nativo a Erial
3	Bosque Nativo a Páramo
4	Bosque Nativo a Pastizal
5	Bosque Nativo a Plantación Forestal
6	Bosque Nativo a Tierra Agropecuaria
7	Bosque Nativo a Vegetación Arbustiva y Herbácea
8	Cuerpo De Agua Natural a Bosque Nativo

- 9 Cuerpo de Agua Natural a Páramo
 - 10 Cuerpo De Agua Natural a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 11 Erial a Bosque Nativo
 - 12 Erial a Páramo
 - 13 Erial a Pastizal
 - 14 Erial a Tierra Agropecuaria
 - 15 Erial a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 16 Páramo a Bosque Nativo
 - 17 Páramo a Cuerpo de Agua Natural
 - 18 Páramo a Pastizal
 - 19 Páramo a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 20 Pastizal a Bosque Nativo
 - 21 Pastizal a Páramo
 - 22 Pastizal a Tierra Agropecuaria
 - 23 Pastizal a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 24 Plantación Forestal a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 25 Tierra Agropecuaria a Bosque Nativo
 - 26 Tierra Agropecuaria a Pastizal
 - 27 Tierra Agropecuaria a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 28 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Bosque Nativo
 - 29 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Cuerpo de Agua
 - 30 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Páramo
 - 31 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Pastizal
 - 32 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Plantación Forestal
 - 33 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Tierra Agropecuaria
-

Tabla 29.

Transiciones entre usos del suelo en la microcuenca de río San Agustín, período 2010-2022.

N°	TRANSICIONES DE USOS DE SUELO
1	Bosque Nativo a Erial
2	Bosque Nativo a Páramo
3	Bosque Nativo a Pastizal
4	Bosque Nativo a Tierra Agropecuaria
5	Bosque Nativo a Vegetación Arbustiva y Herbácea
6	Erial a Pastizal
7	Páramo a Bosque Nativo
8	Páramo a Pastizal
9	Páramo a Vegetación Arbustiva y Herbácea
10	Pastizal a Bosque Nativo
11	Pastizal a Plantación Forestal
12	Pastizal a Tierra Agropecuaria
13	Pastizal a Vegetación Arbustiva y Herbácea
14	Plantación Forestal a Pastizal

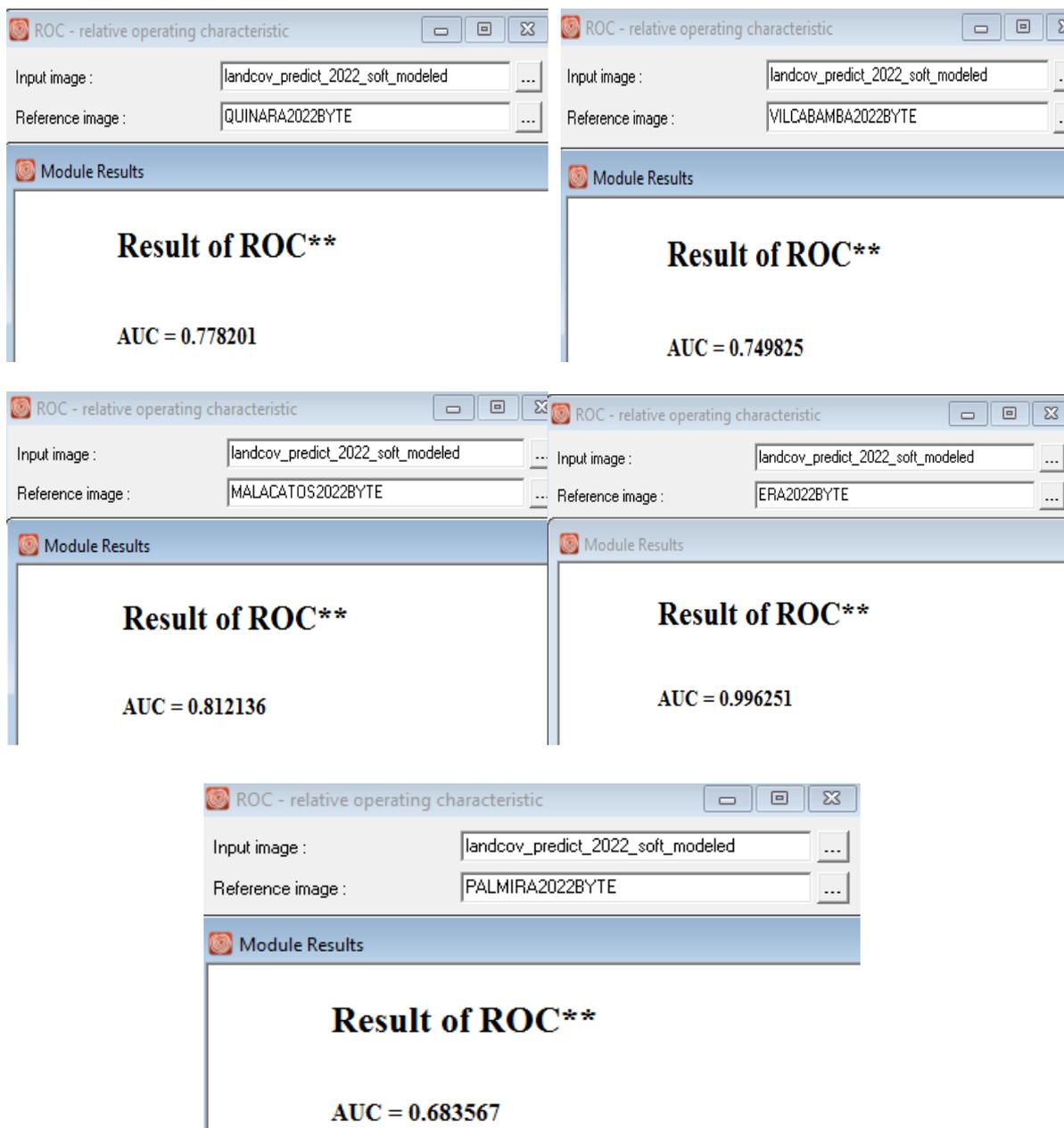
- 15 Plantación Forestal a Tierra Agropecuaria
 - 16 Tierra Agropecuaria a Bosque Nativo
 - 17 Tierra Agropecuaria a Pastizal
 - 18 Tierra Agropecuaria a Plantación Forestal
 - 19 Tierra Agropecuaria a Vegetación Arbustiva y Herbácea
 - 20 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Bosque Nativo
 - 21 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Pastizal
 - 22 Vegetación Arbustiva y Herbácea a Tierra Agropecuaria
-

Tabla 30.

Transiciones entre usos del suelo en la microcuenca de río Aguacolla, período 2010-2022.

N°	TRANSICIONES DE USO DE SUELO
1	Bosque Nativo a Páramo
2	Bosque Nativo a Pastizal
3	Bosque Nativo a Tierra Agropecuaria
4	Bosque Nativo a Vegetación Arbustiva y Herbácea
5	Páramo a Bosque Nativo
6	Páramo a Plantación Forestal
7	Páramo a Vegetación Arbustiva y Herbácea
8	Pastizal a Bosque Nativo
9	Pastizal a Tierra Agropecuaria
10	Pastizal a Vegetación Arbustiva y Herbácea
11	Plantación Forestal a Paramo
12	Tierra Agropecuaria a Bosque Nativo
13	Tierra Agropecuaria a Páramo
14	Tierra Agropecuaria a Vegetación Arbustiva y Herbácea
15	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Bosque Nativo
16	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Páramo
17	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Pastizal
18	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Plantación Forestal
19	Vegetación Arbustiva y Herbácea a Tierra Agropecuaria

Anexo 5.
Validación Roc de cada microcuencia.



Anexo 6.
Tabla de rangos de clasificación del cambio

Cambio	%
Muy alto	70 -100
Alto	40 - 70
Bajo	10 - 40
Muy bajo	< 10

Anexo 7.

Áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2022 – 2030 en cada microcuenca

Category	Hectares	Legend
0	6241.482000	QUINARA
1	18.959400	PAR to BN
2	10.772100	VAH to BN
3	27.155700	BN to PAR
4	2.201400	ER to PAR
5	9.073800	VAH to PAR
6	1.888200	BN to PAS
7	3.152700	VAH to PAS
8	23.837400	BN to VAH
9	1.390500	ER to VAH
10	8.476200	PAR to VAH
11	1.054800	PAS to VAH

Category	Hectares	Legend
0	5881.877100	MALACATOS
1	8.057700	PAR to BN
2	1.544400	PAS to BN
3	10.623600	VAH to BN
4	11.885400	BN to PAR
5	22.684500	PAS to PAR
6	6.220800	VAH to PAR
7	4.290300	BN to PAS
8	3.890700	VAH to PAS
9	10.332000	BN to VAH
10	5.455800	PAR to VAH
11	2.142900	PAS to VAH

Category	Hectares	Legend
0	4023.745200	VILCABAMBA
1	5.118300	PAR to BN
2	2.650500	VAH to BN
3	2.362500	PAS to ER
4	6.165000	BN to PAR
5	2.575800	ER to PAS
6	1.132200	TA to PAS
7	5.472900	VAH to PAS
8	2.260800	BN to TA
9	7.536600	BN to VAH
10	1.064700	PAR to VAH
11	3.080700	PAS to VAH
12	2.865600	PF to VAH

Category	Hectares	Legend
0	3871.335600	LA ERA
1	81.317700	PAS to BN
2	3.883500	TA to BN
3	2.041200	VAH to BN
4	175.926600	BN to PAS
5	4.951800	TA to PAS
6	4.860900	VAH to PAS
7	3.777300	BN to TA
8	1.143000	PAS to TA
9	1.227600	BN to VAH
10	3.755700	PAS to VAH

Category	Hectares	Legend
0	12151.818000	LA PALMIRA
1	1.756800	PAR to BN
2	7.566300	VAH to BN
3	6.610500	BN to PAR
4	3.783600	VAH to PAR
5	1.246500	PAR to PF
6	14.830200	PAS to TA
7	52.543800	VAH to TA
8	4.206600	BN to VAH
9	1.700100	PAR to VAH

Anexo 8.

Áreas de cambio de uso del suelo entre el año 2022 – 2060 en cada microcuencia

Category	Hectares	Legend	Category	Hectares	Legend
0	5918.629500	QUINARA	0	3895.042500	VILCABAMBA
1	72.477900	PAR to BN	1	20.934900	PAR to BN
2	3.778200	PAS to BN	2	1.962900	TA to BN
3	46.110600	VAH to BN	3	11.116800	VAH to BN
4	104.356800	BN to PAR	4	4.129200	PAS to ER
5	2.015100	ER to PAR	5	25.535700	BN to PAR
6	35.757900	VAH to PAR	6	3.100500	VAH to PAR
7	8.260200	BN to PAS	7	2.135700	BN to PAS
8	13.137300	VAH to PAS	8	4.522500	ER to PAS
9	1.179900	BN to PF	9	4.204800	TA to PAS
10	1.445400	VAH to PF	10	22.403700	VAH to PAS
11	99.832500	BN to VAH	11	2.907000	VAH to PF
12	1.539900	ER to VAH	12	8.541900	BN to TA
13	33.705900	PAR to VAH	13	31.788000	BN to VAH
14	4.359600	PAS to VAH	14	4.601700	PAR to VAH
15	2.857500	PF to VAH	15	12.478500	PAS to VAH
			16	10.624500	PF to VAH

Category	Hectares	Legend
0	5624.010900	MALACATOS
1	32.721300	PAR to BN
2	8.874000	PAS to BN
3	43.761600	VAH to BN
4	2.172600	PAR to CAN
5	50.861700	BN to PAR
6	76.863600	PAS to PAR
7	26.653500	VAH to PAR
8	15.616800	BN to PAS
9	13.205700	VAH to PAS
10	43.423200	BN to VAH
11	21.315600	PAR to VAH
12	9.524700	PAS to VAH

Category	Hectares	Legend
0	3321.065700	LA ERA
1	231.052500	PAS to BN
2	12.463200	TA to BN
3	7.386300	VAH to BN
4	500.012100	BN to PAS
5	1.195200	PF to PAS
6	22.299300	TA to PAS
7	20.376000	VAH to PAS
8	11.426400	BN to TA
9	6.204600	PAS to TA
10	6.043500	BN to VAH
11	14.696100	PAS to VAH

Category	Hectares	Legend
0	11887.421400	LA PALMIRA
1	7.535700	PAR to BN
2	32.367600	VAH to BN
3	27.644400	BN to PAR
4	15.973200	VAH to PAR
5	1.105200	TA to PAS
6	1.681200	VAH to PAS
7	5.439600	PAR to PF
8	17.181000	PAS to TA
9	224.889300	VAH to TA
10	17.628300	BN to VAH
11	7.195500	PAR to VAH

Anexo 9.
Fotografías de salidas de campo a las microcuencas.



Anexo 10.
Certificación de traducción Abstract



Loja, 7 de junio de 2024

Magister
JHIMI BOLTER VIVANCO LOAIZA
**CATEDRÁTICO DE LA CARRERA DE PEDAGOGÍA DE LOS
IDIOMAS NACIONALES Y EXTRANJEROS - UNL**

CERTIFICO:

Que el documento aquí expuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del resumen del Trabajo de Integración Curricular denominado: Análisis multitemporal de los cambios de uso de suelo, de las microcuencas productoras de agua, en los sistemas de riego públicos de la Cuenca Superior del Río Catamayo., de autoría de Kathy Daniela Agurto Mendoza, con cédula de ciudadanía número 1150084877, de la Carrera de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Loja.

Lo certifico y autorizo hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.



JHIMI BOLTER VIVANCO LOAIZA, M. Ed.
**CATEDRÁTICO DE LA CARRERA DE PEDAGOGÍA
DE LOS IDIOMAS NACIONALES Y EXTRANJEROS - UNL**

Educamos para Transformar

