

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental

TRABAJO DE TITULACIÓN

Título del proyecto

**TRANSICIONES EN LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DE SUELO EN LA
RESERVA DE PRODUCCIÓN FAUNÍSTICA CHIMBORAZO**

Autor:

Tapia Salazar Lizeth Paola
Ulloa Trujillo Ariel Emmanuel

Tutor:

PhD. Omaira Márquez

**Riobamba - Ecuador
Año 2020**

CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL.

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: “TRANSICIONES EN LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DE SUELO EN LA RESERVA DE PRODUCCIÓN FAUNÍSTICA CHIMBORAZO”, presentado por: Tapia Salazar Lizeth Paola y Ulloa Trujillo Ariel Emmanuel y dirigido por: PhD. Carmen Omaira Márquez.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación, se constató el cumplimiento de las observaciones realizadas y se remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

MsC. Marcel Paredes
Presidente del Tribunal



Firmado electrónicamente por:
**MARCO MARCEL
PAREDES HERRERA**

.....
Firma

PhD. Omaira Márquez
Tutor del Proyecto

.....
Firma

PhD. José Gregorio Prato Moreno
Miembro del Tribunal

.....
Firma

MsC. Patricio Santillán
Miembro del Tribunal

.....
Firma

DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA.

Por la presente, certifico que el actual trabajo de investigación previo a la obtención del título de INGENIERO AMBIENTAL, elaborado por los señores Tapia Salazar Lizeth Paola y Ulloa Trujillo Ariel Emmanuel con el tema: “TRANSICIONES EN LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DE SUELO EN LA RESERVA DE PRODUCCIÓN FAUNÍSTICA CHIMBORAZO”, el mismo que fue analizado y supervisado bajo mi asesoramiento permanente en calidad de Tutor y Guía, por lo que se encuentra apto para ser presentado y defendido.

Es todo lo que se puede informar en honor a la verdad.

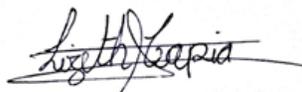


PhD. Carmen Omaira Márquez.

C.I:1757244114

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

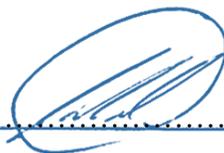
Yo, Lizeth Paola Tapia Salazar con cédula de identidad No. 060460035-3 y Ariel Emmanuel Ulloa Trujillo con cédula de identidad No. 020251731-4; hacemos referencia que como autores del presente trabajo de investigación, titulado: “TRANSICIONES EN LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DE SUELO EN LA RESERVA DE PRODUCCIÓN FAUNÍSTICA CHIMBORAZO”, somos responsables de las ideas, resultados y propuestas plasmadas en la presente investigación, existiendo el sustento de diversos autores que han sido referenciados debidamente.



.....

Lizeth Paola Tapia Salazar

C.I: 060460035-3



.....

Ariel Emmanuel Ulloa Trujillo

C.I: 020251731-4

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Nacional de Chimborazo por abrirme sus puertas y permitir formarme como profesional en la Carrera de ingeniería Ambiental.

A Dios por ayudarme a no desfallecer y lograr alcanzar un objetivo más en mi vida sobre todo al iniciarme como profesional.

A mis padres por su apoyo incalculable, por a pesar de las limitaciones seguir ayudándome a culminar mi carrera, por su paciencia, enseñanzas y más que todo por permitirme compartir este logro con ellos.

A mi hijo y abuelitos Julio y Carmen por ser el motivo y la razón de seguir adelante.

A la directora de tesis PhD. Omaira Márquez que nos permitió adquirir un poco de sus conocimientos al asesorarnos en este trabajo de investigación, por su ayuda, dedicación y esfuerzo, pero sobre todo el agradecimiento por ser guía y un apoyo durante todo el proceso.

Al grupo “Soil Organic Carbon Evaluation and Sequestration in Ecuadorian Paramo Ecosystem”, especialmente al ingeniero Jhonathan Orozco y Marco Rodriguez por las asesorías, acompañamiento al campo, consejos y animo dados desde el instante que se inició con la tesis.

Lizeth Paola Tapia Salazar

Primeramente, agradezco a Dios por las bendiciones que nos da cada nuevo día.

A mis padres por apoyarme en cada peldaño de mi vida por estar pendientes en cada momento por su sacrificio por verme surgir como persona y ahora profesional.

A mi esposa por estar junto a mí en cada momento y ser mi compañera tanto de aulas como de vida y por darme la mayor felicidad de tener un hijo precioso.

también, a toda mi familia por los consejos por estar pendientes de mi progreso, que me han servido para ser un hombre de bien, a quienes agradezco por todo su apoyo incondicional.

A mi abuelita que desde el principio de mi carrera estuvo pendiente de mí y sé que desde el cielo ella me sigue guiando y cuidando, todo sus consejos y esfuerzos se verán reflejados en este trabajo.

A nuestra tutora de tesis PhD. Omaira Márquez ya que sin su guía y asesoramiento no hubiera sido posible realizar esta investigación.

Ariel Emmanuel Ulloa Trujillo

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mis abuelitos Julio y Carmen por ser la razón que necesitaba para llegar a graduarme y haber estado presentes en cada etapa de mi vida.

A mis padres Juan y María, por no rendirse conmigo y apoyarme tanto afectiva como económicamente a lo largo de mi carrera universitaria, por ser un soporte y mi mayor tesoro, les dedico este trabajo por todo el esfuerzo puesto en mí por sus esperanzas y deseos de algún día decirme ingeniera.

A mi hijo Mateo por haber sido una razón más para trabajar día a día en esta investigación, para no rendirme.

Y a mi esposo por haber estado a mi lado y ayudarme en cada paso que doy.

Lizeth Paola Tapia Salazar

Este trabajo va dirigido a mis padres Luis y Rita, por nunca dar su brazo a torser por ver a su hijo cumplir sus metas en todo aspecto de mi vida, a mis tías Blanca Y Patricia, a quienes pusieron sus esperanzas y apoyo incondicional como un hijo propio de ellas, mi hijo Luciano Mateo que ha sido el motor más importante para cumplir con mis metas y mi esposa Lizeth Paola por estar pendiente en todas las circunstancias de nuestra vida por ser el apoyo incondicional para cumplir mis metas, a nuestra tutora Dra. Omaira por confiar y transmitir sus conocimientos en nuestro trabajo investigativo

Ariel Emmanuel Ulloa Trujillo

SIGLAS Y ABREVIATURAS

Ni	Nieve
Sd	Suelo desnudo
He	Herbazal de páramo
In	Intervención antrópica (pasto, cultivo y viviendas)
Ma	Matorral (arbustal y bosque nativo)
Pf	Plantación forestal
Hu	Humedal
INAMHI:	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.
COS:	Carbono orgánico del suelo.
SIG:	Sistemas de Información Geográfica.
OA:	Overall Accuracy (Precisión general).
PA:	Producer's Accuracy (Precisión del productor).
UA:	User's Accuracy (Precisión del usuario).
USGS:	Servicio Geológico de los Estados Unidos.
MVS:	Máxima verosimilitud.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL.	ii
DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA.	iii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vii
SIGLAS Y ABREVIATURAS	ix
ÍNDICE	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
JUSTIFICACIÓN	4
OBJETIVOS	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
1. Sistema de Información Geográfica (SIG)	6
2. Análisis Espacial	6
3. Teledetección	6
4. Fotointerpretación	6
5. Modelos para analizar los cambios de uso de la tierra	6
6. Tierra	7
7. Métodos de clasificación de imágenes satelitales	7
8. Clasificación supervisada	7
9. Validación de la clasificación	7
10. Matriz de confusión	7
11. Índice Kappa	8
12. Interacciones de cambio-error	9
13. Matriz de tabulación cruzada	9
14. Transiciones sistemáticas	10
15. Análisis de Intensidad.	11

a. Rapidez:	11
b. Naturaleza:	11
c.Trascendencia:	12
CAPÍTULO III	13
METODOLOGÍA	13
1. Delimitación del área de estudio	14
2. Tratamiento de imágenes satelitales	15
2.1. Error de bandeo	16
2.2. Corrección radiométrica y atmosférica	16
2.3. Eliminación de nubosidad	16
2.4. Mejora de la resolución y asignación de coordenadas geográficas	16
3. Clasificación supervisada	17
4. Validación de la clasificación	18
5. Confiabilidad de la clasificación	18
6. Interacción de cambio-error	19
7. Detección de cambios significativos	21
8. Transiciones sistemáticas.	21
9. Análisis de la dinámica de cambios	22
10. Cálculo del factor LS	23
11. Cálculo del factor C	24
CAPÍTULO IV	25
RESULTADOS	25
1. Validación de la clasificación	25
2. Estado actual del uso del suelo.	27
3. Dinámica de cambio de uso de suelo	30
4. Transiciones sistemáticas	32
4.1. Detección de cambios significativos	32
5. Análisis de Intensidad	37
5.1. Nivel de rapidez	37
5.2. Nivel de naturaleza	37
5.3. Nivel de trascendencia	40
6. Factor LS y C de la USLE	43
6.1. Factor LS	43
6.2. Factor C	44

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
Conclusiones	46
Recomendaciones	47
BIBLIOGRAFÍA	48
ANEXOS	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de confusión.	8
Tabla 2. Valoración del coeficiente Kappa	9
Tabla 3. Matriz de tabulación cruzada para dos intervalos diferentes de tiempo	10
Tabla 4. Características de las imágenes satelitales (1999-2009-2020)	15
Tabla 5. Rangos de clasificación del NDVI según Paula <i>et al.</i> (2018)	17
Tabla 6. Índices para la validación de la clasificación.	19
Tabla 7. Ecuaciones para el análisis de intensidad a nivel de rapidez	22
Tabla 8. Ecuaciones para el análisis de intensidad a nivel de naturaleza	22
Tabla 9. Ecuaciones para el análisis de intensidad a nivel de trascendencia en términos de ganancia.	23
Tabla 10. Ecuaciones para el análisis de intensidad a nivel de trascendencia en términos de pérdida.	23
Tabla 11. Matriz de confusión 1999.	26
Tabla 12. Matriz de confusión 2009.	26
Tabla 13. Matriz de confusión 2020.	27
Tabla 14. Uso y cobertura de suelo de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo	28
Tabla 15. Matriz de tabulación cruzada en términos porcentuales del área de estudio en el primer período de tiempo (1999-2009).	29
Tabla 16. Matriz de tabulación cruzada en términos porcentuales del área de estudio en el segundo período de tiempo (2009-2020).	29
Tabla 17. Magnitud relativa de los cambios en la superficie de cada una de las categorías en el período 1999-2009.	31
Tabla 18. Magnitud relativa de los cambios en la superficie de cada una de las categorías en el período 2009-2020.	32
Tabla 19. Transiciones sistemáticas "Ganancias".	33
Tabla 20. Transiciones sistemáticas "Pérdidas".	35
Tabla 21. Naturaleza de cambio en el primer período de tiempo (1999-2009).	38
Tabla 22. Naturaleza de cambio en el segundo período de tiempo (2009-2020).	39

Tabla 23. Valores del factor C de acuerdo con las prácticas de uso de suelo de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo	44
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de las dos primeras fases para el desarrollo del proyecto de investigación	13
Figura 2. Metodología de las dos últimas fases para el desarrollo del proyecto de investigación	14
Figura 3. Delimitación del área de estudio	15
Figura 4. Mapas de uso y cobertura de suelo de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo	28
Figura 5. Diagrama de Sankey para el cambio de uso de suelo en los períodos 1999-2009-2020	30
Figura 6. Pérdidas y ganancias en el período 1999-2009	31
Figura 7. Pérdidas y ganancias en el período 1999-2009	32
Figura 8. Transiciones sistemáticas en términos de ganancia en el período 1999-2009	34
Figura 9. Transiciones sistemáticas en términos de pérdidas en el período 1999-2009	34
Figura 10. Transiciones sistemáticas en términos de pérdidas en el período 2009-2020	36
Figura 11. Transiciones sistemáticas en términos de ganancia en el período 2009-2020	36
Figura 12. Intensidad de cambio a nivel de rapidez	37
Figura 13. Análisis de intensidad para ganancias y pérdidas a nivel de categoría, primer período (1999-2009)	38
Figura 14. Análisis de intensidad para ganancias y pérdidas a nivel de categoría, segundo período (2009-2020)	39
Figura 15. Trascendencia en términos de ganancia para la categoría herbazal	40
Figura 16. Trascendencia en términos de ganancia para la categoría intervención	41
Figura 17. Trascendencia en términos de pérdida para la categoría herbazal	42
Figura 18. Trascendencia en términos de pérdida para la categoría herbazal	43
Figura 19. Valores del Factor LS	44
Figura 20. Factor C calculado para cada práctica de uso de suelo en los tres años de estudio 1999-2009-2020	45

RESUMEN

El objetivo del estudio fue cuantificar las transiciones en los cambios de uso y cobertura de suelo en la Reserva de Producción Faunística Chimborazo, Ecuador. Se utilizaron datos de 1999, 2009 y 2020, a través de análisis multitemporales que involucraron imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8. La investigación se realizó en tres fases: la primera consistió en el tratamiento o corrección de las imágenes satelitales de los tres años para conseguir información a través de la clasificación supervisada de los cambios de uso de suelo durante este período, distinguiéndose 7 categorías: Nieve (Ni), Suelo desnudo (Sd), Herbazal de páramo (He), Intervención (In), Matorral (Ma), Plantación forestal (Pf), Humedal (Hu). La validación de datos se hizo en el campo para el último año y para los otros dos se validó con el testimonio de guardaparques de la Reserva, además de ello se empleó el índice Kappa, con índices de concordancia aceptables, superiores a 0.80. La segunda fase consistió en el análisis de las transiciones sistemáticas evaluando tanto las pérdidas, como las ganancias para cada categoría. El resultado del análisis de rapidez de intensidad para el primer intervalo de tiempo reporta un cambio acelerado con un área de cambio del 29.54 %, mientras que para el segundo intervalo de tiempo el cambio es lento con un área de cambio de 28.42 %. El matorral y la intervención son los más susceptibles a cambios, debido a que muestran pérdidas y ganancias durante los dos períodos.

ABSTRACT

The study's objective was to quantify the transitions in land-use changes and cover in the "*Reserva de Producción Faunística Chimborazo*," Ecuador. Data from 1999, 2009, and 2020 were used through multi-temporal analyses involving Landsat 7 y Landsat 8 satellite images. The research was carried out in three phases: the first consisted in the treatment or correction of the satellite images of the three years to obtain information through the supervised classification of changes in land use during this period, distinguishing seven categories: Snow, Bare soil, Moorland Herbaceous, Intervention, Scrub, Forest plantation, Wetland. Data validation was done in the field for the last year, and the other two it was validated with the testimony of park rangers of the Reserve. In addition to this, the Kappa index was used, with acceptable concordance rates higher than 0.80. The second phase consisted of analyzing the systematic transitions evaluating both the losses and the gains for each category. The intensity speed analysis reports an accelerated change with an area of change of 29.54% for the first interval of time, while for the second interval of time, the change is slow with an area of change of 28.42 %. The scrub and the intervention are the most susceptible to changes since they show profit and loss transitions during the two periods.

Keywords: multi-temporal analysis, intensity, Kappa rate, transitions



Reviewed by: Romero, Hugo

Language Skills Teacher

INTRODUCCIÓN

El uso y cobertura del suelo constituyen parámetros con facilidad de modificación frente a las actividades antrópicas desarrolladas a su alrededor (Moreno, 2017) especialmente si hablamos de los bofedales y páramos. La mayor variación ocurre en los litorales y zonas frágiles de alta diversidad, por lo que se convierten en áreas de gran interés en la caracterización, valoración de cambios y modificaciones paisajísticas (Aguilera & Botequilha, 2012).

En el Ecuador el uso de ecosistemas de alta montaña en el territorio andino ha determinado cambios en el paisaje, ocasionados por la quema de vegetación natural, expansión de la frontera agrícola, sobrepastoreo. Derivándose en pérdidas de biodiversidad, degradación del suelo y deterioro de las funciones ecosistémicas del recurso (Ordóñez, 2011).

Dentro de los ecosistemas frágiles andinos encontramos la Reserva de Producción Faunística Chimborazo, con una superficie aproximada de 53 078 ha, dicha reserva se encuentra ubicada en las provincias de Bolívar, Chimborazo y Tungurahua, en poder de 38 organizaciones campesinas; destacando entre sus principales servicios, la regulación hídrica, provisión de agua, almacenamiento de carbono, servicios que se originan en los bofedales (Andrade, 2016).

Por lo que el presente trabajo de investigación se centró en investigar las transiciones del uso y los cambios de cobertura de suelo en la Reserva de Producción Faunística Chimborazo, ocurrida en los años 1999-2009-2020, con la finalidad de observar lo ocurrido en el suelo pese a ser una zona protegida en la que se limita su intervención. Recurriendo a visitas en campo para el último año y al uso de sistemas de información geográfica (SIG) que permitieron evidenciar lo ocurrido, acudiendo en primera instancia a la obtención de imágenes satelitales a través de la plataforma USGS en donde se descargaron imágenes Landsat TM+ y OLI para proceder a la aplicación del método de determinación de pérdidas, ganancias y persistencias (Aldwaik & Pontius, 2012). Subsiguientemente se ejecutó el estudio de transiciones sistemáticas (Aldwaik & Pontius, 2012) y como último método para conocer el nivel de intensidad se identificaron procesos dinámicos acelerados, activos y dirigidos en el recurso (Aldwaik & Pontius, 2012).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las últimas décadas la actividad humana se ha convertido en el principal factor de transformación de los ecosistemas, esto debido al incremento de la población y la acelerada pérdida de cubierta forestal que termina con la reserva genética de ecosistemas autóctonos, ocasionando el quebranto de los diferentes bienes y servicios ambientales que estos proporcionan (Velázquez *et al.*, 2002).

En el Ecuador, el incremento de zonas pobladas y la concentración agrícola en el valle interandino y zonas bajas, influye en la regulación hídrica que realizan los páramos (Crespo *et al.*, 2014).

La Reserva de Producción Faunística Chimborazo, al ser una zona frágil ha sido motivo de estudio por los servicios que brindan sus bofedales (Andrade, 2016), sin embargo en la literatura no se han encontrado estudios a nivel de transiciones sistemáticas o análisis de intensidad y dinámica en la cobertura y uso del suelo de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo. Uno de los pocos estudios encontrados es el de Paula *et al.* (2018) que realizó un estudio multitemporal en los períodos 1962-1966; 2000; 2010-2011 de los cambios de vegetación.

La Reserva de Producción Faunística Chimborazo, se crea con Acuerdo Ministerial No. 437 del 26 de octubre de 1987 publicado en el Registro Oficial No. 806 del 9 de noviembre del mismo año. Se localiza en las provincias de Chimborazo, Bolívar y Tungurahua, con una extensión de 53 078 hectáreas. Su altura varía desde los 3 800 a 6 310 metros sobre el nivel del mar, que corresponde a la altura de la cumbre del nevado Chimborazo; presenta un clima frío andino con temperaturas desde los 0 a 10 °C (MAE, n.d.)

La necesidad de este estudio radica en la importancia que tiene la Reserva de Producción Faunística Chimborazo dentro de los ecosistemas naturales, tomando en cuenta, que es una zona rica en cuanto a calidad de suelo se refiere, esto al poseer una alta fertilidad lo que la hace susceptible a modificaciones por la expansión de su frontera agrícola y ganadera. Además de poseer dentro de sus ecosistemas el páramo y humedales lo que la hace una fuente hídrica que se vuelve vulnerable por la actividad antrópica desarrollada a su alrededor, en especial en este caso en donde el ecosistema humedal y la actividad antrópica subyacen una

junto a la otra, es por ello que un estudio de transiciones e intensidades de cambios de uso y cobertura de suelo se hace necesario para asegurar el correcto aprovechamiento de sus recursos. Convirtiéndose la presente investigación en un antecedente para futuras investigaciones.

JUSTIFICACIÓN

La Reserva de Producción Faunística Chimborazo, posee gran interés científico debido a que entre sus objetivos está el de mantener los recursos de los ecosistemas de páramo encontrados en la reserva, además de garantizar la protección de los mismos, y es por ello que surge la iniciativa de evaluar el uso y cobertura de su suelo, con el propósito de conocer la dinámica de las transiciones, su magnitud y los factores que caracterizan esas transiciones. El conocimiento que se obtuvo de este estudio debe servir de para establecer planes de manejo para la conservación de los ecosistemas de páramo y en especial el de la Reserva.

Además de que a través del uso de los Sistemas de Información Geográfica se logró una mejor comprensión de la dinámica de uso y cobertura de suelo en el sector, lo que ayudaría a tener una mejor postura para la toma de decisiones dentro del manejo de la Tierra en los Sistemas de Alta Montaña ecuatorianos y especialmente en los páramos.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Estudiar las transiciones en los cambios de uso y cobertura de suelo en la Reserva de Producción Faunística Chimborazo.

Objetivos Específicos

- Identificar y delimitar en unidades geográficas los usos y coberturas de suelo mediante clasificación supervisada de las imágenes Landsat de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo.
- Cuantificar los cambios que han ocurrido en el uso del suelo para identificar sus transiciones sistemáticas.
- Analizar la intensidad de las transiciones de uso y cobertura de suelo en los intervalos de tiempo 1999, 2009, 2020, en términos de rapidez de ocurrencia, que resultan de procesos activos y aquellas que resultan de procesos dirigidos.
- Calcular el factor C y LS de la USLE usando Sistemas de Información geográfica (SIG) en la Reserva de Producción Faunística Chimborazo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Un SIG se puede considerar como un “mapa de orden superior”, en el que se realizan acciones de forma potente y avanzada de lo que se hacían en tiempos anteriores a su aparición, marcando una diferencia en la elaboración de mapas. Sin embargo debe tomarse en cuenta que esta herramienta no solo contiene datos y representaciones sino también posee operaciones a realizarse sobre el mapa (Olaya, 2014).

2. Análisis Espacial

Estudio de características cuantificables de los fenómenos manifestados en el espacio en base, a la posición, superficie, distancia e interacción con el propio espacio (Buzai & Baxendale, 2010).

3. Teledetección

Es la técnica de obtención de información a distancia, sin necesidad de contacto con el objeto, pero con interacción de los objetos observados, que se encuentren sobre el medio terrestre, marino o en la atmósfera (Cede *et al.*, 2011).

4. Fotointerpretación

Es una técnica que permite identificar los objetos que posee una fotografía aérea, definiendo su categoría, naturaleza, límites y relaciones con el medio. Si se hace referencia a la interpretación de la vegetación dependerá mucho de la fisionomía y de las características vegetativas de la zona (Olaya, 2014).

5. Modelos para analizar los cambios de uso de la tierra

Son una forma de estudio de imágenes satelitales, apreciando el aumento o disminución de la superficie cultivada en el tiempo, basado en directrices de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de biodiversidad del sector (Senisterra & Gaspari, 2014).

6. Tierra

La ONU define la tierra como “un área delineable de la superficie terrestre del planeta tierra, que comprende todos los atributos de la biósfera inmediatamente sobre o debajo de esta superficie incluyendo aquellos del clima cercano a la superficie, las formas del suelo y terreno, la hidrología superficial (incluyendo lagos someros, ríos, ciénagas y pantanos), las capas sedimentarias cercanas a la superficie y las reservas de agua subterránea asociadas, la población de plantas y animales, el diseño de asentamientos humanos y los resultados físicos de actividad humana pasada y presente” (FAO, n.d.).

7. Métodos de clasificación de imágenes satelitales

La clasificación de imágenes satelitales consiste en elaborar mapas temáticos en donde las coberturas de suelo pueden llegar a agruparse de acuerdo con su uso de suelo. Catalogándose los distintos terrenos a través de colores y cubriendo grandes extensiones de terreno de manera rápida y efectiva (Rodríguez, 2011).

8. Clasificación supervisada

Esta técnica parte de un conocimiento previo de la zona de estudio, en donde se utilizan sitios de entrenamiento que han sido muestreados en campo (Rodríguez, 2011).

9. Validación de la clasificación

Compara los resultados de la clasificación supervisada con información geográfica realista basada en la estimación de los errores a partir del cálculo de matrices de confusión e indicadores que se derivan de esta (Martín *et al.*, 2012).

10. Matriz de confusión

Sirve para ver la fiabilidad global del método de clasificación para cada una de las clases, así como también los principales conflictos entre ellas, se fundamenta en la comparación de un conjunto de individuos en una tabla de control o aprendizaje (ver tabla 1), donde se ordena la predicción dada versus la clase a la que estos realmente pertenecen (Castañeda, 2016).

Tabla 1. Matriz de confusión.

		CLASES EN CAMPO			Precisión del usuario (UA)	Error de comisión
		Categoría 1	Categoría 2	Total		
CLASES MAPA	Categoría 1	P_{11}	P_{21}	P_{1+}	$\frac{P_{11}}{P_{+1}}$	$1 - \left(\frac{P_{11}}{P_{1+}}\right)$
	Categoría 2	P_{21}	P_{22}	P_{2+}	$\frac{P_{11}}{P_{+2}}$	$1 - \left(\frac{P_{11}}{P_{2+}}\right)$
	Total "Campo"	P_{+1}	P_{+2}			
	Precisión del productor (PA)	$\frac{P_{11}}{P_{+1}}$	$\frac{P_{22}}{P_{+2}}$			
	Error de omisión	$1 + \left(\frac{P_{11}}{P_{+1}}\right)$	$1 - \left(\frac{P_{22}}{P_{+2}}\right)$			

Fuente: (Pontius *et al.*, 2004)

11. Índice Kappa

El coeficiente kappa hace referencia a las concordancias inter-observador y se calcula en tablas de cualquier dimensión siempre que se contraste dos observadores, pudiendo tomar valores entre -1 y +1, mientras más cercano sea su valor a +1, mayor es el grado de concordancia, por el contrario, mientras más cercano a -1, mayor es el grado de discordancia inter-observador. Un valor de $k = 0$ refleja que la concordancia observada es precisamente la que se espera a causa del azar. Siendo los valores que se encuentran en la escala de 0.81 a 1 los que poseen una concordancia casi perfecta (Cerde & Villarroel, 2008).

Un requerimiento para calcular el coeficiente kappa es definir para cada celda de la diagonal principal el número teórico de observaciones atribuibles al azar. Este procedimiento se repite para todas las celdas concordantes. Posteriormente, se suman estos valores teóricos, siendo su resultado equivalente al total de concordancias atribuibles al azar (Cerde & Villarroel, 2008).

El coeficiente kappa se basa en un cociente, que incluye en el numerador la diferencia entre la sumatoria de las concordancias observadas y las concordancias atribuibles al azar, mientras en el denominador encontramos la diferencia entre el total de observaciones y la sumatoria de las concordancias atribuibles al azar, esto se observa en la ecuación 1 (Cerde & Villarroel, 2008).

$$K = \frac{[(\Sigma \text{ concordancias observadas}) - (\Sigma \text{ concordancias atribuibles al azar})]}{[(\text{Total de observaciones}) - (\Sigma \text{ concordancias atribuibles al azar})]} \quad (1)$$

En la Tabla 2 se observa la escala utilizada para expresar la fuerza de concordancia propuesto por Landis y Koch (1977) y ampliamente usado en diferentes investigaciones como Rodríguez, (2011), Quillupangui, (2019) y Casco *et al.*, (2016) esta escala sugiere una interpretación de la concordancia para comprender resultados paradójicos resultado de la clasificación realizada y utilizada en nuestra investigación definiéndose en nuestro estudio una fuerza de concordancia casi perfecta de las clasificaciones individuales realizadas.

Tabla 2. Valoración del coeficiente Kappa

Coefficiente kappa	Fuerza de concordancia
<0,00	Pobre
0.00 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1.00	Casi perfecta

Fuente(Casco *et al.*, 2016).(Landis & Koch, 1977)

12. Interacciones de cambio-error

Los errores obtenidos de cada clasificación al momento de sobreponerse unos sobre otros se vuelven multiplicativos, llegando a reportar en áreas de cambio real, etiquetas erróneas de cambios que no coinciden con el paisaje real (Fuller, Smith & Devereux, 2003).

13. Matriz de tabulación cruzada

Tiene como propósito indicar el cambio de cobertura de suelo aplicando la superposición de mapas raster en dos diferentes intervalos de tiempo, obteniendo la dinámica de cambio en términos de ganancia, pérdida y persistencia de suelo (Gallardo & Martínez, 2014). El cambio neto se define como la diferencia en valor absoluto de las pérdidas y ganancias de cada categoría, mientras el cambio total resulta de la suma de las ganancias y pérdidas. Por otro lado el intercambio representa el doble del valor mínimo de las ganancias o pérdidas, dicho de otra manera el cambio es igual a la diferencia del cambio total y el cambio neto (ver tabla 3) (Aldwaik & Pontius, 2012).

Tabla 3. Matriz de tabulación cruzada para dos intervalos diferentes de tiempo

		Tiempo t+1			Total Y_t	Pérdida de i
		Categoría I	Categoría j	Categoría J		
Tiempo t	Categoría i	P_{i1}	P_{ij}	P_{iJ}	$\sum_{j=1}^J P_{ij}$	$\sum_{j=1}^J P_{1j} - P_{11}$
	Categoría i	P_{i1}	P_{ij}	P_{iJ}	$\sum_{j=1}^J P_{ij}$	$\sum_{j=1}^J P_{ij} - P_{ij}$
	Categoría J	P_{J1}	P_{Jj}	P_{JJ}	$\sum_{j=1}^J P_{Jj}$	$\sum_{j=1}^J P_{Jj} - P_{JJ}$
	Total Y_{t+1}	$\sum_{i=1}^J P_{i1}$	$\sum_{i=1}^J P_{ij}$	$\sum_{i=1}^J P_{iJ}$	$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J P_{ij}$	$\sum_{i=1}^J \left(\sum_{j=1}^J P_{ij} - P_{ii} \right)$
	Ganancia de j	$\sum_{i=1}^J P_{i1} - P_{11}$	$\sum_{i=1}^J P_{ij} - P_{ij}$	$\sum_{i=1}^J P_{iJ} - P_{JJ}$	$\sum_{j=1}^J \left(\sum_{i=1}^J P_{ij} - P_{jj} \right)$	

Fuente: Adaptado de Aldwaik & Pontius, (2014).

Con la matriz de tabulación cruzada se logra entender que las filas llegan a constituir los cambios en el primer tiempo (t), mientras que las columnas representan los cambios en el tiempo 2 ($t+1$), la diagonal de los valores subrayados (P_{11}, P_{ij}, P_{JJ}) representan las persistencias de categorías, los valores fuera de la diagonal son los cambios que ocurren de “ i ” a “ j ”, el valor “Total Y_t ” refleja el total de las categorías en el tiempo 1, mientras que el “Total Y_{t+1} ” refleja el total de las categorías en el tiempo 2, “Pérdida de i ” sugiere la pérdida de “ i ” en el tiempo 1 y 2, mientras que “Ganancia de j ” sugiere las ganancias de “ j ” en los dos tiempos (Pontius et al., 2004).

14. Transiciones sistemáticas

Este proceso provee información sobre los cambios más prominentes en el paisaje a través de la detección de señales importantes en el cambio de cobertura del suelo (Simbangala *et al.*, 2015). El análisis se apoya en el cálculo de diversos componentes (ganancia, pérdida, intercambio y cambio neto) de una matriz de tabulación cruzada. (Teixeira *et al.*, 2014). El método propuesto por Aldwaik y Pontius (2014), permite comprobar si las transiciones entre categorías observadas han sido impulsadas por procesos sistemáticos o aleatorios. Las ganancias o pérdidas no aleatorias implican un proceso “sistemático” de cambio en el que una cobertura terrestre se dirige, sistemáticamente, a otras coberturas para reemplazarlas (Aldwaik & Pontius, 2014). Es decir, las transiciones sistemáticas son aquellas procedentes de procesos regulares o comunes de cambio; donde los procesos tienden a evolucionar de una manera más consistente o progresivamente, dirigida principalmente por factores socioeconómicos, crecimiento demográfico, expansión urbana, carencia de educación ambiental y políticas de gestión del suelo (Simbangala *et al.*, 2015).

15. Análisis de Intensidad.

Aldwaik y Pontius (2012) denominan “Análisis de Intensidad” a la caracterización de patrones de cambio de manera apropiada en diferentes niveles de detalle y durante intervalos de tiempo. El análisis logra generar una investigación que va dirigida a encontrar los procesos y causas del cambio; para lograr dicho análisis se sustenta en un conjunto de indicadores, a partir de tres niveles diferentes: (a) rapidez “lento o acelerado”, (b) naturaleza “latente o activa” y (c) trascendencia “evitado o dirigido”. El análisis de intensidad responde interrogantes desde un nivel de análisis general a niveles más detallados, en donde cada nivel expone diferentes tipos de información. Primer nivel “rapidez” examina cómo el intervalo y la velocidad de cambio varían; es decir, descifra procesos “lentos o acelerados” que se dan en determinado tiempo. Segundo nivel “naturaleza” examina cada una de las categorías y como estas varía en tamaño e intensidad con respecto a las pérdidas y las ganancias totales en cada categoría para cada intervalo de tiempo; descifrando procesos “activos o latentes”.

a. Rapidez:

Identifica en que intervalo de tiempo la tasa de cambio anual es relativamente “lenta o rápida”, calculando la tasa de cambio anual que se distribuye de manera uniforme durante años de estudio. El proceso de cambio rápido o lento se define por el número de años que conforma el intervalo de tiempo, como también por las actividades que se lleven a cabo sobre el paisaje (Aldwaik & Pontius, 2012).

b. Naturaleza:

Identifica que categorías son relativamente “latentes o activas” en un intervalo de tiempo dado, para lo cual se establece una intensidad uniforme que permite el análisis para cada categoría (Aldwaik & Pontius, 2012). Cuando una categoría supera el umbral de cambio se convierte en un proceso activo determinado por las actividades que inducen su ocurrencia, provocando un cambio abrupto sobre el paisaje, mientras que una categoría latente es aquella que no supera el umbral de cambio, pero se espera algún efecto que provoque la transición de un estado latente a un estado activo (Aldwaik & Pontius, 2012).

c. Trascendencia:

Se estudia la intensidad de la transición desde una categoría dada a otra, mientras se toma en cuenta el área de cada una de las categorías identificadas en el paisaje. Igual que en niveles anteriores, se define la intensidad uniforme que permite identificar categorías “evitadas vs dirigidas” (Aldwaik & Pontius, 2012). Denominando categorías evitadas a aquellas en las que existe algo que evita su ocurrencia, encontrándose por debajo del umbral de cambio. A diferencia de las categorías dirigidas o favorecidas que se caracterizan porque existe algo que impulsa su ocurrencia y provoca que supere el umbral de cambio (Aldwaik & Pontius, 2012).

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

En la figura 1, que se observa a continuación, se muestra el esquema general de las dos primeras fases de los procedimientos realizados, iniciando con la primera fase que consistió en la búsqueda bibliográfica y herramientas a utilizar, junto con la adquisición de imágenes satelitales y su posterior tratamiento. En la segunda fase se realizó la clasificación supervisada y posteriormente su validación, tanto matemáticamente a través del cálculo del coeficiente Kappa, como a través de testimonios del conocimiento previo que tienen los guardaparques de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo al estar en el lugar por aproximadamente 30 años, la tercera fase que se muestra en la figura 2 junto con la fase 4, muestra el análisis de transiciones sistemáticas entre las categorías estudiadas y la última fase hace referencia a sus intensidades de cambio de acuerdo a la metodología propuesta por Aldwaik & Pontius (2012).

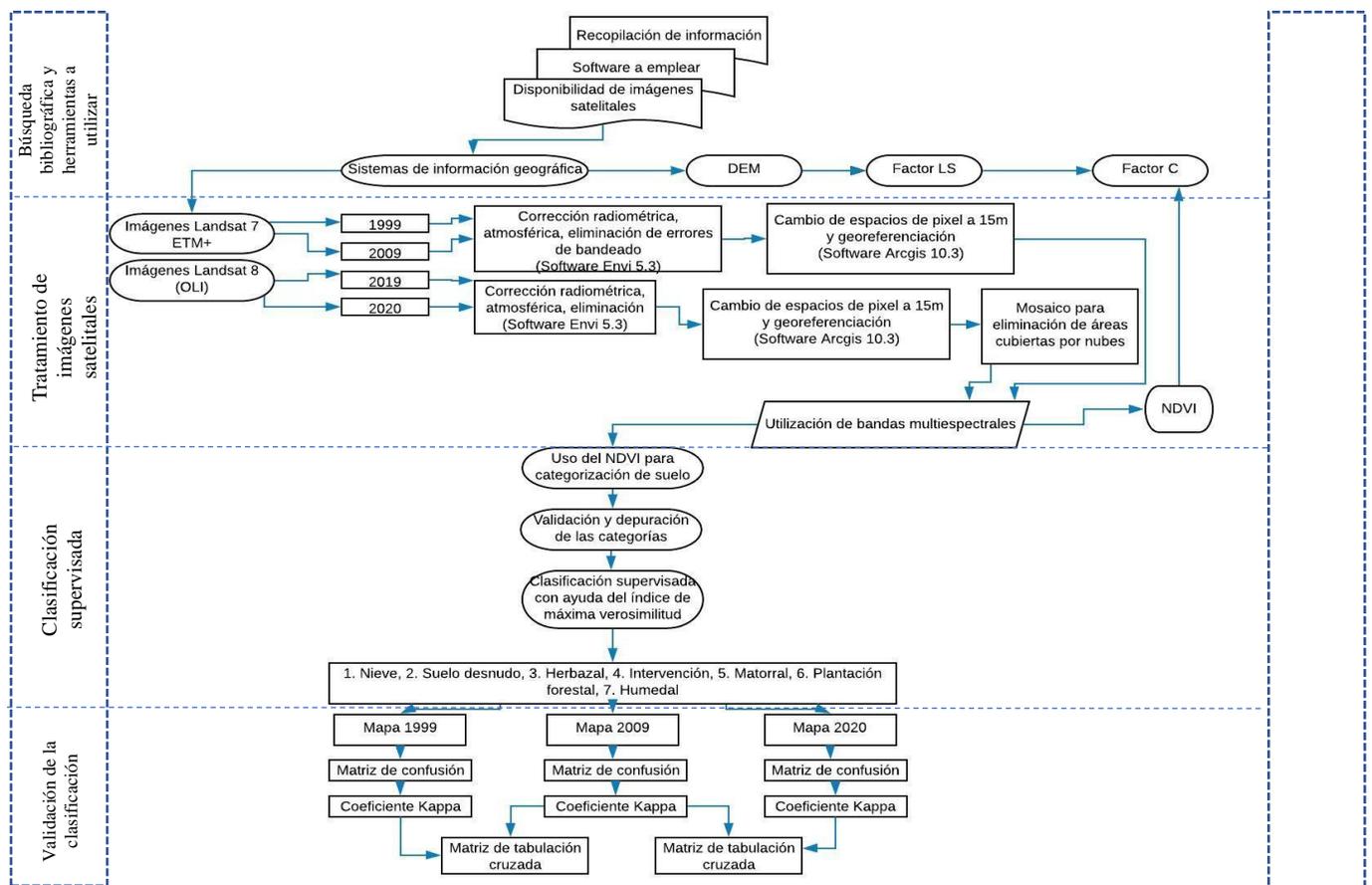


Figura 1. Metodología de las dos primeras fases para el desarrollo del proyecto de investigación

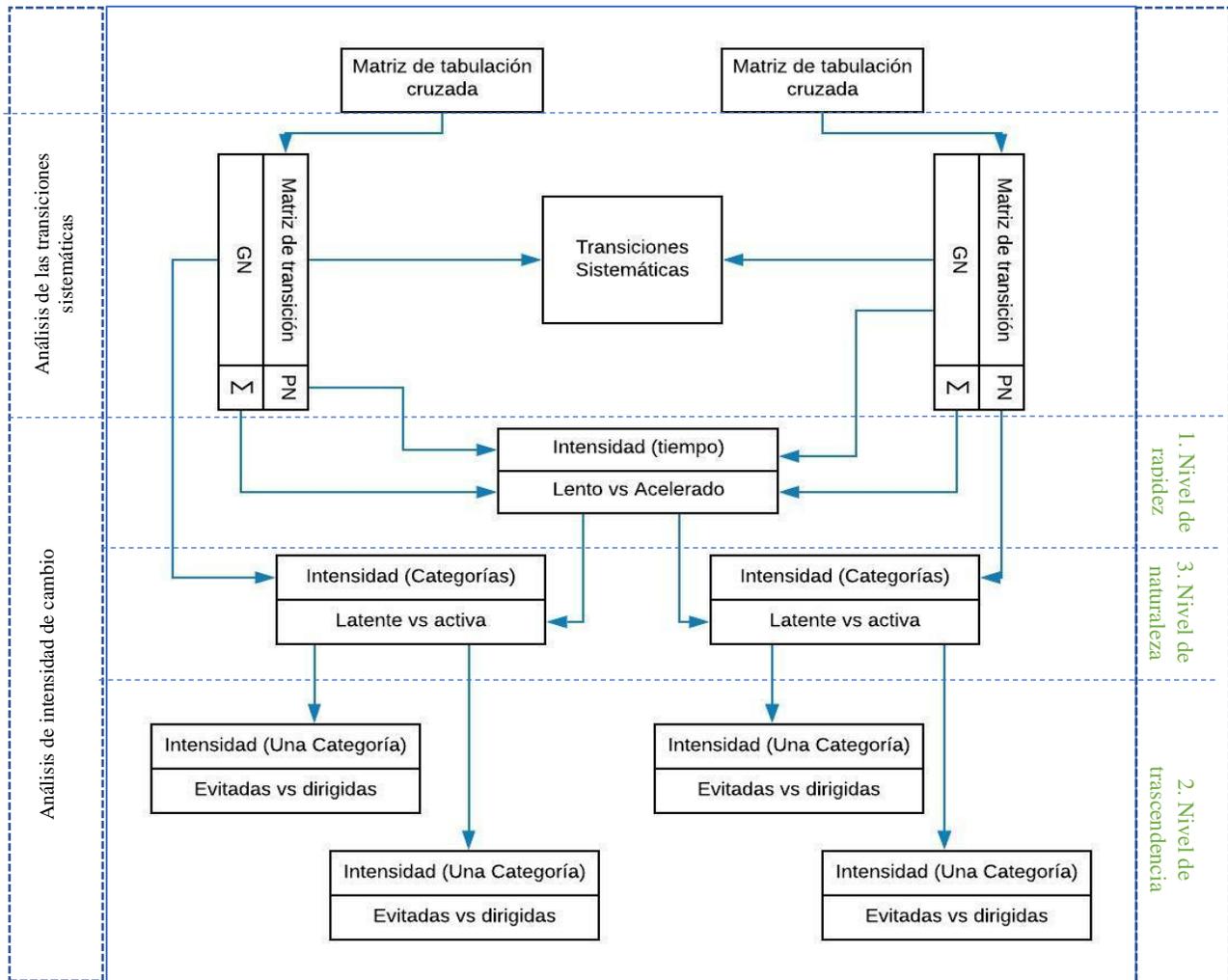


Figura 2. Metodología de las dos últimas fases para el desarrollo del proyecto de investigación

1. Delimitación del área de estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en la zona denominada, Reserva de Producción Faunística Chimborazo. Para la delimitación del área de estudio se utilizó los sistemas de información geográfica y se tomó como referencia el shape de polígono de áreas protegidas del Ecuador de la plataforma SNI actualizada por el MAE en 2015 (ver figura 3). Para su procesamiento se utilizó dos escenas del satélite Landsat (7) de los años 1999-2009 y una escena Landsat (8) para el 2020.

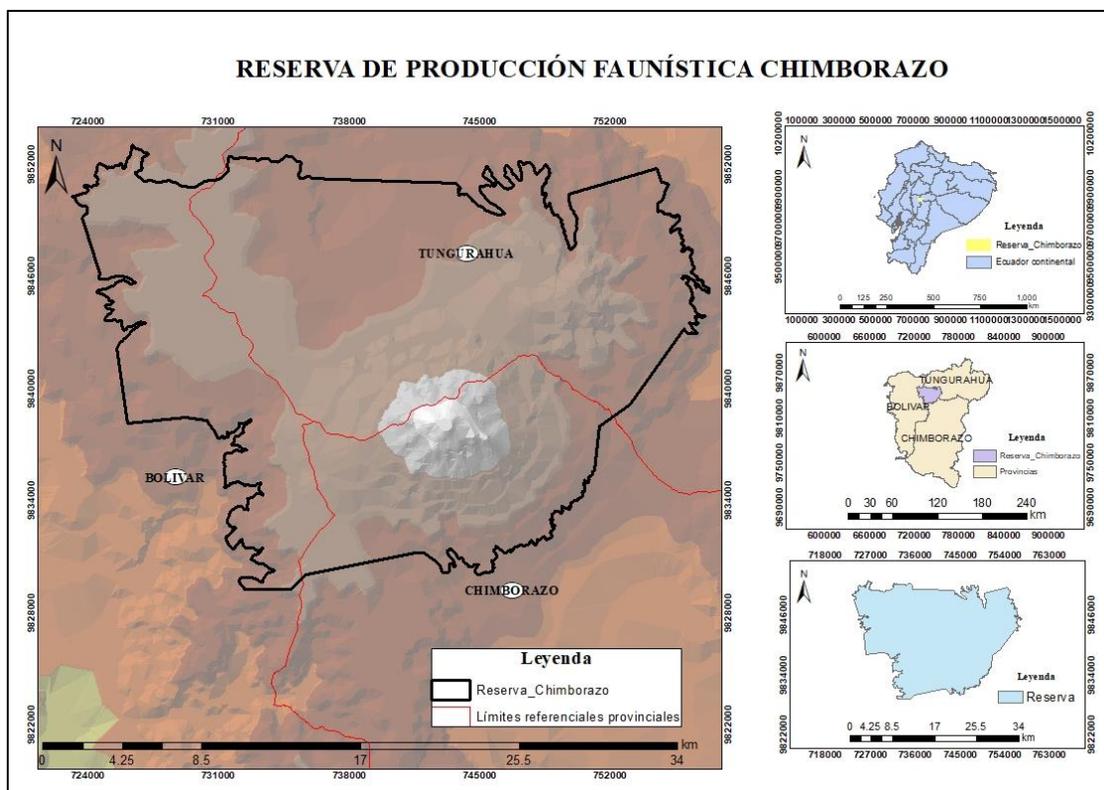


Figura 3. Delimitación del área de estudio

Fuente: *Elaboración del autor*

2. Tratamiento de imágenes satelitales

En la tabla 4 se muestran los detalles de las imágenes satelitales de los años 1999, 2009 y 2019- 2020 necesarias para este estudio, las cuales se obtuvieron a través de la plataforma de Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) realizándose diferentes tratamientos para su corrección con el uso de Sistemas de Información Geográfica.

Tabla 4. *Características de las imágenes satelitales (1999-2009-2020)*

Características	1999	2009	2020	2019
Fecha de adquisición	29/oct/1999	06/sep/2009	08/jun/2020	25/ago/2019
	15:19:21	15:16:38	15:06:58	15:26:37
Sensor	Landsat 7 ETM+	Landsat 7 ETM+	Landsat 8 OLI	Landsat 8 OLI
Resolución espacial	30 m ²	30 m ²	30 m ²	30 m ²
Proyección	UTM – WGS 84	UTM – WGS 84	UTM – WGS 84	UTM-WGS84
Nubosidad	58%	37%	53%	51%
Azimut (grados)	117.19	74.92	125.02	
Elevación (grados)	62.62	59.89	51.27	

*Sin embargo en la escena de estudio la nubosidad no sobrepasa el 30%

Fuente: *Elaboración del autor*

2.1. Error de bandeo

Las imágenes Landsat 7 que presentan distorsión en forma de bandas se corrigieron usando la herramienta denominada “Gap Fill” del ENVI. Esta herramienta interpola los datos faltantes por triangulación para lograr rellenar espacios sin información.

2.2. Corrección radiométrica y atmosférica

Se realizó una corrección radiométrica mediante la herramienta “Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH).”, FLAASH es una herramienta que usa los primeros-principios para corregir longitudes de onda visible a través de infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta en regiones de 3 micrones. Para su uso se cargan los metadatos de la imagen (Anexo 1) tales como: hora, fecha y época de la toma de la imagen, latitud del sensor, altura del sensor sobre el nivel del mar, entre otros, siguiendo el proceso reportado por Aguilar, Mora, & Vargas (2014).

2.3. Eliminación de nubosidad

La única imagen que presentó un 25 % de nubes en el área de estudio fue la del 2020. Las imágenes del 1999 y 2009 no tenían mucha presencia de nubes en el polígono correspondiente a el área de estudio por lo que se podían distinguir con facilidad las diferentes clases de suelo. Para eliminar las nubes del polígono correspondiente a el área de estudio en la imagen del 2020, esta se combinó con una imagen del 2019 de la misma escena que no contenía nubes. Esto se realizó usando la herramienta “Extract by mask” en Arcgis, se extrajo la información sin nubes de la imagen del 2019 y se sobrepuso sobre la escena de la máscara de píxeles validados por la banda *Quality Assessment* Ayala, (2019). De tal manera que no existió la necesidad de crear una clase denominada nubes.

2.4. Mejora de la resolución y asignación de coordenadas geográficas

Para mejorar la definición de las diferentes clases, así como de la clasificación final se procedió a cambiar el tamaño de la celda de la cuadrícula de 30x30m a un píxel menor con un tamaño de 15x15m. Para ello se usó la herramienta “Resample” del AcrToolbox en ArcMap usando la técnica de remuestreo de vecinos más cercano.

Para asignar un sistema de referencia geográfica se procedió a la reproyección de la imagen a coordenadas planas UTM 17s, mediante la herramienta “Project Raster” disponible en AcrToolbox en ArcMap.

3. Clasificación supervisada

La clasificación supervisada se realizó en tres pasos:

- (1) *Uso del índice espectral NDVI para categorizar la cobertura de suelo.*
- (2) *Validación y depuración de las categorías en campo.*
- (3) *Clasificación supervisada con el uso del algoritmo de máxima verosimilitud.*

(1) *Uso del índice espectral NDVI para categorizar la cobertura de suelo.*

De acuerdo a Cartaya *et al.*, (2014) el NDVI permite distinguir la vegetación de otros tipos de cobertura de suelo. El cálculo del NDVI se realiza combinando las bandas 3 y 4 de Landsat 7 y las bandas 4 y 5 de Landsat 8, mediante la herramienta “Raster Calculator” y la ecuación (2).

$$NDVI = (IR - IR_C)/(IR + IR_C) \quad (2)$$

Los valores del NDVI se agruparon en correspondencia con las categorías expresadas en la tabla 5. De acuerdo al estudio de Paula *et al.*, (2018) quien realizó un análisis multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo realizado en la reserva, que coincide con nuestra área de estudio.

Tabla 5. Rangos de clasificación del NDVI según Paula *et al.* (2018)

Clase	Valores de NDVI	Interpretación
1	-0.3 – 0	Suelo desnudo, agua, roca o nieve
2	0.01 – 0.1	Vegetación dispersa (Poca vegetación)
3	0.11 – 0.2	Vegetación moderada (Arbustos, prados)
4	0.221 – 0.4	Páramo (Húmedo)
5	0.41 – 1	Vegetación densa o vigorosa (Alta humedad)

(2) *Validación y depuración de las categorías en campo.*

En la segunda fase se realizaron las visitas en el campo para validar la categorización realizada con el NDVI. Sin embargo, esta clasificación mostró discrepancia con las coberturas observadas en el campo. Por lo que se decidió redefinir las categorías en correspondencia con lo observado en campo (Anexo 2 al 9): Nieve (Ni), Suelo desnudo (Sd),

Herbazal de páramo (He), Intervención (In), Matorral (Ma), Plantación forestal (Pf), Humedal (Hu).

(3) Clasificación supervisada con el uso del algoritmo de máxima verosimilitud.

En la tercera fase con las clases previamente definidas, el uso de la plataforma Google Earth y la información proporcionada por expertos se procedió a realizar la clasificación supervisada con ayuda del algoritmo de máxima verosimilitud.

Para la combinación de la información de Google Earth con la información de los expertos en la zona, lo primero que se hizo fue que, con la información obtenida en campo y puntos dados a través del uso de la plataforma Google Earth, se realizaron mapas temáticos. Los mapas fueron presentados en una reunión con los guardaparques de la zona verificando que la información obtenida sea la correcta.

El algoritmo de máxima verosimilitud permitió considerar los atributos de clasificación para etiquetar cada píxel de la imagen en términos de su máxima probabilidad de pertenecer a una de las 7 categorías previamente definidas, generándose de esta manera los mapas para los 3 años de estudio. Esto se realizó con la herramienta “Maximum Likelihood Classification” del Arctoolbox.

4. Validación de la clasificación

Para la validación de la clasificación supervisada en cada escena se calculó la población mínima estadísticamente representativa con 95% de confianza y 5% de error, lo que condujo a una población mínima de 380 muestras que se distribuyen proporcionalmente en cada categoría. Sin embargo, para el año 1999 usamos 300 muestras, en el 2009 se usaron 1212 y en el 2020 se usaron 1500 muestras en cada categoría.

A partir de esto se construyó una matriz de confusión para evaluar el desempeño de la clasificación supervisada realizada (Powers 2011; Radoux & Bogaet, 2017; Garcia *et al.*, 2019).

5. Confiabilidad de la clasificación

Con el fin de determinar la veracidad de la clasificación con información geográfica que se asume verdadera se procedió a la elaboración de matrices para la obtención del coeficiente Kappa de acuerdo con el cálculo de los índices que hacen referencia a la precisión global, precisión del productor y precisión del usuario (Cerdeña & Villarroel, 2008), datos obtenidos de los raster procesados en ArcMap (ver tabla 6).

Tabla 6. Índices para la validación de la clasificación.

Precisión global (OA)	Precisión del usuario (UA)	Precisión del productor (PA)	Coefficiente Kappa
$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ii}}{N}$	$UA = \frac{P_{ii}}{P_{i+}}$	$PA = \frac{P_{ii}}{P_{+j}}$	$\hat{K} = \frac{\sum P_o - \sum P_e}{N - \sum P_e}$

“n” indica el número de clases; N el número total de píxeles u observaciones en las “n” clases de referencia; “P_{ii}” indica el número elementos de la diagonal de la matriz de confusión; “P_{+j}” es la suma de los píxeles de la clase “j”; “P_{i+}” expresa la suma de los píxeles clasificados como la clase “i”. $\sum P_o$, representa la sumatoria de las concordancias observadas; $\sum P_e$ es la etiqueta de la sumatoria de las concordancias atribuibles al azar; N representa el número total de observaciones.

Fuente: (Pontius *et al.*, 2004)

6. Interacción de cambio-error

Fuller, Smith & Devereux (2003) manifiesta que los errores de cada mapa se vuelven multiplicativos al momento que se superponen unos sobre otros. Si hay cambios estos se mapearán de manera correcta y su extensión será proporcional al exceso de los cambios, dicha diferencia de cambio d_c viene dada por la ecuación 4.

$$d_c = a_1 a_2 c \quad (4)$$

en donde

a_1 = exactitud del mapa 1

a_2 = exactitud del mapa 2

c = cambio

Además de ello se sugiere que los cambios pueden ocultarse de acuerdo al número de clases, por lo que estas diferencias ocultas d_h se calculan con la ecuación 5

$$d_h = \frac{a_1(1-a_2)c}{n-1} + \frac{a_2(1-a_1)c}{n-1} + \frac{(1-a_1)(1-a_2)c}{n-1} \quad (5)$$

en donde

a_1 = exactitud del mapa 1

a_2 = exactitud del mapa 2

c = cambio

n = número de clases

Para las diferencias que son cambios incorrectos mapeados d_{ci} se utiliza la ecuación 6

$$d_{ci} = \frac{a_1(1-a_2)c(n-2)}{n-1} + \frac{a_2(1-a_1)c(n-2)}{n-1} + \frac{(1-a_1)(1-a_2)c(n-2)}{n-1} \quad (6)$$

Las diferencias debidas al error se calculan con la ecuación 7

$$d_e = a_1(1-a_2)(1-c) + a_2(1-a_1)(1-c) \quad (7)$$

Y para el cálculo de los errores en ambas fechas que se estiman como cambios se usa la ecuación 8.

$$d_{e \neq e} = \frac{(1-a_1)(1-a_2)(1-c)(n-2)}{n-1} \quad (8)$$

El cálculo de c que viene a ser el cambio se despeja de la ecuación 9 (Anexo 10)

$$d_o = d_c + d_{ci} + d_e + d_{e \neq e} \quad (9)$$

La tabla 7 evalúa como las precisiones, inexactitudes, cambios y el número de clases de los mapas interactúan para registrar el cambio y la estasis de cambio.

Tabla 7. Ecuaciones utilizadas para comparar pares de mapas para evaluar las diferencias debidas a errores; también para identificar cambios ocultos por errores.

Áreas de cambio (c)		
	a_2	$1 - a_2$
a_1	$a_1 a_2 c$ Cambios mapeados correctamente	$a_1(1 - a_2)c(n - 2)/(n - 1)$ Cambios mapeados incorrectamente
		$a_1(1 - a_2)c/(n - 1)$ <i>Cambio oculto por casualidad error-coincidencia</i>
$1 - a_1$	$a_2(1 - a_1)c(n - 2)/(n - 1)$ Cambios mapeados incorrectamente	$(1 - a_1)(1 - a_2)c(n - 2)/(n - 1)$ Cambio mapeado doblemente incorrecto
	$a_2(1 - a_1)c/(n - 1)$ <i>Cambio oculto por casualidad error-coincidencia</i>	$(1 - a_1)(1 - a_2)c/(n - 1)$ <i>Cambio oculto por casualidad error-coincidencia</i>

Áreas de no cambio (1-c)		
	a_2	$1 - a_2$
a_1	$a_1 a_2 (1 - c)$ Estasis mapeada correctamente	$a_1(1 - a_2)(1 - c)$ Estasis mapeada con cambio
$1 - a_1$	Estasis mapeada con cambio	$(1 - a_1)(1 - a_2)(1 - c)(n - 2)/(n - 1)$ Estasis mapeada con cambio
		$(1 - a_1)(1 - a_2)(1 - c)/(n - 1)$ Estasis mapeada como tal pero a través de errores dobles

La notación es la siguiente: a_1 es la precisión proporcional de map-1; a_2 es la precisión proporcional del mapa-2; c es el proporcional cambio entre fechas de mapeo; n es el número de clases mapeadas. Tenga en cuenta que las precisiones y los errores son multiplicativos; eso quiere decir que donde hay cambio, existe la posibilidad ($1 / (n - 1)$) de que un error pueda ocultar el cambio; donde hay estasis, todos los errores de una sola fecha aparecen como cambios, pero los errores de fecha doble tienen la posibilidad de registrar estasis, aunque sean de la clase incorrecta. Donde el mapeo muestra la verdadera situación (ya sea cambio o estasis) el texto de la celda se muestra en negrita; los cambios verdaderos ocultos por errores se dan en cursiva; donde el mapeo registra una diferencia (ya sea un cambio o un error), las celdas están sombreadas.

Fuente: (Fuller, Smith & Devereux, 2003)

7. Detección de cambios significativos

Para la obtención de cambios significativos (Pontius *et al.*, 2004) propone una metodología en la que se usa una matriz de tabulación cruzada, adicionando tres valores:

- (1) El valor esperado
- (2) La diferencia entre el valor menos esperado que se observa y el que muestra la transición según el cambio total
- (3) El cociente logrado de la división entre el primer y segundo valor que es el que muestra la fuerza de transición.

Los dos últimos valores son los que ofrecen información crítica suficiente para determinar que la transición es significativa, analizándose puntos de vista que incluye las pérdidas y las ganancias.

Además de ello se dice que una transición es sistemática si esta modifica totalmente el paisaje indicando los valores que se acercan a 1 un proceso sistemático y los valores que se acercan a 0 una transición de paisaje al azar, por lo que para nuestra investigación se tomaron valores mayores o iguales a 0.8 para identificar transiciones sistemáticas, siendo indispensable que se cumpla la condición $G_{ij} \leq \frac{P_{ij}}{(a+1)}$ ó $L_{ij} \leq \frac{P_{ij}}{(a+1)}$.

8. Transiciones sistemáticas

Con la matriz de tabulación cruzada se procedió con el análisis de transición para cada uno de los periodos en estudio. Construyéndose dos tablas de transiciones, una para analizar las ganancias y otra para analizar las pérdidas. En el análisis de ganancia (perdida) (ver ecuación 10 y 11), se estimara la ganancia (perdida) esperada de cada categoría mediante la distribución de la ganancia (perdida) observada entre las otras clases, con base a sus proporciones relativas en el tiempo (Pontius *et al.*, 2004; Simbangala *et al.*, 2015).

$$G_{ij} = (P_{+j} - P_{jj}) \left(\frac{P_{i+}}{\sum_{i=1; i \neq j}^J P_{i+}} \right) \quad (10)$$

$$L_{ij} = (P_{i+} - P_{jj}) \left(\frac{P_{+j}}{\sum_{i=1; i \neq j}^J P_{+j}} \right) \quad (11)$$

9. Análisis de la dinámica de cambios

El análisis de cambios se realizó de acuerdo con la metodología planteada por Aldwaik & Pontius (2012) y adaptada por Guamán (2020), Llumitaxi (2020) y Valle (2019).

Esta metodología incluye el cálculo de un conjunto de indicadores para tres niveles de análisis: (a) rapidez “lenta o acelerada” (tabla 8), (b) naturaleza “latente o activa” (tabla 9) y (c) trascendencia “en términos de ganancias y pérdidas” (tabla 10 y 11).

Tabla 8. Ecuaciones para el análisis de intensidad a nivel de rapidez

$S _t =$ Rapidez de cambio relativo interanual	
$S _t = \frac{\left\{ \frac{\sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^I P_{ij} _t \right) - P_{jj} _t \right] \right\}}{\left[\sum_{j=1}^J \left(\sum_{i=1}^I P_{ij} _t \right) \right]} \cdot 100\%}{Y_{t+1} - Y_t} * 100\%$	$S _t = \frac{\text{Proporción de superficie que ha cambiado}}{\text{Superficie total del área en estudio}} \cdot \frac{1}{\text{Número de años que constituyen el intervalo de tiempo}} * 100\%$
$U =$ Rapidez de cambio relativo uniforme por años	
$U = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^I P_{ij} _t \right) - P_{jj} _t \right] \right\}}{\left[\sum_{j=1}^J \left(\sum_{i=1}^I P_{ij} _t \right) \right]} * 100\%}{Y_T - Y_1} * 100\%$	$U = \frac{\text{Proporción total de superficie que ha cambiado}}{\text{Superficie total del área en estudio}} \cdot \frac{1}{\text{Número de años que constituyen todo el período de tiempo en estudio}}$

Fuente: (Aldwaik & Pontius, 2012)

Tabla 9. Ecuaciones para el análisis de intensidad a nivel de naturaleza

$G_j _t = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^I P_{ij} _t \right) - P_{jj} _t \right]}{\left(Y_{t+1} - Y_t \right) \sum_{i=1}^I P_{ij} _t} * 100\%$	$G_j _t = \frac{\text{Proporción relativa de la ganancia neta interanual en relación de la categoría } j \text{ en el tiempo } (t_{+1} - t)}{\text{Ganancia neta de la categoría } j, \text{ durante el intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)} \cdot \frac{1}{\text{Años que constituyen el intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)} \cdot \frac{1}{\text{Área de la categoría } i \text{ en el tiempo } (Y_{t+1})} * 100\%$
$L_i _t = \frac{\left[\left(\sum_{j=1}^J P_{ij} _t \right) - P_{ii} _t \right]}{\left(Y_{t+1} - Y_t \right) \sum_{j=1}^J P_{ij} _t} * 100\%$	$L_i _t = \frac{\text{Proporción relativa de pérdida neta interanual en relación al área de la categoría } i \text{ en el tiempo } (t_{+1} - t)}{\text{Pérdida neta de la categoría } i, \text{ durante el intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)} \cdot \frac{1}{\text{Años que constituyen el intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)} \cdot \frac{1}{\text{Área de la categoría } i \text{ en el tiempo } (Y_t)} * 100\%$

Fuente: (Aldwaik & Pontius, 2012)

Tabla 10. Ecuaciones para el análisis de intensidad a nivel de trascendencia en términos de ganancia.

$R_{in} t = \frac{P_{in} t}{\sum_{j=1}^J P_{ij} t} * 100\%$	$R_{in} t = \text{Proporción de la rapidez interanual de la transición de la categoría } i \text{ a } n, \text{ expresada en porcentaje y en relación al área total de la categoría } i$ <hr/> $R_{in} t = \frac{\text{Rapidez interanual de la transición de categoría } i \text{ a } n}{\text{Área de la categoría } i \text{ al tiempo } (Y_t)} * 100\%$
$W_n t = \frac{\left[\frac{(\sum_{i=1}^J P_{in} t) - P_{nn} t}{(Y_{t+1} - Y_t)} \right]}{\sum_{j=1}^J \left[\frac{(\sum_{i=1}^J P_{ij} t) - P_{nj} t}{(Y_{t+1} - Y_t)} \right]}$	$W_n t = \text{Proporción de la rapidez de la ganancia interanual de la categoría } n, \text{ expresada en porcentaje y en relación al área total de las categorías diferentes a } n$ <hr/> $W_n t = \frac{\text{Rapidez de la ganancia interanual de la categoría } n}{\text{Área que no pertenece a la categoría } n \text{ al tiempo } (Y_t)} * 100\%$

Fuente: (Aldwaik & Pontius, 2012)

Tabla 11. Ecuaciones para el análisis de intensidad a nivel de trascendencia en términos de pérdida.

$Q_{mj} t = \frac{P_{mj} t}{\sum_{i=1}^J P_{ij} t} \times 100\%$	$Q_{mj} t = \text{Proporción de la rapidez de cambio interanual de la transición } m \text{ a } j, \text{ expresada en porcentaje y relativa al área total de la categoría } j \text{ en el tiempo}$ <hr/> $Q_{mj} t = \frac{\text{Rapidez de cambio interanual de transición } m \text{ a } j}{\text{Área de la categoría } i \text{ al tiempo } (Y_{t+1})} * 100\%$
$V_m t = \frac{\left[\frac{(\sum_{j=1}^J P_{mj} t) - P_{mm} t}{(Y_{t+1} - Y_t)} \right]}{\sum_{i=1}^J \left[\frac{(\sum_{j=1}^J P_{ij} t) - P_{im} t}{(Y_{t+1} - Y_t)} \right]} \times 100\%$	$V_m t = \text{Proporción de la pérdida neta interanual de la categoría } m, \text{ expresada en porcentaje y en relación al área total de todas las categorías diferentes a } m \text{ en el tiempo } t+1$ <hr/> $V_m t = \frac{\text{Rapidez de la pérdida neta interanual de la categoría } m}{\text{Área que no pertenece a la categoría } m \text{ al tiempo } (Y_{t+1})} * 100\%$

Fuente: (Aldwaik & Pontius, 2012)

10. Cálculo del factor LS

La longitud de la pendiente y la pendiente que forman el factor LS representan la contribución de la topografía a la pérdida del suelo, en donde las áreas con mayor pendiente y distancia tienden a sufrir mayor erosión que las áreas con pendientes planas o suaves (Phinzi *et al.*, 2020). Para calcular el factor LS se utilizó un Dem de 30 m, cuyo origen se basa en la

interpolación de las curvas de nivel, el mismo que fue obtenido del Instituto Geográfico Militar a través del proyecto “*Soil Organic Carbon Evaluation and Sequestration in Ecuadorian Páramo Ecosystem*” de la UNACH.

Para este estudio lo primero que se realizó fue el cálculo de la pendiente a través del uso de la herramienta *Slope* en ArcMap , posteriormente se procedió a la aplicación de la siguiente fórmula (ver ecuación 12) en la herramienta Raster Calculator que se encuentra en el mismo software ArcMap (Phinzi *et al.*, 2020).

$$LS = \left(\frac{A}{22.13}\right)^m * \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^n \quad (12)$$

Donde **LS** es la longitud de la pendiente y la inclinación de la pendiente **A**=(Acumulación de flujo que constituye un raster acumulado para cada celda*tamaño de celda) es el área que contribuye a la pendiente ascendente por celda unitaria (en metros), **m** (0.4) es un exponente de longitud de variable; **n** (1.3) es un exponente de inclinación de pendiente. Al sustituir la ecuación (5), el factor LS se convierte en (ecuación 13):

$$LS = \left\{power\left(\left(\frac{FlowAcc*30}{22.13}\right) * 0.4\right) * power\left(\left(\frac{\sin(Slope*0.01745)}{0.0896}\right) * 1.3\right)\right\} \quad (13)$$

11. Cálculo del factor C

El factor C que oscila entre 0 y 1, se relaciona con la proporción de pérdida de suelo en condiciones de cultivo específicas que ocurren en suelos bajo tierra. Si el uso del suelo evita por completo la erosión, el factor C se convierte en 0; mientras que por el contrario si el uso del suelo no actúa como protección contra la erosión, el factor C se convierte en 1, mientras que, para el resto de las condiciones, es menor a 1 (Phinzi *et al.*, 2020).

Usamos el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) aplicados a las imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8 utilizadas en el estudio, representados por la banda infrarroja cercana y la banda de la luz roja visible que son las que se usan en el cálculo (Ecuación 2) para derivar los valores del factor C según la Ecuación 14 (Phinzi *et al.*, 2020).

$$C = \exp\left(-a\frac{NDVI}{(\beta-NDVI)}\right) \quad (14)$$

Donde C representa la cobertura y el factor de gestión (dimensionales), y *a* y *β* son los parámetros que determinan la forma de la curva NDVI.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

1. Validación de la clasificación

La precisión general (OA) de la clasificación supervisada para los años 1999, 2009 y 2020, son de 89%, 87.2% y 90.9% respectivamente. Mientras que el grado de similitud valorado con el coeficiente Kappa fue de 0.87%, 0.85% y 0.89%, respectivamente. Estos resultados sugieren que la concordancia es aceptable y por tal motivo existe una buena precisión individual respecto a la clasificación, en concordancia con lo reportado por Casco *et al.* (2016).

El análisis del efecto de los errores cuando se compararon dos imágenes, siguiendo la metodología reportada por Fuller, Smith & Devereux (2003) es reportada en el Anexo 11 y 12. Con un 28% de cambio y los niveles de precisión estimados para el año 1999 de (0.87) y para el 2009 de (0.85). Puede solamente haber existido un 55 % de similitud entre los mapas y el 45% del área de mapa combinado puede haber registrado diferencias. Del 45, el 28% puede haber sido cambios reales y el 17% surgido de errores.

Para el año 2009 - 2020, con un 26% de cambio y los niveles de precisión estimados para el año 2009 de (0.85) y para el 2020 de (0.89). Puede solamente haber existido un 57% de similitud entre los mapas y el 43% del área de mapa combinado puede haber registrado diferencias. Del 43, el 26% puede haber sido cambios reales y el 17% surgido de errores.

En la tabla 12 se usaron 2100 puntos de validación. La precisión global en la predicción de todas las categorías fue superior o igual al 92%. En la tabla 13 se usaron 8484 puntos de validación, logrando una precisión global superior o igual al 91%, mientras que en la tabla 14, se usaron 10500 puntos alcanzando una precisión global superior o igual al 94%. Mientras que la mayor proporción de clasificación erróneas se manifestó en la clase Herbazal con una proporción de 8% (1999), 9% (2009) y 3% (2020).

Tabla 12. Matriz de confusión 1999.

Clases reales	Clases Predichas						
	Nieve (300)	Suelo desnudo (300)	Herbazal (300)	Intervención (300)	Matorral (300)	Plantación Forestal (300)	Humedal (300)
Nieve (299)	299	0	0	0	0	0	0
Suelo desnudo (306)	1	298	0	0	7	0	0
Herbazal (275)	0	0	200	42	24	3	6
Intervención (282)	0	1	24	239	6	6	6
Matorral (311)	0	1	34	6	263	290	1
Plantación forestal (307)	0	0	16	0	0	290	1
Humedal (320)	0	0	26	13	0	1	280

	Nieve	Suelo desnudo	Herbazal	Intervención	Matorral	Plantación forestal	Humedal
Sensibilidad (Precisión de usuario)	1	0.99	0.67	0.8	0.88	0.97	0.93
Especificidad	1	1	0.96	0.98	0.97	0.99	0.98
Precisión (Precisión de productor)	1	0.97	0.73	0.85	0.85	0.94	0.88
Exactitud por clase	1	1	0.92	0.95	0.96	0.99	0.97
Clasificación errónea	1	0	0.08	0.05	0.04	0.01	0.03

Tabla 13. Matriz de confusión 2009.

Clases actuales	Clases Predichas						
	Nieve (1212)	Suelo desnudo (1212)	Herbazal (1212)	Intervención (1212)	Matorral (1212)	Plantación Forestal (1212)	Humedal (1212)
Nieve (1205)	1196	2	0	0	2	5	0
Suelo desnudo (1225)	2	1183	0	1	39	0	0
Herbazal (1519)	0	0	1004	150	248	42	75
Intervención (1107)	0	3	22	1004	60	0	18
Matorral (887)	0	24	79	27	754	1	2
Plantación forestal (1213)	14	0	32	11	14	1142	0
Humedal (1328)	0	0	75	19	95	22	1117

	Nieve	Suelo desnudo	Herbazal	Intervención	Matorral	Plantación forestal	Humedal
Sensibilidad (Precisión de usuario)	0.99	0.98	0.83	0.83	0.62	0.94	0.92
Especificidad	1	0.99	0.93	0.99	0.98	0.99	0.97
Precisión (Precisión de productor)	0.99	0.97	0.66	0.91	0.85	0.94	0.84
Exactitud por clase	1	0.99	0.91	0.96	0.93	0.98	0.96
Clasificación errónea	0	0.01	0.09	0.04	0.07	0.02	0.04

Tabla 14. Matriz de confusión 2020.

Clases actuales	Clases Predichas						
	Nieve (3500)	Suelo desnudo (3500)	Herbazal (3500)	Intervención (3500)	Matorral (3500)	Plantación Forestal (3500)	Humedal (3500)
Nieve (3502)	3500	2	0	0	0	0	0
Suelo desnudo (3531)	0	3456	56	15	1	0	3
Herbazal (3608)	0	24	3232	25	112	0	215
Intervención (3763)	0	5	58	3149	58	115	378
Matorral (3252)	0	12	76	25	3008	2	129
Plantación forestal (3710)	0	1	54	28	58	3356	213
Humedal (3124)	0	0	24	258	263	27	2562

	Nieve	Suelo desnudo	Herbazal	Intervención	Matorral	Plantación forestal	Humedal
Sensibilidad (Precisión de usuario)	1	0.99	0.92	0.9	0.86	0.96	0.73
Especificidad	1	1	0.98	0.97	0.99	0.98	0.97
Precisión (Precisión de productor)	1	0.98	0.9	0.84	0.92	0.9	0.82
Exactitud por clase	1	1	0.97	0.96	0.97	0.98	0.94
Clasificación errónea	0	0	0.03	0.04	0.03	0.02	0.06

2. Estado actual del uso del suelo

La tabla 15 nos muestra la superficie que cada categoría ocupa en hectáreas y su proporción aproximada en porcentaje, respecto al área total de estudio en los años de 1999-2009-2020, teniendo como resultados durante el primer intervalo de tiempo (1999-2009) la reducción de la categoría nieve en un 0.4% al igual que el herbazal en un 4.63%, el suelo desnudo disminuye en un 1.7%, y el matorral en un 0.7%, a diferencia de la intervención y la plantación forestal que aumentan en un 5.3% y 2.2% respectivamente, mientras el humedal se mantiene.

Los resultados para el segundo intervalo nos muestran datos casi parecidos para la categoría nieve, herbazal, plantación forestal y humedal, mientras que el suelo desnudo aumenta de 21.6% a 23.3%, el matorral incrementa su territorio de 38.5% a 42.1%, mientras que por el contrario la intervención disminuye de 21% a 15.4%.

Tabla 15. *Uso y cobertura de suelo de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo*

DESCRIPCIÓN	1999	%	2009	%	2020	%
Nieve (Ni)	1708.89	3.2	1465.31	2.8	1560.62	2.9
Suelo desnudo (Sd)	12325.58	23.2	11452.66	21.6	12384.95	23.3
Herbazal (He)	9497.85	17.9	7002.77	13.2	7126.08	13.4
Intervención (In)	8340.60	15.7	11121.95	21.0	8166.60	15.4
Matorral (Ma)	20780.34	39.2	20435.87	38.5	22358.52	42.1
Plantación forestal (Pf)	240.33	0.5	1421.79	2.7	1222.20	2.3
Humedal (Hu)	184.93	0.3	178.08	0.3	259.49	0.5
total	53078.5	100.0	53078.4	100.0	53078.5	100.0

Los porcentajes representan la proporción aproximada que ocupa cada categoría en el área total de terreno estudiado

Fuente: *Elaboración del autor.*

En la figura 4 se muestra los mapas de uso de suelo y los cambios que ha sufrido el área de estudio desde 1999 a 2009 y de 2009 a 2020. Se observan cambios evidentes en las categorías intervención y matorral.

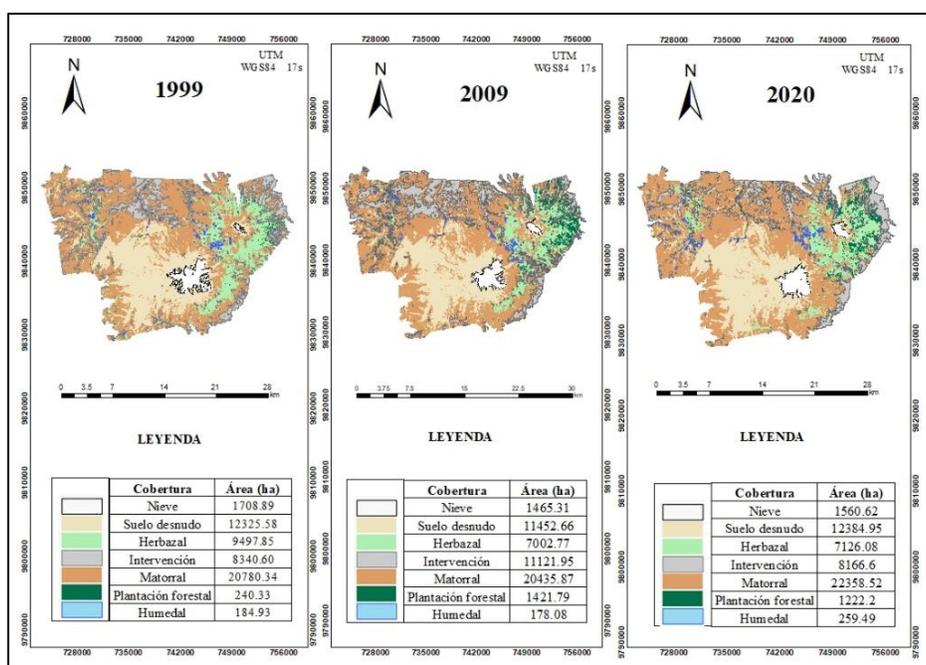


Figura 4. *Mapas de uso y cobertura de suelo de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo*

Fuente: *Elaboración del Autor*

En las tablas 15 y 16 se presenta las matrices de tabulación cruzada cuya diagonal representa la proporción de persistencia de cambio en el paisaje del terreno estudiado, mientras los

valores de alrededor de la diagonal representan los cambios aleatorios que han sufrido las diferentes categorías. En la tabla 16 se analiza el primer intervalo de tiempo (1999-2009), encontrándose la mayor persistencia en la categoría matorral con un 29%, seguido de la categoría suelo desnudo con un 19.2%.

Tabla 16. Matriz de tabulación cruzada en términos porcentuales del área de estudio en el primer período de tiempo (1999-2009).

		2009								
Cambio en porcentaje de área		Nieve	Suelo desnudo	Herbazal	Intervención	Matorral	Plantación forestal	Humedal	Total 1999 P ₊	Pérdidas
1999	Nieve	<u>2.3</u>	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.5
	Suelo desnudo	0.9	<u>19.2</u>	0.0	0.2	1.3	0.0	0.0	21.6	2.4
	Herbazal	0.0	0.0	<u>9.5</u>	1.5	2.0	0.1	0.1	13.2	3.7
	Intervención	0.0	0.0	3.8	<u>10.2</u>	6.8	0.0	0.1	21.0	10.8
	Matorral	0.0	3.6	2.8	3.0	<u>29.0</u>	0.0	0.0	38.5	9.5
	Plantación forestal	0.0	0.0	1.6	0.8	0.0	<u>0.3</u>	0.0	2.7	2.4
	Humedal	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	<u>0.1</u>	0.3	0.2
	Total 2009 (P ₊)	3.2	23.2	17.9	15.7	39.2	0.4	0.3	100.0	50.0
	Ganancias	0.9	4.1	8.4	5.5	10.2	0.2	0.2		

La persistencia se denota con las cifras porcentuales subrayadas

Fuente: Elaboración del Autor

Por otro lado, la tabla 17 representa el segundo período de tiempo evidenciándose que la categoría matorral tiene un cambio constante en el tiempo, seguido del suelo desnudo.

Tabla 17. Matriz de tabulación cruzada en términos porcentuales del área de estudio en el segundo período de tiempo (2009-2020).

		2020								
Cambio en porcentaje de área		Nieve	Suelo desnudo	Herbazal	Intervención	Matorral	Plantación forestal	Humedal	Total 2009 P ₊	Pérdidas
2009	Nieve	<u>2.5</u>	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.4
	Suelo desnudo	0.2	<u>19.7</u>	0.1	0.4	3.0	0.0	0.0	23.3	3.7
	Herbazal	0.0	0.0	<u>7.1</u>	2.6	2.6	1.0	0.2	13.4	6.3
	Intervención	0.0	0.1	2.3	<u>10.5</u>	1.7	0.8	0.1	15.4	4.9
	Matorral	0.0	1.4	2.6	7.0	<u>31.0</u>	0.2	0.0	42.1	11.1
	Plantación forestal	0.0	0.0	1.0	0.3	0.2	<u>0.8</u>	0.0	2.3	1.5
	Hu	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	<u>0.1</u>	0.5	0.4
	Total 2009 (P ₊)	2.8	21.6	13.2	21.0	38.5	2.7	0.3	100.0	50.0
	Ganancias	0.2	1.9	6.1	10.4	7.5	1.9	0.3		

La persistencia se denota con las cifras porcentuales subrayadas

Fuente: Elaboración del Autor

La figura 5 representada por el diagrama de Sankey sugiere los cambios de uso de la tierra en los dos períodos de tiempo, excluyéndose valores menores al 0.1% y cuyo ancho de los

conectores es proporcional al tamaño de hectáreas ocupado por cada categoría, pudiendo evidenciar también las barras que mientras mayor grosor tengan indica mayor persistencia respecto al terreno ocupado, es por ello que con el diagrama podemos corroborar lo dicho en párrafos anteriores al mencionar que las categorías matorral y suelo desnudo son los más persistentes con el cambio en el tiempo, mientras que la plantación forestal, herbazal y nieve han sido los más susceptibles a transiciones, destacándose el caso del humedal que en el período de 1999 a 2009 no existe interacción de las demás categorías con el humedal sino solamente del humedal con la categoría herbazal.

Respecto al comportamiento de la categoría matorral se puede observar que de 1999 a 2009 se recibe aportes de la categoría suelo desnudo, herbazal y en mayor cantidad de la intervención, esto se evidencia con el grosor de sus conectores, a la vez que, la barra que indica su ocupación respecto a las demás categorías también ocupa un mayor espacio en la línea central. Para el segundo período se aprecia que el matorral cede terreno a las categorías de las cuales en el primer período ganó, es por ello la disminución del tamaño de la barra respecto a su ocupación, sin embargo, vuelve a ganar terreno del herbazal, plantación forestal, suelo desnudo e intervención, razón por la que su ocupación en hectáreas se incrementa.

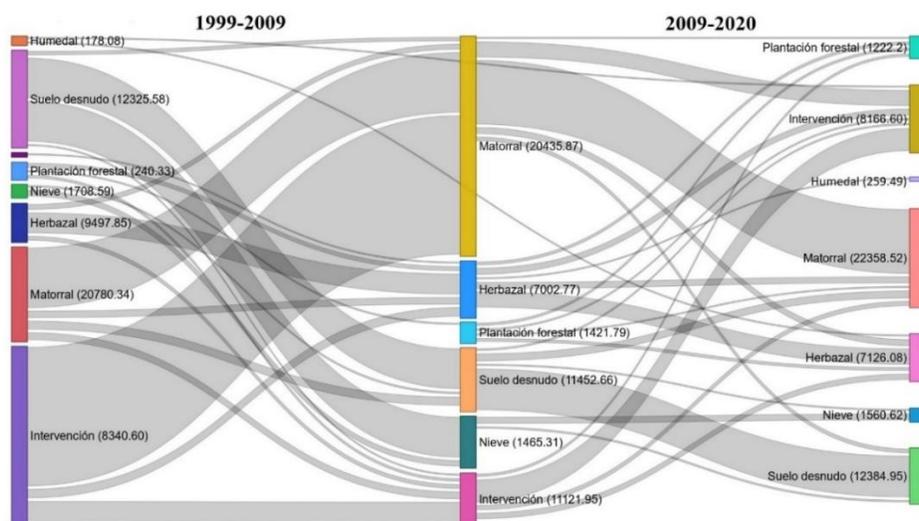


Figura 5. Diagrama de Sankey para el cambio de uso de suelo en los períodos 1999-2009-2020

Fuente: Elaboración del Autor

3. Dinámica de cambio de uso de suelo

Durante el primer período que va de 1999 a 2009, de acuerdo con el porcentaje total del área y lo que ha ocupado cada categoría, el mayor intercambio ocurre en la categoría matorral con

un 19% y una ganancia del 10.2%, además de la categoría intervención que tiene pérdida equivalente al 10.8% de extensión, y cambio neto de 5.2%, esto se evidencia en la tabla 18.

Tabla 18. Magnitud relativa de los cambios en la superficie de cada una de las categorías en el período 1999-2009.

Categorías	Porcentaje con relación al área total en el período de 1999-2009				
	Ganancias	Pérdidas	Cambio Neto	Intercambio	Cambio global
Nieve	0.9	0.5	0.5	0.9	1.4
Suelo desnudo	4.1	2.4	1.7	4.8	6.5
Herbazal	8.4	3.7	4.7	7.5	12.2
Intervención	5.5	10.8	5.2	11.0	16.3
Matorral	10.2	9.5	0.7	19.0	19.7
Plantación forestal	0.2	2.4	2.2	0.4	2.6
Humedal	0.2	0.2	0.0	0.5	0.5
Total	29.5	29.5	14.9	44.1	

Valores expresados en porcentaje de área 1999-2009

Fuente: Elaboración del Autor

Para mayor comprensión de la tabla anterior, en la figura 6 se muestra las pérdidas y ganancias que han tenido las diferentes categorías de uso de suelo, en donde la intervención muestra la mayor pérdida de terreno con un 10.8%, además de tener el mayor cambio neto con un 5.2%, a la vez, en la gráfica se puede observar también que el matorral posee una mayor ganancia de terreno con un 10.2% sin embargo no se evidencia un cambio neto ya que así como gana terreno también lo pierde. Otra categoría que muestra un cambio neto alto es la categoría herbazal que tiene una ganancia de 8.4% y un cambio neto que equivale al 4.7%.

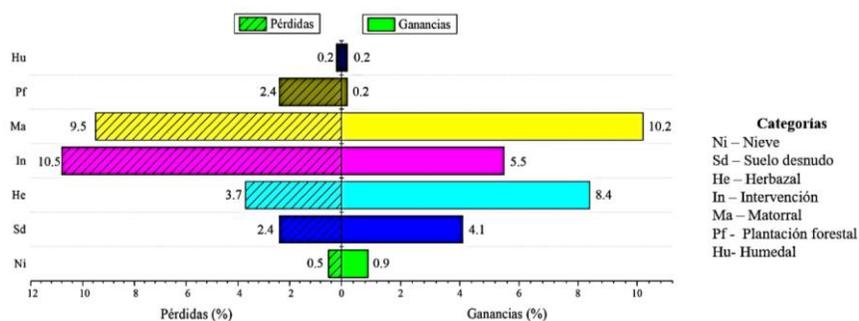


Figura 6. Pérdidas y ganancias en el período 1999-2009

Fuente: Elaboración del Autor

Para el segundo intervalo de tiempo se muestra la ganancia de terreno entre categorías evidenciándose el cambio de uso ocurrido entre las mismas, siendo la intervención la que posee mayor ganancia, con un 10.4% seguido del matorral que, aunque gana territorio sus

pérdidas son mayores con 11.1% teniendo un cambio global de 18.7%, esto se observa en la tabla 19.

Tabla 19. Magnitud relativa de los cambios en la superficie de cada una de las categorías en el período 2009-2020.

Porcentaje	2009-2020				
	Ganancias	Pérdidas	Cambio Neto	Intercambio	Cambio global
Nieve	0.2	0.4	0.2	0.5	0.7
Suelo desnudo	1.9	3.7	1.8	3.8	5.6
Herbazal	6.1	6.3	0.2	12.2	12.4
Intervención	10.4	4.9	5.6	9.7	15.3
Matorral	7.5	11.1	3.6	15.0	18.7
Plantación forestal	1.9	1.5	0.4	3.1	3.5
Humedal	0.3	0.4	0.2	0.5	0.7
Total	28.4	28.4	11.9	44.9	

Valores expresados en porcentaje de área 2009-2020

Fuente: Elaboración del Autor

La figura 7 evidencia lo ocurrido en el segundo intervalo de tiempo, observándose como el matorral tiene mayor pérdida de territorio con un 11.1% y un cambio neto de 3.6%, sin embargo, el mayor cambio neto lo posee la categoría intervención con una ganancia del 10.4%.

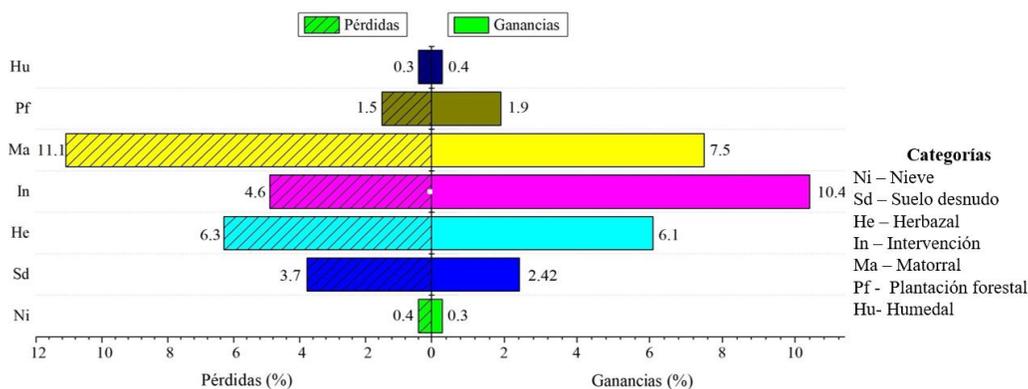


Figura 7. Pérdidas y ganancias en el período 2009-2020

Fuente: Elaboración del Autor

4. Transiciones sistemáticas

4.1. Detección de cambios significativos

En la tabla 20 se presentan los valores de las transiciones sistemáticas más representativas en términos de ganancia en el período 1999-2009 resaltando la ganancia de la categoría herbazal

sobre la intervención, plantación forestal y humedal, presentándose el mismo panorama en el segundo período.

Tabla 20. *Transiciones sistemáticas "Ganancias".*

	P _{ij}	G _{ij}	Huella [δG]	Magnitud de cambio [δ*G]	$\frac{P_{ij}}{(a + 1)}$	Interpretación
1999-2009	0.4	0.1	0.3	1.9	0.2	Suelo desnudo gana y reemplaza a nieve
	0.9	0.2	0.7	3.5	0.5	Nieve gana y reemplaza a suelo desnudo
	0.1	0.0	0.1	4.4	0.1	Plantación forestal gana y reemplaza a herbazal
	0.1	0.0	0.1	3.1	0.1	Humedal gana y reemplaza a herbazal
	3.8	2.0	1.8	0.9	2.1	Herbazal gana y reemplaza a intervención
	6.8	3.5	3.3	1.0	3.8	Matorral gana y reemplaza a intervención
	3.6	2.0	1.6	0.8	2.0	Suelo desnudo gana y reemplaza a matorral
	1.6	0.3	1.3	5.0	0.9	Herbazal gana y reemplaza a plantación forestal
	0.8	0.2	0.6	3.3	0.4	Intervención gana y reemplaza a plantación forestal
	0.2	0.0	0.2	4.8	0.1	Herbazal gana y reemplaza a humedal
2009-2020	0.40	0.07	0.33	4.44	0.22	Suelo desnudo gana y reemplaza a nieve
	0.23	0.06	0.17	2.91	0.13	Nieve gana y reemplaza a suelo desnudo
	0.99	0.26	0.73	2.74	0.55	Plantación forestal gana y reemplaza a herbazal
	0.18	0.04	0.14	4.04	0.10	Humedal gana y reemplaza a herbazal
	2.27	1.08	1.19	1.10	1.26	Herbazal gana y reemplaza a intervención
	0.78	0.30	0.48	1.57	0.43	Plantación forestal gana y reemplaza a intervención
	0.99	0.16	0.83	5.13	0.55	Herbazal gana y reemplaza plantación forestal
	0.21	0.03	0.18	5.04	0.12	Herbazal gana y reemplaza humedal
	0.18	0.06	0.12	1.95	0.10	Intervención gana y reemplaza humedal

Valores expresados en porcentaje de área

Fuente: Elaboración del Autor

En la figura 8 y 9 se muestran los valores de las transiciones denominadas como sistemáticas al cumplir la condición dada durante los períodos 1999-2009 y 2009-2020 respectivamente, tomando en cuenta que G=gana y R=reemplaza. Por ejemplo, Ma-G; Ma-R-In, se lee si matorral gana, matorral reemplaza a intervención. Por encontrarse esta representación debajo de la línea significa que la magnitud de cambio es débil o poco representativa. La línea color naranja representa un umbral para comparar las magnitudes de cambio que se interpretan como significativas y no aleatorias si se encuentran por encima de la línea y de poca relevancia si se presenta por debajo de la línea.

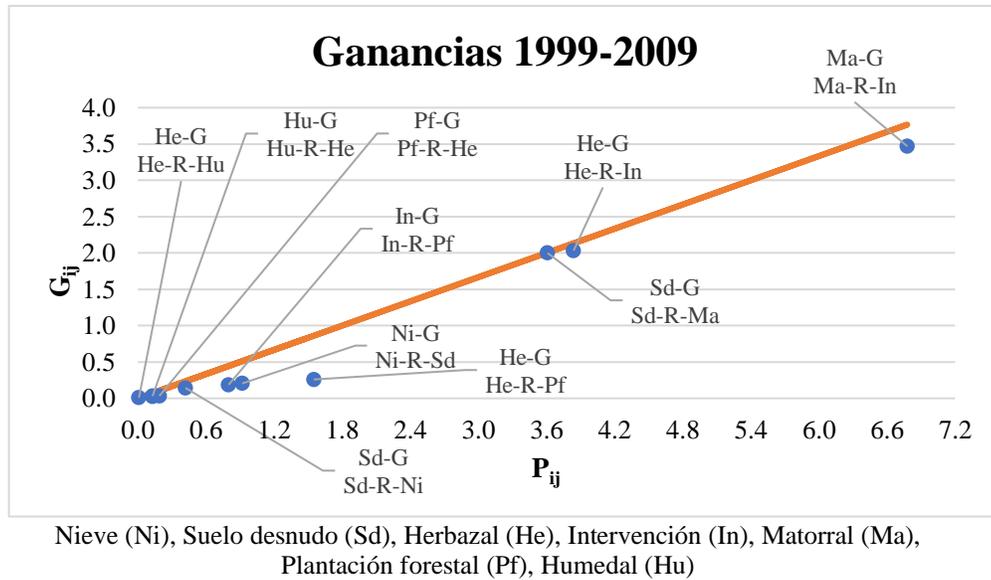


Figura 8. Transiciones sistemáticas en términos de ganancia en el período 1999-2009
Fuente: Elaboración del Autor

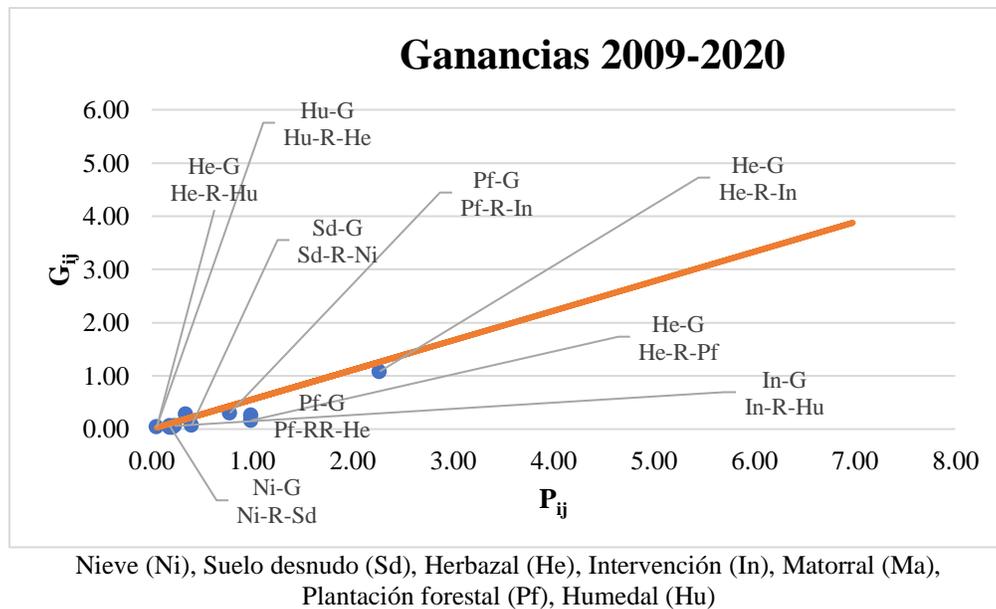


Figura 9. Transiciones sistemáticas en términos de pérdidas en el período 2009-2020
Fuente: Elaboración del Autor

Al hablar de las transiciones sistemáticas se debe tomar en cuenta también las pérdidas que sufren, evidenciándose que las mismas categorías que ganan también pierde, demostrando así el cambio ocurrido y el reemplazo de uso de suelo entre una categoría y otra esto se observa al perder territorio el herbazal y ser reemplazado por las categorías intervención, plantación forestal y humedal esto en el primer período de tiempo. Para el segundo período

se observa que la mayor pérdida ocurre con la categoría intervención que se reemplaza por las mismas categorías del primer período que son herbazal y humedal, esto se evidencia en la tabla 21.

Tabla 21. *Transiciones sistemáticas "Pérdidas".*

	P _{ij}	G _{ij}	Magnitud		Interpretación	
			Huella de cambio [δG]	$\frac{P_{ij}}{(a + 1)}$		
1999-2009	0.42	0.11	0.31	2.77	0.23	Nieve pierde y se reemplaza por suelo desnudo
	0.92	0.10	0.82	8.06	0.51	Suelo desnudo pierde y es reemplazado por nieve
	1.47	0.71	0.76	1.06	0.82	Herbazal pierde y es reemplazado por intervención
	0.13	0.02	0.11	5.41	0.07	Herbazal pierde y es reemplazado por plantación forestal
	0.13	0.02	0.11	7.41	0.07	Herbazal pierde y es reemplazado por humedal
	0.08	0.04	0.04	0.84	0.04	Intervención pierde y es reemplazado por humedal
	1.55	0.43	1.12	2.59	0.86	Plantación forestal pierde y es reemplazado por herbazal
	0.80	0.38	0.42	1.11	0.44	Plantación forestal pierde y es reemplazado por intervención
2009-2020	0.40	0.09	0.31	3.22	0.22	Nieve pierde y es reemplazado por suelo desnudo
	0.99	0.20	0.79	4.06	0.55	Herbazal pierde y es reemplazado por plantación forestal
	0.18	0.02	0.16	6.62	0.10	Herbazal pierde y es reemplazado por humedal
	2.27	0.81	1.46	1.80	1.26	Intervención pierde y es reemplazado por herbazal
	0.78	0.17	0.61	3.72	0.43	Intervención pierde y es reemplazado por plantación forestal
	0.05	0.02	0.03	1.50	0.03	Intervención pierde y es reemplazado por humedal
	6.98	3.79	3.19	0.84	3.88	Matorral pierde y es reemplazado por intervención
	0.99	0.21	0.78	3.76	0.55	Plantación forestal pierde y es reemplazado por herbazal
	0.21	0.06	0.15	2.65	0.12	Humedal pierde y es reemplazado por herbazal
	0.18	0.09	0.09	0.97	0.10	Humedal pierde y es reemplazado por intervención

Valores expresados en porcentaje de área

Fuente: Elaboración del Autor

La figura 10 y 11 muestra la interacción mencionada en la tabla 18 acerca de las transiciones sistemáticas siendo P=pierde y R=reemplaza.

Podemos de acuerdo a la ubicación de los puntos evidenciar que categorías han perdido territorio producto de estas transiciones, en donde aquellos valores por encima de la línea naranja presentan la mayor magnitud de cambio cuyas transiciones sistemáticas han significado la pérdida de territorio y el reemplazo por otras categorías. Los puntos debajo de la línea representan las magnitudes de cambio mínimo en donde la pérdida de territorio ha sido de manera imperceptible. Por ejemplo, He-P; In-R-He, se lee, si herbazal pierde,

5. Análisis de Intensidad

5.1. Nivel de rapidez

La figura 12 muestra la rapidez de cambio experimentado por la Reserva de Producción Faunística Chimborazo durante los 21 años de estudio. Para conocer dicha intensidad se calculó el “umbral” o cambio uniforme, el cual tomó un valor de 2.76%. Se calculó además el cambio interanual, el cual nos dio como resultado que para el primer intervalo de 1999 a 2009 el cambio se da de manera rápida, sugiriendo que el 29.5% de superficie de terreno se ha modificado, mientras que para el segundo período de 2009 a 2020 las transiciones se dan de manera lenta.

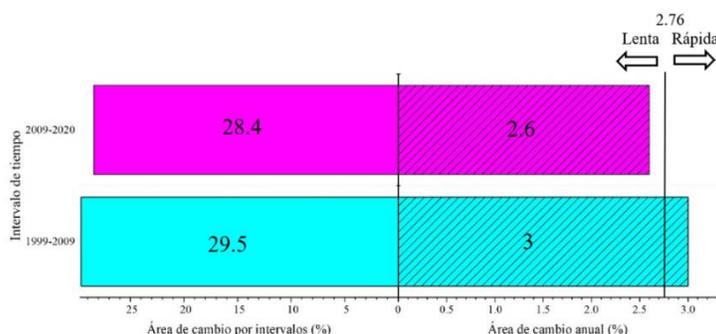


Figura 12. *Intensidad de cambio interanual*

Fuente: *Elaboración del Autor*

5.2. Nivel de naturaleza

La tabla 22, muestra la intensidad de los cambios a nivel de naturaleza durante el primer intervalo de tiempo, identificándose cambios activos en donde las transiciones se han dado de manera rápida al sobrepasar el umbral de 2.95 y cambios latentes cuyas transiciones se han dado de manera paulatina y con menor intensidad sin llegar a sobrepasar el umbral.

Si hacemos referencia a los procesos de cambio activos, en cuanto a pérdidas tenemos a las categorías intervención, plantación forestal y humedal, con un porcentaje total de área de cambio de 5.13%, 8.97%, 7.10% respectivamente. Mientras que por otro lado tenemos las pérdidas latentes dadas en las categorías herbazal, intervención, plantación forestal y humedal, con 3.18%, 2.65% y 3.10% respectivamente.

Por otro lado, tenemos las ganancias cuyas categorías con transiciones activas son suelo desnudo, cultivo y matorral, mismas que tienen un cambio de área que equivale al 4.31%, 4.82% y 3.99% respectivamente, y las categorías que representan a nivel de naturaleza cambios latentes son la nieve, páramo y bosque con 4.71%, 3.51%, 3.89% y 7.21%.

Tabla 22. Naturaleza de cambio en el primer período de tiempo (1999-2009).

	Pérdidas			Ganancias		
	Área de cambio anual (ha)	Naturaleza de cambio (%)		Área de cambio anual (ha)	Naturaleza de cambio (%)	
Nieve	25	1.7	Latente	49	2.9	Latente
Suelo desnudo	129	1.1	Latente	216	1.6	Latente
Herbazal	198	2.9	Latente	447	4.7	Activa
Intervención	571	5.1	Activo	292	3.5	Activa
Matorral	506	2.5	Latente	540	2.6	Latente
Plantación forestal	127	9	Activo	9	3.9	Activa
Humedal	13	7.1	Activo	13	7.2	Activa

Fuente: Elaboración del Autor

La figura 13, muestra lo dicho en párrafos anteriores identificándose la variación de área que sufren las categorías. En donde la intervención, plantación forestal y humedal, resultan ser categorías activas tanto en pérdidas como en ganancias. Por otro lado, la categoría intervención es la que más territorio ha cedido en el intervalo de tiempo de 1999-2009, esto puede decirse que se debe a que la plantación forestal a ocupado terreno que antes era cultivo, basándose también en un principio económico en donde la explotación de madera se convierte en el principal factor.

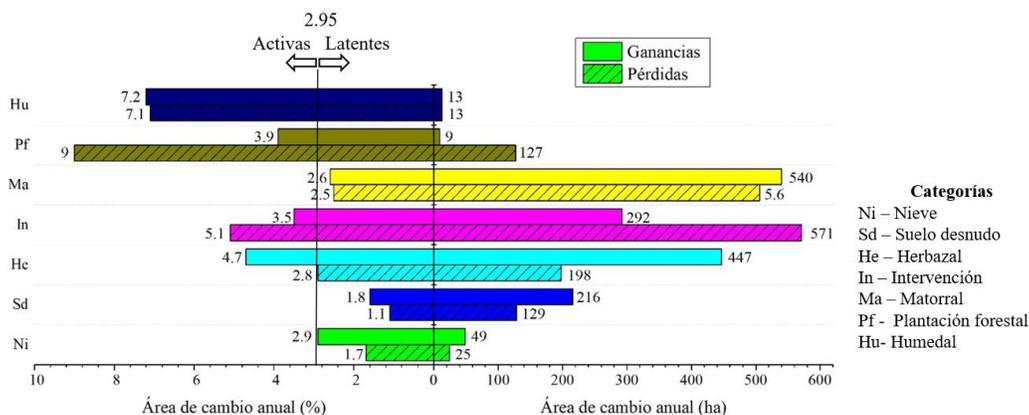


Figura 13. Magnitud relativa de intensidad de cambio para cada una de las categorías, en cuanto a pérdidas y ganancias en el período (1999-2009)

Fuente: Elaboración del Autor

Para identificar los cambios de intensidad ocurridos durante el segundo período de tiempo debemos tener en cuenta que los valores que sobrepasen el umbral que es de 2.58 tendrán una naturaleza activa durante este intervalo.

En este período se presenta un escenario singular, en donde, las categorías con transiciones activas para pérdidas son las mismas categorías con transiciones activas en ganancias, siendo

estas; herbazal, intervención, plantación forestal y humedal con intensidades mayores al umbral de 4.3%, 2.6%, 6.1% y 7.9% respectivamente en pérdidas, y en ganancias presentan valores de 4.2%, 4.5%, 6.5% y 7.4%, particular que se observa en la tabla 23. De acuerdo a estos resultados obtenidos, las categorías herbazal, intervención, plantación forestal y humedal, que, han actuado como categorías con cambios activos han sido las que han experimentado mayores transiciones tanto para ganar territorio como para perder, ocurriendo dichos cambios de manera rápida al sobrepasar el umbral.

Tabla 23. *Naturaleza de cambio en el segundo período de tiempo (2009-2020).*

	Pérdidas			Ganancias		
	Área de cambio anual (ha)	Naturaleza de cambio (%)		Área de cambio anual (ha)	Naturaleza de cambio (%)	
Nieve	20	1.3	Latente	12	0.8	Latente
Suelo desnudo	177	1.4	Latente	93	0.8	Latente
Herbazal	305	4.3	Activo	294	4.2	Activa
Intervención	235	2.9	Activo	504	4.5	Activa
Matorral	538	2.4	Latente	363	1.8	Latente
Plantación forestal	75	6.1	Activo	93	6.5	Activa
Humedal	21	7.9	Activo	13	7.4	Activa

Fuente: *Elaboración del Autor*

La figura 14, evidencia de mejor manera las intensidades activas o latentes de acuerdo con aquellas que exceden el umbral, siendo las categorías activas las mismas en pérdidas y ganancias.

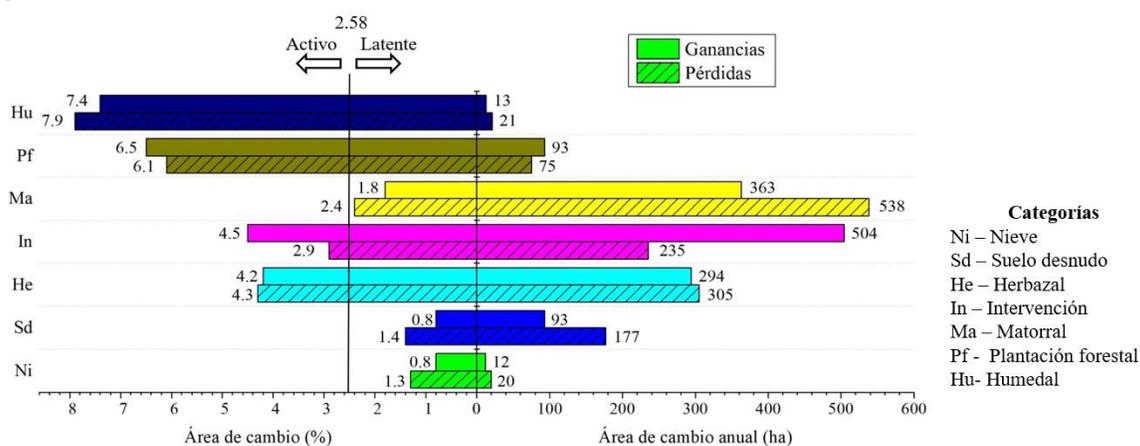


Figura 14. *Magnitud relativa de intensidad de cambio para cada una de las categorías, en cuanto a pérdidas y ganancias en el período (2009-2020)*

Fuente: *Elaboración del Autor*

5.3. Nivel de trascendencia

Se toma en cuenta los valores antes y después del umbral calculado para cada categoría y hace referencia a la transición que experimenta una categoría “m” que pierde a una categoría “n” que gana, identificando aquellas que son evitadas (antes del umbral) o dirigidas (después del umbral). Logrando denotar el área de transición anual observada durante los dos períodos de tiempo estudiados.

Las categorías representativas y de las cuales se evidenciará el nivel de trascendencia tanto en pérdidas como en ganancias, se escogió de acuerdo con su resultado en cuanto a transiciones y cambios de uso de suelo, en donde las categorías intervención, plantación forestal y humedal tuvieron nivel de naturaleza activo siendo de carácter decisivo para que se les seleccione para la representación dinámica de sus intensidades.

5.3.1. Trascendencia en términos de ganancia

En la figura 15 se muestra la dinámica de la categoría herbazal en donde las barras ubicadas al lado derecho antes del umbral son transiciones que han podido ser evitadas, siendo estas, el matorral, suelo desnudo y nieve, mientras que las categorías que han sobrepasado el umbral son aquellas que han dirigido sus cambios para la transición hacia el herbazal, siendo estas categorías, el humedal, plantación forestal y la intervención.

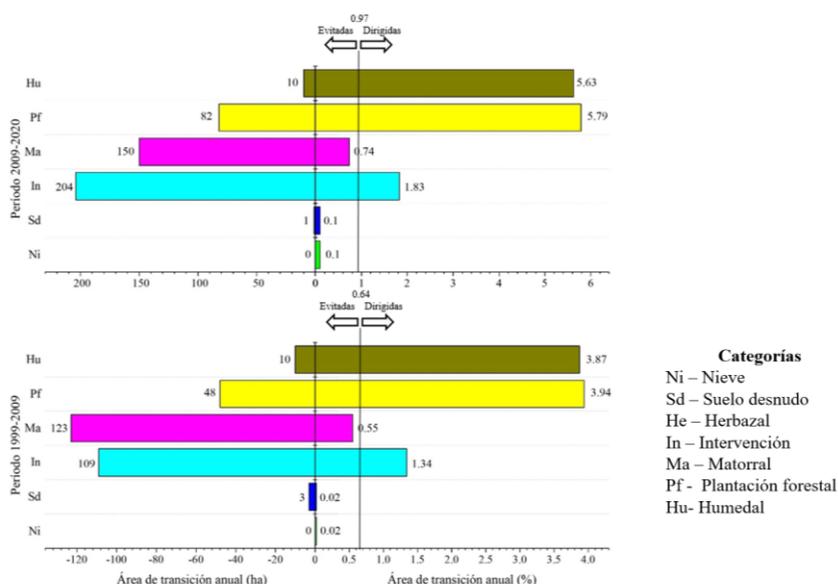
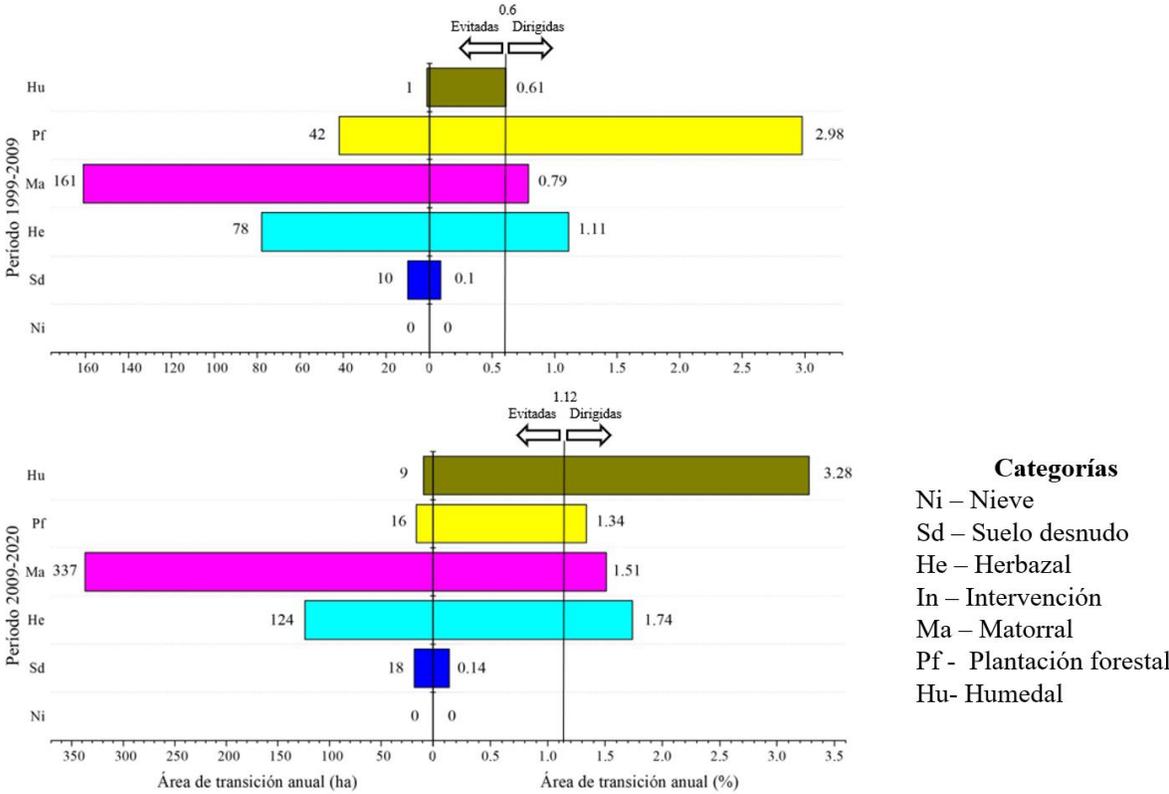


Figura 15. Trascendencia en términos de ganancia para la categoría herbazal

Fuente: Elaboración del Autor

En la figura 16 de la dinámica de la categoría intervención se evidencia que para el primer período de 1999 a 2009, la categoría plantación forestal posee la mayor transición dirigida, con un cambio anual de 2.98% que aporta a la categoría intervención, al igual que lo que ocurre con el humedal, matorral y herbazal. Para el segundo período de 2009 a 2020, el mayor cambio dirigido posee la categoría humedal con un 3.28%.



Nieve (Ni), Suelo desnudo (Sd), Herbazal (He), Intervención (In), Matorral (Ma), Plantación forestal (Pf), Humedal (Hu)

Figura 16. Trascendencia en términos de ganancia para la categoría intervención
Fuente: Elaboración del Autor

5.3.2. Trascendencia en términos de pérdidas

Las categorías de interés fueron herbazal e intervención. Siendo las categorías ubicadas al lado izquierdo del umbral aquellas que han intentado evitar la transición, mientras que las categorías que sobrepasan el umbral han dirigido sus cambios para ganar territorio de las categorías estudiadas.

Para la trascendencia en términos de pérdidas de la categoría herbazal (figura 17), durante el primer intervalo de tiempo, se distinguieron 4 categorías que se consideran con transiciones dirigidas hacia el cambio del herbazal, siendo éstas, la intervención, matorral, plantación

forestal y humedal con intensidades de 0.93%, 0.51%, 2.93% y 3.83% respectivamente, superando el umbral de 0.45%, estos cambios pueden deberse a que existen zonas de transición en donde la categoría herbazal se encuentra próxima al matorral, humedal y la plantación forestal. Las barras que no llegan a sobrepasar el umbral y que están hacia la izquierda son categorías con transiciones que pueden ser evitadas, siendo estas, el suelo desnudo y la nieve, las mismas que poseen cambios que pasan desapercibidos.

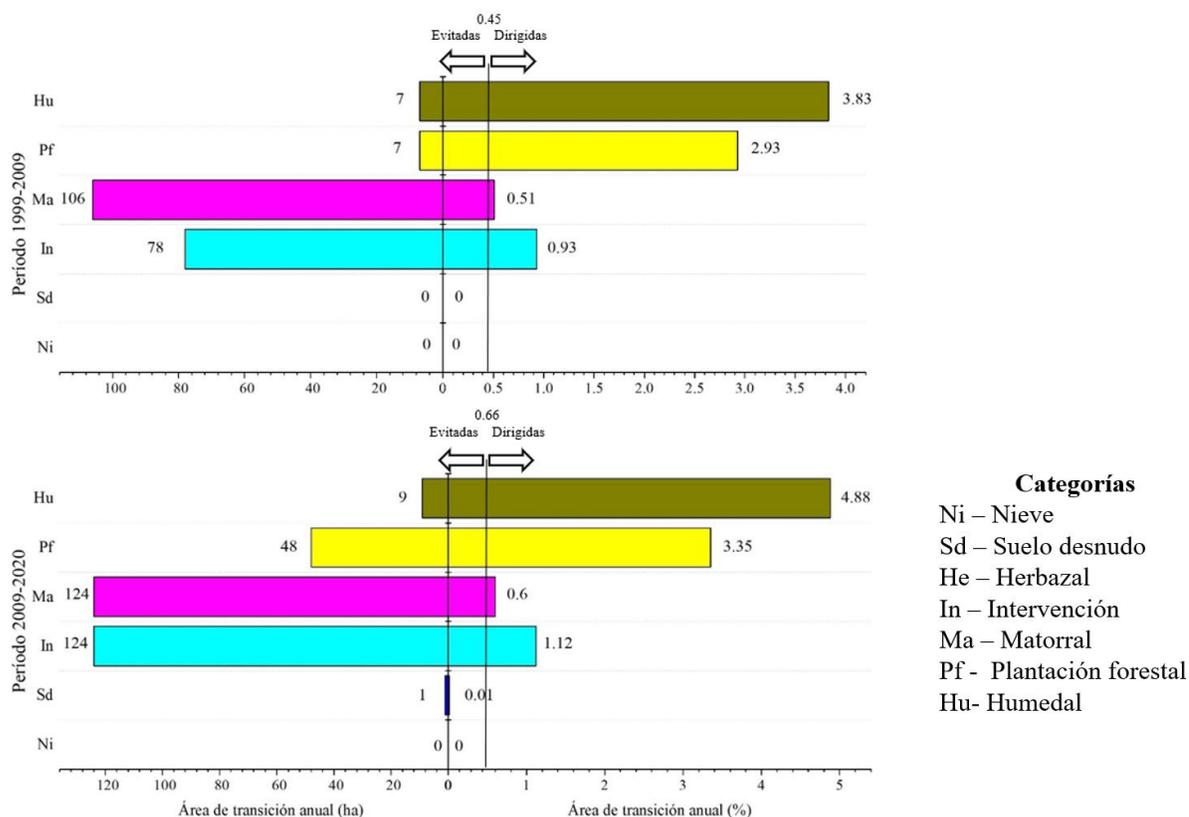


Figura 17. *Trascendencia en términos de pérdida para la categoría herbazal*
Fuente: *Elaboración del Autor*

En la figura 18 se observa la dinámica de la categoría intervención para el primer período de tiempo, en donde, se evidencia que las categorías cuyos cambios han sido dirigidos, son el humedal, matorral y herbazal ganando terreno de la intervención con una intensidad de cambio anual de 2.36%, 2.15% y 1.73% respectivamente. En cuanto a las categorías plantación forestal, suelo desnudo y nieve han tenido cambios que han podido ser evitados. Por otro lado, en el segundo período la plantación forestal es la que mayor área de transición

posee con 2.63%, seguido del herbazal con 1.56% y el humedal con 1.46% teniendo cambios que han podido ser evitados, las categorías, matorral, suelo desnudo y nieve.

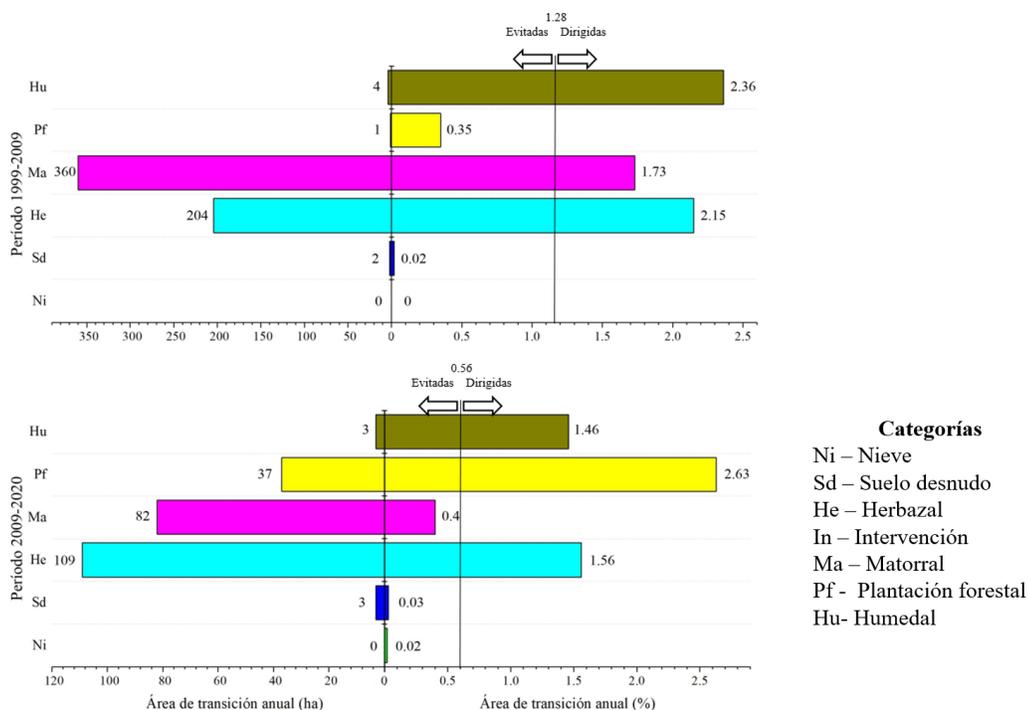


Figura 18. Trascendencia en términos de pérdida para la categoría herbazal
Fuente: Elaboración del Autor

6. Factor LS y C de la USLE

6.1. Factor LS

En la figura 19 se evidencian los valores calculados del factor LS, los cuales varían de 0.03 a 64.75, con una porción significativa de susceptibilidad a erosión sobre todo en las partes cercanas a los volcanes Chimborazo y Carihuairazo que forman parte de la reserva, con valores que van de 8.79 a 16.78 sin tomar en cuenta los valores críticos que ya son los que se encuentran en la parte más alta de los volcanes antes mencionados.

RESERVA DE PRODUCCIÓN FAUNÍSTICA CHIMBORAZO

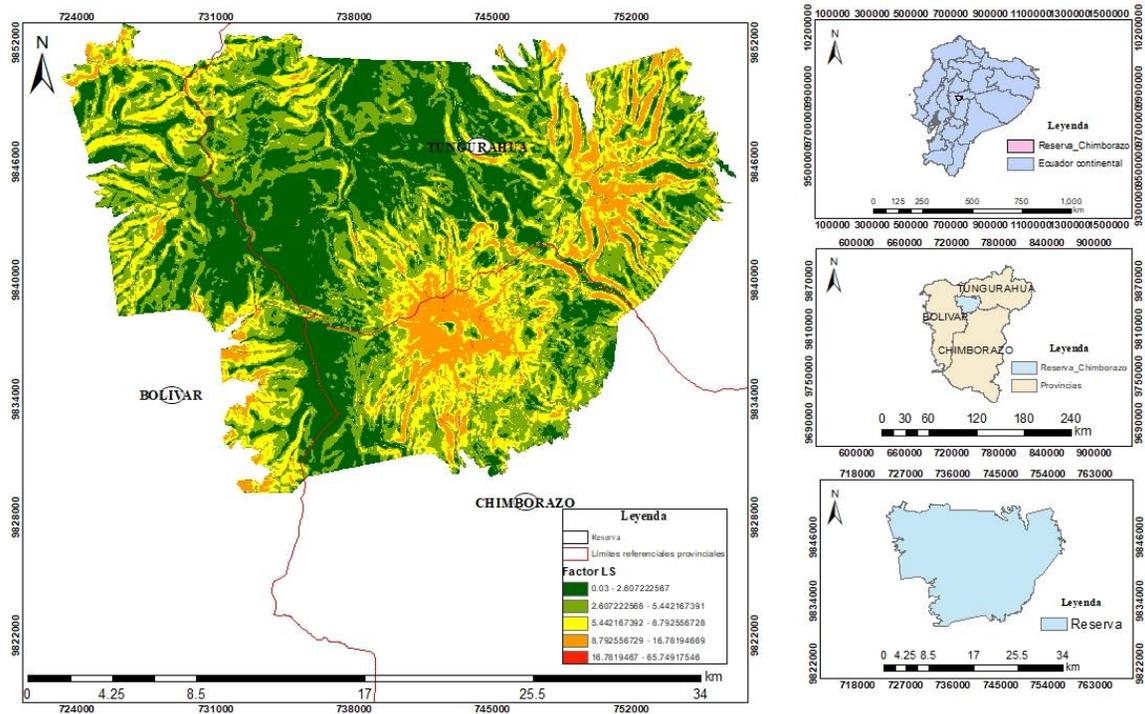


Figura 19. Valores del Factor LS
Fuente: Elaboración del Autor

6.2. Factor C

Para el Factor C de la USLE se tuvo que agrupar las coberturas de suelo y despreciar otras, tomándose en cuenta solamente 3 categorías: Suelo desnudo, la unión del herbazal y el cultivo y por último el matorral, teniendo cada uno los siguientes valores correspondientes al factor estudiado, como se observa en la tabla 24.

Tabla 24. Valores del factor C de acuerdo con las prácticas de uso de suelo de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo

PRÁCTICA	FACTOR C 1999	FACTOR C 2009	FACTOR C 2020
Suelo desnudo	0 – 0.22	0 – 0.22	0 – 0.49
Herbazal, cultivo	0.23 – 0.54	0.23 – 0.58	0.5 – 0.95
Matorral	0.55 – 2.72	0.59 – 2.13	0.96 – 2.15

Fuente: Elaboración del Autor

Para apreciar de mejor manera en la figura 20 se evidencia el cálculo del factor C correspondiente a cada año de estudio, en donde el color rojo representa los valores altos de C, asociados a sistemas montañosos cuyas áreas tienen procesos de erosión y tierra estéril.

El color amarillo que hace referencia a los valores intermedios de C se encuentra en la parte central del área de estudio y corresponde a la cobertura de matorral y cultivo, por último los valores bajos que se pintan de color verde por lo general representan una fuerte cobertura vegetal que en este caso constituye el herbazal.

Como se puede observar los valores más altos de P se encuentran en las zonas de montaña del volcán Chimborazo y Carihuairazo, en donde abunda la presencia de rocas de antiguas erupciones y suelo desnudo con pendiente en donde existe erosión

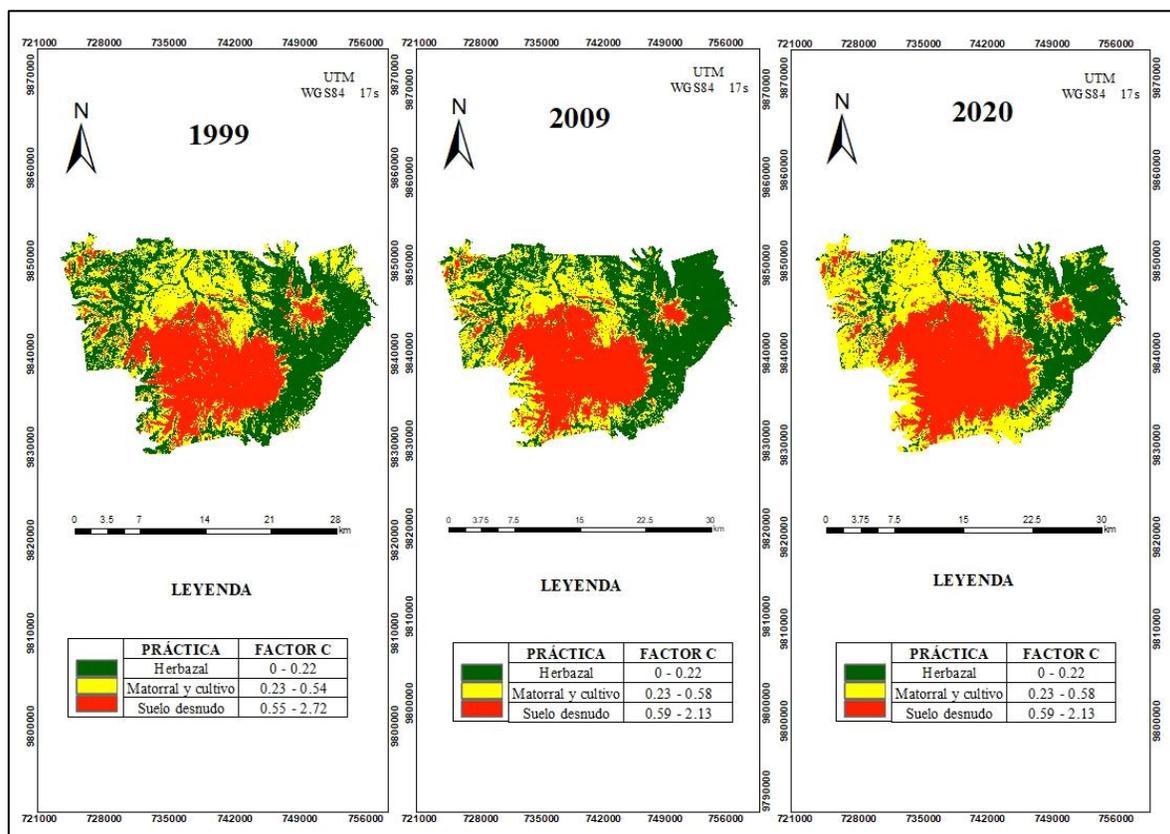


Figura 20. Factor C calculado para cada práctica de uso de suelo en los tres años de estudio 1999-2009-2020

Fuente: Elaboración del Autor

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El uso del algoritmo de máximo verosimilitud se realizó una clasificación supervisada para los años 1999, 2009 y 2020 con una precisión de 0.85%, 0.87% y 0.89% respectivamente.
- Se observa como el matorral ha ido ganando terreno sobre otras categorías identificándose que de 1999 a 2009 su territorio disminuye de 39.2% a 38.5%, mientras que para el segundo período el matorral pierde extensión y lo cede a otras categorías, sin embargo dichas categorías tienen su transición hacia el matorral y lo hacen ganar nuevamente territorio, llegando a ocupar un 42.1% de terreno en la reserva, hay que destacar también el comportamiento de la intervención dentro de la zona protegida ya que se observa como aumenta su extensión de 1999 a 2009 y disminuye para el segundo período de 2009 a 2020.
- En cuanto al análisis de transiciones sistemáticas se pudo analizar que debido a la proximidad entre categorías existen zonas de transición entre herbazal, suelo desnudo, humedal e intervención, razón por la cual la mayoría de transiciones ocurren entre estas categorías, ya sea ganando o cediendo territorio. En las transiciones sistemáticas observadas, en términos ganancias, el herbazal gana territorio de la intervención, plantación forestal y humedal, mientras que si nos referimos a pérdidas para el primer período de 1999 a 2009, la categoría herbazal también pierde y es reemplazada por las mismas categorías de las que antes se beneficiaba. Para el segundo período de tiempo se observa la pérdida de la intervención que es reemplazada también por humedal, plantación forestal y herbazal, sobre todo en zonas que converge el humedal con el pastoreo como se observó en la zona correspondiente a la provincia de Tungurahua.
- Las categorías herbazal, humedal e intervención se mantienen con cambios activos, cuyas transiciones se dan de manera rápida tanto para pérdidas como para ganancias, al igual que tienen transiciones de intensidad dirigida con respecto a ganancia y pérdida de sus superficies en los dos intervalos de tiempo. Mientras que las demás categorías mantienen su cambio latente es decir sus transiciones se dan de manera

paulatina, en especial la categoría nieve en la que no se aprecia su intensidad de cambio ya que pasa desapercibida.

- En cuanto a los factores LS y C de la USLE debemos destacar que los sistemas de montaña del volcán Chimborazo y Carihuairazo se encuentran susceptibles a erosión debido a que poseen zonas de suelo desnudo que en su mayoría constituyen las rocas de erupciones anteriores y que por los fuertes vientos y pendientes son arrastrados hacia las planicies, lo que provoca que la superficie del suelo se debilite y se erosione, pudiendo convertirse en un factor de riesgo para los ecosistemas tratados.

Recomendaciones

- La investigación muestra la necesidad de diseñar e implementar planes, proyectos y acciones de gestión para el control y la sostenibilidad de los usos del suelo. En especial políticas que velen para que no ocurran invasiones dentro de la zona protegida debido a la vulnerabilidad de sus ecosistemas, ya que la reserva se encuentra albergando no solamente al páramo sino también gran extensión de humedales que constituyen una gran reserva de agua.
- Es necesario continuar con el monitoreo del área de estudio e indagar sobre las consecuencias de la degradación del suelo y los efectos del cambio climático sobre la zona.
- Se sugiere estudios que tengan como su principal objetivo el análisis de los humedales y el estado en el que estos se encuentran, ya que junto con los páramos constituyen la principal fuente hídrica del país.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, F., & Botequilha, A. (2012). Selección de métricas de paisaje mediante análisis de componentes principales para la descripción de los cambios de uso y cobertura del suelo del Algarve, Portugal. *GeoFocus*, 12, 93–121.
- Aldwaik, S. Z., & Pontius, R. G. (2012). Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. *Landscape and Urban Planning*, 106(1), 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.010>
- Andrade, J. (2016). *Determinación del estado de conservación de los bofedales de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6378/1/98T00109.pdf>
- Buzai, G. D., & Baxendale, C. A. (2010). Análisis espacial con sistema de información geográfica. Aportes de la geografía para la elaboración del diagnóstico en el ordenamiento territorial. *Revista Postgrados UNAH*, 4(1), 55–67. http://faces.unah.edu.hn/decanato/images/stories/PDF/Revista_Congreso_Vol1/analisis_espacial_sig.pdf
- Cartaya, S., Zurita, S., Rodríguez, E., & Montalvo, V. (2014). Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí, Ecuador. *Revista Ud Y La Geomática*, 9, 5–17. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.udgeo.2014.9.a01>
- Casco, G., Arias, L., Mareco, H., & Kindgard, A. (2016). *Informe final de evaluación de exactitud temática del mapa de cobertura forestal y cambio de uso de la tierra para los años 2011, 2013 y 2015*. http://www.infona.gov.py/application/files/3415/3995/7157/Evaluacion_exactitud_Mapas_111315_160516.pdf
- Castañeda, J. (2016). *Desarrollo de una metodología de clasificación semiautomática de formas del relieve en la geografía colombiana basado en clasificación de objetos (Tesis de Magíster)*. Universidad Distrital Francisco José de Calda.
- Cede, R., Cabrera, E., Vargas, D. M., Galindo, G., García, M. C., Ordoñez, M. F., & Alonso, F. (2011). Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones Geológicas. *SIGMUR. SIG y Teledetección En La Universidad de Murcia*, 84(4), 3–4. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000400004>

- Cerda, J., & Villarroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1), 54–58. <https://doi.org/10.4067/s0370-41062008000100008>
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., & Borja, P. (2014). *Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos*.
- Powers, D. Evaluation: from precision, recall and F-factor to ROC, informedness, markedness & correlation, J. Mach. Learn. Technol. 2 (2011) 37-63
- FAO. (n.d.). *Tierra | Tierras y Aguas | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved December 7, 2020, from <http://www.fao.org/land-water/land/es/>
- Fuller, R. M., Smith, G. M., & Devereux, B. J. (2003). The characterisation and measurement of land cover change through remote sensing: Problems in operational applications? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(3), 243–253. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(03\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(03)00004-7)
- Gallardo, M., & Martínez, J. (2014). *Cambios de usos del suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid: analizando el pasado y simulando el futuro*. 480. <https://doi.org/https://doi.org/10.13140/2.1.4842.6247>
- Guamán, E. (2020). *Transiciones en la cobertura y uso de la tierra en la zona de transición cuenca del río Chambo: período 1998-2007-2019*. Tesis Pregrado. Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador
- Landis, J., & Koch, G. (1977). An Application of Hierarchical Kappa-type Statistics in the Assessment of Majority Agreement among Multiple Observers. *Biometrics*, 33(2), 363–374.
- Llunitaxi, L. (2020). *transiciones en la cobertura y uso de la tierra en la zona hídrica chambo – penipe: período 1998-2007-2019*. Tesis de Pregrado. UNiversidad NAcinal de Chimborazo, Ecuador.
- MAE. (n.d.). *Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, 26 años de protección. – Ministerio del Ambiente y Agua*. Retrieved June 20, 2020, from <https://www.ambiente.gob.ec/reserva-de-produccion-de-fauna-chimborazo-26-anos->

de-proteccion/

- Martín, J., Cánovas, F., Alonso, F., Gomariz, F. J., & Moreno, J. (2012). *Clasificación de coberturas del suelo en la Demarcación Hidrográfica del Segura mediante técnicas de minería de datos*. 19–21. https://www.researchgate.net/profile/Fulgencio_Canovas-Garcia/publication/273144096_Clasificacion_de_coberturas_del_suelo_en_la_Demarcacion_Hidrografica_del_Segura_mediante_tecnicas_de_mineria_de_datos/links/54fa3c170cf20b0d2cb63793.pdf
- Moreno, A. (2017). *Análisis de las transiciones de los cambios de uso y cobertura del suelo mediante técnicas estadísticas y sistemas de información geográfica de los años (2001-2016) en el cantón Chambo, provincia de Chimborazo*. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf
- Ordóñez, M. V. (2011). Influencia del uso de suelo y la cobertura vegetal natural en la integridad ecológica de los ríos altoandinos al noreste del Ecuador. *Tesis de Maestría*, 45.
- Phinzi, K., Ngetar, N. S., & Ebhuoma, O. (2020). Soil erosion risk assessment in the Umzintlava catchment (T32E), Eastern Cape, South Africa, using RUSLE and random forest algorithm. *South African Geographical Journal*, 00(00), 1–24. <https://doi.org/10.1080/03736245.2020.1716838>
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Quillupangui, C. (2019). *Determinación del comportamiento espectral de coberturas y usos de la tierra de la subcuenca del río San Pedro*. Tesis de Pregrado. Universidad Central de Ecuador. Ecuador.
- Radaux, J., & Bogaert, P. (2017) Good practices for object-based accuracy assessment, *Remote Sens*, 9. Epub ahead of print
- Rodríguez, A. (2011). Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos , estudio de caso piedemonte de Villavicencio , Meta (Tesis de Maestría). In *Meta*. Universidad Nacional de Colombia.

- Senisterra, G., & Gaspari, F. (2014). Análisis del uso del suelo en el contexto de su dinámica espacio temporal en una cuenca rural serrana. Argentina. *Revista de Tecnología*, 13(2), 53–60. <https://doi.org/10.18270/rt.v13i2.1885>
- Simbangala, M., Campos, B., & Arriaga, J. (2015). Transiciones sistemáticas de cobertura de suelo en la Región Costa Maya, Quintana Roo, México, 1993-2010. *Perspectiva Geográfica*, 20(1), 103. <https://doi.org/10.19053/01233769.4501>
- Teixeira, Z., Teixeira, H., & Marques, J. C. (2014). Systematic processes of land use/land cover change to identify relevant driving forces: Implications on water quality. *Science of the Total Environment*, 470–471, 1320–1335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.098>
- Valle, R. (2019). *Cambio de uso y cobertura de suelo en la zona hídrica del río Cebadas, provincia de Chimborazo*.
- Velázquez, A., Mas, J., Díaz, J., Mayorga, R., Alcantara, P., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., & Palacio, J. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica INE*, 62(62), 21–37. http://dialnet.unirioja.es/servlet/dfichero_articulo?codigo=2897113

ANEXOS

Anexo 1. Metadatos de las imágenes satelitales descargadas

Características Metadata	1999	2009	2019	2020
Locación del centro de la escena	Lat: 1°26'45.60"S Long: 78°49'48"W	Lat: 1°26'59.78"S Long: 78°48'29.16"W	Lat: 1°26'46.46"S Long: 78°46'37.88"W	Lat: 1°26'46.72"S Long: 78°47'11.58"W
Tipo de sensor	Landsat ETM+	Landsat ETM+	OLI	OLI
Altitud del sensor (km)	705	705	705	705
Elevación del suelo (km)	6.2	6.2	6.2	6.2
Tamaño del pixel	30m ²	30m ²	30m ²	30m ²
Fecha de la toma de la imagen	29/oct/1999	06/sep/2009	25/ago/2019	08/jun/2020
Hora de la toma de la imagen	15:19:21	15:16:38	15:26:37	15:06:58
Modelo atmosférico	Invierno de la latitud media			
Modelo del aerosol	Rural	Rural	Rural	Rural
Recuperación de aerosol	2 Band (K-T)	2 Band (K-T)	2 Band (K-T)	2 Band (K-T)
Visibilidad Inicial	40%	40%	35%	35%

Anexo 2. *Primer punto de control de arbustal (el arbustal se tomó en cuenta dentro de la categoría matorral)*



Anexo 3. Toma de puntos de control de humedal.



Anexo 4. Toma de puntos de control de suelo desnudo.



Anexo 5. Toma de puntos de control en zona de transición entre suelo desnudo, humedal y herbazal (tomando en cuenta que el pastizal natural se tomó en cuenta dentro de la categoría herbazal).



Anexo 6. Toma de puntos de intervención.



Anexo 7. Zona de transición entre la categoría intervención herbazal y matorral.



Anexo 8. Toma de puntos de la categoría herbazal.



Anexo 9. Toma de puntos de bosque nativo (el bosque nativo se toma en cuenta dentro de la categoría matorral)



Anexo 10. Estimación de “c” de acuerdo con la ecuación de Fuller, Smith & Devereux (2003)

$$d_o = d_c + d_{ci} + d_e + d_{e \neq e}$$

$$d_c = a_1 a_2 c$$

$$d_{ci} = \frac{a_1(1 - a_2)c(n - 2)}{n - 1} + \frac{a_2(1 - a_1)c(n - 2)}{n - 1} + \frac{(1 - a_1)(1 - a_2)c(n - 2)}{n - 1}$$

$$d_e = a_1(1 - a_2)(1 - c) + a_2(1 - a_1)(1 - c)$$

$$d_{e \neq e} = \frac{(1 - a_1)(1 - a_2)(1 - c)(n - 2)}{n - 1}$$

$$d_o = a_1 \left[a_2 \left(\frac{n - 4}{n - 1} - \frac{c(n - 6)}{n - 1} \right) + \frac{(c - 1)(n - 3)}{n - 1} \right] + \frac{a_2(c - 1)9(n - 3)}{n - 1} - \left(\frac{c}{n - 1} \right) + \left(\frac{n - 2}{n - 1} \right)$$

$$c = \frac{a_1(a_2(n - 4) - n + 3) - a_2(n - 3) + d_o(-n) + d_o + n - 2}{a_1(a_2(n - 6) - n + 3) - a_2(n - 3) + 1}$$

Anexo II. Cálculo del error de acuerdo con Fuller, Smith & Devereux (2003) mapa 1999-2009

Una comparación del Mapa de cobertura terrestre de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo 1999 con el Mapa de cobertura terrestre 2009 para evaluar las posibles diferencias debidas a cambio y los debidos a errores; también para identificar cambios ocultos por errores; los valores representan las soluciones de las ecuaciones 4 a la 9 e información resumida adicional.

Proportional Accuracy 1999	a_1	0.87
Proportional Accuracy 2009	a_2	0.85
Proporción indicativa de cambio	c	0.28
Número de clases	n	7

Áreas de cambio (c)			
	a_2	$1 - a_2$	Total
a_1	0.21	0.03	0.24
		<i>0.006</i>	0.01
$1 - a_1$	0.03	0.005	0.03
	<i>0.005</i>	<i>0.001</i>	0.01
Total	0.24	0.04	0.28

Áreas con no cambio (1-c)			
	a_2	$1 - a_2$	Total
a_1	0.53	0.09	0.63
		0.01	0.09
$1 - a_1$	0.08	0.002	0.00
Total	0.61	0.11	0.72

	Cobertura proporcional	Porcentaje del área del mapa
Mapas que muestran diferentes clases (suma de celdas pintadas)	0.45	45%
Mapas que muestran las mismas clases (suma de las celdas sin pintar)	0.55	55%

Cuando el mapeo muestra la situación real (ya sea cambio o estasis), el texto de la celda se muestra en negrita; los verdaderos cambios ocultos por errores son el texto en cursiva; donde el mapeo registra una diferencia (ya sea un cambio o un error), las celdas están sombreadas.

Anexo 12. Cálculo del error de acuerdo con Fuller (2003) mapa 2009-2020

Una comparación del Mapa de cobertura terrestre de la Reserva de Producción Faunística Chimborazo 2009 con el Mapa de cobertura terrestre 2020 para evaluar las posibles diferencias debidas a cambio y los debidos a errores; también para identificar cambios ocultos por errores; los valores representan las soluciones de las ecuaciones 4 a la 9 e información resumida adicional.

Proportional Accuracy 2009	a_1	0.85
Proportional Accuracy 2020	a_2	0.89
Proporción indicativa de cambio	c	0.26
Número de clases	n	7

Áreas de cambio (c)			
	a_2	$1 - a_2$	Total
a_1	0.20	0.02	0.22
		<i>0.004</i>	0.00
$1 - a_1$	0.03	0.004	0.03
	<i>0.006</i>	<i>0.001</i>	0.01
Total	0.23	0.03	0.26

Áreas con no cambio (1-c)			
	a_2	$1 - a_2$	Total
a_1	0.56	0.07	0.63
$1 - a_1$	0.10	0.01	0.11
		0.002	0.00
Total	0.66	0.08	0.74

	Cobertura proporcional	Porcentaje del área del mapa
Mapas que muestran diferentes clases (suma de celdas pintadas)	0.43	43%
Mapas que muestran las mismas clases (suma de las celdas sin pintar)	0.57	57%

Cuando el mapeo muestra la situación real (ya sea cambio o estasis), el texto de la celda se muestra en negrita; los verdaderos cambios ocultos por errores son el texto en cursiva; donde el mapeo registra una diferencia (ya sea un cambio o un error), las celdas están sombreadas.