



# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

**FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES  
RENOVABLES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MANEJO Y CONSERVACIÓN  
DEL MEDIO AMBIENTE**

## **TEMA:**

**“DINÁMICA Y MODELAMIENTO FUTURO DE CAMBIOS Y  
FRAGMENTACIÓN EN LA COBERTURA Y USO DEL  
SUELO EN LA HOYA DE LOJA EN EL PERIODO 2001 -  
2016”**

Tesis previa a la obtención de título de  
**Ingeniera en Manejo y Conservación  
del Medio Ambiente**

## **AUTORA:**

Evelyn Liliana Jiménez Borja

## **DIRECTOR:**

Ing. Juan Armando Maita Chamba Mg. Sc.

**LOJA - ECUADOR**

**2019**



## CERTIFICACIÓN

Juan Maita Chamba, Mg. Sc. Geomática.  
**DIRECTOR DE TESIS**

En calidad de director de tesis certifico que la Señorita **Evelyn Liliana Jiménez Borja**, egresada de la carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, de la Universidad Nacional de Loja, culminó el proyecto de titulación denominado **“DINÁMICA Y MODELAMIENTO FUTURO, DE LOS CAMBIOS Y FRAGMENTACIÓN EN LA COBERTURA Y USO DEL SUELO DE LA HOYA DE LOJA EN EL PERIODO 2001 - 2016”**, el mismo que ha sido debidamente revisado y corregido, cumpliendo con las normas reglamentarias vigentes, dentro del cronograma establecido.

Por lo cual, autorizo que se continúe con el proceso que correspondiente.

Loja, 12 de abril de 2019.

Atentamente,

Juan Maita Chamba, Mg. Sc. Geomática.  
**DOCENTE - INVESTIGADOR DE LA FACULTAD AGROPECUARIA  
Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES, UNL.**  
Cc. Archivo personal



## **CERTIFICACIÓN**

En calidad de Tribunal Calificador de la Tesis titulada **“DINÁMICA Y MODELAMIENTO FUTURO, DE LOS CAMBIOS Y FRAGMENTACIÓN EN LA COBERTURA Y USO DEL SUELO DE LA HOYA DE LOJA EN EL PERIODO 2001 - 2016”**, de autoría de la señorita egresada de la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente **Evelyn Liliana Jiménez Borja**, se certifica que la misma ha sido revisada e incorporadas todas las observaciones realizadas por sus miembros, y una vez revisada se ha procedido a la respectiva calificación.

Por lo tanto autorizamos a la señorita egresada, la versión final de la tesis y entrega oficial para su sustentación pública y difusión.

Loja, 14 de mayo de 2019

Atentamente,

Ing. Vinicio Alvarado, Mg. Sc.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Ing. Raquel Hernández, Mg. Sc.  
**VOCAL DEL TRIBUNAL**

Ing. Aníbal González, Mg. Sc.  
**VOCAL DEL TRIBUNAL**



### **AUTORÍA**

Yo, Evelyn Liliana Jiménez Borja, declaro ser autora del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

**Autor:** Evelyn Liliana Jiménez Borja

**Firma:**  .....

**Cédula:** 1600474850

**Fecha:** Loja, 28 de mayo de 2019



**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DE LA AUTORA PARA LA  
CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN  
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Yo, **Evelyn Liliana Jiménez Borja**, declaro ser autora de la tesis titulada “**DINÁMICA Y MODELAMIENTO FUTURO, DE LOS CAMBIOS Y FRAGMENTACIÓN EN LA COBERTURA Y USO DEL SUELO DE LA HOYA DE LOJA EN EL PERIODO 2001 - 2016**”, como requisito para optar al grado de: Ingeniera en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

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

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los veintiocho días del mes de mayo de dos mil diecinueve, firma la autora.

**Firma:**  .....

**Autora:** Evelyn Liliana Jiménez Borja

**Número de cédula:** 1600474850

**Dirección:** Loja, Sauces Norte.

**Correo electrónico:** [evyjimnz@gmail.com](mailto:evyjimnz@gmail.com)

**Teléfono:** 2 541 791

**Celular:** 0986734847

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Director de Tesis:** Ing. Juan Maita Ch. Mg. Sc.

**Tribunal Calificador:** Ing. Vinicio Alvarado Mg. Sc.

Ing. Raquel Hernández Mg. Sc.

Ing. Aníbal González Mg. Sc.

## **AGRADECIMIENTOS**

En estas líneas quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible este trabajo investigativo, principalmente a mi familia, mis padres y hermanos, quienes con su apoyo incondicional y aliento diario me impulsaban cada día a cumplir mis metas.

A mis maestros a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias por su paciencia y enseñanza a lo largo de toda la carrera; de igual forma, agradezco a mi Director de Tesis, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo.

Por último pero no menos importante, agradezco a todos mis amigos y amigas con los que he compartido buenos momentos y, que especialmente me dieron su apoyo durante los momentos complicados para concluir mi carrera universitaria y trabajo de titulación.

*La Autora.*

## **DEDICATORIA**

Todo en la vida requiere de arduo esfuerzo, dedicación, sacrificio y paciencia, valores y principios que me han sido inculcados a lo largo de toda mi vida por mis padres, hermanos y mi sobrina Sofía; gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

Por sus enseñanzas, por su motivación, por su apoyo en mi formación personal y académica, confiaron en mí en todo momento y no dudaron que lograría alcanzar mis metas, a ellos les dedico todos mis logros y finalmente este trabajo de titulación.

*La Autora.*

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
2.1    SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) .....	5
2.2    CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO .....	5
2.3    ANÁLISIS MULTITEMPORAL.....	6
2.3.1    Clasificación de imágenes satelitales.....	6
2.3.2    Imágenes satelitales.....	8
2.3.3    Procesamiento radiométrico y atmosférico de las imágenes.....	10
2.3.4    ArcGis.....	11
2.3.5    QGis.....	12
2.4    FRAGMENTACIÓN DE COBERTURAS .....	12
2.4.1    Métricas de fragmentación. ....	14
2.4.2    FRAGSTATS .....	15
2.5    CONECTIVIDAD DE LAS ÁREAS NATURALES.....	15
2.5.1    GUIDOS .....	16
2.6    MODELAMIENTO DE ESCENARIOS FUTUROS.....	17
2.6.1    TerrSet .....	18
<b>III. METODOLOGÍA</b> .....	<b>19</b>
3.1    ÁREA DE ESTUDIO .....	19
3.2    BASE DE DATOS.....	21
3.3    ESTABLECIMIENTO DE LOS CAMBIOS ESPACIO TEMPORALES DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO .....	23
3.3.1    Pre procesamiento de imágenes satelitales .....	23
3.3.2    Clasificación de coberturas vegetales.....	25
3.3.3    Análisis de coberturas vegetales.....	26
3.4    ESTABLECIMIENTO DEL GRADO Y PATRONES DE FRAGMENTACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL .....	26
3.5    ESTABLECIMIENTO DE UN MODELO DE CONECTIVIDAD DE LAS ÁREAS NATURALES.....	28
3.6    MODELAMIENTO DE UN ESCENARIO FUTURO DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO PARA EL AÑO 2030.....	29
3.6.1    Generación de Información Base .....	29
3.6.2    Modelación de Escenario Futuro - 2030.....	29

<b>IV. RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
4.1 CAMBIOS ESPACIO TEMPORALES DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO QUE SE HA PRODUCIDO EN LA HOYA DE LOJA, A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS MULTITEMPORAL .....	34
4.2 GRADO Y PATRONES DE FRAGMENTACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA HOYA DE LOJA.....	35
4.3 MODELO DE CONECTIVIDAD DE LAS ÁREAS NATURALES EN LA HOYA DE LOJA... ..	39
4.4 MODELADO DE UN ESCENARIO FUTURO DE LA CUBERTURA Y USO DEL SUELO PARA EL AÑO 2030 EN LA HOYA DE LOJA .....	44
<b>V. DISCUSIÓN .....</b>	<b>49</b>
5.1 CAMBIOS ESPACIO TEMPORALES DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO DE LA HOYA DE LOJA DEL AÑO 2001 - 2016 .....	49
5.2 GRADO Y PATRONES DE FRAGMENTACIÓN DE LA COBERTURA DE VEGETAL.....	51
5.3 MODELO DE CONECTIVIDAD DE LAS ÁREAS NATURALES.....	53
5.4 MODELADO DE UN ESCENARIO FUTURO DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO PARA EL AÑO 2030.....	54
<b>VI. CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>65</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características principales de los Satélites Landsat 7 y 8 .....	10
Cuadro 2. Variables base consideradas en el desarrollo del trabajo investigativo .....	22
Cuadro 3. Métricas utilizadas en el estudio de índice de fragmentación de la Hoya de Loja .....	27
Cuadro 4. Variables de Modelado Futuro .....	31
Cuadro 5. Orden de variables del submodelo de transición final, con sus respectivas parametrizaciones y resultados del Multi-Player Perceptron. ....	32
Cuadro 6. Métricas de fragmentación de las coberturas clasificadas en los años 2001 y 2016 .....	36
Cuadro 7. Cambios porcentuales de los valores de las métricas para cada año y cobertura .....	36
Cuadro 8. Dinámica multitemporal de los parámetros morfológicos espaciales de la cobertura páramo.....	40
Cuadro 9. Dinámica multitemporal de los parámetros morfológicos espaciales de la cobertura bosque.....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración y definición de clases genéricas de MSPA .....	17
Figura 2. Área de Estudio – Hoya de Loja .....	19
Figura 3 Diagrama de flujo del desarrollo metodológico .....	22
Figura 4 Interfaz de la extensión SWAT .....	23
Figura 5 Interfaz de usuario de Semi Automatic Classification Plugin - Preprocessing.....	24
Figura 6 Interfaz de usuario de Semi Automatic Classification Plugin – Clasificación de coberturas	25
Figura 7 Interfaz de usuario de FRAGSTATS .....	27
Figura 8 Interfaz de usuario de GUIDOS - cálculo de conectividad de áreas naturales .....	28
Figura 9 Interfaz de usuario de LCM - Transiciones potenciales .....	30
Figura 10 Interfaz de usuario LCM - Predicción de cambio .....	33
Figura 11. a) Cobertura y Uso de Suelo de la Hoya de Loja, del año 2001. b) Cobertura y Uso de Suelo de la Hoya de Loja, del año 2016.....	34
Figura 12. Cambio de cobertura y uso de suelo en la Hoya de Loja, expresado en porcentaje y número de hectáreas.....	35
Figura 13 Comparación de resultados de métrica de Número de Parches para el año 2001 – 2016 ....	37
Figura 14. Comparación de resultados de métrica de Densidad de Parche para el año 2001 – 2016... 37	
Figura 15 Comparación de resultados de métrica de Índice de Parche Más Grande para el año 2001 – 2016.....	38
Figura 16 Comparación de resultados de métrica de Tamaño Medio del Parche para el año 2001 – 2016.....	38
Figura 17 Comparación de resultados de métrica de Índice de Forma para el año 2001 – 2016 .....	39
Figura 18. Ilustración de conectores de la cobertura páramo para el año 2001: a) lazos b) puentes c) ramas. Ilustración de conectores de la cobertura páramo para el año 2016: d) lazos e) puentes f) ramas.....	41
Figura 19. Ilustración de conectores de la cobertura bosque para el año 2001: a) lazos b) puentes c) ramas. Ilustración de conectores de la cobertura bosque para el año 2016: d) lazos e) puentes f) ramas.....	43
Figura 20 Probabilidad de cambio en la Hoya de Loja – 2030.....	45
Figura 21. a) Ilustración de probabilidad de cambio de la cobertura páramo para el año 2030. ....	46
Figura 22 b) Ilustración de probabilidad de cambio de la cobertura bosque para el año 2030. ....	47

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>ARCOM</b>	Agencia de Regulación y Control Minero
<b>CUS</b>	Cobertura y Uso del Suelo
<b>DEM</b>	Modelo de Elevación Digital (Siglas en inglés)
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Siglas en inglés)
<b>IGM</b>	Instituto Geográfico Militar
<b>INEC</b>	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
<b>IPCC</b>	Panel Intergubernamental del Cambio Climático (Siglas en inglés)
<b>LCM</b>	Land Change Modeler
<b>MAE</b>	Ministerio del Ambiente
<b>MAGAP</b>	Ministerio de Agricultura Acuicultura Ganadería y Pesca
<b>MSPA</b>	Análisis de Patrones Espaciales Morfológicos (Siglas en inglés)
<b>ROI</b>	Región de Interés (Siglas en inglés)
<b>SCP</b>	Semi Automatic Classification Plugin
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográfica
<b>SNI</b>	Sistema Nacional de Información
<b>USGS</b>	Servicio Geológico de los Estados Unidos (Siglas en inglés)

**“Dinámica y modelamiento futuro de cambios y fragmentación en la cobertura y uso del suelo de la Hoya de Loja en el periodo 2001 - 2016.”**

## RESUMEN

Las actividades antrópicas como la agricultura, ganadería, expansión poblacional, crecimiento y desarrollo urbano industrial son los principales precursores del cambio de cobertura y uso del suelo, lo que conlleva a la pérdida de biodiversidad, alteración de ecosistemas y degradación de bosques. El presente estudio fue aplicado en la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja, donde se utilizó la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para el desarrollo metodológico semiautomático aplicado; mediante el uso de *ArcGis* y *QGis* – extensión *Semi Automatic Classification Plugin*, se determinó el cambio de cobertura y uso del suelo entre los años 2001 y 2016, así como el uso de *FRAGSTATS* permitió establecer el estado de fragmentación de la zona, seguido de la identificación de modelos de conectividad se realizó a través de *GUIDOS* y finalmente la generación de un escenario futuro para el año 2030 de la cobertura y uso de suelo ejecutado en *TerrSet* – extensión *Land Change Modeler*. En la cuenca alta del río Zamora la cobertura de páramo perdió 458 ha (-1,66%) de extensión, mientras que los bosques incrementaron 831 ha (+2,99%) de área sin embargo, las zonas forestales poseen un alto índice de fragmentación y los páramos son propensos a fragmentarse con rapidez; a más de que presentan una probabilidad conjunta (alta y muy alta) del 11,37% para la cobertura páramo y 7,34% para la cobertura bosque, de sufrir cambios en el año 2030. Los modelos de conectividad son una importante herramienta para contrarrestar los cambios producidos dentro del área de trabajo, por lo que se presentan mapas de zonificación como un instrumento de apoyo, para su posible aplicación o como referente a futuros estudios.

**Palabras clave:** Cambio de cobertura – Fragmentación – Conectividad – Modelado futuro – Loja.

## ABSTRACT

Anthropic activities such as agriculture, livestock, population expansion, industrial growth and urban development are the main precursors of the change in coverage and land use, which leads to the loss of biodiversity, alteration of ecosystems and degradation of forests. The present study was applied in the upper basin of the Zamora or Hoya de Loja river, where Remote Sensing and Geographic Information Systems were used for the semi-automatic methodological development applied; through the use of ArcGis and QGis - Semi Automatic Classification Plugin extension, the change of coverage and land use between 2001 and 2016 was determined, as well as the use of FRAGSTATS allowed to establish the state of fragmentation of the area, followed by the identification of connectivity models was carried out through GUIDOS and finally the generation of a future scenario for the year 2030 of the coverage and land use executed in TerrSet - extension Land Change Modeler. In the upper basin of the Zamora River, moorland coverage lost 458 ha (-1.66%) of extension, while the forests increased 831 ha (+2.99%) of area, nevertheless the forest areas have a high index of fragmentation and the moorlands are prone to fragment quickly. In addition, they have a joint probability (high and very high) of 11.37% for the moorland coverage and 7.34% for forest coverage, to undergo changes in the year 2030. The connectivity models are an important tool to counteract the changes produced and to be produced within the work area, for which zoning maps are presented as a support instrument, for its possible application or as a reference for future studies.

**Key words:** Land Change - Fragmentation - Connectivity – Land modeling - Loja.

## I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas naturales proporcionan una gran cantidad de recursos y servicios a la humanidad, por lo que controlar la degradación y preservación de ecosistemas se ha convertido en un concepto central de las políticas locales para la conservación del agua, planificación del uso de la tierra, la utilización de los recursos regionales y la gestión del ambiente (Song et al., 2015, Zhao et al., 2013). Actualmente, estos servicios se encuentran bajo una gran presión debido a las actividades antropogénicas, como asentamientos, áreas edificadas, minería, actividades agrícolas y principalmente el cambio de cobertura y uso del suelo (CUS) (Tolessa, Senbeta, y Kidane, 2017).

En los últimos años el estudio de las causas, los procesos y las consecuencias de los CUS, han sido los principales temas de investigación a nivel ambiental (Morales et al., 2016). La localización y monitoreo del CUS utilizando datos de imágenes multiespectrales ha sido un tema de gran interés de investigación en teledetección; por lo que ha atraído amplios intereses en las comunidades de medio ambiente, geografía, ecología, hidrología y GIS (Srivastava et al., 2012).

El interés de la comunidad científica por la fragmentación, radica en que es considerado motor principal de la pérdida masiva de biodiversidad a escala planetaria (García, 2011). De manera conjunta la fragmentación y deforestación son componentes importantes de los drásticos cambios globales, ambos contribuyen a la pérdida rápida del área de bosque tropical con importantes implicaciones para el funcionamiento del ecosistema y la conservación de la biodiversidad, eliminan la biomasa, cambian la vegetación, perturban los suelos, y pueden llegar a modificar el balance de agua, energía y carbono de la superficie de la tierra, lo que en última instancia puede afectar el clima (Li et al., 2016; Smith et al., 2016; Tapia et al., 2015).

La estrecha relación en la que se encuentran, indica que a medida que se dan procesos de deforestación, se elevan los niveles y patrones de fragmentación; según García (2011) dichos procesos se ven notablemente influenciados por el uso humano de los recursos naturales, dentro de los cuales sobresale el cambio y uso de suelo natural para su transformación a zonas antrópicas y tierras agropecuarias.

Teniendo en cuenta la relevancia del manejo adecuado de ecosistemas y coberturas naturales dentro de la dinámica humana se realiza el presente trabajo investigativo, el cual gira en torno al manejo y aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar la

dinámica de los cambios producidos en la cobertura y uso de suelo de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja, donde particularmente se ha observado el incremento de superficie en zonas boscosas; infiriendo las posibles variables precursoras de dichos cambios, mediante la revisión de información secundaria y correlacionándola con los patrones de cambio obtenidos. Además de establecer la fragmentación incidente en coberturas de interés ecológico, páramo y bosque, en base a la cobertura y uso de suelo en el área de estudio, conjuntamente con la identificación, procesamiento y correlación de métricas de fragmentación; evidenciando la presencia de procesos fragmentadores.

La versatilidad y diversificación de los Sistemas de Información Geográfica permite de la misma forma establecer modelos de conectividad de áreas naturales, las cuales han sido categorizadas de acuerdo a la necesidad de la aplicación de conectores como lazos, ramas y puentes en zonas del área de estudio que han sufrido alteración de sus patrones naturales de distribución, procesos de fragmentación y/o deforestación. Así mismo, se ha realizado el modelado de un posible escenario futuro de las coberturas de páramo y bosque de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja para el año 2030, debido a su interés ecológico mediante el uso de estas herramientas (SIG), estableciendo el nivel de probabilidad de cambio para cada cobertura, donde la cobertura de páramo es aquella con más probabilidades de sufrir cambios en un futuro.

Por lo antes mencionado el presente trabajo investigativo se desarrolló con el fin de:

*Determinar la dinámica y modelamiento futuro, de cambios y fragmentación en la cobertura y uso del suelo de la Hoya de Loja mediante técnicas de SIG y Teledetección, en el periodo 2001 - 2016.*

### **Objetivos específicos**

- Establecer los cambios espacio temporales de la cobertura y uso del suelo que se ha producido en la Hoya de Loja.
- Determinar el grado y patrones de fragmentación de la cobertura vegetal de la Hoya de Loja.
- Establecer un modelo de conectividad de las áreas naturales en la Hoya de Loja.
- Modelar un escenario futuro de la cobertura y uso del suelo para el año 2030 en la Hoya de Loja.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

El cambio de cobertura, uso de suelo y demás patrones del comportamiento espacial tienen su base en el manejo de Sistemas de Información Geográfica, que son el complemento específico para el desarrollo y análisis del presente estudio, por lo cual se parte de su conceptualización central, prosiguiendo con la descripción de la terminología en base cronológica a los objetivos planteados anteriormente, donde constan conceptos básicos y SIGs utilizados.

### **2.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

La integralidad que manejan los SIG hace que sea el instrumento más adecuado para el procesamiento, la gestión de resultados y elementos producidos por otras tecnologías, las cuales se centran en el aprovechamiento de la información espacial (De la Cruz y Muñoz, 2016). Fundamentalmente se constituye como una herramienta para trabajar con información georreferenciada, una definición en la que pueden entrar un gran número de tecnologías y de otros elementos no tecnológicos (Olaya, 2014).

Concretamente el concepto relacionado a un Sistema de Información Geográfica habla de una interacción y un proceso organizado donde influyen hardware, software, datos geográficos y personal idóneo, diseñada para capturar, almacenar, manejar, analizar, modelar y representar de forma concreta la información geográficamente referenciada con el fin de brindar herramientas para la correcta planificación y gestión, construyendo estrategias que permitan modelar descriptiva y predictivamente la evolución temporal y espacial de los elementos del ambiente (De la Cruz y Muñoz, 2016); concluyendo que, SIG se constituye como un elemento complejo que engloba una serie de otros elementos conectados, cada uno de los cuales desempeña una función particular (Olaya, 2014).

### **2.2 CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO**

La cobertura del suelo («land cover») es el estado biofísico de la cubierta de la Tierra y su inmediata subcubierta; es el tipo de vegetación, la presencia de agua, rocas, etc. Un cambio en la ocupación de suelo puede consistir en una conversión (paso de bosque a cultivo) o una modificación (densidad de árboles de un bosque).

El uso del suelo («land use») incluye tanto la manera en la cual los atributos biofísicos del suelo son manipulados por el hombre y la intención que fundamenta esa manipulación, el propósito para el cual se utiliza el suelo. Un cambio de utilización de la tierra en un lugar puede consistir

en un cambio de uso o una modificación de la intensidad de uso, por ejemplo aumento de la presión de pastoreo o supresión de la fertilización orgánica o mineral (Peña, 2007).

Las alteraciones en la cobertura del suelo son uno de los componentes más importantes del cambio global que afectan a los ecosistemas terrestres y causan impactos en el clima, en el ciclo del agua y de los nutrientes y en la biodiversidad. Los paisajes pueden cambiar debido a muchos factores, ya sean naturales o inducidos por el hombre. Las perturbaciones naturales como inundaciones y tormentas tienen una profunda influencia en la evolución histórica de los paisajes, pero generalmente la influencia humana arrolla y enmascara estos procesos naturales debido a su mayor frecuencia e intensidad de ocurrencia (Fonseca et al., 2010).

## **2.3 ANÁLISIS MULTITEMPORAL**

La detección de cambios en cobertura y uso de suelo generalmente emplea uno de dos métodos básicos: la comparación píxel a píxel y la comparación posterior a la clasificación, que compara dos o más imágenes clasificadas por separado de diferentes fechas. Se considera que la comparación posterior a la clasificación es el método más apropiado y comúnmente utilizado para la detección de cambios (Srivastava et al., 2012).

El análisis multitemporal consiste en que los resultados obtenidos de la clasificación supervisada permiten generar el estudio correspondiente a las variaciones en el tiempo de las coberturas o clases definidas (Mendoza y Garcia, 2011). Lo que quiere decir que permite obtener conclusiones con relación a las transformaciones espaciales de una región entre dos fechas referenciadas, evidenciando la marcada repercusión de la acción humana sobre los recursos naturales (De la Cruz y Muñoz, 2016).

### **2.3.1 Clasificación de imágenes satelitales**

La clasificación de imágenes es una parte importante de la teledetección, el análisis de imágenes y reconocimiento de patrones; en un amplio sentido, la clasificación de imágenes se define como el proceso de categorización de todos los píxeles de una imagen o datos satelitales de sensores remotos sin procesar para obtener un conjunto determinado de etiquetas o temas de cobertura terrestre (Sowmya, Deepa y Venugopal, 2017).

Los diversos valores radiométricos de cada píxel (ND) por banda, contiene información que identifica en gran medida al objeto que se encuentra en la imagen multispectral. Los sistemas de clasificación intentarán asignar cada píxel a una de esas clases mediante el etiquetado de los

mismos para, a través de su unión, y según algoritmos dados, formar las clases correspondientes (Arozarena, 2016).

En general, las técnicas de clasificación de imágenes se dividen en dos categorías: clasificación supervisada y clasificación no supervisada; los cuales a su vez se subdividen o están compuestos por diferentes tipos de algoritmos.

- ***Clasificación no supervisada***

En la clasificación no supervisada los píxeles se agrupan en base a las propiedades de reflectancia que poseen, estas agrupaciones son llamadas cúmulos. El usuario identifica el número de grupos y bandas que se genere, y con esta información, la herramienta de clasificación de imágenes genera racimos. Existen diferentes algoritmos de agrupamiento imagen como Kmeans y expectativa de Maximización. Dicha técnica de clasificación no se utiliza comúnmente cuando no existen sitios de muestreo (Sowmya et al., 2017).

- ***Clasificación supervisada***

Clasificación supervisada o semi-automática, es una técnica de procesamiento de imágenes que permite la identificación de materiales en una imagen a partir de sus firmas espectrales. Existen varios tipos de algoritmos de clasificación, pero el propósito general es producir un mapa temático de la cobertura del suelo (Congedo, 2019). El método supervisado requiere de un cierto conocimiento de la zona de estudio que permite delimitar sobre la imagen unas zonas o áreas representativas de las distintas categorías que se pretenden discriminar (Nazareno, 2014).

Dicha clasificación es la herramienta esencial utilizada para extraer información cuantitativa de datos de imágenes de sensores remotos (firmas espectrales), usando este método el analista tiene disponibles suficientes píxeles conocidos para generar parámetros representativos de cada clase de interés o de cobertura; este paso se llama entrenamiento (Sowmya et al., 2017).

Las firmas espectrales de las clases de cobertura de referencia son calculadas considerando los valores de los píxeles de cada área de entrenamiento que tengan el mismo Clase ID (o Macroclase ID). Por lo tanto, el algoritmo de clasificación, clasifica la imagen completa comparando las características de cada píxel con las características espectrales de las clases de referencia (Congedo, 2019). La calidad de una clasificación supervisada depende de la calidad de los sitios de entrenamiento (Sowmya et al., 2017).

Son varios los algoritmos de clasificación que pueden ser utilizados dentro del proceso de clasificar los píxeles de una imagen satelital, como algoritmo de distancia mínima, máxima probabilidad, mapeo del ángulo espectral, clasificación de paralelepípedo, clasificación por firmas de cobertura del suelo, raster de algoritmo, entre otros.

- **Máxima Probabilidad.**- El algoritmo de máxima probabilidad calcula las distribuciones de probabilidad para las clases relacionado al teorema de Bayes, estimando si un píxel pertenece a una clase de cobertura. En particular, las probabilidades de distribución de las clases son asumidas de la forma de modelos normales multivariados. Para utilizar este algoritmo, se requiere un número lo suficientemente alto de píxeles para cada área de entrenamiento, lo cual permite el cálculo de la matriz de covarianza (Congedo, 2019).

La probabilidad estadística se calcula para cada clase, con el objetivo de determinar la pertenencia de las celdas a la clase; cuando se especifica una igual ponderación, cada celda se clasifica en la clase a la que tiene mayor probabilidad de ser miembro (Srivastava et al., 2012).

### 2.3.2 Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales multitemporales son la representación visual de la información capturada por un sensor de un satélite artificial; las cuales, consisten de números digitales [DN] que representan características de la imagen tales como color, brillo, longitud de onda, frecuencia irradiaba energía, o elemento de imagen en la imagen. El componente más pequeño de una imagen se llama píxel, una imagen digital se compone de píxeles que están dispuestos en filas y columnas conocidos comúnmente como una imagen ráster. El contenido de la información y las dimensiones de estos píxeles dependen de la resolución de la imagen (De la Cruz y Muñoz, 2016; Sowmya et al., 2017).

Las imágenes satelitales son de mucha utilidad para la identificación y monitoreo de los elementos del medio ambiente y su dinámica ecosistémica, estas se han convertido en una herramienta ventajosa para la evaluación y el seguimiento de cualquier elemento sobre la superficie terrestre y de su comportamiento en lapsos determinados de tiempo, infiriendo los factores determinantes en los cambios que se presenten en la cobertura terrestre (De la Cruz y Muñoz, 2016).

Los avances tecnológicos y la disponibilidad cada vez mayor de imágenes satelitales de alta resolución ofrecen la posibilidad de contar con clasificaciones de cobertura de la tierra y análisis de patrones más precisos, lo que podría mejorar en gran medida la detección y cuantificación del cambio de la cubierta de la tierra para la conservación (Boyle et al., 2014).

#### - *LANDSAT*

Los programas satelitales de detección remota han producido imágenes de la tierra que se está convirtiendo en una fuente de datos cada vez más valiosa para estudios de la tierra en general. El ejemplo más destacado es el programa Landsat, el cual ha estado en funcionamiento desde 1972 (Laborte, Maunahan, y Hijmans, 2010). Desde el primer lanzamiento del Satélite Earth Resources Technology Satellite (ERTS), (ahora denominado Landsat 1), las imágenes obtenidas por teledetección se han utilizado cada vez más para monitorear los ecosistemas de la Tierra al cuantificar el cambio y uso del suelo, la deforestación y las reservas de carbono (Boyle et al., 2014).

Después del segundo lanzamiento en 1975, la serie se extendió con el lanzamientos de Landsat 3, 4 y 5 en 1978, 1982 y 1984 respectivamente; Landsat 5 estuvo en funcionamiento hasta 2012, mientras que Landsat 6 se perdió poco después del lanzamiento en 1993, Landsat 7 se lanzó en 1999 y continúa funcionando, aunque tiene un serio problema técnico con el sensor principal y Landsat 8 fue lanzado en febrero de 2013; con el fin de la continuidad de datos el Congreso de los Estados Unidos aprobó el desarrollo de Landsat 9, que se lanzará en 2023 (Chuvieco, 2016). En el Cuadro 1 se detallan las principales características de Landsat 7 y 8.

La serie de satélites Landsat ha proporcionado un registro temporal de imágenes multiespectrales de la superficie terrestre más larga de la historia, registro ampliamente utilizado para varias aplicaciones gubernamentales, públicas y privadas (Matus, Hernández y Martínez, 2018).

**Cuadro 1.** Características principales de los Satélites Landsat 7 y 8

<b>LANDSAT 7</b>		<b>LANDSAT 8</b>	
Lanzamiento el 15 de abril de 1999		Lanzamiento 11 de febrero de 2013	
Operativo a pesar de la falla del Corrector de línea de exploración (SLC)		Operativo - Sin problemas en órbita	
705 km de altitud		705 km	
Sensor: ETM +		Sensor: OLI - TIRS	
<b>BANDAS</b>			
<b>Band. 1</b>	30 m Blue	30 m Coastal/Aerosol	<b>Band. 1</b>
<b>Band. 2</b>	30 m Green	30 m Blue	<b>Band. 2</b>
<b>Band. 3</b>	30 m Red	30 m Green	<b>Band. 3</b>
<b>Band. 4</b>	30 m NIR	30 m Red	<b>Band. 4</b>
<b>Band. 5</b>	30 m SWIR-1	30 m NIR	<b>Band. 5</b>
<b>Band. 6</b>	60 m TIR	30 m SWIR – 1	<b>Band. 6</b>
<b>Band. 7</b>	30 m SWIR – 2	100 m TIR – 1	<b>Band. 10</b>
<b>Band. 8</b>	15 m Pan	100 m TIR – 2	<b>Band. 11</b>
		30 m SWIR – 2	<b>Band. 7</b>
		15 m Pan	<b>Band. 8</b>
		30 m Cirrus	<b>Band. 9</b>

Fuente: (NASA, 2019)

### 2.3.3 Procesamiento radiométrico y atmosférico de las imágenes

En teledetección, las técnicas de procesamiento de imágenes pueden ser categorizadas en cuatro etapas principales de tratamiento: pre procesamiento de imagen, mejora, transformación y clasificación (Sowmya et al., 2017). Previo al procesamiento y análisis de datos de imagen se pueden aplicar varias rutinas de pre-procesamiento, apropiadas para obtener la salida deseada, y mejorar la calidad de los datos de imagen mediante la reducción o eliminación de varios errores causados por condiciones internas y externas

El pre-procesamiento de imágenes trata de corregir las distorsiones presentes en los datos de imagen en bruto, mediante la aplicación de técnicas que consisten en procesos dirigidos a la corrección geométrica, la corrección radiométrica y las correcciones atmosféricas para mejorar la capacidad de interpretar los componentes de la imagen de forma cualitativa y cuantitativa. Estos procesos corrigen los datos para detectar irregularidades en los sensores y eliminan

(correcciones radiométricas) la distorsión no deseada del sensor o el ruido atmosférico; con el fin de mostrar efectivamente la imagen para la interpretación visual (Sowmya et al., 2017).

Los procedimientos de corrección geométricos abordan los errores en la posición relativa de los píxeles debido a factores tales como la variación en la altitud, la actitud y la velocidad de la plataforma de sensor, la curvatura de la Tierra, la distorsión panorámica, desplazamiento alivio y no linealidades en el barrido de un sensor; mientras que los procedimientos de corrección radiométrica representan errores que afectan el valor de brillo de los píxeles, como cambios en la iluminación de la escena, las condiciones atmosféricas y la visualización de la geometría (Bruce y Hilbert, 2004).

#### **2.3.4 ArcGis**

ArcGIS fue desarrollado por - ESRI (Environmental Systems Research Institute), en el año 1969 como empresa privada de consultoría especializada en proyectos de análisis de uso del suelo. La primera versión del software se denominó ArcInfo. En los últimos 10 años se ha transformado desde un sistema basado en comandos escritos a una interfaz gráfica de usuario (GUI), lo que lo hace mucho más fácil de usar. Debido al tamaño y la complejidad del programa (en realidad un conjunto de programas) y porque los usuarios dependen de ciertos aspectos del software, gran parte del código se transfiere e incluye en las nuevas versiones (Crosier et al., 2005).

ArcGIS es una completa plataforma de sistemas de información que permite crear, analizar, almacenar y difundir datos geo-espaciales, para resolver problemas complejos con fines geográficos (MAE-MAGAP, 2015).

##### **- *Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (Soil & Water Assessment Tool - SWAT)***

SWAT son las siglas de Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua para una cuenca hidrográfica; el modelo a escala fue desarrollado por Dr. Jeff Arnold para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), específicamente para el Servicio Agrícola de Investigación (ARS) a principios de los años noventa, el cual a lo largo de los años ha experimentado revisión y expansión continua de sus capacidades.

SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un

tiempo prolongado. SWAT es un modelo continuo de tiempo, es decir un modelo conformado a largo plazo, que no está diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo detallado (Neitsch et al., 2011).

### **2.3.5 QGis**

QGIS es un SIG de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License; el proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como un proyecto en SourceForge en junio del mismo año. QGIS actualmente funciona en la mayoría de plataformas Unix, Windows y Mac. QGIS se desarrolla usando el kit de herramientas Qt y C++, lo que significa que es ligero y tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) agradable y fácil de usar.

QGIS proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos. Puede visualizar, gestionar, editar y analizar datos y diseñar mapas imprimibles. Ofrece muchas funcionalidades SIG comunes proporcionado por las características principales y complementos (“QGIS User Guide,” 2019).

#### **- *Complemento de Clasificación Semi-Automática (Semi Automatic Classification Plugging - SCP)***

Desarrollado por Lucas Congedo, el Complemento de Clasificación Semi-Automática (SCP) es gratuito y de código abierto para QGIS, que permite la clasificación semiautomática (también conocida como clasificación supervisada) de imágenes de sensores remotos. Proporciona varias herramientas para la descarga de imágenes gratuitas, el pre procesamiento, el pos procesamiento y el cálculo ráster.

El objetivo general de SCP es proporcionar un conjunto de herramientas entrelazadas para el procesamiento de ráster con el fin de hacer un flujo de trabajo automático y facilitar la clasificación de la cobertura del suelo, que podría ser realizada también por personas cuyo campo principal no es la teledetección. La primera versión del SCP fue escrita por Luca Congedo en 2012 con el fin de crear una herramienta para la clasificación de la cobertura del suelo de una manera asequible y automática. Las siguientes versiones de SCP se desarrollaron como compromiso personal con la teledetección (Congedo, 2019).

## **2.4 FRAGMENTACIÓN DE COBERTURAS**

El término “fragmentación” es generalmente usado para describir modificaciones en el patrón del hábitat a lo largo del tiempo, y detalla básicamente la interrupción de la continuidad espacial

de un tipo de cobertura en general; ocasionando la división del hábitat, que conlleva a la formación de fragmentos más pequeños y aislados, que a largo plazo cambian su estructura (biodiversidad) y funcionalidad (ciclos biogeoquímicos) del paisaje, (Correa, Volante y Seghezzeo, 2012; Haddad et al., 2015).

Se denomina **parche** a la superficie no-lineal de tamaño variable que difiere fisionómicamente de sus alrededores, y que posee un grado de homogeneidad interno. Los Parches varían de acuerdo con su tamaño, forma, tipo, heterogeneidad y sus características de borde. Generalmente están inmersos en una matriz de características contrastantes en cuanto a fisonomía y composición. Las características y la dinámica evolutiva de un parche dependen básicamente de su origen o de los mecanismos causantes (Etter, 2014).

El borde se ha definido como la zona de transición entre hábitats adyacentes. A lo que el efecto de borde podría definirse como como el resultado de la interacción de dos ecosistemas adyacentes (Lopez, 2004); de igual manera se define como el conjunto de procesos asociados al incremento de la relación perímetro/área que se produce con el avance de la fragmentación del hábitat. Estos procesos afectan gravemente a la calidad del hábitat y provocan una pérdida de especies (Santos y Tellería, 2006).

La fragmentación es el resultado de tres principales procesos de alteración paisajística: 1) la pérdida progresiva de superficie de hábitat original; 2) la subdivisión creciente del hábitat remanente; y 3) el incremento de la relación perímetro/superficie en dicho hábitat (García, 2011). Los procesos responsables de esta pérdida son múltiples y difíciles de separar, pero de algo se puede estar seguro, la disminución del área de fragmentos y aumenta el aislamiento en el hábitat (Haddad et al., 2015).

En los bosques la fragmentación provoca el aumento de la radiación solar directa y difusa en los bordes recién creados, lo que a menudo conduce a condiciones de microclima más cálidas, más secas, con cambios en intensidad de luz, humedad, velocidad del viento y presión del aire. La temperatura de la superficie del suelo depende en gran medida de la cobertura vegetal y la fragmentación reemplaza la cobertura vegetal continua con un mosaico de matriz y hábitat remanente, lo que puede influir en las predicciones de la extinción y contribuir como un mecanismo impulsador de cambios ecológicos en paisajes fragmentados (Tuff, Tuff y Davies, 2016).

### 2.4.1 Métricas de fragmentación.

La fragmentación del paisaje se puede cuantificar a través de un conjunto de métricas de patrones espaciales que informan sobre la cantidad y configuración de los parches, la distribución de los tamaños de parches y los efectos de borde (Hermosilla et al., 2019).

Las métricas de fragmentación pueden definirse como un conjunto de medidas cuantitativas agregadas, derivadas del análisis digital de mapas temáticos, estas métricas pueden aportar información que por sí solas consisten únicamente en un conjunto de valores numéricos, no obstante, desde el punto de vista de su valor comparativos, los resultados pueden aportar una información muy valiosa acerca de la evolución y cambios de un lugar determinado (Aguilera, 2010).

La selección de métricas se realiza en función de su capacidad para caracterizar diversos aspectos de la fragmentación (Correa et al., 2012), dentro de las cuales se pueden mencionar:

- **Número de parches (NP).** - Número de parches totales. Es indicador de varios procesos ecológicos. Adicionalmente se emplea como índice de heterogeneidad del paisaje y como base para el cálculo de otras métricas.
- **Índice del parche más grande (LPI).** - Es igual al área ( $m^2$ ) del parche más grande del tipo de cobertura correspondiente dividida por el área de estudio ( $m^2$ ), multiplicado por 100 (para convertir a un porcentaje); en otras palabras, LPI es igual al porcentaje del área de estudio, comprendido por el parche más grande.
- **Densidad de Parches (PD).** - La densidad de parches es un aspecto limitado, pero fundamental, del patrón de paisaje. La densidad de parches tiene la misma utilidad básica que el número de parches como índice, excepto que expresa el número de parches por unidad de área que facilita la comparación entre paisajes de diferentes tamaños. Por supuesto, si el área total del paisaje se mantiene constante, entonces la densidad del parche y el número de parches transmiten la misma información.
- **Índice de Forma (PAFRAC).** - Una dimensión fractal mayor que 1 para un mosaico de paisaje bidimensional, indica una desviación de una geometría euclidiana (es decir, un aumento en la complejidad de la forma del parche). Los valores cercanos a 1 representan formas con perímetros muy simples, como cuadrados, y valores cercanos a 2 figuran formas altamente intrincadas.

- **Tamaño medio del Parche (AREA\_MN).** - Es igual a la suma, de todos los parches del tipo de cobertura correspondiente, dividido por el número de parches del mismo tipo (McGarial, 2015).

#### **2.4.2 FRAGSTATS**

Es un programa de análisis del patrón espacial para mapas categóricos; el cual cuantifica la extensión del área y la configuración espacial de los parches dentro de un paisaje. Permite analizar de patrones espaciales para cuantificar la estructura (es decir, la composición y configuración) de los paisajes. El paisaje objeto de análisis está definido por el usuario y puede representar cualquier fenómeno espacial. FRAGSTATS simplemente cuantifica la heterogeneidad espacial del paisaje tal como se representa en un mapa categórico (es decir, en un mosaico de paisaje) o en una superficie; incumbe al usuario establecer una base sólida para definir y escalar el paisaje en términos de contenido temático, resolución y grano espacial.

Hay tres niveles de análisis, que representan fundamentalmente diferentes perspectivas sobre el análisis del patrón de paisaje y que tienen importantes implicaciones para la elección e interpretación de las métricas de fragmentación:

- **Análisis a nivel de parche**, las métricas se definen para parches individuales, y se caracteriza por el carácter espacial y el contexto de cada parche.
- **Análisis a nivel de clase**, métricas de clase se integran a lo largo de todos los parches de un determinado tipo (clase).
- **Análisis a nivel de paisaje/cobertura**, métricas del paisaje están integradas sobre todos los tipos de parches o clases sobre la extensión completa de los datos (es decir, todo el paisaje) (McGarial, 2015).

Es decir que los niveles de análisis van de lo particular (parche) a lo general (paisaje), dependiendo de las necesidades y nivel de detalle de estudio que requiera el usuario, lo cual va en relación con las métricas de fragmentación a ser seleccionadas.

#### **2.5 CONECTIVIDAD DE LAS ÁREAS NATURALES**

La conectividad es una propiedad del paisaje que facilita el movimiento y dispersión de las especies, el intercambio genético y otros flujos ecológicos en un territorio, por lo que es necesario considerarla como la base para la planificación de la conservación (MAE, 2017a). Además que permite la restitución, continuidad y mejoramiento de los servicios ecosistémicos

como la regulación de ciclos hidrológicos, remoción de material particulado, fijación de carbono y polinización (Colorado, Vásquez y Mazo, 2017).

En conectividad se representa al paisaje como un conjunto de parches de hábitat (nodos) y de elementos conectores (enlaces); donde un enlace se define como un elemento que no contiene área pero representa la posibilidad de dispersión entre dos parches, el cual puede corresponder a un corredor físico o simbolizar el potencial de que un organismo se disperse entre dos parches a través de una cobertura que le es favorable (MAE, 2017a).

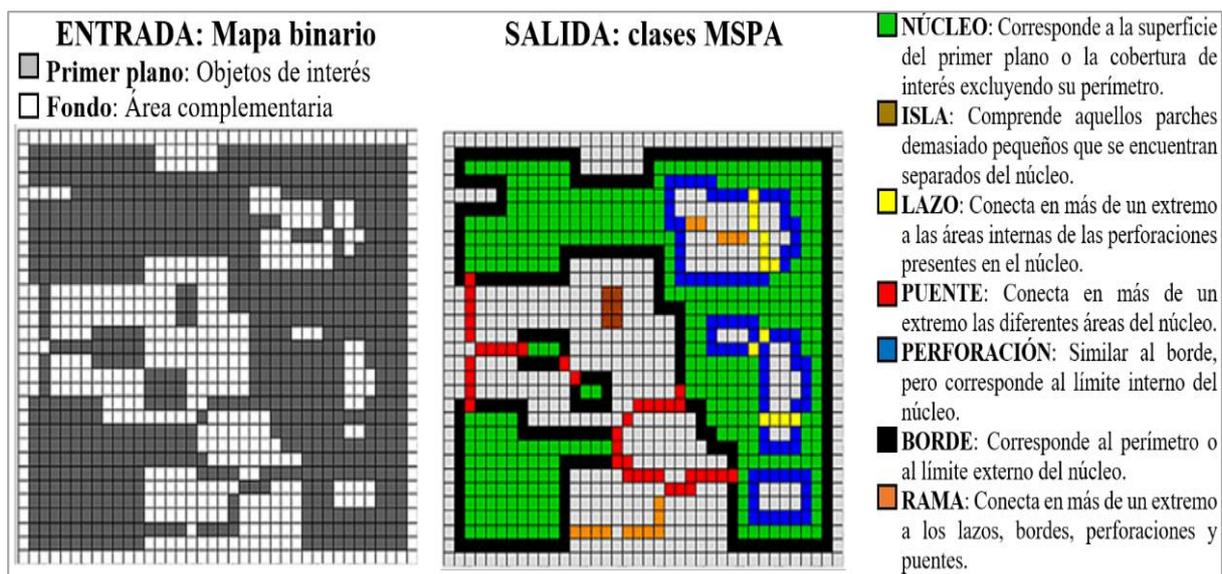
La conectividad entre fragmentos de bosques aislados o pobremente conectados por medio de corredores ecológicos, permite la recuperación de la conectividad ecológica y consecuentemente contribuir a la conservación de la biodiversidad (Colorado et al., 2017).

### **2.5.1 GUIDOS**

GuidosToolbox incluye herramientas para la detección y evaluación cuantitativa de nodos y enlaces clave, así como para definir la conexión en imágenes ráster y para configurar archivos de entrada apropiados para un análisis de red mejorado. GuidosToolbox puede facilitar una evaluación holística en estudios de evaluación de riesgos, planificación del paisaje y políticas de conservación / restauración (Vogt y Riitters, 2017).

- *Análisis de patrones espaciales morfológicos (Morphological Spatial Pattern Analysis – MSPA)*

**MSPA** es una secuencia personalizada de operadores morfológicos matemáticos orientados a la descripción de la geometría y la conectividad de los componentes de la imagen. Basándose únicamente en conceptos geométricos, esta metodología se puede aplicar a cualquier escala y a cualquier tipo de imágenes digitales en cualquier campo de aplicación. El área de primer plano de una imagen binaria se divide en siete clases genéricas de MSPA: Core, Islet, Perforation, Edge, Loop, Bridge y Branch (Núcleo, isla, perforación, borde, lazo, puente y rama – ilustrado y descrito en la Figura 1). Esta segmentación da como resultado clases mutuamente excluyentes que, cuando se combinan, corresponden exactamente al área inicial de primer plano (Vogt y Riitters, 2017).



**Figura 1.** Ilustración y definición de clases genéricas de MSPA

**Fuente:** Vogt y Riiters, 2017

## 2.6 MODELAMIENTO DE ESCENARIOS FUTUROS

Los modelos de simulación de uso del suelo y cambio de cobertura del suelo son herramientas efectivas y reproducibles para analizar tanto las causas como las consecuencias de la dinámica futura del paisaje en varios escenarios. Los modelos de simulación actuales se centran principalmente en la evolución de tipos específicos de uso de la tierra bajo la influencia de actividades humanas (Liu et al., 2017).

La construcción de escenarios es una herramienta ampliamente utilizada para iniciar discusiones sobre usos futuros de la tierra, donde en dicha construcción de los escenarios posibles, se pueden explorar futuros potenciales mediante el uso de mapas, imágenes y figuras (Andersen et al., 2019).

Los modelos de CCUS (Cambio en la Cobertura y el Uso del Suelo) ofrecen la posibilidad de analizar la sensibilidad de los patrones de uso de suelo a cambios en variables selectas, son una técnica muy importante en la proyección de escenarios hacia el futuro, para conducir experimentos que nos ayudan a entender los procesos fundamentales del cambio, y para describir estos últimos en términos cuantitativos; es decir nos ayudan en la comprensión de los procesos que llevan a los cambios y realizar proyecciones basadas en diferentes escenarios (Henriquez, 2012; Mas y Flamenco, 2011).

### 2.6.1 TerrSet

TerrSet comprende un sistema modelado y monitoreo geoespacial, el cual incorpora herramientas de SIG IDRISI y procesamiento de imágenes, además de ofrecer una constelación de aplicaciones verticales enfocadas en una secuencia de tareas específica, como el monitoreo y modelo del sistema terrestre para el desarrollo sostenible.

IDRISI fue el primer sistema de procesamiento de imágenes y GIS desarrollado específicamente para una plataforma de microcomputadoras. A lo largo de las décadas que siguieron, IDRISI ha madurado hasta convertirse en un sistema de grado de investigación para el análisis geográfico con desarrollos innovadores en áreas como la toma de decisiones de criterios múltiples / objetivos múltiples, el aprendizaje automático y el análisis de series de tiempo.

IDRISI proporciona dos de los componentes principales del sistema, así como los componentes básicos; todos los componentes utilizan el IDRISI API y las estructuras del archivo de datos. Si bien IDRISI fue un producto independiente, ahora se incorpora dentro del sistema TerrSet (Eastman, 2016).

#### - *Modelador de Cambio de Tierra (Land Change Modeler – LCM)*

LCM es un entorno de software integrado dentro de TerrSet orientado al problema acuciante de la conversión acelerada de la tierra y las necesidades analíticas muy específicas de la conservación de la biodiversidad. Clark Labs trabajó con conservación internacional durante un período de varios años para desarrollar este sitio de herramientas que se utilizarán en una variedad de escenarios y contextos de cambio de tierra (Eastman, 2016).

En LCM, las herramientas para la evaluación y la predicción del cambio en la cobertura del suelo y sus implicaciones se organizan en torno a las principales áreas de tareas. Proporciona un completo análisis de los cambios en el suelo mediante la creación de mapas y gráficos del cambio del suelo, transiciones y tendencias de los tipos de suelo; predicciones de cambios e intervenciones de planificación, donde es capaz de crear escenarios de cambio del uso del suelo con la integración de los factores biofísicos, como tipo de uso del suelo, la altitud, la pendiente (derivada de los modelos digitales de elevación-MDE), y características hidrológicas (distancia a los ríos y lagos), y socioeconómicos como modelos que podrían utilizar la infraestructura (carreteras) y la demografía (Eastman, 2016; Oñate y Bosque, 2010).

### III. METODOLOGÍA

A continuación, se describe en primera instancia la zona o área de estudio donde se realizó el trabajo investigativo con sus principales características, seguido de los procesos metodológicos aplicados, los cuales han sido descritos individualmente para cada objetivo.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Loja se encuentra ubicada al Sur de la Región Interandina del Ecuador, en el cantón y provincia de Loja, específicamente en el valle de Cuxibamba, perteneciente al nudo de Cajanuma, la cual fue delimitada al norte hasta antes de la unión del río Zamora, con el río San Lucas. La cuenca superior del río Zamora u Hoya de Loja comprende una extensión aproximada de 5 190 ha (52 km<sup>2</sup>), la cual se ubica a una altura promedio de 2 100 msnm, en los puntos 3°59'35" latitud sur y 79°12'15" longitud oeste (GEO LOJA, 2007).

La figura 2 muestra la ubicación del área de estudio, perteneciente a la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja.

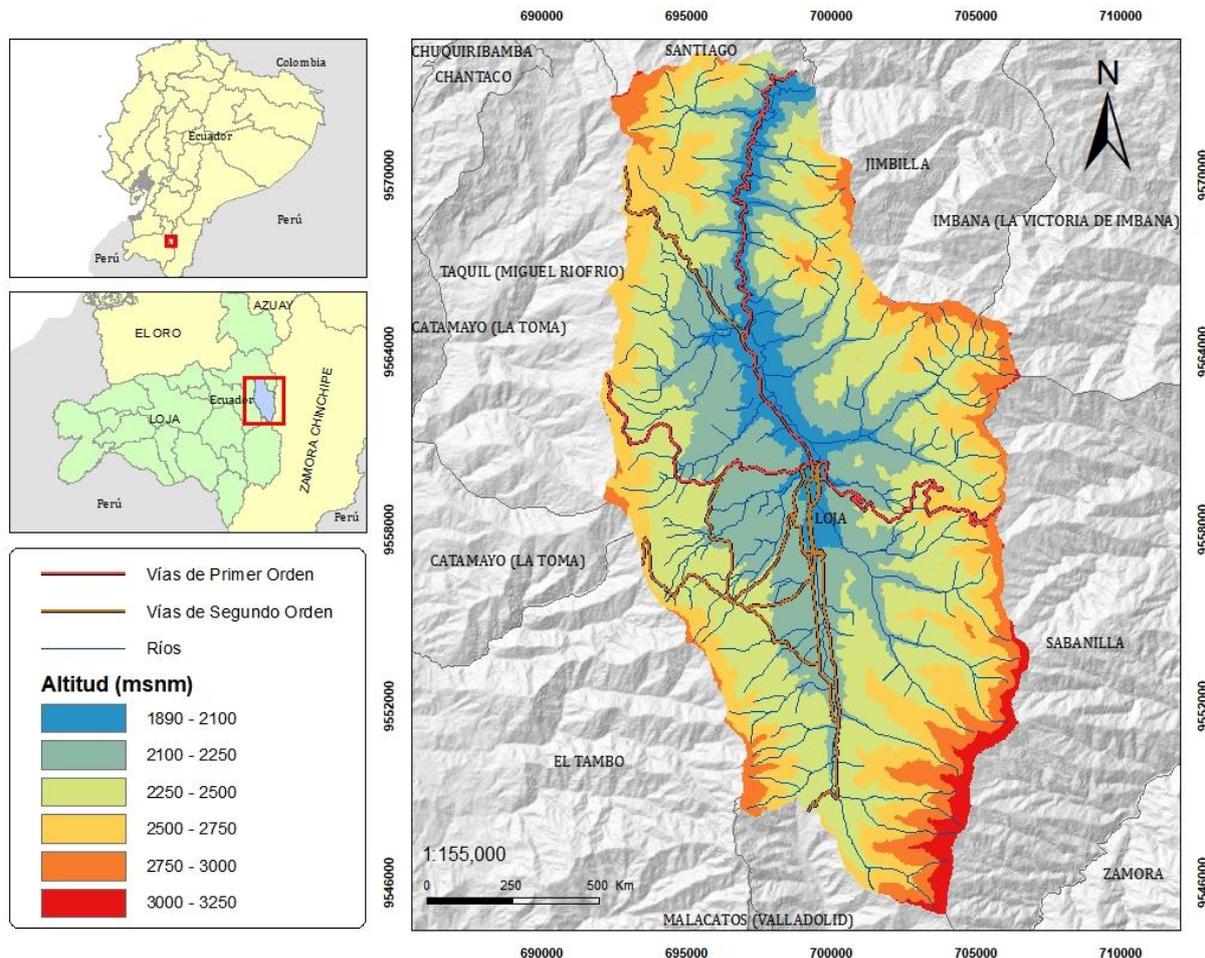


Figura 2. Área de Estudio – Hoya de Loja

El clima de la ciudad de Loja es temperado–ecuatorial subhúmedo, caracterizado por una temperatura media del aire de 16 °C, donde el período con menor temperatura media se extiende de junio a septiembre, y julio es el mes más frío; dentro de la zona se presenta una precipitación anual de 900 mm, con un pico mayor entre los meses de marzo – abril y otro menor en octubre (GEO LOJA, 2007).

La cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja se encuentra encerrado por brazos de la cordillera Central (Real) de los Andes, dispuestos en forma de herradura (GEO LOJA, 2007). El relieve de la zona se presenta muy irregular y con valles de aproximadamente 1800 msnm a altitudes que pueden sobrepasar los 3700 metros. Los accidentes orográficos más representativos son las cordilleras: del Bunque, San José, Tambo Blanco, de la Paz, del Salal, de los Altos, Los Guabos, Sañe, entre otras (PDOT Loja, 2014).

La cuenca superior del río Zamora u Hoya de Loja (230 km<sup>2</sup>) es parte del gran sistema del río Santiago (27.425 km<sup>2</sup> de área drenada), afluente del Marañón–Amazonas y es el asiento de la actual ciudad de Loja (GEO LOJA, 2007).

Del nudo de Cajanuma, nacen dos ríos pequeños: el Malacatos septentrional y el Zamora Huayco, los cuales se unen al norte de la ciudad de Loja, dando origen al río Zamora y engrosan su caudal recibiendo varios afluentes, donde el río Jipiro es el más importante (GEO LOJA, 2007).

La red hidrográfica es numerosa, representada por cursos de agua sencillos: Al sur-este de la carta se hallan los Ríos Zamora, San Francisco, Trapichillo, Tambo Blanco, de los Corazones, La Merced, Peñas Encantadas, Sordomorras, el Ingenio, etc., (PDOT Loja, 2014).

El área de estudio se caracteriza por poseer en su mayoría la formación natural Matorral húmedo montano, donde las características generales son: vegetación original destruida en su mayor parte reemplazada por bosques de eucalipto y cultivos, donde destacan arveja, trigo, cebada, papa, haba y cultivos tropicales introducidos como banano, café, cítricos y caña de azúcar. Los remanentes de vegetación original quedan únicamente en pendientes pronunciadas, barrancos y otros sitios poco accesibles (GEO LOJA, 2007)

El uso del suelo en la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja se distribuye entre ocho categorías mayoritarias, siendo pastizal y bosque natural las coberturas que mayor porcentaje de área poseen. La zona sur-oriental presenta menor grado de intervención en términos de la cobertura vegetal natural, ocupada mayoritariamente por bosque natural denso y páramo en la zona alta. En la parte nor-occidental se puede observar mayor grado de intervención humana,

dominado principalmente por pastizales, cultivos, plantaciones forestales y matorrales en sucesión (Arteaga, 2014).

En el contexto nacional de áreas protegidas destaca el Parque Nacional Podocarpus (PNP) con una superficie de 146 280 hectáreas, considerado uno de los más biodiversos en avifauna del mundo, donde se halla cerca del 40% de la población de aves del Ecuador, y además presenta un alto endemismo de especies florísticas, registradas alrededor de 211 especies hasta 2007 (GEO LOJA, 2007).

Considerando los datos oficiales del Sistema Nacional de Información (SNI), en la ciudad de Loja en 2010 existía una población de 180 617 habitantes, de los cuales el 52,04% pertenecen al sexo femenino y el 47,96% restante pertenece al sexo masculino; el grupo más representativo es la población comprendida entre 15 y 19 años. Según proyecciones poblacionales del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), para el 2020 en el área urbana de la provincia de Loja la población se prevé un incremento de 257 422 a 338 639 habitantes, lo que implica de forma paralela un crecimiento poblacional significativo y una mayor expansión urbana, ocasionando cambios de cobertura y uso de suelo (PDOT Loja, 2014).

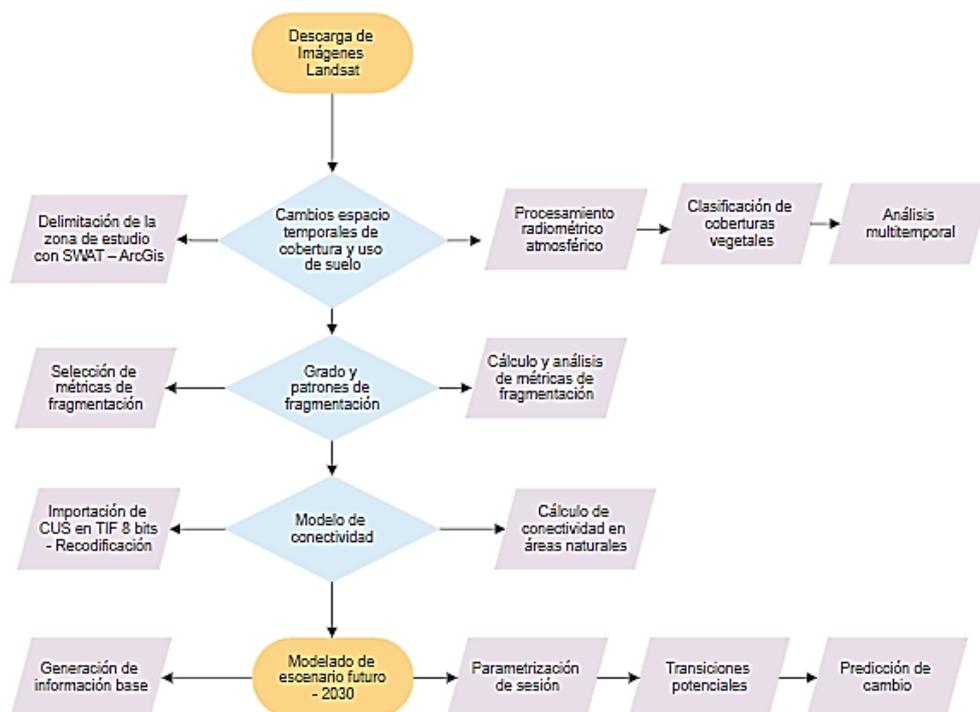
### **3.2 BASE DE DATOS**

La base de datos primaria está compuesta por dos imágenes satelitales de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja; la primera imagen perteneciente al año 2001 del satélite Landsat 7 y la segunda imagen perteneciente al año 2016 del satélite Landsat 8. Las dos imágenes fueron adquiridas a través de la plataforma digital del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS, extensión Glovis (<https://glovis.usgs.gov/>). Adicionalmente, se seleccionaron 12 variables o también llamados impulsores de cambio, de diferentes bases de datos; cabe destacar que las capas de cobertura y uso de suelo pertenecientes a la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja del año 2001 y 2016, son de autoría propia, puesto que constituyen el primer objetivo del presente trabajo investigativo. De forma similar las coberturas de tierras agropecuarias y zonas antrópicas fueron extraídas de la capa de cobertura y uso de suelo del año 2016, por lo que carecen de fuente y enlace de descarga. En el Cuadro 2 se describen las variables utilizadas:

**Cuadro 2.** Variables base consideradas en el desarrollo del trabajo investigativo

Variable	Fuente	Enlace	Año	Escala	Resolución Espacial	Formato
Área urbana	INEC	<a href="http://www.ecuadorencifras.gob.ec/registro-descargas-cartograficas/">http://www.ecuadorencifras.gob.ec/registro-descargas-cartograficas/</a>	2010	1:100000	-	Shp
Catastro Minero	ARCOM	<a href="http://geo.controlminero.gob.ec:1026/geo_visor/">http://geo.controlminero.gob.ec:1026/geo_visor/</a>	2016	1:100000	-	Shp
CUS Hoya de Loja	Autoría propia	-	2001	1:50000	-	Shp
CUS Hoya de Loja	Autoría propia	-	2016	1:50000	-	Shp
Deforestación	MAE	<a href="http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/portal/">http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/portal/</a>	2016	1:100000	-	Shp
Áreas protegidas, socio bosque privado y comunitario.	MAE	<a href="http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/portal/">http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/portal/</a>	2016	1:100000	-	Shp
Mapa de densidad poblacional	UNL	-	2010	-	15 m	Rst
Mapa de pendientes	UNL	-	2013	-	15 m	Rst
Modelo de elevación digital (DEM)	Alaska Satellite	<a href="https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/terrain-corrected-rtc/">https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/terrain-corrected-rtc/</a>	2016	-	15 m	Rst
Poblados	INEC	<a href="http://www.ecuadorencifras.gob.ec/registro-descargas-cartograficas/">http://www.ecuadorencifras.gob.ec/registro-descargas-cartograficas/</a>	2010	1:100000	-	Shp
Red hídrica	IGM	<a href="http://www.geoportalig.m.gob.ec/portal/">http://www.geoportalig.m.gob.ec/portal/</a>	2013	1:100000	-	Shp
Red vial	OSM – Google Street Map	<a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a>	2016	1:100000	-	Shp

En la Figura 3, se describe brevemente el proceso metodológico aplicado en el presente trabajo investigativo, donde se representan los principales pasos a seguir.



**Figura 3.** Diagrama de flujo del desarrollo metodológico

### 3.3 ESTABLECIMIENTO DE LOS CAMBIOS ESPACIO TEMPORALES DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO

#### 3.3.1 Pre procesamiento de imágenes satelitales

- *Delimitación de la zona de estudio*

La delimitación del área de estudio, se realizó mediante la aplicación de un proceso semiautomático en la extensión de ArcGis – SWAT, donde únicamente se hizo uso del Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de interés y, se determinaron las unidades altitudinales (metros). A continuación, en la definición de corriente, se seleccionó el DEM como información base para la generación de dirección y acumulación de flujo, con un aproximado de 640 ha y 28 444 números de celda, como se observa en la Figura 4; parámetros fijados para la creación de corrientes y puntos de salida.

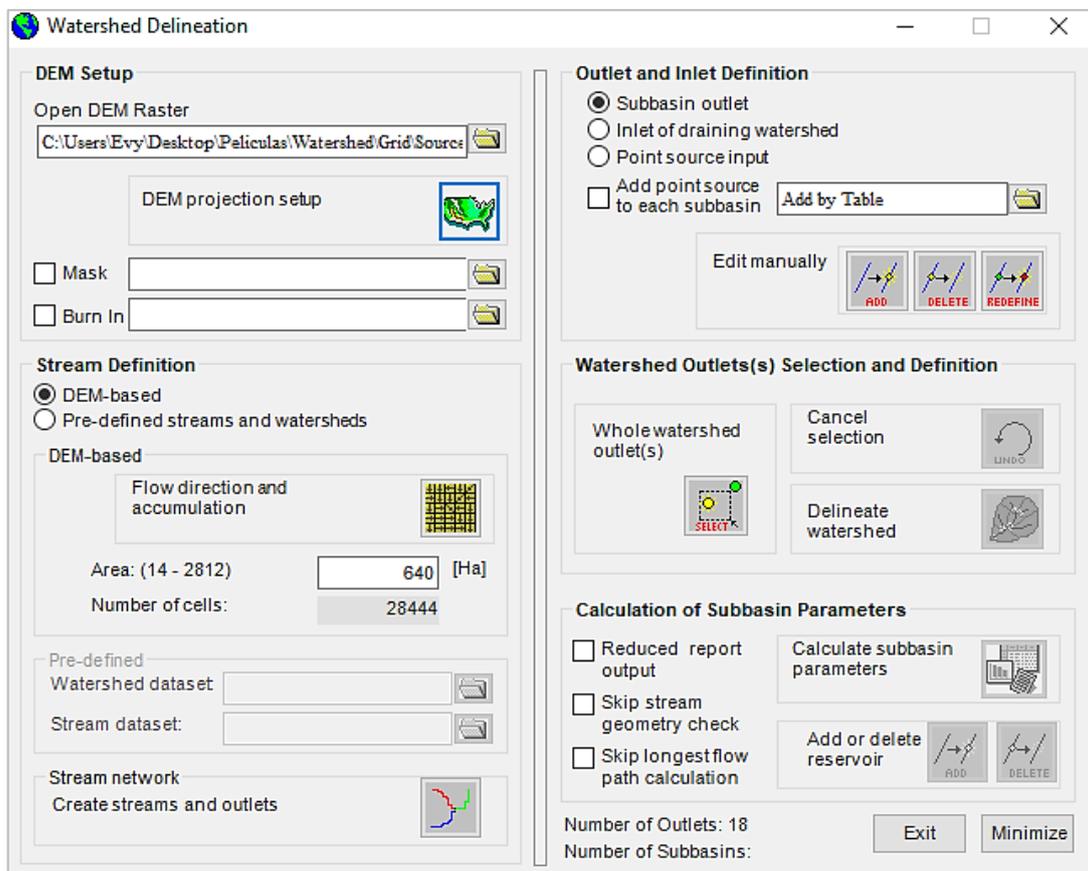


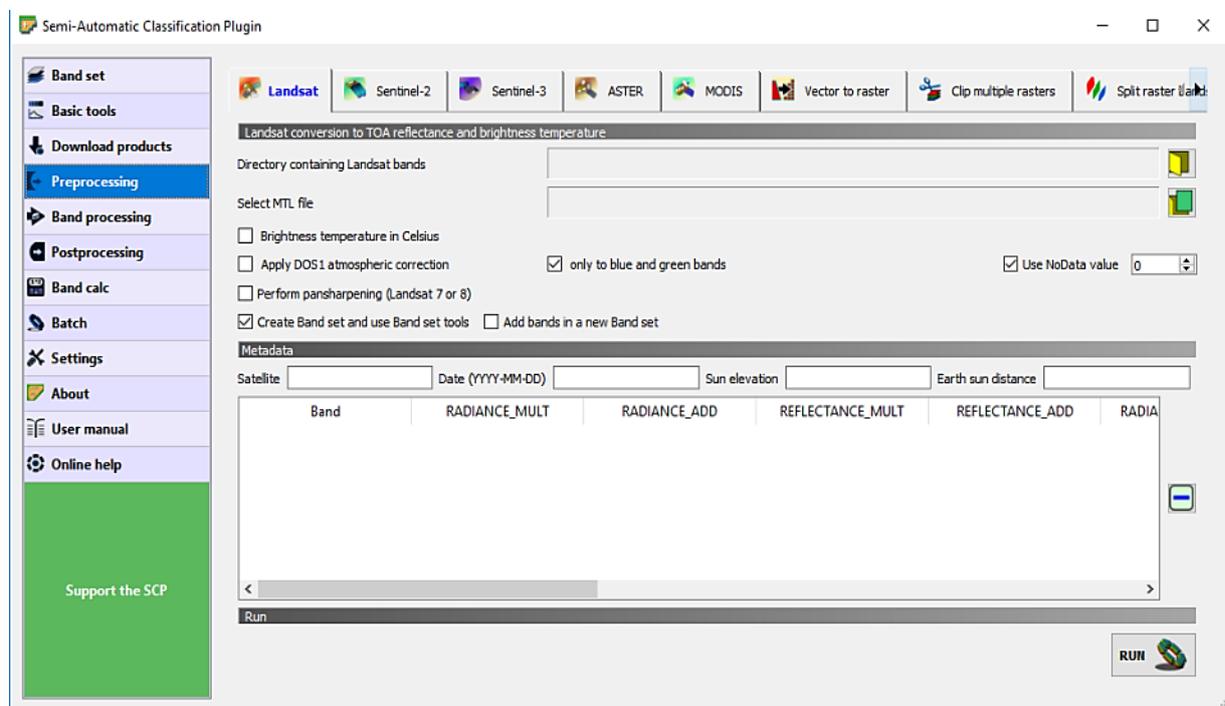
Figura 4. Interfaz de la extensión SWAT

Posteriormente de forma manual se definió y seleccionó el punto de salida de la cuenca hasta antes de la unión del río Zamora, con el río San Lucas, indispensable para la final delimitación

de la misma; con lo cual se obtuvo la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja, conformada por 35 puntos de salida y 35 subcuencas.

### - *Procesamiento radiométrico y atmosférico*

A través del uso de SCP se realizó la corrección de radianza/reflectividad, corrección atmosférica, substracción de objeto oscuro y refinado pancromático o Pansharpening, de las imágenes satelitales correspondientes a la zona de estudio, proceso indispensable para asegurar la calidad de resultados en el trabajo investigativo. Esto mediante el uso de la extensión *Preprocessing*, la cual, en base a las características e información compilada en cada banda, aplicó automáticamente cálculos matemáticos para la corrección de distorsiones existentes en la imagen, como se observa en la Figura 5; en donde finalmente se generó un conjunto de bandas que recopiló la información rectificada de las imágenes satelitales descargadas.



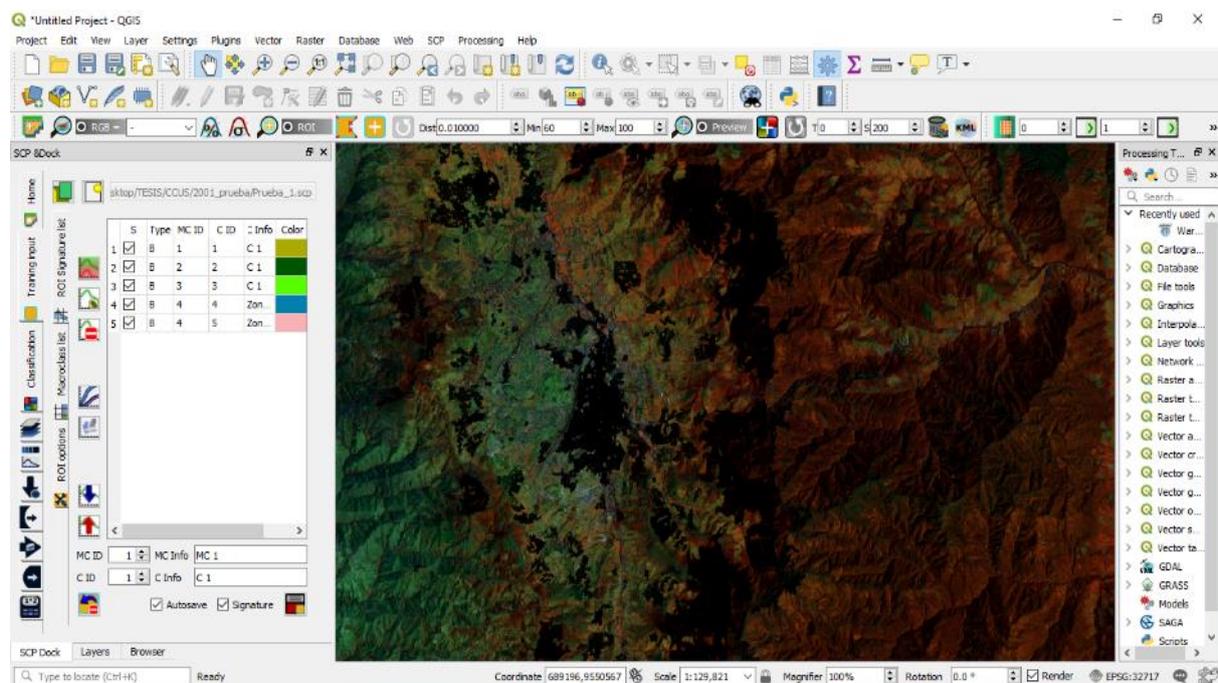
**Figura 5.** Interfaz de usuario de Semi Automatic Classification Plugin - Preprocessing

En caso de que la imagen resultante no cuente con las coordenadas UTM correctas, estas fueran reproyectadas en sus respectivas coordenadas (UTM WGS84 17S) mediante el uso de la extensión *warp reproject* en QGIS.

### 3.3.2 Clasificación de coberturas vegetales

Para una mejor interpretación visual e identificación de coberturas, se aplicó una combinación de bandas 453, la cual se encarga de dar más peso a la región infrarroja (banda 4 y 5), permitiendo así realzar la diferencia de humedad entre suelo y vegetales; cuanto mayor sea la humedad del suelo más oscuro aparecerá éste. Mediante el uso de SCP Dock se realizó una clasificación supervisada, utilizando cuatro clases de coberturas: páramo, bosque, tierras agropecuarias y zonas antrópicas, como se observa en la Figura 6.

El proceso se inició con la creación de ROIs (Región de Interés) para cada clase de cobertura, donde se definió y delimitó manualmente áreas de entrenamiento. La creación de ROIs implica la generación automática de firmas o distancias espectrales, las cuales son útiles para evaluar la separabilidad de ROIs, es decir que permiten identificar a través de un rango numérico si las diferentes clases son similares entre sí; y, si podrían causar errores de clasificación. A través del cálculo automático de dichas distancias espectrales (Anexo 1) se determinó el algoritmo de clasificación más óptimo a ser aplicado en el estudio, en el que se encontró al de máxima distancia, probabilidad o verosimilitud.



**Figura 6.** Interfaz de usuario de Semi Automatic Classification Plugin – Clasificación de coberturas

Posteriormente a través de la extensión *Postprocessing*, se realizó de forma manual el ajuste o corrección de errores en la clasificación de píxeles; donde se removieron o reclasificaron los píxeles que no pertenecieran a la clase asignada por el software y se eliminaron los píxeles más

pequeños que el tamaño de umbral proporcionado y fueron automáticamente asignados a la clase de cobertura vecino más grande.

Como último paso se realizó la evaluación de exactitud, la cual permitió determinar cuantitativamente la validación de clasificación en base al cálculo de varias estadísticas (Anexo 2); de esa manera se pudo establecer porcentualmente la exactitud con que se realizó la clasificación.

### **3.3.3 Análisis de coberturas vegetales**

En base a los procedimientos previamente aplicados, se obtuvieron mapas de cobertura y uso de suelo de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja de los años 2001 y 2016; con lo que se cuantificaron en superficie y porcentaje las coberturas de páramo, bosque, tierras agropecuarias y zonas antrópicas para los dos años. Mediante los resultados antes mencionados se realizó una evaluación de las ganancias y pérdidas por categoría de cobertura terrestre y año, determinando así por análisis multitemporal el cambio neto de cada cobertura en el periodo de 15 años.

## **3.4 ESTABLECIMIENTO DEL GRADO Y PATRONES DE FRAGMENTACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL**

Para determinar el grado y patrones de fragmentación en la cobertura y uso de suelo en la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja, se utilizó el software FRAGSTATS, estableciendo el nivel de análisis y las métricas de fragmentación a utilizarse en el proceso, las cuales fueron seleccionadas en función de las características de la zona de estudio, de los objetivos a alcanzarse y criterios técnicos, basados en la revisión de otros estudios científicos realizados.

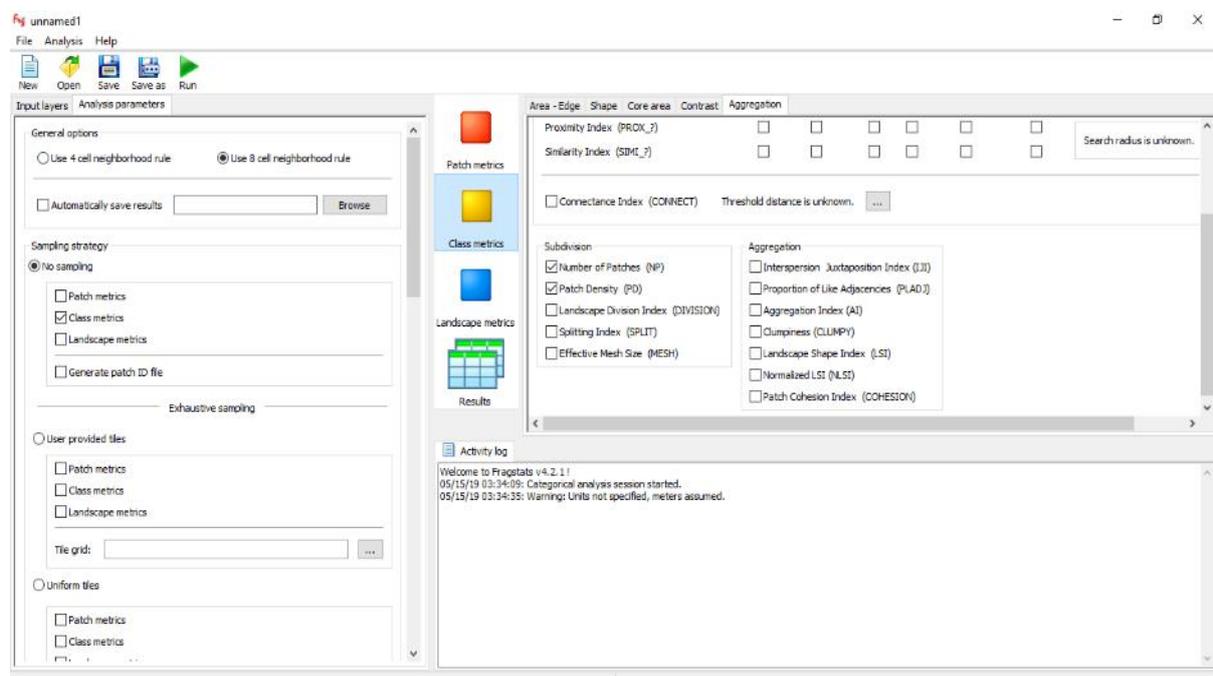
Se preseleccionaron cinco métricas de fragmentación a nivel de clase, las cuales son descritas a continuación en el Cuadro 3:

**Cuadro 3.** Métricas utilizadas en el estudio de índice de fragmentación de la Hoya de Loja

MÉTRICA	CLAVE	DESCRIPCIÓN
Numero de Parches	NP	Mide la fragmentación del paisaje.
Densidad de Parches	PD	Mide el número de parches por cada 100 hectáreas.
Índice del Parche más grande	LPI	Es el porcentaje del área total del paisaje ocupada por el parche forestal de mayor tamaño
Tamaño medio del Parche	AREA_MN	MN (Media) es igual a la suma, a través de todos los parches del tipo de parche correspondiente, de los valores métricos de parche correspondientes, dividido por el número de parches del mismo tipo.
Índice de forma	PAFRAC	Mide la complejidad de la forma. Mientras más se acerque a 2 será más irregular, mientras más se acerca a 1 será más regular.

**Fuente:** McGarrial y Marks, 2015

El análisis de fragmentación de las capas de cobertura y uso de suelo de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja del año 2001 y del año 2016 en formato ráster se realizó independientemente uno de otro. El proceso inició con la parametrización del análisis, donde se determinó el uso de la regla de vecindad de ocho celdas (use 8 cells neighborhood rule) y se estableció el análisis de desarrollo a nivel de clase (class metrics) como se observa en la Figura 7; posteriormente se seleccionaron las métricas de fragmentación - señaladas en el Cuadro 3 - para las coberturas de páramo y bosque de los dos años, para el final cálculo de fragmentación.



**Figura 7.** Interfaz de usuario de FRAGSTATS

### 3.5 ESTABLECIMIENTO DE UN MODELO DE CONECTIVIDAD DE LAS ÁREAS NATURALES

Mediante el software GUIDOS se calculó el nivel de conectividad de las coberturas de páramo y bosque de los dos años, de manera individual. El procedimiento se inició con la parametrización de información base, donde se importó el archivo TIF (en 8 bits) del mapa de CUS, para seguidamente recodificar la cobertura de análisis con código 2, las demás coberturas con código 1 y finalmente el área sin datos con código 0 o 259.

Posteriormente se realizó el cálculo de conectividad, mediante el uso del MSPA, utilizando la parametrización previamente indicada; como resultado el programa generó un archivo ráster y un archivo TXT con información estadística de las siete clases de patrones espaciales morfológicos de fragmentación, como se observa en la Figura 8.

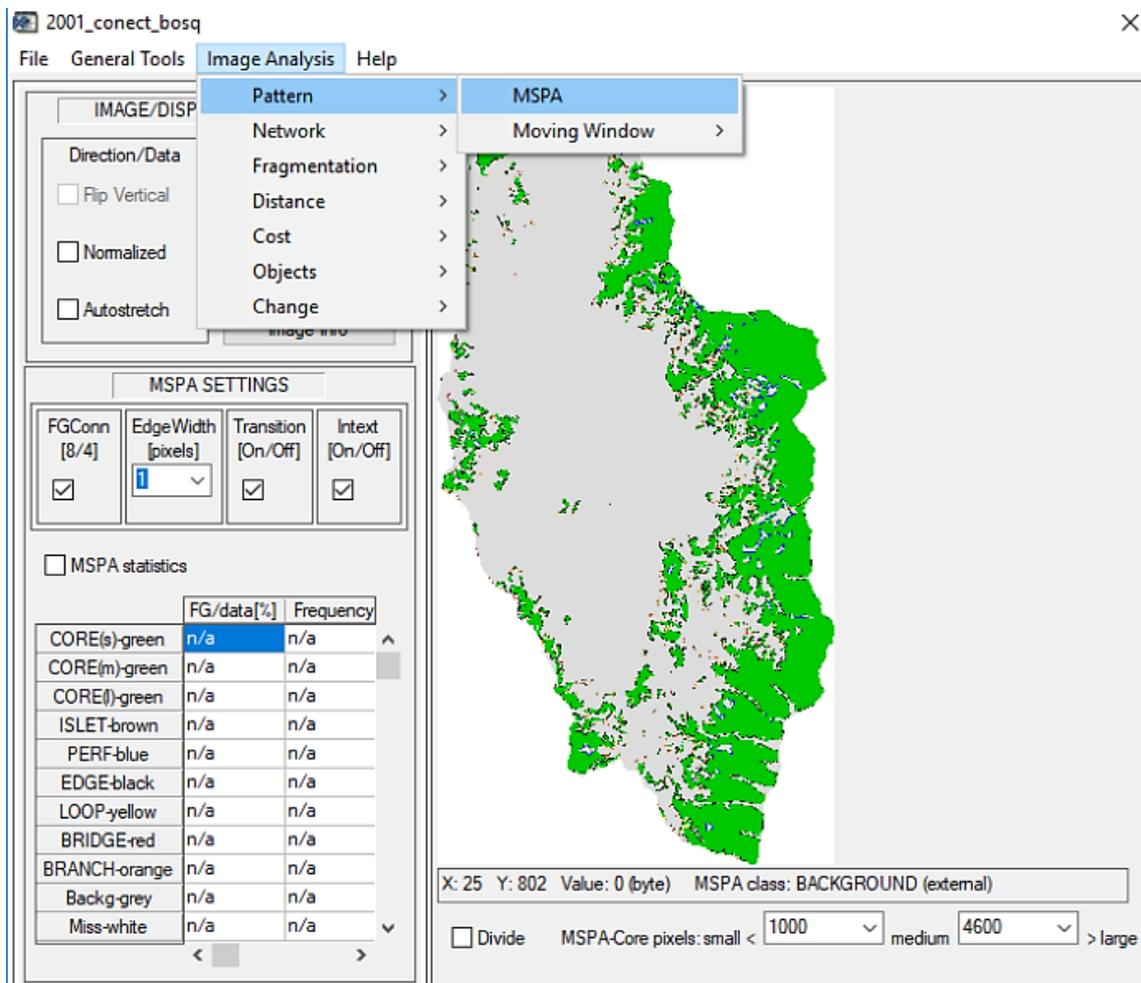


Figura 8. Interfaz de usuario de GUIDOS - cálculo de conectividad de áreas naturales

Para observar de mejor manera los patrones espaciales de cambio de los dos años de evaluación, se realizaron Heat Maps o mapas de calor de las clases morfométricas: branch (rama), bridge (puente) y loop (rama), de cada cobertura de interés ecológico, utilizando el software QGis.

### **3.6 MODELAMIENTO DE UN ESCENARIO FUTURO DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO PARA EL AÑO 2030**

Se realizó el modelado de un escenario futuro de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja para el año 2030, utilizando el software TerrSet, con el fin de proyectar los posibles cambios en la cobertura y uso de suelo de la zona de estudio; el proceso metodológico se desarrolló en dos fases principales, descritas a continuación:

#### **3.6.1 Generación de Información Base**

Se inició con la identificación de driver (impulsores de cambios), considerando estudios científicos realizados en otras zonas de estudio y la disponibilidad de información espacial de nuestra área de interés, llegando finalmente a seleccionar 12 drivers (Cuadro 2).

Una vez seleccionadas las variables, se realizó un pre procesamiento, que incluyó corrección de fallas y ajuste de detalles, especialmente en la información de cursos de agua y vías, las cuales fueron actualizadas digitalmente, utilizando la información de Open Street Map.

Una de las principales características del software TerrSet es que trabaja con archivos con formato específico del programa, por lo cual fue transformada la información vectorial de formato SHP a VCT, y de TIF a RST. Algunas capas base fueron utilizadas para generar mapas de distancias y en el caso del DEM para el mapa de pendientes (Cuadro 4).

#### **3.6.2 Modelación de Escenario Futuro - 2030**

##### **a) Parámetros de sesión**

El proceso de modelación se inició con la parametrización de sesión dentro de la extensión de TerrSet – Land Change Modeler (LCM), donde se requirió los CUS de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja del año 2001 y 2016, un Modelo de Elevación Digital (DEM) y red vial codificada en tres clases: primer orden, segundo orden y tercer orden.

Las sesiones fueron creadas de forma individual, generando de esta manera una sesión de modelación de escenario futuro para cada cobertura de interés ecológico, en este caso páramo y bosque, con los mismos parámetros antes mencionados.

## b) Transiciones potenciales

### - Submodelos de transición

Se utilizaron dos submodelos de transición, cada uno de ellos con dos tipos de transición, que comprende los potenciales cambios de las coberturas naturales a tierras agropecuarias y zonas antrópicas, las cuales se detallan a continuación:

- Submodelo de páramo: Páramo a tierras agropecuarias y páramo a zonas antrópicas.
- Submodelo de bosque: Bosque a tierras agropecuarias y bosque a zonas antrópicas.

### - Evaluación y selección de sitio y variables de controlador

La selección de variables usualmente se realiza mediante el análisis de una tabla de contingencia, la medida cuantitativa de asociación es Cramer's V, la cual da un valor para descartar o determinar una buena variable potencial, dicho valor va de 0 que indica que no existe correlación, y 1 que señala correlación perfecta, dicha medida constituye una prueba rápida del potencial explicativo de una variable (Figura 9); sin embargo puede llegar a ser imprecisa, puesto que no reconoce los efectos de interacción, lo que no garantiza un buen desempeño debido a que no puede dar cuenta de los requisitos matemáticos del enfoque de modelado utilizado y la complejidad de la relación.

The screenshot shows the TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System interface. The main window is titled 'Land Change Modeler : LCM'. The 'Transition Sub-Models : Status' panel is active, showing a table of transition rules. The 'Test and Selection of Site and Driver Variables' panel is also active, showing the evaluation of the 'Alos\_Loja15' variable. The table below shows the results of the Cramer's V and P-Value tests for different cover classes.

Cover Class	Cramer's V	P Value
Overall V	0.4343	0.0000
Bosque	0.5649	0.0000
Zonas Antropicas	0.5106	0.0000
Tierras Agropecuarias	0.3585	0.0000
Paramo	0.2563	0.0000

Figura 9. Interfaz de usuario de LCM - Transiciones potenciales

Considerando lo anterior, se decidió optar por el método de estabilización de variables, el cual consiste en realizar las ejecuciones necesarias para alcanzar en lo posible el 100% de tasa de precisión, paralelamente con el orden fijo e invariable de drivers; donde cada drive ocupe la misma posición en cada ejecución, sin disminuir la tasa de precisión.

- ***Estructura de Submodelo de transición***

Se inició el proceso de estabilización de variables con la importación de los 12 impulsores de cambio (variables) previamente procesados, principalmente como mapas de distancia; dentro de la estructura de submodelo de transición, se especificó el rol que desempeñan, el tipo de capa base y la operación, como se describe en el Cuadro 4:

**Cuadro 4.** Variables de Modelado Futuro

VARIABLE	ABREVIACIÓN	ROL	TIPO DE CAPA BASE	OPERACIÓN
Mapa de distancia al área urbana	URB	Estática	-	Distancia
Mapa de distancia al catastro minero	MINR	Estática	-	Distancia
Mapa de distancia de cobertura de tierras agropecuarias	AGROP	Dinámica	Cobertura terrestre	Distancia
Mapa de distancia de cobertura de zonas antrópicas	ANTRO	Dinámica	Cobertura terrestre	Distancia
Mapa de distancia de deforestación	DEFORST	Estática	-	Distancia
Mapa de densidad poblacional	DENSID	Estática	-	-
Mapa de distancia de áreas protegidas, socio bosque privado y comunitario.	PANE	Dinámica	Cobertura terrestre	Distancia
Mapa de pendientes	SLOPE	Estática	-	-
Modelo de elevación digital	ALOS	Estática	-	-
Mapa de distancia a zonas pobladas	POBLD	Estática	-	Distancia
Mapa de distancia de redes hídricas	RÍOS	Estática	-	Distancia
Mapa de distancia de redes viales	VÍAS	Dinámica	Carreteras	Distancia

Las variables pueden desempeñar un rol estático o dinámico, dependiendo si permanecen invariables a lo largo del tiempo, como el modelo de elevación digital, o están sujetas a factores

dependientes del tiempo y son recalculadas durante el curso de una predicción, como la red vial que se encuentra en constante variación.

- ***Ejecución del submodelo de transición***

Una vez estructurado el submodelo de transición con los impulsores de cambio, se determinó la Red Neuronal Perceptron multicapa (MLP) como metodología para el modelado, debido a su naturaleza de aprendizaje en cada ejecución, lo cual contribuye a la mejora continua de la tasa de precisión y la estabilización del orden de variables.

Con cada ejecución se generó automáticamente un archivo HTML, el cual contiene datos referentes a la ejecución realizada, principalmente con información acerca del orden de las variables a ser insertadas en la próxima ejecución, con su respectivo valor de influencia y nivel de precisión a obtenerse con dicho orden.

En el Cuadro 5 se resume las ejecuciones realizadas en cada cobertura, con las respectivas tasas de aprendizaje y precisión, para la obtención del conjunto de variables final.

**Cuadro 5.** Orden de variables del submodelo de transición final, con sus respectivas parametrizaciones y resultados del Multi-Player Perceptron.

Submodelo	Orden y variables seleccionadas para la ejecución	Nro. de ejecuciones	Muestras solicitadas por clase	Tasa de aprendizaje inicial	Tasa de aprendizaje final	Tasa de exactitud
<b>Páramo</b>	1. VÍAS 2. ANTRO 3. AGRO 4. URB 5. SLOPE 6. MINR 7. PANE 8. ALOS 9. POBLD 10. RÍOS	100	1370	0.01	0.001	95,04%
<b>Bosque</b>	1. VÍAS 2. ANTRO 3. AGRO 4. SLOPE 5. DEFORST 6. POBLD 7. ALOS 8. PANE 9. DENSID	80	1816	0.00187	0.0003	93,49%

Finalmente, evaluadas y seleccionadas las variables con la tasa de precisión más alta y el orden específico e invariable, se procedió a la creación de transición potencial para cada cobertura.

### c) Predicción de cambio

A partir de las transiciones potenciales generadas, se realizó la predicción de cambio para las coberturas de páramo y bosque para 2030, año de predicción establecido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC siglas en inglés); donde se hizo uso de la cadena de Markov, la cual determinó la probabilidad de que cada categoría de cobertura terrestre cambie a todas las demás categorías, de la fecha posterior a la fecha de predicción en función a los potenciales de transición hacia el futuro.

En la asignación de cambio sin componentes opcionales, se estableció una predicción suave o flexible, de tipo lógico OR, el cual se basa en el estado actual de los potenciales de transición para cada una de las transiciones seleccionadas, que trata una ubicación como más vulnerable si es deseada por varias transiciones al mismo tiempo. Adicionalmente se incluyó las coberturas de transición al submodelo correspondiente, para finalmente crear el modelo de ejecución o escenario futuro; como se observa en la Figura 10.

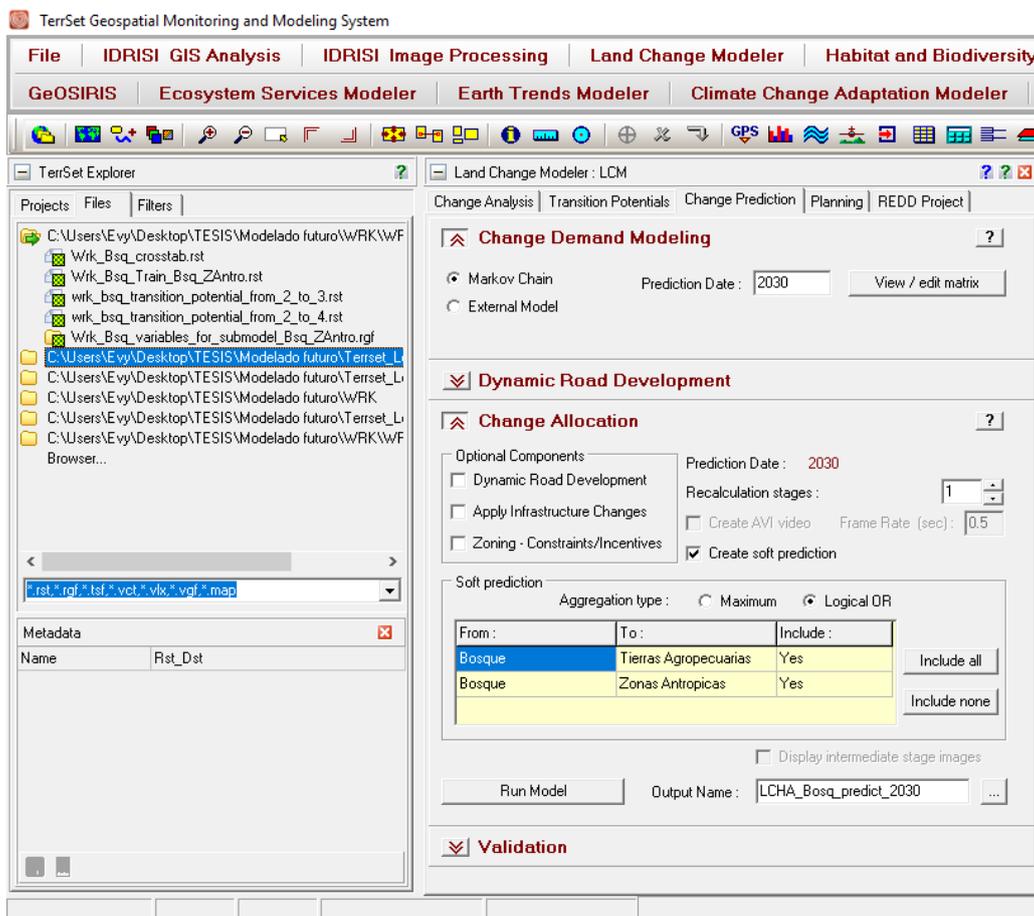
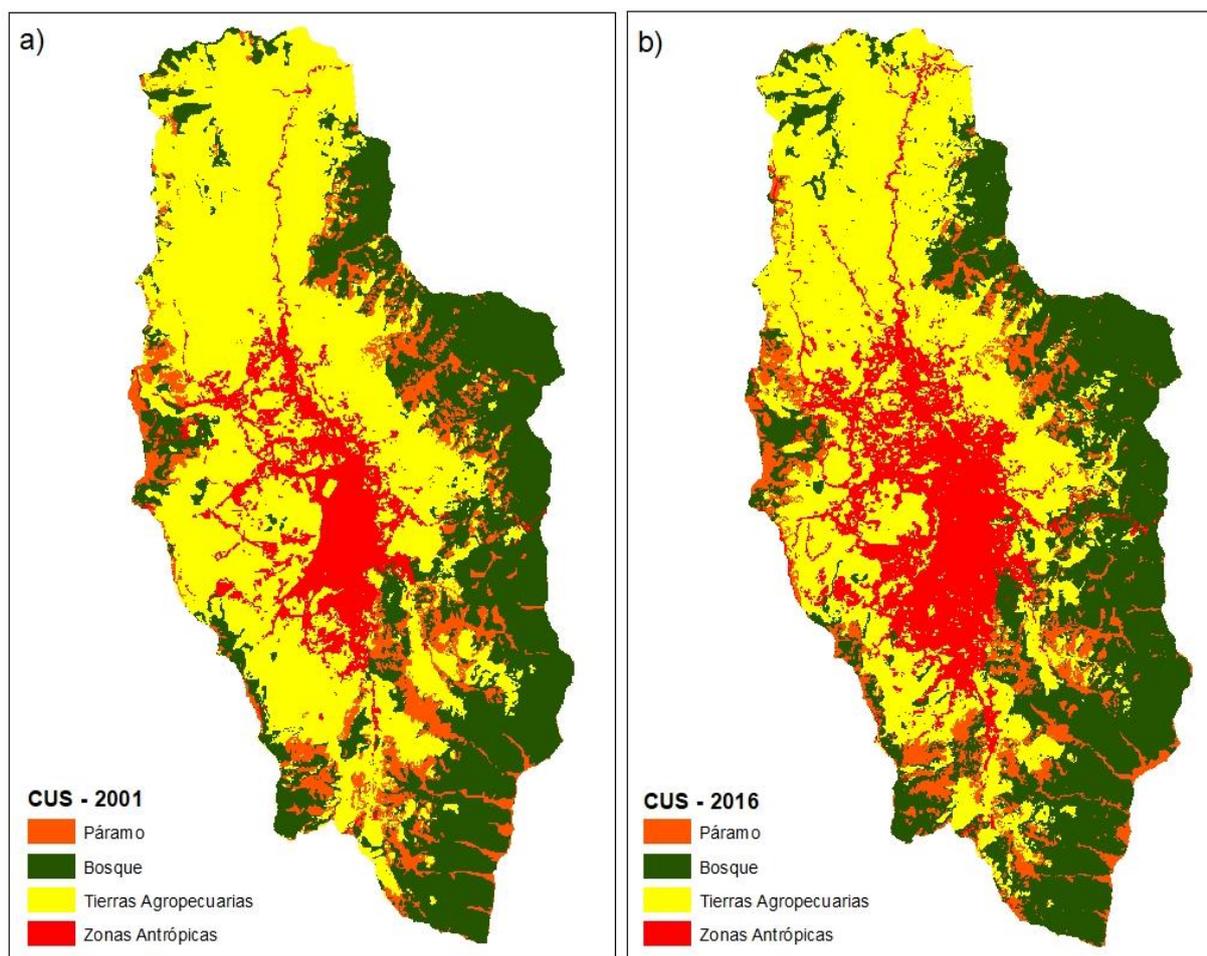


Figura 10. Interfaz de usuario LCM - Predicción de cambio

## IV. RESULTADOS

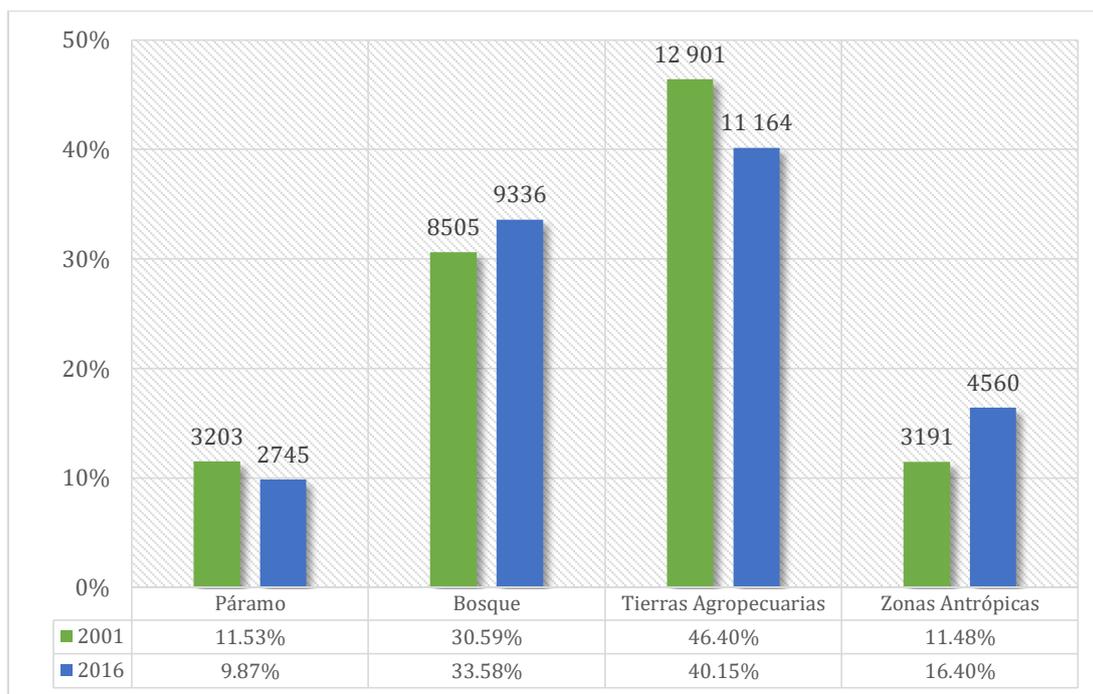
### 4.1 CAMBIOS ESPACIO TEMPORALES DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO QUE SE HA PRODUCIDO EN LA HOYA DE LOJA, A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS MULTITEMPORAL

Para el primer objetivo, se obtuvo como resultado final mapas de cobertura y uso del suelo de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja para los años 2001 y 2016 (Figura 11), donde se visualiza los cambios producidos en la zona y periodo de estudio.



**Figura 11.** a) Cobertura y Uso de Suelo de la Hoya de Loja, del año 2001. b) Cobertura y Uso de Suelo de la Hoya de Loja, del año 2016.

En el Anexo 3 y Figura 12, se puede observar de forma cuantitativa las coberturas y uso de suelo de los dos años de análisis expresados en hectáreas y porcentaje.



**Figura 12.** Cambio de cobertura y uso de suelo en la Hoya de Loja, expresado en porcentaje y número de hectáreas.

Dentro de la zona de estudio se puede distinguir que, las coberturas de *páramo y tierras agropecuarias* entre 2001 y 2016 sufrieron una disminución en su superficie total, del **1,66%** (- 458 ha) y del **6,25%** (- 1 737 ha), respectivamente. Mientras que las coberturas de *bosque y zonas antrópicas*, extendieron sus dominios en un lapso de 15 años, con un total de **2,99%** (+831 ha. principalmente en la zona sur y sureste de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja), y **4,92%** (+1369 ha) para cada cobertura.

#### **4.2 GRADO Y PATRONES DE FRAGMENTACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL DE LA HOYA DE LOJA**

En el Cuadro 6 se detalla cuantitativamente los cambios que han existido entre el año 2001 y 2016 dentro del área de estudio, mediante el cálculo de métricas de fragmentación para cada clase correspondiente.

**Cuadro 6.** Métricas de fragmentación de las coberturas clasificadas en los años 2001 y 2016

Cobertura	Año	NP <sup>1</sup>		PD <sup>2</sup>		LPI <sup>3</sup>		AREA_MN <sup>4</sup>		PAFRAC <sup>5</sup>	
		2001	2016	2001	2016	2001	2016	2001	2016	2001	2016
<b>Páramo</b>		687	826	2,47	2,97	0,91	0,56	4,167	3,113	1,43	1,41
<b>Bosque</b>		327	501	1,17	1,80	21,4	26,35	26,57	18,69	1,36	1,39
<b>Tierras Agropecuarias</b>		487	321	1,75	1,15	42,9	15,17	27,33	14,66	1,35	1,47
<b>Zonas Antrópicas</b>		268	758	0,96	2,72	8,61	24,55	10,99	14,74	1,44	1,39

A continuación, en el Cuadro 7 se exponen las variaciones porcentuales para cada métrica de fragmentación que ha presentado la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja entre el año 2001 y 2016:

**Cuadro 7.** Cambios porcentuales de los valores de las métricas para cada año y cobertura

COBERTURA	CCUS	NP	PD	LPI	AREA_MN	PAFRAC
<b>Páramo</b>	- 1,66	+ 20,23	+ 20,22	- 0,35	- 25,31	- 1,07
<b>Bosque</b>	+ 2,99	+ 53,21	+ 53,19	+ 4,90	- 29,65	+ 1,77
<b>Tierras Agropecuarias</b>	- 6,25	- 34,09	- 34,09	- 27,77	- 46,36	+ 9,16
<b>Zonas Antrópicas</b>	+ 4,92	+ 182,84	+ 182,81	+ 15,39	+ 33,99	- 3,15

Cabe señalar que los resultados obtenidos son de interés ecológico, por lo cual se tomará en cuenta únicamente los valores para las coberturas de páramo y bosque, debido a que procesos de fragmentación en coberturas de tierras agropecuarias y zonas antrópicas son irrelevantes para el presente objetivo.

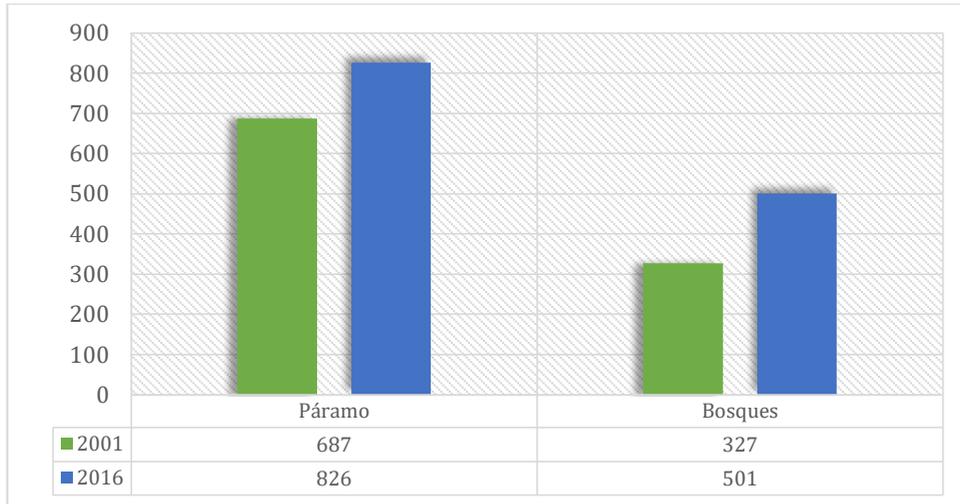
<sup>1</sup> NP. Número de parches

<sup>2</sup> PD. Densidad de parche

<sup>3</sup> LPI. Índice de parche más grande

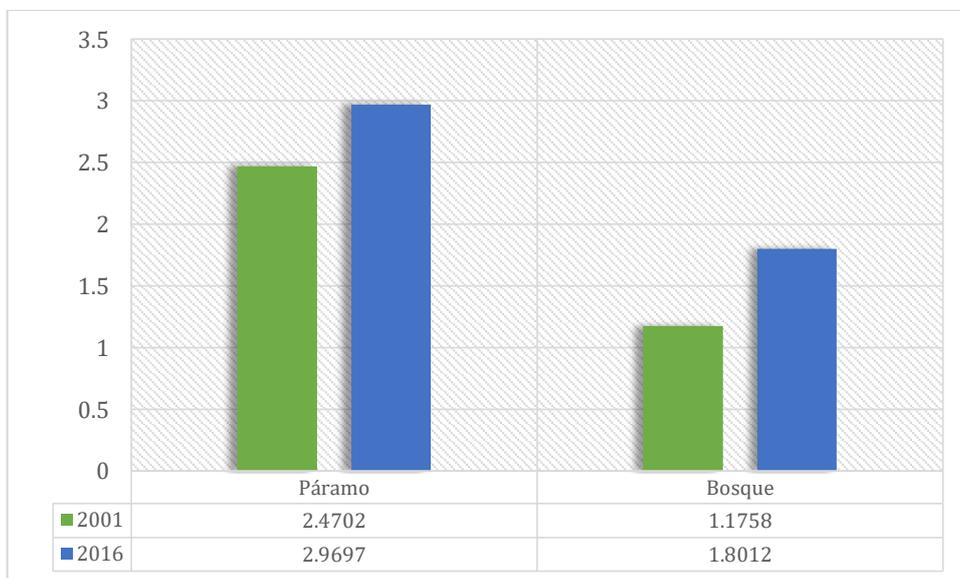
<sup>4</sup> AREA\_MN. Tamaño medio de parche

<sup>5</sup> PAFRAC. Índice de forma



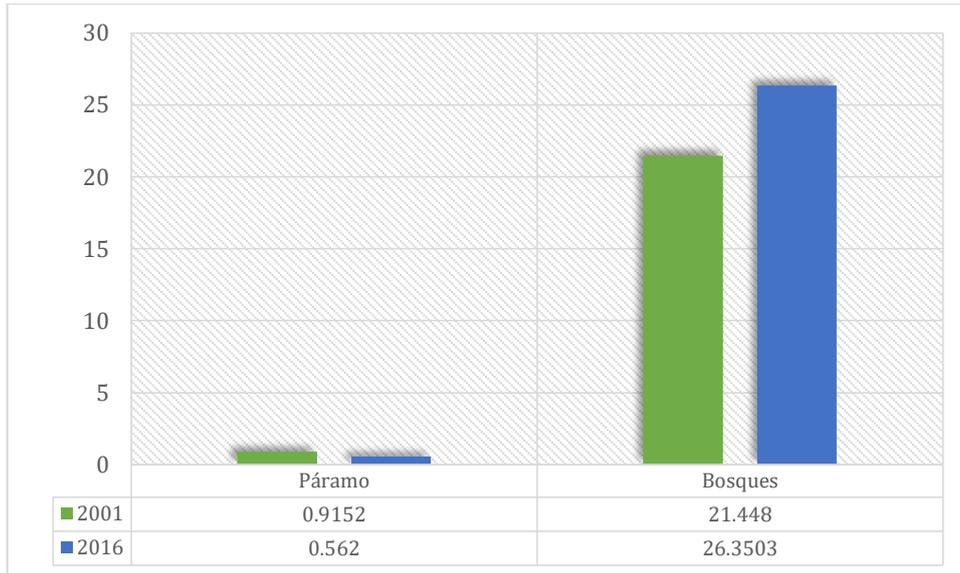
**Figura 13.** Comparación de resultados de métrica de Número de Parches para el año 2001 – 2016

En la Figura 13, se visualiza que para la métrica de *Número de Parches* entre 2001 y 2016, en la cobertura de *páramo* hubo un aumento del + 20,23% y en la cobertura de *bosque* incrementó un + 53,21%.



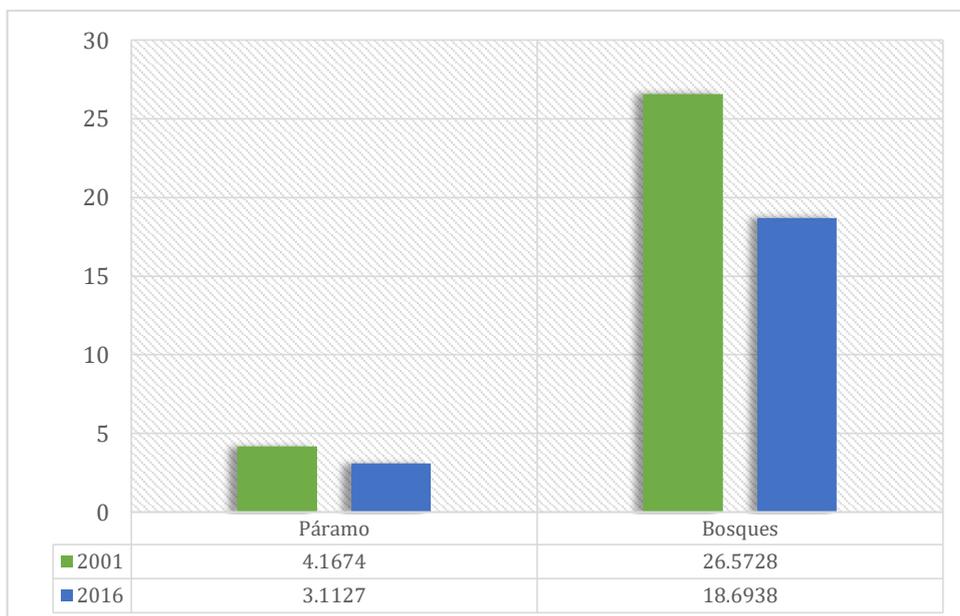
**Figura 14.** Comparación de resultados de métrica de Densidad de Parche para el año 2001 – 2016

En la Figura 14, se observa que para la métrica de *Densidad de Parches* en el lapso de 15 años, en la cobertura de *páramo* existió una aumento del + 20,22% y en la cobertura de *bosque* aumentó un + 53,19%.



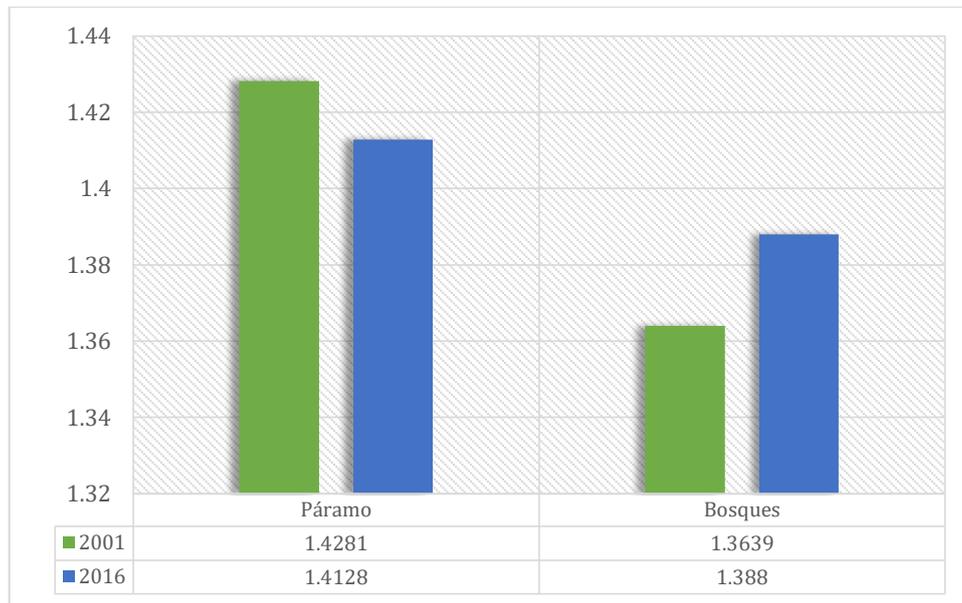
**Figura 15.** Comparación de resultados de métrica de Índice de Parche Más Grande para el año 2001 – 2016

En la Figura 15, se visualiza que para la métrica de *Índice del Parche Más Grande* entre 2001 y 2016, en la cobertura de *páramo* hubo una disminución del – 38,59% y en la cobertura *bosque* existió un incremento del + 22,86%.



**Figura 16.** Comparación de resultados de métrica de Tamaño Medio del Parche para el año 2001 – 2016

En la Figura 16, se observa que, para la métrica de *Tamaño Medio del Parche* en el lapso de 15 años, en la cobertura de *páramo* se presentó una disminución del – 25,31% y en la cobertura de *bosque* se redujo en un – 29,65%.



**Figura 17.** Comparación de resultados de métrica de Índice de Forma para el año 2001 – 2016

En la Figura 17, se visualiza que para la métrica de *Índice de Forma* entre 2001 y 2016, en la cobertura de *páramo* existió una disminución del  $- 1,07\%$  y en la cobertura de *bosque* se presentó un aumento del  $+ 1,77\%$ .

#### **4.3 MODELO DE CONECTIVIDAD DE LAS ÁREAS NATURALES EN LA HOYA DE LOJA**

Para el tercer objetivo se obtuvieron dos mapas de modelado de conectividad de áreas naturales, mediante escenarios de conexión potencial para las coberturas de páramo y bosque. Sin embargo, debido a que las conexiones son imperceptibles por su tamaño, fue necesaria la construcción de mapas de calor para cada tipo de conector (lazo, puente, rama), cobertura y año, para facilitar la identificación de la distribución y concentración de dichos conectores a lo largo de la zona de estudio.

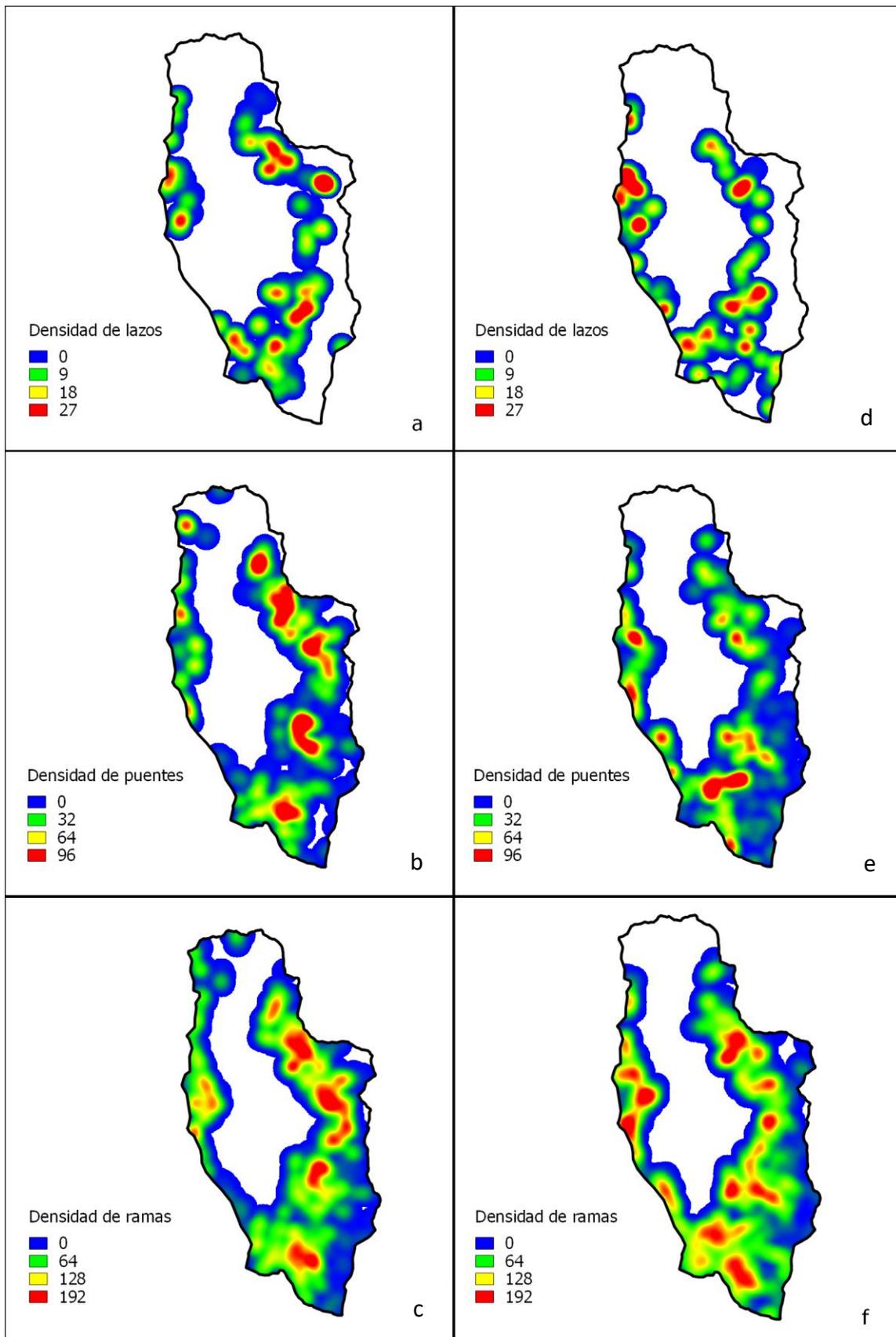
Adicionalmente se generó una matriz de resultados cuantitativos de los parámetros MSPA para cada cobertura y año respectivamente, como se presenta en el Cuadro 8 y Cuadro 9.

**Cuadro 8.** Dinámica multitemporal de los parámetros morfológicos espaciales de la cobertura páramo.

MSPA-clase	Color	Primer plano (%)			Frecuencia		
		2001	2016	Variación	2001	2016	Variación
<b>Núcleo</b>	Verde	56,30	53,57	- 2,73	875	845	- 30
<b>Isla</b>	Café	3,46	5,14	+ 1,68	595	714	+ 119
<b>Perforación</b>	Azul	0,59	0,46	- 0,10	31	27	- 4
<b>Borde</b>	Negro	27,15	26,52	- 0,63	1 120	1 115	- 5
<b>Lazo*</b>	Amarillo	0,64	0,81	+ 0,17	119	119	0
<b>Puente*</b>	Rojo	3,46	3,27	- 0,19	639	578	- 61
<b>Rama*</b>	Anaranjado	8,40	10,24	+ 1,84	2846	3085	+ 239

\*Conectores de interés

En el Cuadro 8 se puede observar que, dentro de la cobertura de **páramo** en los años 2001 y 2016, se pudo determinar que la clase núcleo disminuyó un  $- 2,73\%$ , e isla aumentó un  $+ 1,68\%$  lo que corrobora la presencia de procesos de fragmentación dentro de la cobertura. Al existir un incremento en los niveles de fragmentación dentro de la zona de estudio los conectores consecuentemente tienden a aumentar, debido a que son necesarios para vincular zonas naturales con otras, sea entre o intra núcleos. A esto se observó un aumento del  $+ 0,17\%$  en lazos y  $+ 1,84\%$  en ramas.



**Figura 18.** Ilustración de conectores de la cobertura páramo para el año 2001: a) lazos b) puentes c) ramas. Ilustración de conectores de la cobertura páramo para el año 2016: d) lazos e) puentes f) ramas.

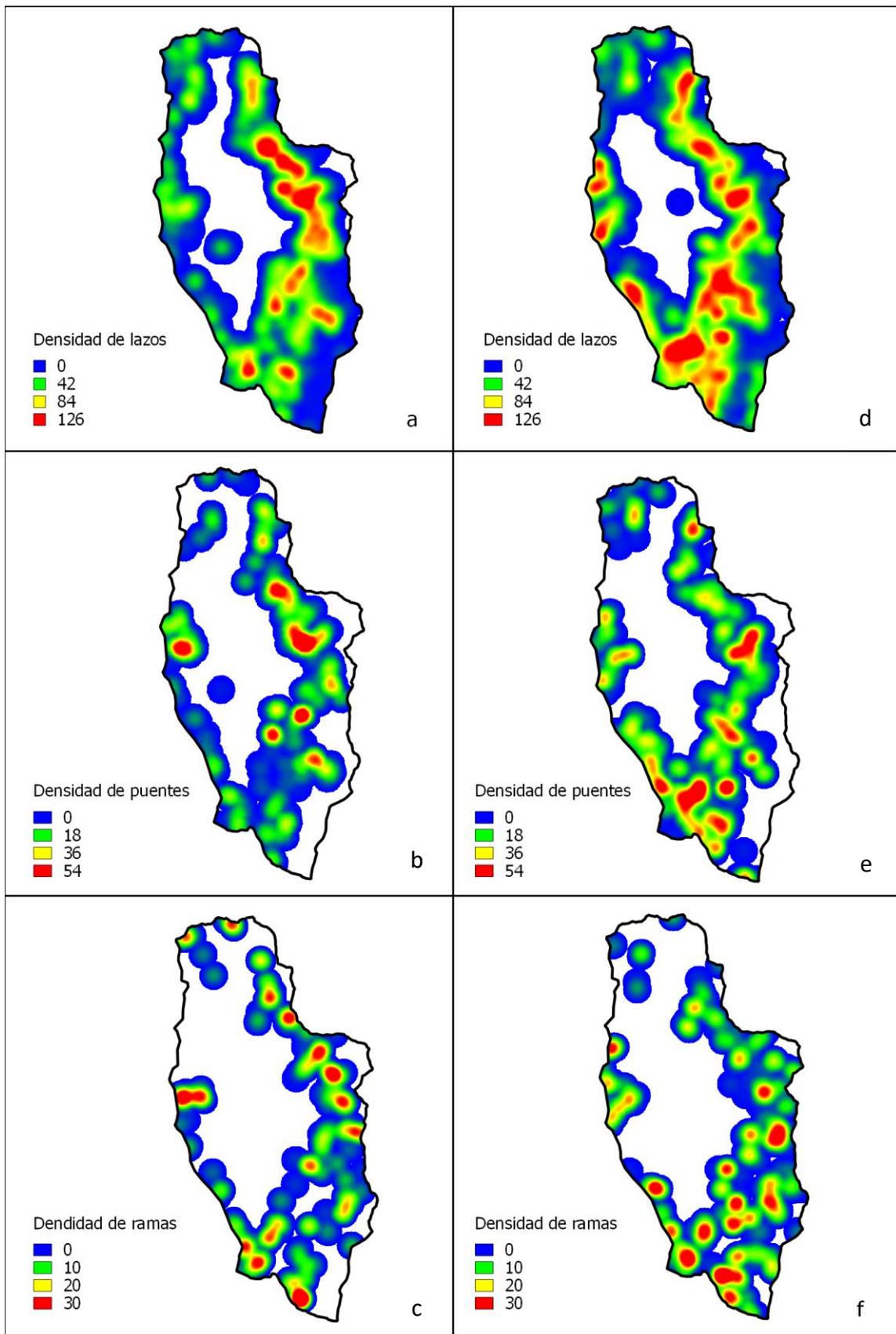
En la Figura 18 se observa la concentración de patrones de conectividad en la clase **lazo** para el año 2001 se encuentra en las parroquias de El Valle, Punzara y Carigán; de manera similar en el año 2016 se encuentran en las parroquias de Punzara, Sucre y El Valle, aumentando su concentración en la parroquia de Carigán. A pesar de que la clase **punte** disminuyó un - 0,19%, en 2001 se presentó una mayor concentración en las parroquias de El Sagrario y San Sebastián, mientras que en 2016 se hallaron mayormente en la parroquia de Punzara. La clase **rama** para el año 2001 presentó un patrón de concentración a lo largo de las parroquias Punzara, El Sagrario, El Valle y San Sebastián; mientras que para el año 2016 se observan fuertes concentraciones de conectores alrededor de todas las parroquias de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja, los cuales mayormente siguen los bordes del área de estudio, debido a que en esas zonas se asentaba la mayor parte de la cobertura de páramo.

**Cuadro 9.** Dinámica multitemporal de los parámetros morfológicos espaciales de la cobertura bosque.

MSPA-clase	Color	Primer plano (%)			Frecuencia		
		2001	2016	Variación	2001	2016	Variación
<b>Núcleo</b>	Verde	85,01	83,05	- 1,96	455	619	- 164
<b>Isla</b>	Café	0,54	0,81	+ 0,27	206	450	+ 244
<b>Perforación</b>	Azul	1,32	2,00	- 0,68	103	249	- 146
<b>Borde</b>	Negro	10,53	10,77	+ 0,63	687	920	+ 233
<b>Lazo*</b>	Amarillo	0,27	0,33	+ 0,04	189	230	+ 41
<b>Puente*</b>	Rojo	0,46	0,63	+ 0,17	303	434	+ 131
<b>Rama*</b>	Anaranjado	1,86	2,40	+ 0,54	2 084	3 094	+ 1 010

\*Conectores de interés

En el Cuadro 9, se observa que dentro de la cobertura de **bosque** en los años 2001 y 2016, se determinó que la clase núcleo se redujo en un - 1,96%, e isla incrementó un + 0,27%, ratificando procesos de fragmentación en la cobertura. Al existir dichos procesos dentro de la zona de estudio, se necesitará un aumento de conectores, para la vinculación de áreas naturales entre sí. A esto se observó un aumento del + 0,04% en lazos, + 0,17% en puentes y + 0,54% en ramas.



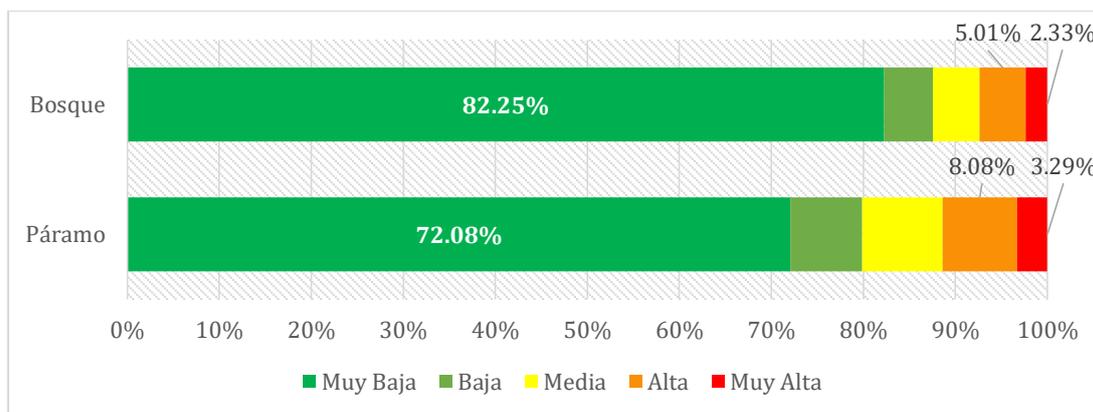
**Figura 19.** Ilustración de conectores de la cobertura bosque para el año 2001: a) lazos b) puentes c) ramas. Ilustración de conectores de la cobertura bosque para el año 2016: d) lazos e) puentes f) ramas.

En la Figura 19 se visualiza que la clase **lazo** se halla ampliamente distribuida a lo largo de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja, en el año 2001 se encontró una mayor concentración de conectores en las parroquias de El Valle, Sagrario y San Sebastián, mientras que en el año 2016 se halló una gran cantidad de conexiones distribuidas por todas las parroquias de la Ciudad de Loja, especialmente en la parroquia Punzara y a lo largo de los bordes de la zona de estudio. Para la clase **punte** los patrones en el 2001 se hallaron con mayor intensidad en la parroquia de El Valle, para el año 2016 se pudo observar un incremento considerable de puentes en la parroquia Punzara, sin disminuir enormemente su concentración en la parroquia de El Valle. Finalmente, la clase **rama** en el año 2001 presentó patrones de fuerte concentración en la parroquia de El Valle y Sagrario, y con menores en las parroquias de Punzara y Carigán; en 2016 se hallaron conexiones con más fuerza en las parroquias de Sucre, Sagrario, Punzara y con menor intensidad en la parroquia de El Valle.

#### **4.4 MODELADO DE UN ESCENARIO FUTURO DE LA CUBERTURA Y USO DEL SUELO PARA EL AÑO 2030 EN LA HOYA DE LOJA**

Como resultado del cuarto objetivo se obtuvieron dos capas ráster una cuantitativa de predicción suave, denominada potencial proyectado para la transición, la cual es un mapeo continuo de la vulnerabilidad al cambio para el conjunto seleccionado de transiciones, y no indica expresamente qué cambiará, sino, cuantifica el grado en que las áreas tienen las condiciones adecuadas para precipitar el cambio. Y una cualitativa de predicción dura, denominada cobertura de suelo proyectada, que genera un escenario futuro específico, en un mapa de CUS con todas las categorías de entrada, con sus respectivas ganancias y pérdidas de cobertura para el año de predicción. Tomando en cuenta que generar un modelo de escenario futuro, implica cierto nivel de incertidumbre no se consideraron los resultados de la predicción dura, debido a que constituyen resultados inflexibles por su naturaleza específica.

La predicción suave constituye una evaluación integral del potencial de cambio de la cobertura de interés, por lo cual fue seleccionada para la construcción de una matriz de datos reclasificada en cinco categorías, para una mejor presentación e interpretación de los resultados obtenidos; los cuales determinan los posibles cambios a producirse en cada cobertura para el año 2030, con probabilidad de cambio de muy baja a muy alta (detallado en el Anexo 4).



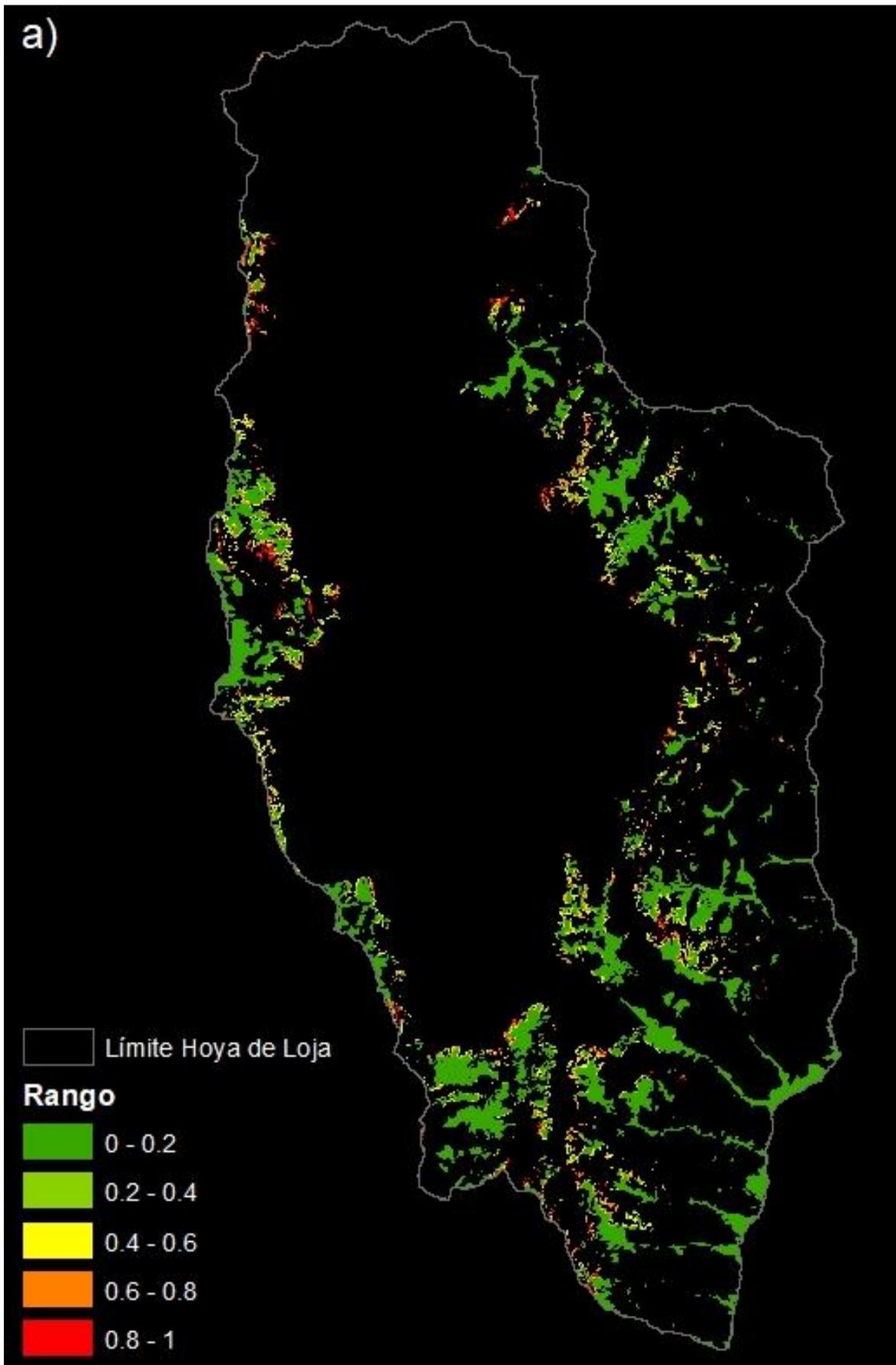
**Figura 20.** Probabilidad de cambio en la Hoya de Loja – 2030

En la Figura 20 se puede observar que en la cobertura de páramo se determinó un 3,29% de probabilidad muy alta y un 8,08% de probabilidad alta; es decir, un 11,37% de cobertura tendería a sufrir cambios en el año 2030. En la cobertura bosque se estableció un 2,33% de probabilidad muy alta y un 5,01% de probabilidad alta; lo que significa que un 7,34% de cobertura cambiaría para el año 2030.

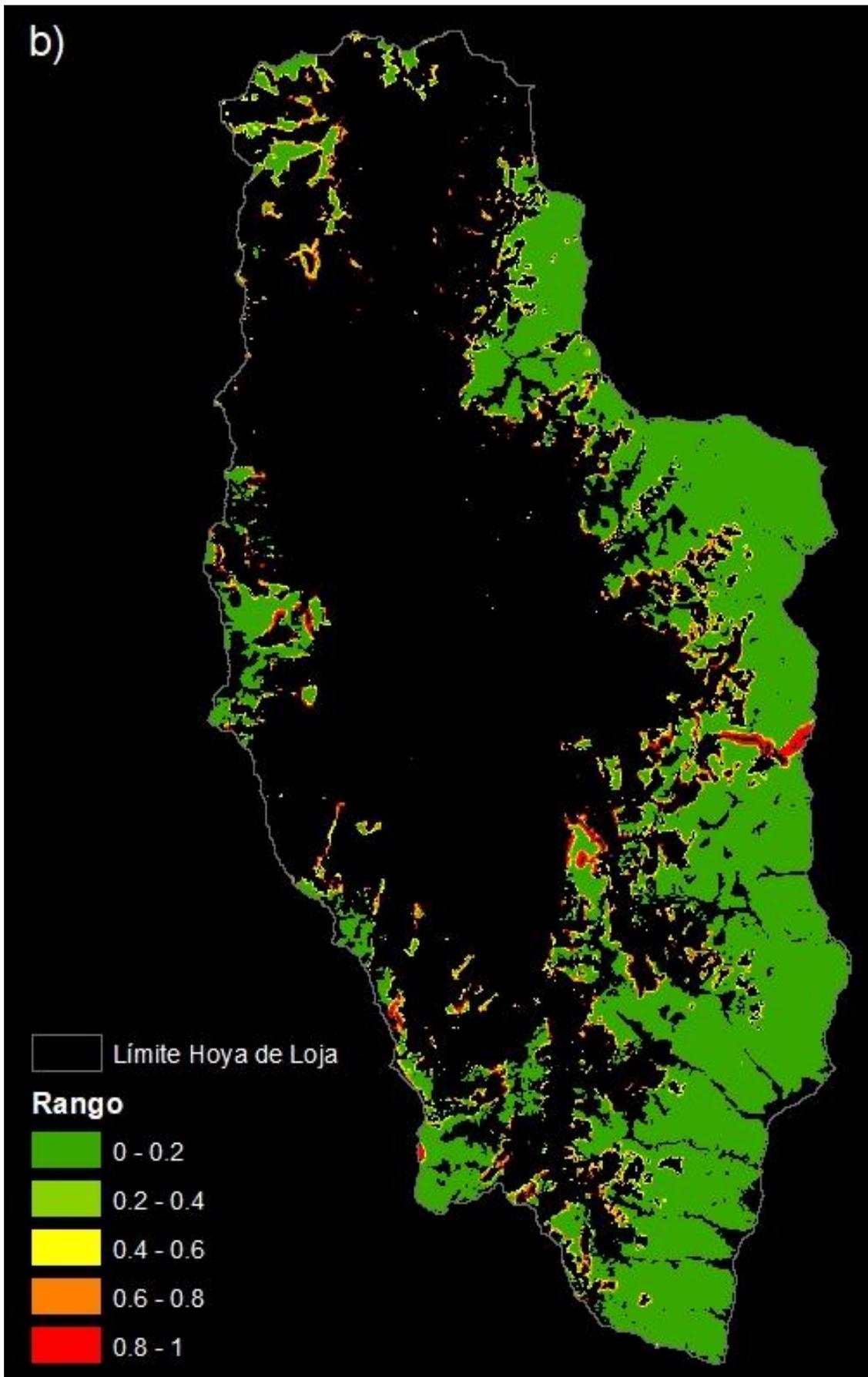
No obstante, a pesar de que los valores de alta y muy alta probabilidad de cambio son relativamente bajos en relación a los de muy baja probabilidad; puesto que para páramo habría un 72,08% de probabilidad muy baja de cambio, y de igual forma para la cobertura bosque un 82,25% de probabilidad muy baja para sufrir cambios. Las coberturas analizadas constituyen un pilar ecológico dentro del área de estudio, por lo que se cree necesario tomarse medidas respectivas y necesarias para su manejo, protección y conservación óptima, disminuyendo así la probabilidad alta y muy alta de cambios para el año 2030.

En base a las capas ráster resultantes y a la matriz de datos reclasificados, se generaron mapas de probabilidad de cambio de la cobertura páramo y bosque para el año 2030; diseñados para facilitar la identificación de patrones y ubicación de las zonas más propensas a sufrir cambios en los próximos 15 años; los cuales son presentados a continuación.

En la Figura 21 se observan los posibles cambios en las coberturas, la clase de páramo se encuentran distribuidos aleatoriamente por toda la el área de estudio, siendo los páramos del parque eólico ubicado a lo largo del cerro Villonaco y la vía a Zamora las zonas con mayores probabilidades de sufrir cambios, incluyendo páramos aledaños a zonas de transición entre páramo - bosque y páramos - tierras agropecuarias. Mientras que en la Figura 22, en la cobertura de bosque las zonas con muy alta y alta probabilidad de cambio se encuentran dentro o aledaños al parque eólico, la vía a Zamora, sector de Zamora Huayco y de igual forma aquellas que se asientan en zonas de transición.



**Figura 21.** a) Ilustración de probabilidad de cambio de la cobertura páramo para el año 2030.



**Figura 22.** b) Ilustración de probabilidad de cambio de la cobertura bosque para el año 2030.

Cabe señalar que todas las áreas boscosas y de páramo que cuentan con escasa superficie de extensión son mucho más propensas a sufrir cambios, puesto que la mayor parte de estas se hayan de color rojo (muy alta probabilidad de cambio) y por su reducido tamaño no son distinguidas a simple vista. Se cree que los principales factores que inciden en la pérdida o cambio de cobertura son la expansión urbana y crecimiento poblacional.

## V. DISCUSIÓN

### 5.1 CAMBIOS ESPACIO TEMPORALES DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO DE LA HOYA DE LOJA DEL AÑO 2001 - 2016

Los cambios espacio temporales de la cobertura y uso del suelo en la cuenca alta del río Zamora, de acuerdo al análisis multitemporal han sido relativamente ligeros en el periodo 2001 – 2016. De acuerdo a estudios realizados por Torrachi (2015) y Van Der Hoek (2017), la proximidad a zonas previamente deforestadas, la presencia de madera dura para su explotación y especialmente la cercanía a vías que facilitan el acceso, podrían constituir las principales variables incidentes en la disminución de páramos y bosques, donde la pérdida o transformación de coberturas vegetales da paso a otros tipos de usos, tales como agricultura, pastizales, infraestructura, embalses. Además otro factor adicional clave es el crecimiento de la población humana local acompañada de la expansión urbana.

Ecuador posee aproximadamente 12 500 km<sup>2</sup> de páramo; sin embargo, se presentan procesos de degradación en la sierra andina, como es el caso de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja, donde en base a los resultados del estudio realizado se observó que la cobertura de páramo ha sufrido una disminución en su superficie total en un lapso de 15 años. Estos cambios se pueden atribuir a diferentes variables, en los estudios de Carrasco y Guzmán (2011) y Torres (2014) se menciona la aplicación de técnicas no sostenibles dentro de la cobertura, como el pastoreo extensivo e intensivo para ganadería, la agricultura migratoria, el establecimiento de plantaciones forestales con especies exóticas y quemas de vegetación, afectando su composición y estructura vegetal, lo que favorece el establecimiento de pastos exóticos y hierbas rasantes altamente competitivas que contribuyen a la pérdida de funciones, reciclaje de nutrientes y progresiva erosión de la cobertura de páramo.

Según Maza (2010), en la ciudad de Loja los recursos naturales como el suelo, la cubierta vegetal, la calidad y cantidad del agua han sido afectados por la acción antrópica; además el cambio y uso del suelo constituye una de las principales actividades dinámicas del paisaje y el territorio, ya sea para el desarrollo económico o social. En el presente estudio se encontró un incremento de superficie boscosa en el periodo de estudio de 2,99% que puede atribuirse a la existencia de áreas protegidas que son parte de las políticas públicas, fundamentales para reducir y frenar procesos de deforestación (Van Der Hoek, 2017). En el periodo 2014 – 2016 en Ecuador se registró una regeneración anual promedio de 33 241 ha/año (MAE, 2017b),

además, la implementación del Programa Socio Bosque en 2008 ha contribuido a la preservación de grandes extensiones de bosque nativo, así como el Plan de Acción REDD+ del Ecuador “Bosque para el Buen Vivir” (2016-2025), el cual constituye un componente esencial en la reducción de la deforestación (MAE, 2016b).

Los patrones de aumento de la cobertura boscosa identificados en este estudio, se repiten en las estadísticas de otras investigaciones, como el caso de datos de obtenidos de GLOBAL FOREST WATCH, (2018); desde el año 2001 al año 2012, el cantón Loja ganó 355 ha de cobertura arbórea, lo que equivale al 26% de toda la ganancia de cobertura arbórea en la provincia de Loja. Así mismo, considerando la información de los mapas de Cobertura y Uso de Suelo de Ecuador Continental de los años 2000 y 2016, estos reportan un aumento de la cobertura boscosa en un 10,5% (845 ha).

El aumento del área de bosques, puede ser resultado de una serie de estrategias de conservación nacionales y locales implementadas. Dentro de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja el 41,27% (3 826,7 ha) de la cobertura de bosques se encuentra en áreas protegidas, como El Parque Nacional Podocarpus, Bosques Protectores y Programas de Socio Bosque privados y comunitarios, que contribuyen a la protección e incremento de áreas boscosas. También se puede mencionar otros posibles factores, como la migración de población rural a núcleos urbanos, la regeneración natural de bosques (Torrachi, 2015), programas y proyectos de reforestación por parte del Municipio de Loja en microcuencas para el manejo de fuentes de agua, la restauración forestal con fines de conservación ambiental y reforestación en el parque lineal “Orillas del Zamora” (PDOT Loja, 2014), que favorecen el aumento de superficie arbórea.

Las grandes extensiones de plantaciones y diseminación natural de especies exóticas como eucalipto y pino (Maza, 2009), aportan significativamente en el porcentaje total de cobertura bosque en la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja; sin embargo contribuyen a la disminución de extensión de páramos, debido a que son considerados áreas de aptitud forestal, lo que ocasiona la alteración de su paisaje (Carrasco y Guzmán, 2011) y pérdida de cobertura vegetal nativa; como es el caso del sector Villonaco, donde hace más de 30 años los páramos han sido reemplazados por plantaciones de pinos (Calatayud et al., 2010).

Como factores negativos en la reducción de los bosques, se encuentran los constantes incendios forestales registrados en la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja y sus alrededores; según diario Crónica, (2015), en el cantón Loja se registraron alrededor de 30 incendios en 2015, para

el año 2016 según el Informe de Situación número 110 de incendios forestales se registraron cerca de 144 incendios forestales en la provincia de Loja, consumiendo alrededor de 6 325 ha (Riesgos, 2016); solo en el noviembre del 2016 se registró un incendio que consumió más de 100 ha en el sector el Capulí (ECU 911, 2016).

A nivel nacional se puede mencionar algunas estadísticas de la dinámica de los bosques, donde según Sierra (2013), entre el 2000 y el 2008, el 99,4% del área deforestada del país fue transformada a áreas agropecuarias, el 0.23% a infraestructura, principalmente áreas urbanas y asentamientos rurales densos y 0,37% a otros; las dos terceras partes de las nuevas áreas urbanas fueron creadas a partir de áreas agropecuarias establecidas en décadas anteriores, que originalmente fueron zonas boscosas. Lo que ratifica los resultados obtenidos, donde la cobertura de zonas antrópicas ha sido aquella con mayor porcentaje de cambio entre los años 2001 y 2016 tendiendo a ganar superficie, principalmente de tierras agropecuarias; indicando que son inversamente proporcionales: a medida que se intensifica el crecimiento poblacional y la extensión urbana en torno a la periferia de la ciudad de Loja, disminuyen zonas aledañas al casco urbano destinadas a cultivos y ganadería.

En base a lo anterior expuesto, se puede corroborar que el incremento de zonas antrópicas conlleva al aumento de tierras destinadas a construcción de viviendas, negocios comerciales, apertura de vías y consecuentemente la disminución y pérdida de extensión de coberturas con fines de producción agrícola, ganadera e incluso vegetación natural como zonas arbóreas y páramos; tomando en cuenta que a partir de datos obtenidos del INEC (2010), en la ciudad de Loja habitaban aproximadamente 181 mil personas, para el 2020 habrían alrededor de 214 mil personas y se estima que para el año 2030 la población alcanzaría un total de 249 mil habitantes, se prevé un incremento paralelo de la población con las zonas antrópicas a lo largo de los años.

## **5.2 GRADO Y PATRONES DE FRAGMENTACIÓN DE LA COBERTURA DE VEGETAL**

La deforestación, causada principalmente por la conversión de la tierra forestal a zonas de agricultura y ganadería, amenaza a la variedad de la vida en nuestro planeta. Los cambios de uso de la tierra dan lugar a una pérdida de hábitats valiosos, a la degradación de la tierra, la erosión del suelo, la disminución del agua limpia y la liberación de carbono a la atmósfera. Encontrar la manera de aumentar la producción agrícola y mejorar la seguridad alimentaria sin reducir la superficie forestal es uno de los mayores problemas de nuestro tiempo (FAO, 2018).

Según (Tapia et al., 2015), el crecimiento de la población combinado con la expansión del sistema de carreteras en el sur de Ecuador aumentó la accesibilidad de áreas hasta entonces inexploradas y además hizo rentable la extracción de madera a un costo menor.

En 2010, Ecuador poseía 15,6 millones de hectáreas de cobertura arbórea, que se extendía sobre el 61% de su superficie terrestre, sin embargo entre 2001 y 2017 perdió alrededor de 748 mil ha de cobertura arbórea (GLOBAL FOREST WATCH, 2018); en la provincia de Loja entre los años 1990 y 2016 se perdieron aproximadamente de 11 380 ha de bosques, por procesos de deforestación (MAE, 2017b). La pérdida de especies da como resultado conjuntos de árboles empobrecidos localmente y cada vez más homogeneizados, donde la flora arbórea de crecimiento antiguo se reemplaza por un pequeño subconjunto de especies de árboles pioneros o sucesionales (Tapia et al., 2015).

Dentro del periodo de análisis, la cobertura de páramo presentó una disminución de las métricas de índice de parche más grande y tamaño medio de parche, lo que consecuentemente contribuyó al aumento de los valores en las métricas de número y densidad de parche; esto indica que la cobertura ha presentado procesos de fragmentación, a pesar de contar con formas regulares, de acuerdo al índice de forma.

En la cobertura de bosque se pudo observar un incremento de los valores en las métricas de índice de parche, número y densidad de parche; esto evidencia un alto nivel de fragmentación en zonas boscosas, cabe señalar que existió una disminución del tamaño medio del parche, lo cual indica que se están dando aún más procesos de fragmentación; a pesar de que el parche tiende a ser regular, en base a valores del índice de parche.

Teniendo en cuenta que en el cantón Loja las tasas de deforestación entre 1990 y 2008 ha sido de aproximadamente de 10,60%, significando una pérdida de aproximada de 200 064,82 ha de bosque y cobertura vegetal (PDOT Loja, 2014), dichos datos corroboran los resultados obtenidos en el trabajo de estudio, donde se evidencia la presencia de un alto nivel de fragmentación en coberturas de interés ecológico y el desarrollo de aún más procesos fragmentadores dentro de la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja. Debido a que la deforestación y fragmentación se encuentran estrechamente ligados, a medida que se incrementan actividades de deforestación, los parches de bosque pueden disminuir o incluso desaparecer, empeorando su situación referente a fragmentación.

De forma adicional en base a datos de fragmentación de los ecosistemas del Ecuador Continental (2015), presentados por el MAE, se puede observar que en los ecosistemas

pertenecientes a la Hoya Loja poseen niveles medios e incluso altos de fragmentación. A pesar que áreas boscosas aumentaron su superficie entre 2001 y 2016 en el área de estudio, no significa que no se han dado procesos de deforestación en la zona, o que este aumento de bosques ha sido en forma de parches, dispersa o incluso con especies exóticas.

A partir de estudios realizados por González, Tapia y Valdivieso (2009), la fragmentación de coberturas vegetales nativas ha traído como consecuencia “cambios en las condiciones ambientales de los remanentes de bosque, pérdida en el número y composición de genotipos, especies, tipos funcionales y unidades de paisaje”; además, según MAE (2017b) causa alteraciones en procesos biológicos y ecológicos, disponibilidad de servicio ecosistémicos, abastecimiento de agua y cambios en la estructura física del suelo, que contribuye a la generación de deslizamientos de tierra.

Las causas de la fragmentación pueden ser de tipo antrópico, como la construcción de una carretera que fragmenta generalmente un ecosistema de bosque por intervención humana, así como el avance de la frontera agrícola, especialmente en áreas rurales y montañosas, como sucede en los ecosistemas del páramo; o de tipo natural, la cual se da en casos de ecosistemas localizados sobre cumbres, llanuras aluviales, zonas lacustres o valles que tienen un patrón de distribución discontinuo (MAE, 2015).

Es importante señalar que el interés de la comunidad científica por la fragmentación de hábitats naturales, radica en que estos son considerados motores principales de la pérdida masiva de biodiversidad a escala planetaria (García, 2011). La gestión y creación de políticas debe apuntar hacia la concentración de estrategias que brinden la oportunidad de que los hábitats posean mayor resiliencia contra los cambios no deseados (MAE, 2015).

### **5.3 MODELO DE CONECTIVIDAD DE LAS ÁREAS NATURALES**

En base a los resultados obtenidos del trabajo de estudio se pudo zonificar los sectores donde es más urgente la aplicación de conectores, y a partir de la información secundaria revisada y analizada, se puede decir que el modelado de conectividad se concentra en zonas donde existe un alto grado de fragmentación en la cuenca alta del río Zamora u Hoya de Loja principalmente en las parroquias de El Valle y Punzara, tanto para las coberturas de páramo, como bosque; tomando en cuenta que se evidenció la disminución de núcleos y consecuentemente el aumento de islas y conectores de ramas, lazos y puentes en la zona de estudio, indicando que zonas con mayor área de superficie o núcleos han sido fragmentados en islas, por lo cual es necesario la

implantación de conectores para disminuir los impactos provocados por los procesos fragmentadores. Dicha información se ratificó con datos de conectividad de los ecosistemas del Ecuador Continental, donde se corrobora que en ambos casos, áreas con altos niveles de conectividad ocupan las mismas zonas. Puesto que se considera que en zonas donde se observa mayor concentración de posibles conectores naturales, es dónde existe un mayor grado de fragmentación, alteración de los ecosistemas y pérdida de diversidad biológica.

Por ende la conectividad es un proceso opuesto a la fragmentación; lo que quiere decir que el número de conectores dentro de áreas naturales es inversamente proporcional al nivel de fragmentación en la zona, a mayores patrones de conectividad, menores niveles de fragmentación, además de restitución, continuidad y mejoramiento de servicios ecosistémicos (Colorado et al., 2017; Vargas, 2008).

En estudio realizados por Leonard et al. (2016) menciona que a consecuencia de la intensificación de los patrones de uso humano de la tierra, la conectividad del paisaje a menudo se degrada con impactos negativos en la biodiversidad global. El aumento en el aislamiento del hábitat se correlaciona fuertemente con la distribución de especies amenazadas, en peligro de extinción y extintas en puntos críticos de diversidad; además que la pérdida de conectividad limita el valor de conservación de las tierras protegidas, a medida que aumenta la pérdida de superficie de los hábitats, disminuye la conectividad entre hábitats (Imbernon et al., 2005).

Cabe señalar que la mayoría de estudios utilizan métricas del paisaje y métodos de medición de distancias de coste, como el uso de distancias euclidianas, para determinar que parches se encuentran a menor distancia para establecer más y mejores conexiones (Rojas et al., 2017).

Las estrategias para el mantenimiento de la conectividad dependerán de los objetivos que se quieran alcanzar enfocados a los sitios con menor o mayor necesidad de conectividad; la aplicación de políticas públicas juegan un papel fundamental en el desarrollo y aplicación de dichas estrategias, como: restauración de los ecosistemas y reforestación, rehabilitación y mejora de hábitat con instalación de cercas vivas, ganadería holística, forestería análoga e instalación de pasos de fauna o también denominados corredores ecológicos; con la finalidad de asegurar y mantener un bosque bien conectado, extenso y de alta calidad (MAE, 2017a).

#### **5.4 MODELADO DE UN ESCENARIO FUTURO DE LA COBERTURA Y USO DEL SUELO PARA EL AÑO 2030**

Los modelos de simulación de cambio de cobertura y uso el suelo son herramientas efectivas y reproducibles para analizar tanto las causas como las consecuencias de la dinámica del paisaje

futuro en varios escenarios. Los modelos de simulación actuales se centran principalmente en la evolución de tipos específicos de uso de la tierra bajo la influencia de actividades humanas, en relación con las fuerzas impulsoras como desarrollo socioeconómico (Liu et al., 2017).

Si bien es cierto dentro de la Hoya de Loja existe una probabilidad conjunta (alta y muy alta) de sufrir cambios negativos o alteraciones en su cobertura original, tanto para páramo en un 11,37% y para bosque un 7,34% para el 2030, sin embargo no es un porcentaje despreciable a la hora de recalcar su importancia ecológica dentro y fuera de sus dominios, como cobertura en sí; el modelado futuro nos permite cuantificar las posibles alteraciones altas o bajas, que se darían alrededor de toda la Hoya de Loja y de esa manera planear, elaborar y aplicar estrategias y medidas de prevención, protección, restauración y sobretodo buen manejo de dichas zonas vulnerables.

Dentro de la región se han desarrollado trabajos de modelamiento de escenarios futuros con el uso de LCM en determinadas áreas como por ejemplo, la modelación de futuros cambios de deforestación en el cantón Catamayo para el año 2030 y 2060 (E. Peña, 2018), cambios futuros de uso del suelo del cantón Zapotillo para el año 2025 (Veliz, 2015), la predicción de un escenario futuro de la cobertura arbórea en la parroquia Achullapas, del cantón Alausí para el año 2030 (Arévalo, 2016) y la proyección de un escenario sin cambios, para establecer la dinámica de cambio en la cuenca del río Coca para el año 2030 (López, 2016).

Sin embargo, siguen siendo escasos, y a pesar de que constituyen una oportunidad de explorar las posibles tendencias futuras de las formas, patrones, e intensidades de cambio que se experimentan en la actualidad; no se les da la importancia necesaria en su desarrollo y aplicación. Además, que pueden convertirse en una herramienta útil para el diseño de la planificación territorial y como instrumento para reparar posibles desequilibrios y errores cometidos en el pasado. La idoneidad y la sostenibilidad de los usos del suelo debe ser una necesidad prioritaria para las administraciones locales, regionales y estatales (Aguilera, Valenzuela y Bosque, 2010, Gallardo, 2014).

## VI. CONCLUSIONES

- Entre los años 2001 y 2016, se identificaron pérdidas de cobertura de páramo (-1,66%) y tierras agropecuarias (-6,25%); por el contrario, se incrementaron las coberturas de bosque (+2,99%) y zonas antrópicas (+4,92%).
- Se determinó un mayor grado de fragmentación en la cobertura de bosques, que en la de páramos, mostrando una tendencia a fragmentarse zonas boscosas con más rapidez con el pasar de los años.
- La conectividad de los bosques y páramos se han visto seriamente afectados por los patrones de fragmentación, lo que implicaría la concentración de conectores en bosques y páramos especialmente en la zona sureste de la Hoya de Loja, debido a que esta sería la zona más fragmentada del área de estudio. Se evidencia un aumento del número de conectores tipo rama para la cobertura de páramo y tipo lazo en el caso de bosques.
- Los principales impulsores de cambio del modelo de escenario futuro para el año 2030 de las CUS fueron las variables de Vías, Zonas Antrópicas y Tierras Agropecuarias para la cobertura de páramo y de bosque. Existe una probabilidad muy alta de disminución para el año 2030 de los bosques (2,33%) y en los páramos (3,29%), en donde para las dos coberturas los cambios se localizan particularmente en los sectores de Villonaco, vía Zamora y sus alrededores.

## VII. RECOMENDACIONES

- Impulsar el uso de nuevas técnicas y metodologías como SIG, debido a que pueden agilizar el proceso de obtención de resultados, así como la optimización de tiempo y bajo coste de desarrollo, haciendo a su vez más efectivo y confiable su uso y aplicación dentro de las zonas de estudio.
- Incentivar el desarrollo e implementación de mapas de cobertura y uso de suelo, fragmentación y conectividad; con mayor resolución espacial y temporal; puesto que son herramientas que pueden ser utilizadas en varios campos de investigación en pro del desarrollo y enriquecimiento académico, así como el buen manejo y distribución de las tierras para su uso, aprovechamiento y preservación, como es el caso del ordenamiento territorial.
- Evaluar otras metodologías de modelamiento de escenarios de CUS, considerando diferentes resoluciones y número de variables utilizadas.
- Considerar el empleo de escenarios futuros de CUS, en la planificación y gestión del territorio, en los diferentes niveles de Gobiernos Autónomos Descentralizados.
- Incentivar el desarrollo de trabajos investigativos en diferentes temáticas dentro de la Hoya de Loja, debido a la escasa disponibilidad de base de datos e información cartográfica del área.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, F. (2010). Aplicación de métricas de ecología del paisaje para el análisis de patrones de ocupación urbana en el Área Metropolitana de Granada. *Anales de Geografía*, 30, 9–29.
- Aguilera, F., Valenzuela, L. y Bosque, J. (2010). Simulación de escenarios futuros en la aglomeración urbana de Granada a través de modelos basados en autómatas celulares. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, 271–300.
- Andersen, P. S., Andersen, E., Graversgaard, M., Christensen, A. A., Vejre, H. y Dalgaard, T. (2019). Using landscape scenarios to improve local nitrogen management and planning. *Journal of Environmental Management*, 232(June 2018), 523–530. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.023>
- Arévalo, W. (2016). *Determinación de cambios de la cobertura arbórea usando imágenes satelitales Landsat 7ETM+ a través de redes neuronales artificiales en la parroquia Achullapas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Arozarena, A. (2016). Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes, 1–47.
- Arteaga, J. (2014). *Selección de estaciones de muestreo para una red de monitoreo de calidad de agua en la hoya de Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Boyle, S. A., Kennedy, C. M., Torres, J., Colman, K. y Pe, P. E. (2014). High-Resolution Satellite Imagery Is an Important yet Underutilized Resource in Conservation Biology. *PLOS ONE*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086908>
- Bruce, C. M. y Hilbert, D. W. (2004). Pre-processing Methodology for Application to Landsat TM/ETM+ Imagery of the Wet Tropics. *Cooperative Research Centre for Tropical Rainforest Ecology and Management*, 44.
- Calatayud, G., García, V., Martín, P., Sierra, N. y Vélez, A. (2010). Restauración de un ecosistema de páramo en Villonaco (Loja, Ecuador) afectado por una plantación de pino patula (*Pinus patula*). *Universidad Internacional Menéndez Pelayo - Universidad Central Del Ecuador*, 40.
- Carrasco, S. y Guzmán, S. (2011). *Influencia del uso del suelo, en la pedofauna y flora de los*

*páramos de la zona del Irquis, Azuay - Ecuador*. Universidad del Azuay.

Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing* (Second Edi). New York: CRC Press.

Colorado, J., Vásquez, J. y Mazo, I. (2017). Modelo de conectividad ecológica de fragmentos de bosque andino en Santa Elena ( Medellín , Colombia ). *Universidad Nacional de Colombia*, 22(3), 379–393.

Congedo, L. (2019). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation.

Correa, J. J., Volante, J. y Seghezzi, L. (2012). Análisis de la fragmentación y la estructura del paisaje en bosques nativos del Norte Argentino, *16*, 97–103.

Crónica. (2015, July 20). 57 incendios forestales se reportaron en la provincia de Loja. Recuperado de <https://www.cronica.com.ec/informacion-2/ciudad/item/7104-57-incendios-forestales-se-reportaron-en-la-provincia-de-loja>

Crosier, S., Booth, B., Dalton, K., Mitchell, A. y Clark, K. (2005). Getting Started with ArcGIS. In *ESRI* (9th ed., p. 272). New York - United States of America.

De la Cruz, J. y Muñoz, G. (2016). Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y cambio de uso del suelo del área de influencia del programa de reforestación de la Federación Nacional de Cafeteros en el Municipio de Popayán, Cauca. *Universidad de Manizales*, 58.

Eastman, J. (2016). TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System, Manual. *Clark University*, 397.

ECU911. (2016). ECU 911 Loja, coordinó acciones para mitigar incendio forestal en Loja. Recuperado de <http://www.ecu911.gob.ec/ecu-911-loja-coordino-acciones-para-mitigar-incendio-forestal-en-loja/>

Etter, A. (2014). INTRODUCCIÓN A LA ECOLOGÍA DEL PAISAJE: Un Marco de Integración para los Levantamientos Ecológicos. *ResearchGate*, (1991), pags. 99. <https://doi.org/10.13140/2.1.4464.5121>. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/266391069\\_INTRODUCCION\\_A\\_LA\\_ECOLOGIA\\_DEL\\_PAISAJE\\_Un\\_Marco\\_de\\_Integracion\\_para\\_los\\_Levantamientos\\_Ecológicos](https://www.researchgate.net/publication/266391069_INTRODUCCION_A_LA_ECOLOGIA_DEL_PAISAJE_Un_Marco_de_Integracion_para_los_Levantamientos_Ecológicos)

FAO. (2018). *El estado de los bosques del mundo - Las vías forestales hacia el desarrollo*

*sostenible*. Roma.

- Fonseca, W., Cháves, H., Alice, F. y Rey, J. (2010). Cambios en la cobertura del suelo y áreas prioritarias para la restauración forestal en el Caribe de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente - CATIE*, (59–60), 99–107.
- Gallardo, M. (2014). *Cambios de usos del suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid*. Universidad Complutense de Madrid.
- García, D. (2011). Efectos biológicos de la fragmentación de hábitats: nuevas aproximaciones para resolver un viejo problema. *Ecosistemas*, 20(2), 1–10.
- GEO LOJA. (2007). *Perspectivas del Medio Ambiente Urbano*. Loja.
- GLOBAL FOREST WATCH. (2018). a Global solution Network to Protect the World's Forests - Ecuador. *World Resources Institute*, 19. Recuperado de: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/ECU>
- González, X., Tapia, M. F. y Valdivieso, M. (2009). *Estado actual de las áreas protegidas y bosques protectores de la región sur del Ecuador y su marco jurídico ambiental*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., ... Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, (March), 1–10.
- Henriquez, L. (2012). Escenarios futuros de uso de suelo para el análisis del efecto del cambio global en los recursos hídricos aplicado al acuífero de la mancha oriental. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1–190.
- Hermosilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., Pickell, P. D. y Bolton, D. K. (2019). Remote Sensing of Environment Impact of time on interpretations of forest fragmentation : Three-decades of fragmentation dynamics over Canada. *Remote Sensing of Environment*, 222(September 2018), 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.027>
- Imbernon, J., Villacorta, J., Zelaya, C. y Valle, A. (2005). Fragmentación y conectividad del bosque en El Salvador Aplicación al Corredor Biológico Mesoamericano. *Universidad de El Salvador*, 286(4), 15–28.
- INEC. (2010). Datos Censales - Tabulados Censales. Recuperado de:

<http://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-censal-cantonal/>

- Laborte, A. G., Maunahan, A. A. y Hijmans, R. J. (2010). Spectral Signature Generalization and Expansion Can Improve the Accuracy of Satellite Image Classification, 5(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010516>
- Leonard, P. B., Sutherland, R. W., Baldwin, R. F., Fedak, D. A., Carnes, R. G. y Montgomery, A. P. (2016). Landscape connectivity losses due to sea level rise and land use change. *Animal Conservation*, 20, 80–90. <https://doi.org/10.1111/acv.12289>
- Li, Y., Zhao, M., Mildrexler, D., Motesharrei, S., Mu, Q., Kalnay, E., ... Wang, K. (2016). Potential and Actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature, 372–386. <https://doi.org/10.1002/2016JD024969>
- Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., ... Pei, F. (2017). Landscape and Urban Planning A future land use simulation model ( FLUS ) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 168(July 2016), 94–116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019>
- Loja, M. De. (2014). PLAN DE DESARROLLO Y Municipio de Loja.
- López, C. (2016). *Evaluación hidrológica de la cuenca el río Coca en función del cambio de uso de suelo por medio del moedlo SWAT*. Escuela Politécnica Nacional.
- Lopez, F. (2004). Estructura y función en bordes de bosques. *Ecosistemas*, 13(1), 67–77.
- MAE-MAGAP. (2015). Protocolo metodológico para la elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador Continental 14, Escala 1:100.000, 1–49.
- MAE. (2015). Fragmentación de los ecosistemas del Ecuador Continental, 24.
- MAE. (2016a). Análisis de la deforestación en el Ecuador continental 1990-2014, 43.
- MAE. (2016b). *Plan de Acción REDD+ Ecuador, “Bosques para el Buen Vivir.”*
- MAE. (2017a). Conectividad de los ecosistemas del Ecuador Continental. *Ministerio Del Ambiente*, 26.
- MAE. (2017b). Deforestación del Ecuador Continental Periodo 2014-2016. *Ministerio Del Ambiente*, 38.
- Mas, J. y Flamenco, A. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una

- región tropical de México. *GeoTropico*, 5(1), 1–24.
- Matus, M., Hernández, N. y Martínez, R. (2018). Predictive performance of regression models to estimate Chlorophyll-a concentration based on Landsat imagery. *PlosOne*, 1–18.
- Maza, C. (2009). *Clasificación y análisis de la cobertura vegetal sobre la subcuenca Zamora Huayco - cantón Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja. Universidad Nacional de Loja.
- Maza, F. (2010). La planeación por escenarios: Revisión de conceptos y propuestas metodológicas. *Universidad Técnica Particular de Loja*, 8(2), 87.
- McGarial, K. (2015). Fragstats Help, (Abril), 182. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201200111>
- Mendoza, E., y Garcia, K. (2011). Análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo en el Municipio de Manaure – Guajira-Colombia, Implementando imágenes landsat., 8.
- Morales, J., Carrillo, F., Farfan, L. y Cornejo, V. (2016). Vegetation change cover in the coastal region of Bahia de Banderas, Mexico, 38(1), 17–29.
- NASA. (2019). Landsat 7 - Landsat 8. Recuperado de: from <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Nazareno, M. (2014). Metodos de clasificación digital de imágenes satelitales para la determinación de usos de suelo agrícola en el partido de Tandil. *Universidad Nacional Del Centro de La Provincia de Buenos Aires*, 1–15.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. y Williams, J. R. (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service Blackland Research Center - Texas AgriLife Research*, 7, 23–28.
- Olaya, V. (2014). Sistemas de Informacion Geográfica, 854.
- Oñate, F. y Bosque, J. (2010). Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. *Elsevier - Journal of Hydrology*, 395, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.033>
- PDOT Loja. (2014). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Municipio de Loja. *Municipio de Loja*, 547.
- Peña, E. (2018). *Análisis multitemporal para la detección de cambios de usos del suelo, en el cantón Catamayo, provincia de Loja*. Universidad Nacional de Loja.

- Peña, J. (2007). *Efectos ecológicos de los cambios de coberturas y usos del suelo en la Marina Baixa (Alicante)*. Universidad de Alicante.
- Ponce, C. (2008). *Análisis de cambio de cobertura vegetal y fragmentación en el corredor de conservación comunitaria El Ángel - Bosque Golondrinas, provincia del Carchi (1996 - 2005)*. Escuela politécnica del ejército.
- QGIS User Guide. (2019), 2.18, 490.
- Riesgos, S. de G. de. (2016). Informe de Situación 110 - Incendios Forestales, 9.
- Rojas, C., De la Barrera, F., Aranguiz, T., Munizaga, J. y Pino, J. (2017). metropolitanos Efectos de la urbanización sobre la conectividad ecológica de paisajes metropolitanos, (December).
- Santos, T. y Tellería, L. (2006). Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas*, 15(2), 3–12. <https://doi.org/10.7818/re.2014.15-2.00>
- Sierra, R. (2013). Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010. Y un acercamiento a los próximos 10 años. *Conservación Internacional Ecuador y Forest Trends*, 57.
- Smith, P., House, J., Mercedes, B., Sobacka, J., Harper, R., Pan, G., ... Rumpel, C. (2016). Global change pressures on soils from land use and management, 1008–1028. <https://doi.org/10.1111/gcb.13068>
- Song, W., Deng, X., Yuan, Y., Wang, Z. y Li, Z. (2015). Impacts of land-use change on valued ecosystem service in rapidly urbanized North China Plain. *Ecological Modelling*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.01.029>
- Sowmya, D., Deepa, P. y Venugopal, K. (2017). Remote Sensing Satellite Image Processing Techniques for Image Classification : A Comprehensive Survey. *International Journal of Computer Applications*, 161(11), 24–37.
- Srivastava, P., Han, D., Ramirez, R., Bray, M. y Islam, T. (2012). Selection of classification techniques for land use / land cover change investigation. *Advances in Space Research*, 50(9), 1250–1265. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.032>
- Tapia Armijos, M. F., Homeier, J., Espinosa, C. I., Leuschner, C. y De la Cruz, M. (2015).

- Deforestation and Forest Fragmentation in South Ecuador since the 1970s – Losing a Hotspot of Biodiversity. *PlosONE*, 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133701>
- Tolessa, T., Senbeta, F. y Kidane, M. (2017). The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem Services*, 23(November 2016), 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.11.010>
- Torrachi, J. (2015). *Deforestación y Pérdida de hábitat en Bosques de montaña en la Cuenca alta del Río Zamora ( Loja , Ecuador )*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Torres, J. (2014). *Diseño de un modelo de restauración ecológica aplicable a los ecosistemas de páramos degradados en el Ecuador*. Universidad Nacional de Loja.
- Tuff, K., Tuff, T. y Davies, K. (2016). A framework for integrating thermal biology into fragmentation research. *Ecology Letters*, 19, 361–374. <https://doi.org/10.1111/ele.12579>
- Van Der Hoek, Y. (2017). The potential of protected areas to halt deforestation in Ecuador. *Universidad Regional Amazónica IKIAM*, 1–7. <https://doi.org/10.1017/S037689291700011X>
- Vargas Ulate, G. (2008). Fragmentación y conectividad de ecosistemas en el sector del proyecto geotérmico Miravalles y sus alrededores. 1975 - 2007. *Reflexiones*, 87(2), 9–38.
- Veliz, F. (2015). *Análisis multi-temporal del cambio de usos del suelo en el cantón Zapotillo, provincia de Loja*. Universidad Nacional de Loja.
- Vergara, J., Fontalvo, T. y Maza, F. (2010). La planeación por escenarios : Revisión de conceptos y propuestas metodológicas, 8(2), 21–29.
- Vogt, P. y Riitters, K. (2017). GuidosToolbox : universal digital image object analysis. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1). <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1330650>
- Zhao, R., Chen, Y., Shi, P., Zhang, L., Pan, J. y Zhao, H. (2013). Land use and land cover change and driving mechanism in the arid inland river basin : a case study of Tarim River , 591–604. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1763-3>

## ANEXOS

### Anexo 1. Distancias espectrales para algoritmo de máxima probabilidad

DISTANCIAS ESPECTRALES	RANGO	2001	2016
Jeffries-Matusita distance	0 – 2,00	1,99	1,95
Bray-Curtis similarity	0 – 100,00	80,39	73,81

### Anexo 2. Evaluación de exactitud para la clasificación realizada

EVALUACIÓN DE EXACTITUD	RANGO	2001	2016
Evaluación General	0 – 100,00	88,20	89,62
Clasificación de sombrero Kappa	0 – 1,00	0,84	0,86

### Anexo 3. Cambio porcentual de la cobertura del suelo a través del tiempo

Cobertura	Año	2001		2016	
		Área ha	Área %	Área ha	Área %
<b>Páramo</b>		3203	11,53%	2745	9,87%
<b>Bosque</b>		8505	30,59%	9336	33,58%
<b>Tierras Agropecuarias</b>		12901	46,40%	11164	40,15%
<b>Zonas Antrópicas</b>		3191	11,48%	4560	16,40%

### Anexo 4. Probabilidad de cambio de coberturas del modelado Futuro - 2030

PROBABILIDAD DE CAMBIO		PÁRAMO		BOSQUE	
Descripción	Rango	Área (ha)	Porcentaje	Área (ha)	Porcentaje
<b>Muy Baja</b>	0 – 0.2	1925,81	72,08	7606,98	82,25
<b>Baja</b>	0.2 – 0.4	208,03	7,78	493,63	5,33
<b>Media</b>	0.4 – 0.6	233,86	8,75	468,12	5,06
<b>Alta</b>	0.6 – 0.8	215,96	8,08	463,48	5,01
<b>Muy Alta</b>	0.8 - 1	88,07	3,29	216,37	2,33