



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

“Trabajo de grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Ambiental”

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**Título del proyecto**

**ANÁLISIS DE LAS TRANSICIONES DE LOS CAMBIOS DE USO Y  
COBERTURA DEL SUELO MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS Y  
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS AÑOS (2001-2016) EN  
EL CANTÓN CHAMBO, PROVINCIA DE CHIMBORAZO.**

**Autor:**

Ambar Violeta Moreno Cobo

**Director:**

PhD. Víctor García

**Riobamba – Ecuador**

**2017**

## REVISION DEL TRIBUNAL

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: **ANÁLISIS DE LAS TRANSICIONES DE LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS AÑOS (2001-2016) EN EL CANTÓN CHAMBO, PROVINCIA DE CHIMBORAZO**, presentado por: Ambar Violeta Moreno Cobo.

Dirigido por: PhD. Víctor García

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

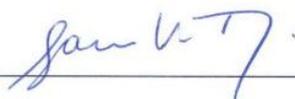
Para constancia de lo expuesto firman:

Ing. Juan Carlos Caicedo  
Presidente del Tribunal



---

PhD. Víctor García  
Director del proyecto



---

Ing. Álvaro Delli  
Miembro del Tribunal

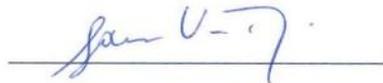


---

## DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

Certifico que el presente trabajo de investigación previo a la obtención del Grado de INGENIERO AMBIENTAL, con el tema: “**ANÁLISIS DE LAS TRANSICIONES DE LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DEL SUELO MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS AÑOS (2001-2016) EN EL CANTÓN CHAMBO, PROVINCIA DE CHIMBORAZO**”, ha sido elaborado por AMBAR VIOLETA MORENO COBO, el mismo que ha sido revisado y analizado en un cien por ciento con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor, por lo que se encuentra apta para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.



PhD. Víctor García

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, **AMBAR VIOLETA MORENO COBO**, con cédula de identidad No. 0604126904, soy responsable de las ideas, doctrinas, resultados y propuesta realizada en la presente investigación y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



---

Ambar Violeta Moreno Cobo

C.I. 0604126904

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, pues soy una de las personas que da fe de lo maravillosa e increíble energía que transmite, por el amor indescriptible que me ha dado y me ha hecho sentir, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por brindarme una vida llena de aprendizajes e increíbles experiencias, por llenarme de sueños y rodearme de personas geniales. Estoy segura de que grandes momentos y logros me esperan siempre a su lado.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, a través de la Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Ambiental, y a sus docentes, por haberme transmitido los conocimientos que pondré en práctica en mi vida profesional. Al Instituto de Ciencia, Innovación Tecnología y Saberes “, en especial a los Ingenieros Franklin Cargua y Marco Rodríguez como guías en el trabajo desarrollado, por su tiempo, amistad y por los conocimientos que me transmitieron.

Al Dr. Víctor García, quien con su amistad, motivación y orientación profesional ha sabido guiarme durante todo el trabajo de investigación.

A mi segunda hermana, Karla Bayas, por ser mi complemento perfecto en toda esta etapa, por ser mi colega, una amiga incondicional, y por brindarme la mejor amistad que continuará muchísimos años más.

## **DEDICATORIA**

A mi padre, Mario, por brindarme un apoyo incondicional, y ser el pilar fundamental, que me ha mostrado con su propio ejemplo, que cualquier reto que me ponga en la vida, se logra a base de esfuerzo, empeño, cariño, sacrificio y paciencia, pues es una parte de todas las enseñanzas que me ha impartido, y que los llevo como un verdadero tesoro. Por ser mi contención en los momentos de debilidad, y por llenarme de ese amor incomparable entre padre e hija. Gracias por creer en mí y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Te amo pa.

A mi hermana, Fernanda, por ser mi mejor amiga y compañera de vida. Eres la mejor hermana mayor que he podido tener, junto a ti he vivido momentos inolvidables que no los cambio por nada, gracias por darme tu apoyo en todo momento, por alentarme a seguir adelante y por darme ese amor tan especial que te caracteriza. Te amo ña.

A mi hermano, Isaac, por ser el hombrecito que complementa mi vida, que me cuida, me llena con su amor tan único y siempre me hace reír con sus ocurrencias, eres demasiado importante para mí, siempre contarás con mi apoyo, tu felicidad es mi felicidad no lo olvides. Te amo ñaño.

El agradecerles no me bastará, hasta demostrarles lo muy comprometida que me encuentro con nuestra linda familia y devolverles el triple de todo el amor y apoyo que me han dado. Quiero que sepan lo feliz que estoy por llegar junto a Uds. a esta etapa de mi vida, son mi todo.

## **SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS**

SIG: Sistemas de Información Geográfica

DEM: Modelos de Elevación Digital

OA: *Overall Accuracy* (Precisión general)

PA: *Producer's Accuracy* (Precisión del productor)

UA: *User's Accuracy* (Precisión del usuario)

MVS: Máxima verosimilitud

## ÍNDICES

REVISION DEL TRIBUNAL .....	i
DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA .....	ii
AUTORÍA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
DEDICATORIA .....	v
SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS.....	vi
RESUMEN .....	1
SUMARY .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
1. Problema.....	3
2. Justificación .....	4
OBJETIVOS .....	5
1. Objetivo General.....	5
2. Objetivos Específicos .....	5
MARCO TEÓRICO .....	6
1. Investigaciones realizadas en el tema.....	6
2. Sistemas de Información Geográfica y Modelos de Elevación Digital.....	6
2.1. Sistemas de Información Geográfica. ....	6
2.2. Modelos de elevación digital (DEM) .....	8
3. Cambios de uso y cobertura del suelo y su relación con el cambio climático .....	8
4. Uso del suelo .....	10
5. Cobertura del suelo.....	10
6. Firmas Espectrales.....	10
7. Análisis de transiciones con matrices.....	11
8. Métodos para la clasificación de imágenes satelitales.....	13
8.1. Clasificación no supervisada. ....	13
8.2. Clasificación supervisada. ....	13
METODOLOGÍA.....	14
1. Área de estudio .....	14
2. Obtención de la información satelital y selección del área de estudio .....	15
3. Procesamiento de las imágenes .....	15
4. Clasificación supervisada .....	16

5. Validación de la clasificación.....	16
6. Matriz de Tabulación cruzada .....	17
7. Análisis de las transiciones e intensidades .....	18
8. Flujo grama de Actividades .....	21
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	22
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	36
1. Conclusiones.....	36
2. Recomendaciones .....	37
BIBLIOGRAFÍA .....	38
ANEXOS .....	42
Anexo 1. Valoración de Coeficiente Kappa .....	42
Anexo 2. Mapa de categorías de usos de suelo del Cantón Chambo en el año 2001.....	42
Anexo 3. Mapa de categorías de usos de suelo del Cantón Chambo en el año 2010.....	43
Anexo 4. Mapa de categorías de usos de suelo del Cantón Chambo en el año 2016.....	43
Anexo 5. Tabla de transiciones en términos de ganancias (2001-2010) .....	44
Anexo 6. Interpretación de la tabla de transición en términos de ganancias.....	44
Anexo 7. Tabla de transiciones en términos de pérdidas (2001-2010) .....	45
Anexo 8. Interpretación de la tabla de transición en términos de pérdidas .....	45
Anexo 9. Tabla de transiciones en términos de ganancias (2010-2016) .....	46
Anexo 10. Interpretación de la tabla de transición en términos de ganancias.....	46
Anexo 11. Tabla de transiciones en términos de pérdidas (2010-2016) .....	47
Anexo 12. Interpretación de la tabla de transición en términos de pérdidas .....	47
Anexo 13. Posicionador geográfico de alta precisión (GPS) para la toma de puntos. ...	48
Anexo 14. Toma de puntos de control en pastizales. ....	48
Anexo 15. Toma de puntos de control en bosque.....	48
Anexo 16. Toma de puntos de control en cultivos .....	49
Anexo 17. Ecosistema de bosque y pastizales en el Cantón Chambo.....	49
Anexo 18. Toma de puntos de control en pasto. ....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema operativo de Satélites de Observación.....	7
<b>Figura 2:</b> Interacciones biofísicas entre el clima y la cobertura vegetal .....	9
<b>Figura 3.</b> Signaturas espectrales típicas de distintas cubiertas. ....	11
<b>Figura 4.</b> Mapa de Ubicación del Cantón Chambo .....	15
<b>Figura 5.</b> Esquema Metodológico .....	22
<b>Figura 6.</b> Mapas de categorías de usos de suelo del Cantón Chambo en los años 2001, 2010 y 2016.....	27
<b>Figura 7.</b> Pérdidas vs. Ganancias en el intervalo de tiempo 2001-2010.....	30
<b>Figura 8.</b> Pérdidas vs. Ganancias en el intervalo de tiempo 2010-2016.....	31
<b>Figura 9.</b> Análisis de intensidad de tiempo para dos intervalos de tiempo: 2001- 2010 y 2010-2016 .....	34
<b>Figura 10.</b> Análisis de intensidad de la categoría para el intervalo de tiempo: 2001- 2010.....	35
<b>Figura 11.</b> Análisis de intensidad de la categoría para el intervalo de tiempo: 2010- 2016.....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Impactos sobre el clima por el cambio del uso del suelo .....	9
<b>Tabla 2.</b> Matriz de tabulación cruzada para dos puntos diferentes en el tiempo. ....	12
<b>Tabla 3.</b> Matriz de error con la asignación óptima de Neyman (NOA), evaluación de la precisión de los mapas e índices kappa de los años estudiados.....	24
<b>Tabla 4.</b> Precisión del mapa de uso correspondiente al año 2001 e incertidumbre estimada en cada una de las unidades básicas del mapa. ....	25
<b>Tabla 5.</b> Precisión del mapa de uso correspondiente al año 2010 e incertidumbre estimada en cada una de las unidades básicas del mapa. ....	25
<b>Tabla 6.</b> Precisión del mapa de uso correspondiente al año 2016 e incertidumbre estimada en cada una de las unidades básicas del mapa. ....	25
<b>Tabla 7.</b> Evolución de la cobertura y uso del suelo en superficie y porcentaje de los años 2001, 2010 y 2016.....	27
<b>Tabla 8.</b> Matriz de tabulación cruzada con valores expresados en términos porcentuales de área del intervalo 2001-2010 .....	28
<b>Tabla 9.</b> Matriz de tabulación cruzada con valores expresados en porcentajes de área del intervalo 2010-2016.....	29
<b>Tabla 10.</b> Índices de cambio del intervalo de tiempo 2001-2010, expresados en términos porcentuales.....	30
<b>Tabla 11.</b> Índices de cambio del intervalo de tiempo 2010-2016, expresados en términos porcentuales.....	30
<b>Tabla 12.</b> Transiciones sistemáticas en términos de ganancias y pérdidas del 2001-2010 .....	31
<b>Tabla 13.</b> Transiciones sistemáticas en términos de ganancias y pérdidas del 2010-2016 .....	32
<b>Tabla 14.</b> Proporciones: ganancia-persistencia, pérdida-persistencia, y cambio neto-persistencia de las unidades de uso del suelo en el intervalo 2001-2010. .	33
<b>Tabla 15.</b> Proporciones: ganancia-persistencia, pérdida-persistencia, y cambio neto-persistencia de las unidades de uso del suelo en el intervalo 2010-2016. .	34

## RESUMEN

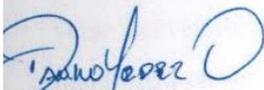
En el último cuarto de siglo, se ha incrementado la atención a los cambios de uso del suelo, debido a la constante amenaza que sufre este recurso natural por la intensiva intervención del hombre y a su influencia en el clima. El objetivo de este trabajo fue analizar los cambios de uso del suelo que han ocurrido en el cantón Chambo, provincia de Chimborazo en los años 2001, 2010 y 2016. La metodología se desarrolló en tres fases: la primera incluyó el procesamiento de imágenes y producción de mapas de uso del suelo; la segunda, involucró el análisis de incertidumbre y generación de las matrices de tabulación cruzada; en la tercera fase se realizó el análisis de transiciones sistemáticas y sus intensidades a nivel de intervalo de tiempo y de categorías. Los resultados muestran que ha existido un *aumento sostenido* del área destinada a la producción agropecuaria (cultivo “C” + pastizal “Pz”) y que este aumento fue para el 2010 de 9 % y para el 2016 de 11 %. Mientras que, se observa una *disminución sostenida* en superficie destinada a los ecosistemas naturales (bosque “Bs” + humedal “Hm”+ páramo “Pr”); para el 2010 fue de 4 % y para el 2016 fue de 6%. El Hm, el Pz y el Bs mantienen una intensidad de cambio activa, el Pr mantiene una intensidad de cambio latente en los dos intervalos. La vulnerabilidad e intensidad de cambio exhibida por los Hm, sugiere que estos ecosistemas son altamente sensibles al cambio climático.

**Palabras clave:** transiciones, Chambo, matriz cruzada, cambio de uso del suelo.

## ABSTRACT

In the last quarter century, attention to changes in land use has increased in importance, due to the constant threat that this natural resource suffers because of the intense intervention of human beings. These changes, are of the many causes that infer on the climate. The aim of the research is to analyze changes in land use and land cover in Chambo, Chimborazo province in 2001, 2010 and 2016. The methodology is developed in three stages: the first is the processing and georeferencing of Landsat images; It is followed by supervised classification of the images, to obtain maps of land use, and to analyze the errors and uncertainties associated with them; Finally, the analysis of systematic transitions and their intensities, using the cross tabulation matrix. The results show that the most representative transitions of the first interval were: wetland to páramo with 13.33%; From forests to pastures with 2.73%; The conversion of culture to pasture with 5.02%; And of páramo a culture with 1.39% of its area. In the second interval, the decrease in the conversion of wetlands is observed with 2.02%. Changes are shown in the Forest, passing to Crops in 2.74% and major changes in agriculture, with the conversion of grasslands to crops. The result of the intensities of change reveals that the two periods of time tend to obtain an accelerated terrestrial activity.

**Keywords:** transitions, Chambo, cross matrix, land use change.

  
Reviewed by:

Danilo Yépez O.  
English professor



## INTRODUCCIÓN

El uso y cobertura del suelo representan elementos claves que intervienen en el equilibrio de los ecosistemas (Rodríguez, 2010). La atención a los cambios de uso del suelo y su modelado, se ha incrementado durante el último cuarto de siglo debido a la existencia de una mayor y más completa conciencia sobre la función que cumple el suelo en el paisaje, cambio ambiental y también por ser constantemente amenazada por las actividades antrópicas (Reid *et al.*, 2010). Al pasar de los años, se han desarrollado una variedad de métodos y tecnologías relevantes para observar, monitorear, analizar y modelar el cambio en el sistema suelo. Esto ha permitido verificar y elaborar teorías y conceptos vinculados con la dinámica de la interacción entre la especie humana y el ambiente. No obstante, el verdadero reto es profundizar en el conocimiento del comportamiento del suelo en sus umbrales críticos de funcionalidad (Reid *et al.*, 2010). Una gran parte de los estudios con su línea de investigación sobre la dinámica terrestre, tienen como objetivo principal, el de predecir los efectos a largo plazo de las actividades humanas en el suelo. Sin embargo, es necesario poner mayor énfasis en la comprensión de los procesos que provocan la transición en los usos y/o cobertura del suelo, porque de esta forma se puede detectar señales claves de las interacciones complejas entre los seres humanos y el ambiente, para así conducir una actuación que garantice la sustentabilidad.

### 1. Problema

Dentro del complejo paisaje andino encontramos una variedad de ecosistemas, entre estos, los ecosistemas de páramos ecuatorianos. Estos ecosistemas nos brindan servicios ambientales esenciales como el abastecimiento y regulación del agua, y también cuentan con importantes sumideros de carbono en sus suelos volcánicos (García, 2016). Pero esta capacidad de regulación del agua y de acumulación de carbono orgánico pueden verse irreversiblemente afectadas por la intensificación de la actividad humana, que se manifiesta en un avance acelerado de la frontera agrícola. Esto hace que las intensivas actividades antrópicas puedan ocasionar cambios significativos y permanentes en los suelos, lo que generalmente tienen consecuencias en el clima. Un aspecto muy poco estudiado en la detección de estos cambios de uso y cobertura del suelo, es la incertidumbre estadística asociada a ellos. Aplicar métodos que diferencien los cambios significativos de los irreales o debidos al azar, ha sido un vacío en los trabajos realizados. Las investigaciones de áreas ambientalmente sensibles se han limitado solo a obtener una eficiente capacidad de predicción en cuanto a sus cambios, más no en detectar las señales

prominentes, tales como la tendencia e intensidad de las transiciones sistemáticas (Pontius, 2004).

## **2. Justificación**

En el centro de la investigación ambiental actual se encuentran los cambios de uso y cobertura del suelo (Falcón, 2014). La temática genera en varias comunidades científicas y profesionales, el interés por entender y abordar la problemática. Para identificar y evaluar los procesos de cambio en la cobertura y uso del suelo, es necesario utilizar métodos actuales que puedan medir cuantitativamente sus transiciones (Aldwaik, 2012). Actualmente las propuestas para este tipo de estudios involucran procedimientos innovadores (por ejemplo el uso de algoritmos de inteligencia artificial), que junto a técnicas de trabajo de campo y la aplicación de herramientas de los sistemas de información geográfica, se complementan eficazmente para alcanzar una mejor comprensión de la problemática generada (López, 2014). Por esta razón, el presente trabajo de investigación, utilizará como plataforma de estudio los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la cual cuenta con varias herramientas, que de manera sinérgica nos permitirá obtener un primer resultado. Luego se orientará al uso de técnicas estadísticas con la aplicación de la matriz de tabulación cruzada. La matriz facilitará la identificación de los indicadores del cambio en términos de ganancias, cambios netos e intercambios entre categorías. También, nos ayudará a la identificación de transiciones sistemáticas más importantes que se dan en el uso de los suelos en el área escogida (Cantón Chambo) en el intervalo temporal comprendido entre los años 2001 y 2016. La investigación se complementará al considerar la determinación de la intensidad de los cambios que sean detectados. Con el fin de lograr una mejor comprensión de la dinámica de uso y cobertura del suelo, lo que tiene implicaciones significativas en las decisiones de manejo de la tierra en los Andes Ecuatorianos.

## **OBJETIVOS**

### **1. Objetivo General**

Analizar las transiciones de los cambios de uso y cobertura del suelo que han ocurrido en el cantón Chambo, provincia de Chimborazo durante los intervalos de tiempo 2001-2010 y 2010-2016.

### **2. Objetivos Específicos**

-Identificar y delimitar en unidades geográficas los usos y coberturas del suelo mediante la clasificación supervisada de las imágenes Landsat del cantón Chambo.

-Cuantificar los cambios que han ocurrido en el uso del suelo, a partir de la matriz de tabulación cruzada, para identificar sus transiciones sistemáticas.

-Analizar la intensidad de las transiciones de uso y cobertura del suelo en los intervalos de tiempo 2001-2010 y 2010-2016, a nivel de intervalo y a nivel de categorías.

## MARCO TEÓRICO

### 1. Investigaciones realizadas en el tema

Existen numerosos ejemplos de estudios realizados sobre los cambios de uso y cobertura del suelo, utilizando técnicas que van desde la interpretación visual hasta métodos automatizados (Rodríguez, 2011). En un caso de estudio, ubicado en una zona costera del estado de Campeche, México, se comparó la eficiencia de 6 métodos de detección de cambio. Se utilizaron imágenes Landsat, con 6 a 10 clases de uso y cobertura del suelo y se consideró una condición binaria (cambio/no cambio). Los mejores resultados se obtuvieron con el método de comparación a posteriori de imágenes clasificadas (Santana, 2007). En otro estudio, propusieron un procedimiento basado en interpretación visual. Con la superposición en pantalla de imágenes (Landsat TM y/o ERS1-SAR) y un mapa vectorial de ocupación del suelo de la situación anterior crearon un nuevo mapa de ocupación, acorde con la fecha de las imágenes, este nuevo mapa permitía realizar análisis espaciales y obtener matrices de transición entre fechas, obteniendo fiabilidades por encima de 97% (López, 2014). Son varias las técnicas de detección de cambios existentes, sin embargo, la mayoría de los autores consultados las enmarcan en dos grupos generales: 1) los basados en la categorización espectral de las imágenes de entrada. En el cual, el procedimiento se da inicialmente, asignando las clases y luego se determina el cambio, de allí la denominación “detección de cambio a posteriori” y 2) en los que primero se determina el cambio, con diferentes técnicas y luego asignan las clases. Aunque no siempre se logra la denominación, sobre todo cuando se trata de cambios sutiles. La comparación a posteriori es aún el método más popular de detección de cambios (Santana, 2007).

### 2. Sistemas de Información Geográfica y Modelos de Elevación Digital

#### 2.1. Sistemas de Información Geográfica.

En estudios de la dinámica terrestre, es muy común recurrir a herramientas que nos ayuden a la interpretación de fotografías aéreas y/o de imágenes satelitales. Es decir, que nos ofrezcan una mejor visión de la distribución de los fenómenos naturales y asentamientos humanos, al momento de realizar análisis de datos geográficos. El primer paso para la interpretación de imágenes satelitales es su adquisición, lo cual se logra con la utilización de técnicas de percepción remota. Estas técnicas registran y reconocen la radiación electromagnética emitida por la superficie terrestre (firmas espectrales), a través

de sensores instalados en plataformas espaciales (Rosete, 2009). Los sensores que comúnmente se utilizan son: cámaras fotográficas, cámaras de video y los satélites especializados. El esquema operativo de la percepción remota se compone de cinco elementos principales: espectro fuente, espectro reflejado, satélite, transmisión de datos y estación receptora (ver Figura 1) (Rosete, 2009). Los sensores hacen posible la cuantificación y el seguimiento de los cambios que ocurren en las coberturas terrestres.

El segundo paso es el procesamiento de las imágenes, que se lleva a cabo gracias a sistemas computarizados, que globalmente se conocen como Sistemas de Información Geográfica (SIG). Convierten las imágenes a productos de información (Falcón, 2014). Los SIG, están basados en sistemas informáticos como: hardware, software, datos digitales y usuario (Arancibia, 2008). Los principales sistemas informáticos (softwares) para los SIG utilizados en la actualidad son: ArcInfo, ArcView, ArcGis, GRASS, MapInfo, IDRISI, GéoConcept, entre otros. Los sistemas de información geográfica permiten la captura, ingreso, almacenamiento, procesamiento, análisis y la presentación de información resultante de datos espaciales (mapas, imágenes de satélite) (Arancibia, 2008). El objetivo principal de los SIG es desarrollar información válida para la toma de decisiones, permitiendo al usuario, conocer las características de un determinado territorio. A su vez, cumple con objetivos secundarios que los llevará a alcanzar el principal, los cuales son: manejar bases de datos grandes y heterogéneas referenciadas geográficamente, indagar sobre la existencia de ciertos fenómenos, permitir una interacción más flexible entre el sistema y el intérprete, aumentar el conocimiento sobre los fenómenos estudiados y lograr la modelación de sus comportamientos (Rosete, 2009). De esta manera, los SIG son una herramienta primordial para realizar estudios de Ordenamiento Territorial o Evaluación de Impacto Ambiental.



**Figura 1.** Esquema operativo de Satélites de Observación. Fuente: (Suárez Morillo, 2014)

## **2.2. Modelos de elevación digital (DEM)**

Los modelos de elevación digital (DEM) son indispensables para muchos análisis, como la extracción de características topográficas, el análisis de escorrentía, el análisis de susceptibilidad a deslizamientos, entre otras. Antes de tales análisis, la precisión de DEM debe ser discutida. La exactitud de DEM es usualmente representada por la resolución espacial y la altura (Suganthi, 2010).

## **3. Cambios de uso y cobertura del suelo y su relación con el cambio climático**

Se considera al suelo como un cuerpo dinámico y natural que cumple muchos roles claves en los ecosistemas terrestres (Vasquez, 2009). Gracias a la variedad de funciones que cumple el suelo, el hombre lo ha utilizado y transformado a lo largo del tiempo. En la actualidad, los cambios de uso y cobertura del suelo, a nivel local, están asociados a una combinación de varios factores, como los económicos, tecnológicos, institucionales, culturales y demográficos (Rodríguez, 2010). También dependen de cada lugar en específico, con su propia ubicación geográfica, clima, topografía, contexto histórico, geología, suelo y factores antropogénicos. Pero es la influencia humana a la que debemos poner un especial interés, por realizar un uso extensivo de la tierra. El aumento significativo de la población, la migración y las actividades productivas aceleradas han intensificado estos cambios ambientales durante los últimos siglos. Los cambios en la intensidad, en los patrones espaciales de uso de la tierra y el clima, pueden generar la pérdida de importantes servicios ambientales de los ecosistemas y limitan el abastecimiento de provisiones a las generaciones futuras (Quétier, 2009).

La alteración de la cobertura vegetal y uso del suelo de los ecosistemas, pueden llegar a afectar el sistema climático (Rodríguez, 2010). Se ha comprobado en varios estudios, que la variabilidad climática establecida por los cambios en el uso del suelo, transforman los patrones de comportamiento de los factores meteorológicos a escala local (Rodríguez, 2010). Entre los factores meteorológicos alterados, está la temperatura, humedad del aire, vientos y precipitación. El uso del suelo, incide en las interacciones biofísicas entre la cobertura vegetal y el clima (ver Figura 2). Según Rodríguez (2010) la conversión histórica del uso del suelo, por parte del hombre, puede haber causado una disminución de la temperatura entre 1 y 2 °C en latitudes medias y un calentamiento de 1 a 2 °C en áreas tropicales deforestadas.

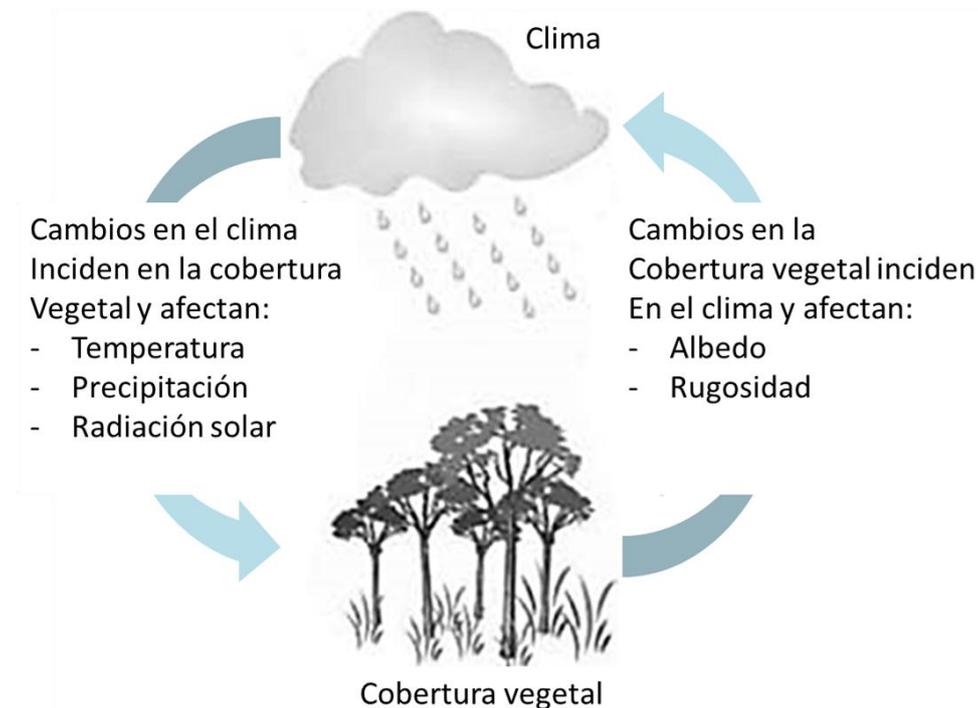
La evidencia de la afectación al sistema climático, debido al uso y cobertura del suelo, se muestra en dos grandes procesos: los primeros son los procesos biogeoquímicos, como por ejemplo las emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), y los procesos biofísicos, tales como la modificación del albedo de la superficie del suelo (ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Impactos sobre el clima por el cambio del uso del suelo

<b>BIOFÍSICOS</b> Afectan los flujos de la superficie con:	<b>BIOGEOQUÍMICOS</b> Alteración de:
1. Modificación del albedo	1. Ciclos biogeoquímicos y cambio en la composición química de la atmósfera
2. Cambios en la rugosidad de la superficie	2. Capacidad de los ecosistemas terrestres para procesar carbono
3. Desequilibrio entre la pérdida de calor sensible y latente	3. Procesos ecológicos y fisiológicos en el suelo y vegetación
4. Cambios en la estructura y distribución de los ecosistemas terrestres	4. Intercambio de gases: metano, óxido nitroso, isorpeno, vapor de agua y CO <sub>2</sub> .
	5. Equilibrio del carbono y por lo tanto de las tasas de fotosíntesis, respiración, mortalidad y perturbaciones de la vegetación.

Fuente: (Rodríguez, 2010).

Elaborado por: el autor



**Figura 2:** Interacciones biofísicas entre el clima y la cobertura vegetal. Fuente: (Rodríguez, 2010)

De manera que, es esencial que se detecten los cambios de uso y cobertura del suelo con precisión, a escalas apropiadas, y de manera oportuna, para comprender mejor sus impactos sobre el clima y mitigarlos.

#### **4. Uso del suelo**

Se denomina uso del suelo, a la intención humana dada o actividad llevada a cabo en la superficie terrestre (por ejemplo, vivienda, parques y cultivo) con fines sociales y económicos (National Research Council, 2014). El término también se aplica a la ocupación o utilización de una cobertura, realizada por el hombre, de manera temporal o permanente (Rodríguez, 2011). El uso del suelo determina características de la superficie terrestre, como la humedad de la capa superficial del suelo, la regulación del balance de radiación del sistema superficie-atmósfera, los flujos de masa (vapor de agua o CO<sub>2</sub>) y energía (calor), entre otros (Rodríguez, 2010).

#### **5. Cobertura del suelo**

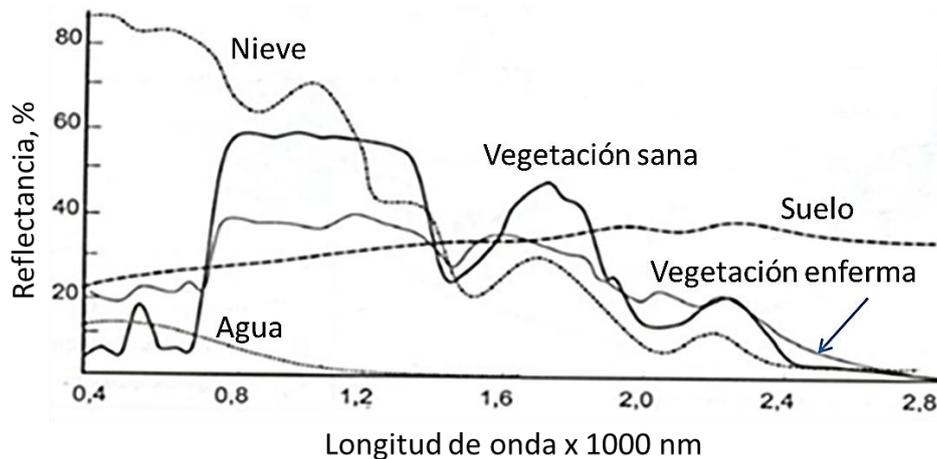
La cobertura del suelo se refiere al tipo de cubierta (natural o producto del ser humano) que se encuentra en la superficie terrestre (pasto, cultivo, ciudad, entre otros) (Rodríguez, 2010). Cobertura de la Tierra: las cualidades biofísicas de la superficie terrestre (por ejemplo, vegetación, agua, suelo desnudo) (National Research Council, 2014).

#### **6. Firmas Espectrales**

En estudios con imágenes satelitales, se necesita que el intérprete tenga una visión directa de las características del terreno. Las características del terreno se obtiene a través de mediciones radiométricas de reflectividad, o de las firmas espectrales de las distintas coberturas terrestres (Corrales, 2014). La radiación reflejada en función de la longitud de onda se llama firma espectral o signatura espectral (Mena, 2011). Se considera a la firma espectral, como una medida cuantitativa que representa las propiedades espectrales de cada objeto. El registro de la firma espectral es influenciado por las condiciones meteorológicas, de iluminación, estaciones del año y su variabilidad temporal (Mena, 2011).

Diferentes tipos de superficies (agua, suelo desnudo, vegetación, etc.) reflejan una luz visible, o tienen un espectro de reflectancia solar característico (Figura 3) (Ayala *et al.*, 2017). El nivel de respuesta característico se da en términos de porcentaje de radiación

reflejada, la cual se encuentra en relación estrecha con el porcentaje de radiación absorbida, transmitida e incidente. Debido a la radiación reflejada, absorbida y transmitida, de los objetos en el espectro visible e infrarrojo, los científicos pueden calcular las firmas espectrales de distintos paisajes y cubiertas (Mena, 2011). Con ellas podemos discriminar e identificar elementos geográficos de la naturaleza que, en el pasado, no podían ser detectados por el ojo humano (Rodríguez, 2011). También, es de gran ayuda para a la creación de mapas de usos del suelo y vegetación.



**Figura 3.** Signaturas espectrales típicas de distintas cubiertas.  
Fuente: (Chuvienco, 1995)

Entre la variedad de aplicaciones de las firmas espectrales se destacan las más comunes en el ámbito científico como: establecer relaciones de reflectividad y características de cobertura, analizar datos multitemporales, revelar las causas de una reflectividad específica en píxeles homogéneos o heterogéneos, detectar la influencia de cambios naturales o artificiales en la cubierta terrestre, sirven para calibrar los resultados de modelos basados en valores de reflectividad, entre otros (Corrales, 2014).

### **7. Análisis de transiciones con matrices.**

La exploración de las matrices de tabulación cruzada y de transiciones, ayuda a identificar los patrones clave de los cambios (Aldwaik, 2012). Con los diversos componentes de las matrices, se pueden analizar y obtener una idea de los procesos probables que determinan un patrón de cambio en el paisaje. Indagar sobre las posibles causas del cambio, por medio de datos cualitativos y cuantitativos, permitirá tomar medidas para prevenir o minimizar los impactos indeseables del cambio de uso del suelo (Braumoh, 2006). Pontius y Alo (2008), motivados por adquirir las señales de cambio más

dominantes entre dos puntos en el tiempo, desarrollaron una técnica para estudiar los cambios de uso del suelo. La técnica se basa en la matriz de tabulación cruzada, que resulta de la superposición de mapas entre dos puntos en el tiempo. Esta matriz es el fundamento de una amplia variedad de estudios de cambios de uso del suelo. La matriz de tabulación cruzada permite cuantificar los diversos indicadores de cambio, tal como: las pérdidas, ganancias, cambio neto e intercambios de cada categoría (Falcón, 2014). También, hace posible la comparación entre una transición sistemática y una transición aleatoria (Aldwaik, 2012). Las transiciones sistemáticas evolucionan de manera constante, progresiva o gradual. En cambio, las transformaciones al azar o aleatorias, son aquellas que actúan repentinamente (Braumoh, 2006). La matriz de tabulación cruzada sigue el formato de la Tabla 2, donde las filas muestran las categorías de tiempo 1 y las columnas muestran las categorías de tiempo 2.

**Tabla 2.** *Matriz de tabulación cruzada para dos puntos diferentes en el tiempo.*

	<b>Tiempo 2</b>				Tiempo total 1	Pérdida
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4		
<b>Tiempo 1</b>						
Categoría 1	<b><math>P_{11}</math></b>	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{1+}$	$P_{1+} - P_{11}$
Categoría 2	$P_{21}$	<b><math>P_{22}</math></b>	$P_{23}$	$P_{24}$	$P_{2+}$	$P_{2+} - P_{22}$
Categoría 3	$P_{31}$	$P_{32}$	<b><math>P_{33}</math></b>	$P_{34}$	$P_{3+}$	$P_{3+} - P_{33}$
Categoría 4	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$	<b><math>P_{44}</math></b>	$P_{4+}$	$P_{4+} - P_{44}$
Tiempo total 2	$P_{+1}$	$P_{+2}$	$P_{+3}$	$P_{+4}$	1	
Ganancia	$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	$P_{+3} - P_{33}$	$P_{+4} - P_{44}$		

Fuente: (Pontius et al., 2004).

Elaborado por: el autor.

Esta tabulación toma forma en una matriz de proporciones. La suma de todos los valores en la fila  $i$  conduce al total representado como  $P_{i+}$ , que representa la proporción de la categoría  $i$  en el tiempo 1, y la suma de los valores en la columna  $j$  conduce al total representado como  $P_{+j}$ , que representa la proporción de la categoría  $j$  en el tiempo 2. Los valores fuera de la diagonal se representan como  $P_{ij}$  y denotan la proporción de suelo que experimenta una transición de la categoría  $i$  a la categoría  $j$ . Los números en la diagonal de la matriz ( $P_{jj}$ ) denotan la proporción de suelo que persiste en la categoría  $j$ . La última fila de la matriz representa las ganancias ( $G_j = P_{+j} - P_{jj}$ ), mientras que las pérdidas ( $L_i = P_{i+} - P_{ii}$ ) se representan en una columna.

Con todos los índices de cambio identificados, se analiza las entradas fuera de la diagonal, a través de la matriz de transiciones, que nos muestran las transiciones más prominentes (sistemáticas), interpretando las transiciones en relación a los tamaños de las categorías (Pontius *et al.*, 2004).

## **8. Métodos para la clasificación de imágenes satelitales**

La clasificación digital de imágenes de satélite se ha transformado en una herramienta fundamental en el monitoreo de la cobertura terrestre. Esta se fundamenta en aprendizaje automático, que intenta clasificar cada pixel individual en base a la información espectral de los objetos, para luego ser representada por números digitales (López, 2009). El objetivo de la clasificación, es asignar los píxeles de la imagen satelital a una clase o categoría en específico (por ejemplo, cultivos, bosque, pastizales, humedales, etc.) y generar un mapa temático (Weng, 2010). Es importante diferenciar dos términos elementales en el tema de clasificadores, como las clases espectrales y clases de información. Las clases espectrales hacen referencia a la categorización de elementos homogéneos contenidos en una imagen de acuerdo al valor espectral de los píxeles de la misma. Las clases de información se refieren a la categorización, donde el analista es el que define cada clase etiquetándola de alguna manera (López, 2009). Generalmente, existen dos enfoques para la clasificación de imágenes: la clasificación supervisada y no supervisada.

### **8.1. Clasificación no supervisada.**

En la clasificación no supervisada, el algoritmo de aprendizaje automático no necesita de un "entrenador". El algoritmo corre a través del computador y clasifica la información en sub conjuntos llamados conglomerados y retorna el resultado agrupado. El algoritmo trabaja agrupando los datos y clasificándolos sin necesidad de basarse en muestreos de campo.

### **8.2. Clasificación supervisada.**

En la clasificación supervisada, el usuario o analista identifica en la imagen muestras representativas dentro de alguna cubierta o categoría de interés. Su proceso cuenta con dos fases: la primera es la de aprendizaje, donde se realizará el retrato espectral de cada categoría, tomando una muestra representativa dentro de un "sitio de entrenamiento" localizado en la imagen. En la segunda fase, se calcula para cada píxel la posibilidad de pertenecer a una cada categoría con base en su respuesta espectral y se asigna finalmente

la clase a la cual es más probable que pertenezca de acuerdo con la información espectral (García, 2008). Para la clasificación supervisada se emplea algoritmos fundamentados en estadística paramétrica y no paramétrica (López, 2009). Entre los algoritmos paramétricos, encontramos a los de máxima verosimilitud y análisis de discriminación lineal. En cuanto a los no paramétricos se encuentran: redes neuronales, árboles de decisiones y máquinas de soporte vectorial (López, 2009). El clasificador de máxima verosimilitud (MVS) o también conocido de máxima probabilidad, es el algoritmo que se utiliza más comúnmente en percepción remota. Es considerado como uno de los procedimientos de discriminación más acertados y eficientes cuando los datos tienen una distribución normal. Su aplicación e interpretación de resultados es sencilla (Mora, 2008).

## **METODOLOGÍA**

### **1. Área de estudio**

La zona de estudio corresponde al cantón Chambo localizado al noroeste de la provincia de Chimborazo. Está ubicado entre los: 78° 34 minutos 59.88 segundos longitud Oeste, y - 1° 43 minutos 59.99 segundos latitud Sur. Su altitud oscila entre los 2.400 a 4.730 msnm, con un promedio de 2.780 msnm., enclavado en la región interandina, de la sierra central ecuatoriana, con una temperatura promedio de 14 °C. Chambo, ocupa una superficie territorial aproximada de 163 Km<sup>2</sup>, que representan el 2,5 %, de la superficie total de la provincia (Cuvi, 2010). Dentro del área de estudio se encuentra ubicada una importante zona de amortiguamiento perteneciente al Parque Nacional Sangay. El Cantón Chambo posee suelos Andisoles, Molisoles e Inceptisoles, caracterizados por la presencia de ceniza volcánica y por tener un buen drenaje natural. Según su textura, encontramos suelos franco y franco arcillosos (Quishpe, 2017).



ubicación (Dávila, 2012). Luego, se utiliza la herramienta *Image Analysis* del software ArcGis 10.2, para la combinación de las bandas espectrales de cada imagen. En nuestro caso, la composición de bandas es de 3-2-1 para el Landsat 7 y 4-3-2 para Landsat 8, ya que permiten una mejor interpretación visual (Urbanski, 2015). En seguida, con la delimitación del área de interés, se utiliza la herramienta *Pan-sharpened composit* que crea la composición de todas las bandas, mejorando el tamaño del píxel de 30 m a 15 m. Posteriormente se realiza el tratamiento de las imágenes con las correcciones atmosféricas y radiométricas. En las correcciones radiométricas se compensa el efecto de los factores ambientales, ya que trabaja con la reflectancia, homogenizando las imágenes, tratando distorsiones provocadas por la atmósfera, y también los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor (Ariza, 2013). En la corrección atmosférica se elimina el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética originada por los gases, partículas en suspensión, aerosoles y nubes (Luna, 2011).

#### **4. Clasificación supervisada**

Se realizó un recorrido de campo para definir y localizar los sitios más representativos. Se obtuvo puntos de control del lugar, con un posicionador geográfico (GPS de alta precisión), para validar el análisis visual que nos proporcionan las imágenes satelitales. Las imágenes fueron clasificadas de manera independiente mediante el método de clasificación supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud. El proceso cuenta con dos fases: la primera es la de aprendizaje, donde se realiza el retrato espectral de cada categoría, con la construcción de “sitios de entrenamiento” localizados en la imagen y luego la construcción de las categorías de coberturas: Bs (Bosque), C (Cultivos), Hm (Humedales), Pr (Páramos), y Pz (Pastizales), para generar mapas de uso de suelo dentro de una superficie de 16300 ha correspondiente a los años 2001, 2010 y 2016. En la segunda fase, se calcula para cada píxel la probabilidad de pertenencia a cada categoría con base en su respuesta espectral y se asigna finalmente a la clase a la cual es más probable que pertenezca de acuerdo con la información espectral (García, 2008).

#### **5. Validación de la clasificación**

La validación de la clasificación se realiza para determinar la confiabilidad de la clasificación, utilizando una matriz de confusión y el Coeficiente Kappa (Rodríguez, 2011). En la matriz de confusión, se sitúa en las filas las clases o categorías obtenidas en el mapa y en las columnas las mismas clases con datos reales del terreno. La diagonal de

la matriz representa el número de sitios de verificación para los cuales hay concordancia entre el mapa y los datos de referencia (Ministerio del Ambiente de Perú, 2014). Con la matriz de confusión, se generan tres tipos de precisiones. La precisión general, “*Overall Accuracy*” (OA) que indica la proporción de todos los pixeles de referencia, que se clasifican correctamente. La precisión del usuario, “*user’s accuracy*” (UA) que representa la probabilidad de que un pixel pertenezca a una clase específica y que sea clasificado en la misma clase. La precisión del productor, “*producer’s accuracy*” (PA) que expresa la probabilidad de que una clase determinada sea reconocida correctamente (Ayala *et al.*, 2017). La concordancia entre los valores observados de la imagen y los valores estimados por el clasificador se evaluó con la ayuda del coeficiente Kappa (*K*) (Ecuación 1) (Perea, Meroño, y Aguilera, 2009):

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (1)$$

Dónde:

$P_o$  = es la proporción de concordancia observada

$P_e$  = es la proporción de concordancia esperada por azar

$1 - P_e$  = representa el acuerdo o concordancia máxima posible que no se debe al azar.

Otra prueba estadística complementaria que se utiliza es la de Neyman Person. Esta prueba necesita de una matriz de error de población, expresada en relación a las proporciones para calcular las proporciones del área del estrato y para evaluar la exactitud del mapa. Básicamente se utiliza para evaluar la precisión del mapa, las áreas corregidas por error y los intervalos de confianza. Obteniendo la distribución de la variabilidad del error en la clasificación. Esto nos permitirá tener mejores intervalos de confianza (Nájera, 2013).

## 6. Matriz de Tabulación cruzada

Con la metodología propuesta por Pontius et al (2004), se estudia los cambios entre dos mapas de usos del suelo en diferentes años (2001, 2010 y 2016). La matriz se compone de proporciones del paisaje, donde las filas corresponden a la información del tiempo 1 y las columnas a la información del tiempo 2. La matriz de tabulación cruzada permite conseguir, para cada categoría de uso del suelo, las ganancias y las pérdidas, el cambio neto y los intercambios experimentados entre dos momentos temporales. Con este método, se obtiene información partiendo de un nivel de análisis macro hasta llegar a un

nivel detallado de los cambios producidos en el territorio (Rocha, 2010). Los indicadores de cambio que se estiman usando la matriz de tabulación cruzada son (Corrales, 2014):

$$\text{Ganancias: } G_{ij} = P_{+j} - P_{ij} \quad (2)$$

$$\text{Pérdidas: } L_{ij} = P_{j+} - P_{ij} \quad (3)$$

$$\text{Cambio neto: } D_j = | L_{ij} - G_{ij} | \quad (4)$$

$$\text{Intercambio: } S_j = 2 \times \text{MIN} (P_{j+} - P_{ij}, P_{+j} - P_{ij}) \quad (5)$$

$$\text{Cambio total: } D_{Tj} = G_{ij} + L_{ij} \quad (6)$$

Para evaluar la vulnerabilidad de los cambios en las diferentes transiciones, se calculan los índices de persistencia de Braimoh (2006). Estos índices relaciona la persistencia de cada categoría de uso de suelo con las ganancias ( $g_p$ ), pérdidas ( $l_p$ ) y cambios netos ( $n_p$ ):

$$g_p = \frac{\text{ganancia}}{\text{persistencia}} \quad (7)$$

$$l_p = \frac{\text{pérdida}}{\text{persistencia}} \quad (8)$$

$$n_p = g_p - l_p \quad (9)$$

## 7. Análisis de las transiciones e intensidades

Una vez realizada la matriz de tabulación cruzada se genera la matriz de transición y se inicia el análisis de transiciones sistemáticas entre categorías, con el fin de detectar señales importantes de los cambios de uso/cobertura del suelo. En el análisis de las transiciones, se considera el valor numérico y el signo de cuatro parámetros característicos para cada combinación de categorías en el tiempo 1 y el tiempo 2. En términos de ganancias, el primer parámetro característico corresponde al valor numérico que representa  $P_{ij}$ , que denotan la proporción de suelo que experimenta una transición de la categoría  $i$  a la categoría  $j$ . El segundo parámetro característico corresponde con el valor numérico de la ganancia que se puede esperar en cada categoría si ésta ocurriera de manera aleatoria, calculado por:

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

La ecuación (10), distribuye la ganancia en cada columna entre las entradas que están fuera de la diagonal, y dentro de la columna. El tercer parámetro característico corresponde con el valor numérico que resulta de sustraer el primer número del segundo, es decir:  $(P_{ij} - G_{ij})$ . La magnitud de este valor numérico indica la diferencia entre el valor observado y el valor esperado, en relación con la magnitud del valor esperado. Y el cuarto parámetro característico corresponde con el valor numérico que resulta de dividir el tercer parámetro entre el segundo parámetro característico  $(P_{ij} - G_{ij})/G_{ij}$ , esta división da valores que indican un proceso sistemático relativo al tamaño de la categoría involucrada. En términos de las pérdidas, de la misma manera consideramos cuatro parámetros característicos: el primero representa el valor de  $P_{ij}$ , que es la proporción de cobertura que paso de la categoría  $i$  a la  $j$ ; el segundo representa la pérdida que se puede esperar en cada categoría si ésta ocurriera de manera aleatoria, y se calcula con la expresión representada en la ecuación (11), asumiendo que la pérdida en cada categoría y la proporción correspondiente permanecen constantes; el tercer parámetro característico resulta de sustraer el primer parámetro del segundo parámetro  $(P_{ij} - L_{ij})$  y éste indica el tamaño de la huella dejada en el paisaje debido a una transición sistemática donde se produjeron pérdidas, y el cuarto parámetro corresponde con el valor numérico que resulta de dividir el tercer parámetro entre el segundo parámetro  $(P_{ij} - L_{ij})/L_{ij}$  y éste indica un proceso sistemático relativo al tamaño de la categoría involucrada.

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

Para interpretar las transiciones en términos de ganancias, se considera el signo del tercer y cuarto parámetro característico. Si ambos son positivos, entonces se dice que la categoría en la columna gana y que ésta reemplaza la categoría en la fila. Si ambos signos son negativos, se dice que la categoría en la columna gana y que ésta *no* reemplaza la categoría en la fila. De manera similar, en términos de las pérdidas, se considera el signo de  $(P_{ij} - L_{ij})$  y el signo de  $(P_{ij} - L_{ij})/L_{ij}$ . Si ambos son positivos entonces se dice que la categoría en la fila pierde y que la categoría en la columna reemplaza la categoría en la fila. Si ambos signos son negativos, se dice que la categoría en la fila pierde y que la

categoría en la columna *no* reemplaza la categoría en la fila (matrices de transiciones en anexos).

El análisis de la intensidad de los cambios se realiza en dos fases separadas. El primer análisis se realiza a “nivel del intervalo de tiempo” y el segundo a “nivel de las categorías”.

A nivel de intervalos de tiempo, se determina si la tasa de cambio interanual global es *lenta* o *acelerada*, al comparar su valor numérico con la tasa uniforme de cambio anual, definida como “umbral de cambio”. Este umbral resulta de distribuir uniformemente el cambio global en todos los años estudiados (Aldwaik, 2012).

Primero se calcula la tasa de cambio por unidad de tiempo (año) en el intervalo  $(Y_{t+1} - Y_t)$  con la ayuda de la ecuación (12). Donde,  $Y_t$  representa el año calendario de inicio del intervalo de tiempo en estudio, y  $Y_{t+1}$  el año calendario de fin del intervalo. Si  $S_t$  representa la intensidad anual de cambio en el intervalo de tiempo  $(Y_{t+1} - Y_t)$ , entonces:

$$S_t = \frac{\left( \frac{\text{Cambio en el área durante el intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)}{\text{Área total de la región en estudio}} \right)}{\text{Duración en años del intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)} \times 100\% \quad (12)$$

Considerando que  $P_{ij}$  representa el número de pixeles que pasan de la categoría  $i$  en el tiempo  $Y_t$  a la categoría  $j$  en el tiempo  $Y_{t+1}$ , entonces rescribiendo la ecuación (13) y obtenemos:

$$S_t = \frac{\left( \frac{\sum_{j=1}^J \left[ \left( \sum_{j=1}^J P_{ij} \right) - P_{ij} \right]}{\sum_{j=1}^J \left[ \left( \sum_{j=1}^J P_{ij} \right) \right]} \right)}{(Y_{t+1} - Y_t)} \times 100\% \quad (13)$$

Si  $U$  simboliza el valor numérico que representa el umbral de cambio uniforme, entonces:

$$U = \frac{\left( \frac{\text{Cambio total en el área durante todos los intervalos de tiempo estudiados}}{\text{Área total de la región en estudio}} \right)}{\text{Duración en años de todos los intervalos}} \times 100\% \quad (14)$$

$$U = \frac{\left( \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \left\{ \sum_{j=1}^J \left[ \left( \sum_{i=1}^J P_{ij} \right) - P_{ij} \right] \right\}}{\left[ \sum_{j=1}^J \left( \sum_{i=1}^J P_{ij} \right) \right]} \right)}{(Y_T - Y_1)} \times 100\% \quad (15)$$

A “nivel de categoría”, se identifica si las transiciones en las categorías se mantienen *latentes* o *activas*. Una transición *latente* se interpreta como que existe pero que está aparentemente inactiva y una transición *activa*, significa que obra o que tiene capacidad de obrar. En este nivel, para cada categoría individual, se utiliza las ecuaciones (16) y (17), que dan la intensidad anual de una categoría en términos de ganancias y pérdidas, respectivamente (Aldwaik, 2012).

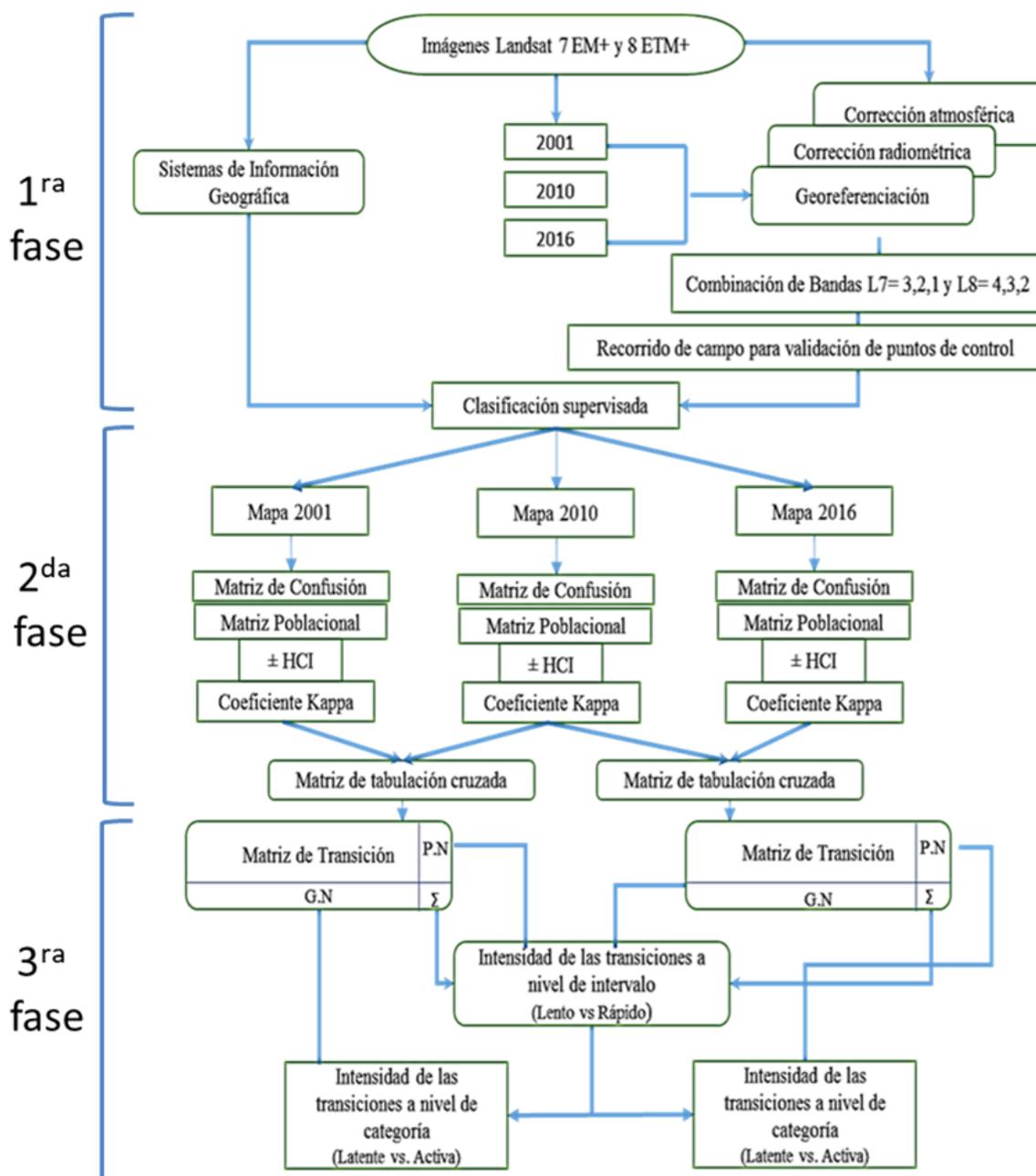
$$G_{ij} = \frac{\left( \frac{\text{Ganancia global en área de la categoría } j \text{ durante el intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)}{\text{Duración en años del intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)} \right)}{\text{Área de la categoría } j \text{ en el tiempo } Y_{t+1}} \times 100\% \quad (16)$$

$$L_{ii} = \frac{\left( \frac{\text{Pérdida global en área de la categoría } i \text{ durante el intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)}{\text{Duración en años del intervalo } (Y_{t+1} - Y_t)} \right)}{\text{Área de la categoría } i \text{ en el tiempo } Y_t} \times 100\% \quad (17)$$

El valor numérico que representa el umbral con respecto al cual se identifica si las transiciones son *latentes* o *activas* se calcula con la ecuación (12).

## 8. Flujoograma de Actividades

La metodología se desarrolló en tres fases: (1) El procesamiento y georeferenciación de las imágenes, (2) La clasificación supervisada de las imágenes, para obtener mapas de uso del suelo, y el análisis de los errores e incertidumbre en los mapas, (3) El análisis de las transiciones y sus intensidades. En la Figura 5 se ilustra el flujoograma de actividades.



**Figura 5.** Esquema Metodológico. HCI: *half-width of the confidence interval* (Mitad del ancho del intervalo de confianza), PN: Pérdidas netas, GN: Ganancias netas. Elaborado por: el autor

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cumplir con el primer objetivo, se inició con la georeferenciación, tratamiento y procesamiento de las imágenes del satélite Landsat 7 y 8 de los años 2001, 2010 y 2016; se seleccionaron imágenes de las fechas, 3 de noviembre del 2001, 4 de octubre del 2010 y 20 de noviembre del 2016. Estas fechas coinciden con el comienzo de la temporada lluviosa. Se establecieron cinco categorías: Bs; C; Hm; Pr; Pz, con de una superficie total

aproximada de 16366 ha. Con las categorías de interés identificadas, los puntos de control determinados en cada categoría por cada año de estudio (validación de los puntos en salidas de campo) y las firmas espectrales, se realizó la clasificación supervisada de las imágenes.

El resultado de la clasificación supervisada, por el método de máxima verosimilitud, en cada imagen satelital, fue la generación de tres mapas de uso del suelo en los años determinados de estudio. Con estos mapas se logró un primer acercamiento a la detección de los cambios generados. La metodología implementada coincide con el estudio de (Santana, 2007), por la comparación a posteriori de imágenes clasificadas y la utilización de técnicas de SIG. En la validación del método de clasificación, Santos (2007) sugiere evaluar la incertidumbre en el proceso de clasificación supervisada con la utilización de la matriz de confusión y el coeficiente Kappa. La matriz de confusión que resultó de la clasificación supervisada realizada en la imagen del año 2001, muestra que el clasificador alcanzó una precisión general (OA) del 73,71%, en el año 2010 fue de 80,19% y en el año 2016 se logró una precisión general de 89,47%.

El índice Kappa toma valores entre el -1 y +1. Si el valor se encuentra más cercano a +1, el grado de concordancia entre los valores observados de la imagen y los valores estimados por el clasificador es mayor, lo contrario si es más cercano a -1 (Cerdeja y Villarroel, 2008). Los valores del índice de Kappa fueron 0,66; 0,73 y 0,84 para las clasificaciones supervisadas correspondientes a los años 2001, 2010 y 2016 respectivamente (ver Tabla 3). Según Arcos (2009), en la práctica, cualquier valor de *K* muy inferior a 0,5 indica una baja concordancia en la predicción de los datos. Los valores obtenidos están entre los rangos permitidos, por lo que se considera que los resultados de la clasificación supervisada de los píxeles de las imágenes, en unidades básicas de uso del suelo, son una representación aceptable de lo que en la realidad se encuentra. De esta forma se generó los mapas de uso que muestran las tendencias en los cambios de uso del suelo que han ocurrido en el área de estudio.

La segunda fase consiste en analizar los errores e incertidumbre asociados a los mapas. Con la implementación de la asignación óptima de Neyman (NOA), se logró la distribución de la muestra para tener el menor error posible. Es decir se obtuvo una mejor precisión de los mapas con la evaluación de los píxeles clasificados. En el año 2001 se obtuvo una precisión global de 74,17%, para el 2010 la precisión global fue de 81,03% y para el año 2016 se logró un 88,27% de la precisión global (ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Matriz de error con la asignación óptima de Neyman (NOA), evaluación de la precisión de los mapas e índices kappa de los años estudiados.

Clases	Píxeles Clasificados					n <sub>i+</sub>	Evaluación de precisión %				
	Bs	C	Hm	Pr	Pz		UA	PA	OA	Kappa	
Datos Referencia		<b>71</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>88</b>	<b>80,22</b>	<b>87,79</b>	<b>74,17</b>	<b>0,66</b>
	<b>Bs</b>	<i>88</i>	2	0	8	1	100	<i>88,14</i>	<i>79,52</i>	<i>81,03</i>	<i>0,73</i>
		81	3	0	0	0	83	96,84	94,91	88,27	0,84
	<b>C</b>	<b>3</b>	<b>162</b>	<b>4</b>	<b>39</b>	<b>4</b>	<b>213</b>	<b>76,25</b>	<b>79,51</b>		
		<i>3</i>	<i>145</i>	0	5	9	163	<i>89,38</i>	<i>66,67</i>		
	<b>Hm</b>	3	187	0	13	4	207	90,43	89,88		
		<b>2</b>	<b>3</b>	<b>130</b>	<b>73</b>	<b>11</b>	<b>218</b>	<b>59,64</b>	<b>76,27</b>		
	<b>Pr</b>	14	4	75	22	13	127	<i>58,67</i>	<i>85,72</i>		
		0	0	76	55	0	131	57,92	91,43		
	<b>Pz</b>	<b>2</b>	<b>23</b>	<b>12</b>	<b>221</b>	<b>1</b>	<b>259</b>	<b>85,33</b>	<b>64,71</b>		
		3	38	5	288	3	337	<i>85,47</i>	<i>88,53</i>		
	<b>n<sub>-j</sub></b>	2	5	5	358	1	370	96,62	83,92		
		<b>3</b>	<b>11</b>	<b>20</b>	<b>4</b>	<b>83</b>	<b>122</b>	<b>68,37</b>	<b>80,87</b>		
		2	28	7	2	134	174	<i>76,91</i>	<i>83,87</i>		
		0	13	2	0	93	190	85,74	95,33		
		<b>80</b>	<b>204</b>	<b>170</b>	<b>342</b>	<b>103</b>					
	110	218	87	325	160	900					
	85	208	83	426	98						

\*Año 2001 (negritas), 2010 (cursiva), 2016 (normal). Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

Las Tablas (4, 5 y 6) muestran la precisión del mapa y la evaluación de la incertidumbre de las áreas ajustadas por error de cada mapa, derivadas de la asignación óptima de Neyman, para los tres años de estudio (Ayala *et al.*, 2017).

En el año 2001 (Figura 6 y Tabla 7), el análisis de uso del suelo refleja que la categoría Pr, representa el 32,64% del área total, es decir, es la categoría más extensa. La segunda categoría lo conforma C, con el 22,01% del paisaje, seguida de la categoría Hm, con el 20,18% de la extensión total. Las categorías menos extensas fueron Bs (14,73%), y Pz (10,44%). El uso del suelo destinado a la producción agropecuaria es representado por la suma de C y Pz, con el 32%, y los ecosistemas naturales están representados por la suma de Hm, Bs y Pr con un 68% del total del Cantón.

**Tabla 4.** Precisión del mapa de uso correspondiente al año 2001 e incertidumbre estimada en cada una de las unidades básicas del mapa.

Clases	$\hat{U}A \pm HCI_{\hat{U}A}$	$PA \pm HCI_{PA}$	$\hat{O}A \pm HCI_{\hat{O}A}$	$p_{+j} \pm HCI_{p_{+j}}$	Mapa	Error-Ajustado	Límite inferior	Límite superior
	%	%	%	%	$\hat{A}_i$ (ha)	$\hat{A}_j$ (ha)	CI (ha)	CI (ha)
<b>Bs</b>	80,22±0,08	92,28±0,05	75,63±0,03	12,81±0,01	2394,0	2394±224	2170	2618
<b>C</b>	76,25±0,06	77,30±0,05		21,71±0,02	3576,9	3576,9±315	3262	3892
<b>Hm</b>	59,64±0,07	73,42±0,08		16,38±0,02	3278,1	3278,1±304	2974	3582
<b>Pr</b>	85,33±0,04	69,98±0,03		39,80±0,02	5302,6	5302,6±382	4921	5684
<b>Pz</b>	68,37±0,08	76,82±0,07		9,29±0,01	1696,4	1696,4±211	1486	1907
					16248			

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

**Tabla 5.** Precisión del mapa de uso correspondiente al año 2010 e incertidumbre estimada en cada una de las unidades básicas del mapa.

Clases	$\hat{U}A \pm HCI_{\hat{U}A}$	$PA \pm HCI_{PA}$	$\hat{O}A \pm HCI_{\hat{O}A}$	$p_{+j} \pm HCI_{p_{+j}}$	Mapa	Error-Ajustado	Límite inferior	Límite superior
	%	%	%	%	$\hat{A}_i$ (ha)	$\hat{A}_j$ (ha)	CI (ha)	CI (ha)
<b>Bs</b>	88,14±0,06	81,86±0,06	82,37±0,02	11,52±0,01	1744	1744±179	1565	1923
<b>C</b>	89,38±0,05	65,96±0,05		24,48±0,02	2946	2946±328	2618	3274
<b>Hm</b>	58,67±0,09	80,55±0,09		7,13±0,01	1596	1596±186	1410	1782
<b>Pr</b>	85,47±0,04	91,88±0,02		41,19±0,02	7218	7218±320	6898	7538
<b>Pz</b>	76,91±0,06	84,21±0,05		15,68±0,01	2799	2799±234	2565	3033
					16303,75			

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

**Tabla 6.** Precisión del mapa de uso correspondiente al año 2016 e incertidumbre estimada en cada una de las unidades básicas del mapa.

Clases	$\hat{U}A \pm HCI_{\hat{U}A}$	$PA \pm HCI_{PA}$	$\hat{O}A \pm HCI_{\hat{O}A}$	$p_{+j} \pm HCI_{p_{+j}}$	Mapa	Error-Ajustado	Límite inferior	Límite superior
	%	%	%	%	$\hat{A}_i$ (ha)	$\hat{A}_j$ (ha)	CI (ha)	CI (ha)
<b>Bs</b>	96,84±0,04	94,93±0,04	89,83±0,02	10,64±0,01	1690	1690±104	1586	1795
<b>C</b>	90,43±0,04	91,73±0,03		27,28±0,02	4502	4502±234	4267	4736
<b>Hm</b>	57,92±0,09	88,35±0,08		6,56±0,02	1621	1621±167	1454	1788
<b>Pr</b>	96,62±0,02	86,71±0,02		45,18±0,02	6572	6572±236	6336	6808
<b>Pz</b>	85,74±0,07	94,17±0,05		10,24±0,01	1822	1822±150	1672	1973
					16207,58			

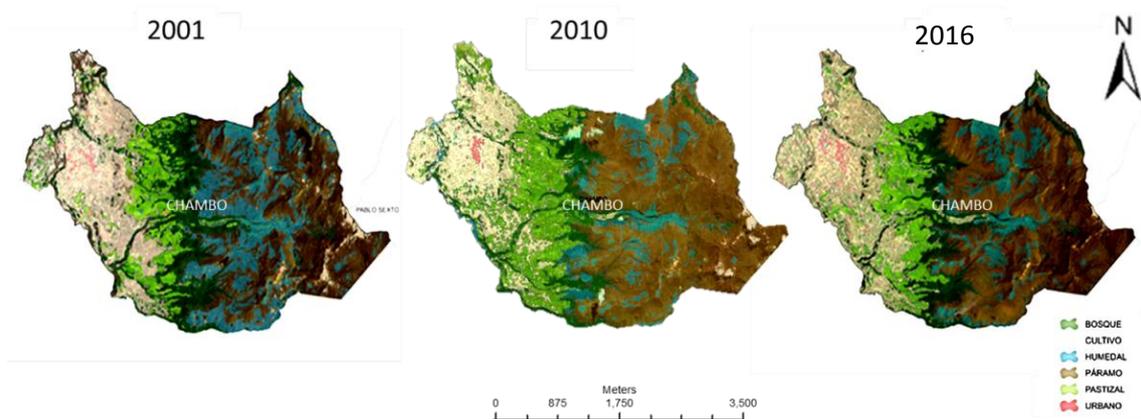
\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

Para el año 2010 (Figura 6, Tabla 7), se mantiene dominante la categoría Pr, y tiene un aumento notable en su superficie, ya que cuenta con el 44,27% del total del área de estudio. Así mismo, la categoría Pz ha obtenido un incremento en su superficie, contando con el 17,17% del total de la superficie. La categoría C, a pesar de tener una disminución en su superficie, sigue siendo la segunda categoría dominante del paisaje, representando el 18,07%. Le sigue la categoría Pz y luego la categoría Hm, correspondiente al 9,79% del área total. La categoría Hm con 9,79 %, sufre una disminución del 51,48 % en su superficie en relación su superficie en el 2001. El bosque (Bs) representa el 10,70% del área. El uso del suelo destinado a la producción agropecuaria en el 2010 fue de 35,24% (C + Pz) y la destinada a ecosistemas naturales (Hm + Pr + Bs) fue de 64,76 % del área total del Cantón. En relación, a las magnitudes de las áreas en el 2001, el área destinada a producción agropecuaria aumento en un 9 % y el área de los ecosistemas naturales disminuyó en 4 %.

El mapa del 2016 (Figura 6, Tabla 7), muestra que la categoría Pr, sufre una disminución en su superficie, pero sigue siendo la categoría más extensa del paisaje, representando el 40,55% del área total. La segunda categoría dominante es C, perteneciente al 27,78% de la superficie total. Esta categoría presento un aumento en su superficie de 54 % en relación al 2010. Le sigue la categoría de pastizal que experimento una disminución de la superficie y cuenta con el 11,24% del área total. El uso del suelo destinado a la producción agropecuaria fue de 39 % (C + Pz), y el destinado a los ecosistemas naturales (Hm + Pr + Bs) fue 61 % del área total del Cantón. En relación a las magnitudes de las áreas en el 2010, el área destinada a producción agropecuaria aumento en 11 % y la destinada a los ecosistemas naturales disminuyó en 6 %.

Los cambios de cobertura y uso del suelo se listan en la Tabla 7, donde se pueden observar los valores numéricos de las superficies expresados en hectáreas y los porcentajes totales para cada categoría de uso del suelo en los tres años de análisis.



**Figura 6.** Mapas de categorías de usos de suelo del Cantón Chambo en los años 2001,2010 y 2016.  
Elaborado por: el autor

**Tabla 7.** Evolución de la cobertura y uso del suelo en superficie y porcentaje de los años 2001, 2010 y 2016.

Descripción	Áreas (ha)					
	2001	%	2010	%	2016	%
Bosque	2394	14,73	1743,7	10,70	1690,3	10,43
Cultivo	3576,9	22,01	2946,0	<b>18,07</b>	4501,8	<b>27,78</b>
Humedales	3278,1	<b>20,18</b>	1596,5	<b>9,79</b>	1621,0	10,00
Páramo	5302,6	<b>32,64</b>	7218,3	<b>44,27</b>	6572,1	<b>40,55</b>
Pastizal	1696,4	10,44	2799,3	<b>17,17</b>	1822,4	<b>11,24</b>
<b>Total</b>	16248	100	16303,8	100	16366,8	100

Elaborado por: el autor

En el período de tiempo 2001-2010, la categoría Hm, sufre una disminución en su superficie, pasando del 20,18% a 9,79%, y en la categoría Pr, existe un incremento importante de 32,64% a 44,27%. Los bosques tienen una disminución en su superficie de 14,73% a 10,70%. En el intervalo de tiempo 2010-2016, el cultivo tiene un incremento significativo que va del 18,07% al 27,78% y el pasto presenta una disminución del 17,17% al 11,24% del paisaje. El páramo también experimenta una disminución en su superficie que va de 44,27% a 40,55%. En general se observa un aumento sostenido del área destinada a la producción agropecuaria; para el 2010 fue de 9 % y para el 2016 fue de 11 %. Mientras que, se observa una disminución sostenida en superficie destinada a los ecosistemas naturales; para el 2010 fue de 4 % y para el 2016 fue de 6%.

La matriz de tabulación cruzada permite realizar un análisis descriptivo de las transiciones. Se requiere de información complementaria para realizar un análisis de las transiciones en términos de factores causales de cambio. Con la matriz de tabulación cruzada se aprecian claramente las pérdidas y ganancias que han ocurrido, los cambios

de cobertura y disposición del suelo, así como también las áreas que permanecieron intactas (Tabla 8 y Tabla 9).

**Tabla 8.** *Matriz de tabulación cruzada con valores expresados en términos porcentuales de área del intervalo 2001-2010*

Tiempo 1 (2001)	Tiempo 2 (2010)					Tiempo total 2001	Pérdida
	Bs	C	Hm	Pr	Pz		
Bs	7,51	0,74	2	1,75	2,73	14,73	7,22
C	1,52	14,26	0,15	0,97	5,02	21,92	7,66
Hm	0,4	0,07	6,09	13,33	0,35	20,24	14,15
Pr	0,78	1,39	1,34	28,29	0,85	32,65	4,36
Pz	0,55	1,31	0,25	0,13	8,26	10,5	2,24
Tiempo total 2010	10,76	17,77	9,83	44,47	17,21	100	
Ganancia	3,25	3,51	3,74	16,18	8,95		

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

La categoría con mayor persistencia o proporción de área que no se ve alterada, en el intervalo 2001-2010 fue el Pr, el cual mantiene inalterada el 28,29% de 32,65% de su área inicial, siendo este resultado de gran relevancia, si consideramos que los ecosistemas de páramo proveen servicios ambientales esenciales como el abastecimiento y regulación del agua, y sus suelos son sumideros de carbono de importancia mundial (García *et al.*, 2016). Entre los ecosistemas naturales, el Bs cuenta con un 7,51% de persistencia del 14,73% de su área inicial, obteniendo el cuarto lugar de las categorías estables. El cultivo obtiene el segundo de las categorías estables con el 14,26% de 21,92% de su área inicial y el tercer lugar de las categorías estables es de Pz, con el 8,26% de 10,5% de su área inicial. Los humedales tienen la menor *persistencia* entre las categorías, debido a su constante intercambio con la categoría Pr. Las transiciones más representativas, que se encuentran fuera de la diagonal, son la de Bs a Pz (2,73%), y de Pr a C (1,39%). Esta transiciones de deben a que los ecosistemas naturales han sido afectados por la acción antrópica (perturbaciones). La transición de Hm a Pr (13,33%), sugiere una gran influencia del cambio climático sobre los humedales, al aumentar ligeramente la temperatura aumenta la evapotranspiración y los humedales se ven sometidos a una constante de reducción y aumento de su área de ocupación. El cambio de C a Pz (5,02%) se debe al cambio en la matriz productiva, ya que la ganadería empezó a intensificarse por las ganancias en sus derivados (Paruelo, Guerschman, y Verón, 2005).

**Tabla 9.** Matriz de tabulación cruzada con valores expresados en porcentajes de área del intervalo 2010-2016

Tiempo 1 (2010)	Tiempo 2 (2016)					Tiempo total 2010	Pérdida
	Bs	C	Hm	Pr	Pz		
Bs	<b>6,73</b>	<b>2,74</b>	0,06	0,35	0,82	10,70	3,96
C	0,16	<b>16,44</b>	0,03	0,01	0,91	17,55	1,11
Hm	<b>1,41</b>	0,83	<b>5,21</b>	<b>2,02</b>	0,40	9,86	4,66
Pr	<b>1,36</b>	0,11	<b>4,71</b>	<b>38,26</b>	0,18	44,62	6,37
Pz	0,76	<b>7,49</b>	0,02	0,02	<b>8,97</b>	17,26	8,29
Tiempo total 2016	10,42	27,62	10,03	40,65	11,29	100	
Ganancia	3,68	11,17	4,82	2,39	2,32		

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

Para el 2010-2016, la categoría con mayor persistencia o proporción de área que no se ve alterada es Pr, con el 38,26% de 44,62% de su área inicial. Le sigue la categoría C, con el 16,44% de 17,55% de su superficie inicial. El pastizal (Pz), obtiene el tercer lugar de persistencia, con el 8,97% del 17,26% de su superficie inicial. En este período, las transiciones más representativas, que se encuentran fuera de la diagonal son: la transformación de Pr a Bs, con el 1,36% de la proporción de área, la conversión de Bs a C en un 2,74%, la conversión de Pz a C con el 7,49%, esta conversión sugiere que la producción de pastos está en declive, debido a la implementación de medidas de recambio de pasturas, realizando actividades agrícolas previas a la implementación de nuevas pasturas (Paruelo et al., 2005). Por último la conversión de Hm a Pr con el 2,02% de la proporción de área.

La Tabla 10 y Tabla 11, resumen el comportamiento del cambio de uso del suelo del área de estudio, en los dos intervalos de tiempo, derivadas de la matriz de tabulación cruzada. En el primer período, las categorías de gran importancia, desde el punto de vista ecológico, que tuvieron mayores pérdidas son los humedales y los bosques, seguidos del páramo (Figura 7). Sin embargo, el cambio neto en páramo fue mayor (Tabla 10), tal y como lo demuestran los valores de la columna correspondiente. De igual manera, para humedales y pastizales el cambio neto es alto. Las categorías con mayores ganancias son Pz y Pr (Figura 7). El intercambio se da con mayor magnitud en Pr (8,72%), seguido muy de cerca por Hm (7,48%) y C (7,01%) (Tabla 10).

En el segundo período, las categorías con más pérdidas son Pz, Pr, y Hm (Figura 8). Las categorías que obtuvieron mayores ganancias son C y Hm con porcentajes de 11,17% y 4,82% respectivamente, seguido de Bs con un 3,68% (Figura 8). El cambio neto, con

mayor porcentaje fue para C, con un 10,06%. Le sigue la categoría Pz, con su cambio neto de 5,97%. Si ponemos atención en los bosques, estos prácticamente pierden y ganan la misma superficie en este periodo de tiempo (Figura 8). El intercambio se da con mayor magnitud, expresado en términos porcentuales, en la categoría Hm (9,32%), seguido de Bs (7,37%) y Pr (4,79%) (Tabla 11).

**Tabla 10.** Índices de cambio del intervalo de tiempo 2001-2010, expresados en términos porcentuales.

	Ganancias	Pérdidas	Cambio global	Intercambio	Cambio Neto
<b>Bs</b>	3,25	<b>7,21</b>	10,46	6,50	3,96
<b>C</b>	3,51	7,65	11,16	<b>7,01</b>	4,14
<b>Hm</b>	3,74	<b>14,15</b>	17,89	<b>7,48</b>	<b>10,41</b>
<b>Pr</b>	<b>16,17</b>	<b>4,36</b>	20,53	<b>8,72</b>	<b>11,81</b>
<b>Pz</b>	<b>8,94</b>	2,24	11,18	4,47	<b>6,7</b>
<b>Total</b>	35,61	35,61		34,18	37,02

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

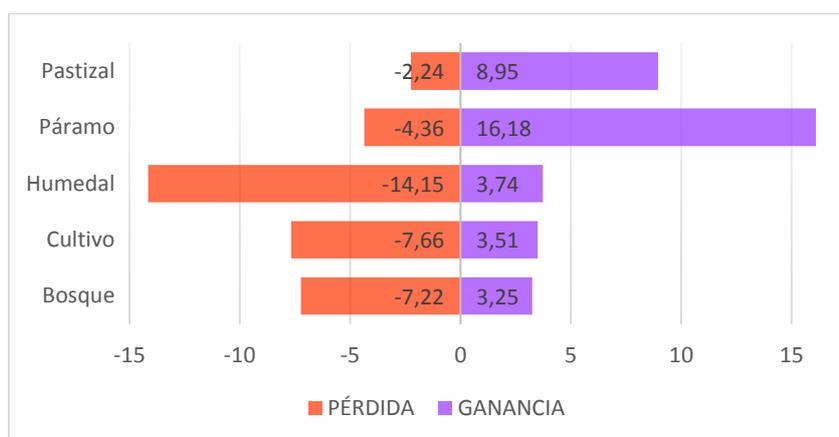
Elaborado por: el autor

**Tabla 11.** Índices de cambio del intervalo de tiempo 2010-2016, expresados en términos porcentuales.

	Ganancias	Pérdidas	Cambio Total	Intercambio	Cambio Neto
<b>Bs</b>	<b>3,68</b>	3,96	7,64	<b>7,37</b>	0,28
<b>C</b>	<b>11,17</b>	1,11	12,28	2,22	<b>10,06</b>
<b>Hm</b>	<b>4,82</b>	<b>4,66</b>	9,48	<b>9,32</b>	0,16
<b>Pr</b>	2,39	<b>6,37</b>	8,76	<b>4,79</b>	<b>3,98</b>
<b>Pz</b>	2,32	<b>8,29</b>	10,61	4,63	<b>5,97</b>
<b>Total</b>	24,39	24,39		28,33	20,45

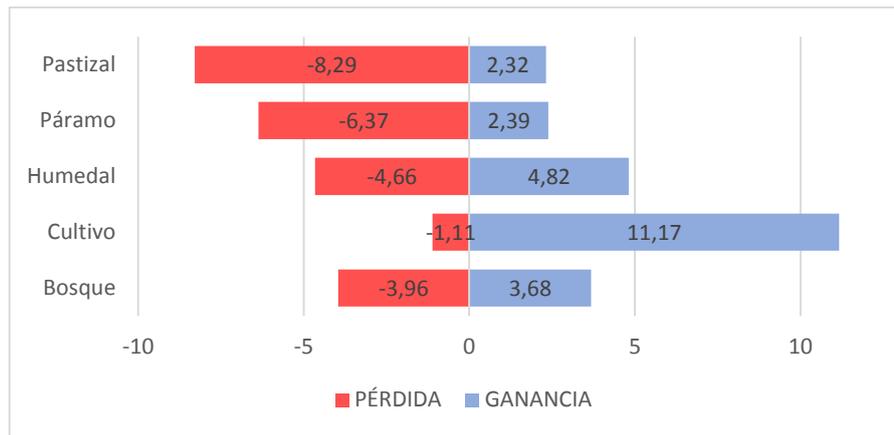
\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor



**Figura 7.** Pérdidas vs. Ganancias en el intervalo de tiempo 2001-2010.

Elaborado por: el autor



**Figura 8.** Pérdidas vs. Ganancias en el intervalo de tiempo 2010-2016.  
Elaborado por: el autor

Para identificar las transiciones sistemáticas, interpretamos las transiciones en relación a los tamaños de las categorías. (Pontius *et al.*, 2004). Primero debemos recordar que una transición es sistemática, si la transición observada se desvía de la transición esperada debido a un proceso aleatorio. Si una categoría *no* tiene ninguna tendencia particular a ganar o perder de ninguna de las otras categorías, entonces las transiciones observadas coincidirían con los patrones esperados debido a procesos aleatorios (Alo y Pontius, 2008). Las transiciones sistemáticas en términos de ganancias y pérdidas, se muestran en la Tabla 12 y Tabla 13.

**Tabla 12.** Transiciones sistemáticas en términos de ganancias y pérdidas del 2001-2010

Transición 2001-2010	Tamaño de la huella	Fuerza de la transición	Interpretación de la transición sistemática
<b>Ganancias</b>			
C a Pz	2,83	1,29	<b>Pastizal gana, Pastizal reemplaza el cultivo</b>
Pr a Pz	-2,42	-0,74	Pastizal gana, Pastizal no reemplaza el Páramo
Bs a Pz	1,26	0,86	<b>Pastizal gana, el Pastizal reemplaza el Bosque</b>
Hm a Pz	-1,67	-0,83	Pastizal gana, Pastizal no reemplaza Hm
Bs a Hm	1,31	1,89	Humedal gana, Humedal reemplaza el Bosque
C a Hm	-0,88	-0,85	Humedal gana, Humedal no reemplaza el Cultivo
Hm a Pr	8,47	1,74	<b>Páramo gana, Páramo reemplaza el Humedal</b>
C a Pr	-4,29	-0,82	Páramo gana, Páramo no reemplaza el cultivo
<b>Pérdidas</b>			
C a Pz	4,47	8,16	<b>Cultivo pierde, Pastizal lo reemplaza</b>
C a Hm	-3,74	-0,96	Cultivo pierde, Humedal no lo reemplaza
Bs a Pz	2,36	6,42	<b>Bosque pierde, el Pastizal lo reemplaza</b>
Bs a C	-0,70	-0,49	Bosque pierde, el Cultivo no lo reemplaza
Hm a Pr	12,07	9,17	<b>Humedal pierde, Páramo lo reemplaza</b>
Hm a Bs	-1,31	-0,76	Humedal pierde, Bosque no lo reemplaza

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

Los resultados muestran que las dos primeras filas de la Tabla 12, indican un patrón sistemático en el cual, pastizal reemplaza a cultivo pero no reemplaza páramo. En una magnitud menor (débil), se indica también que, cuando pastizal gana, reemplaza al bosque y no al humedal. Otra transición sistemática ocurre cuando el humedal gana, este reemplaza al bosque pero no al cultivo. Las dos últimas filas indican que, cuando la categoría páramo gana, reemplaza al humedal y no a cultivos. El análisis muestra que el páramo tiende a persistir y el humedal tiende a perder. En términos de pérdidas, los resultados indican que, cuando cultivo pierde, el pastizal lo reemplaza, y no es reemplazado por el humedal. Cuando el bosque pierde, es porque el pastizal lo reemplaza, no el cultivo. Por último, cuando el humedal pierde, se debe al reemplazo por el páramo, y no por bosque.

**Tabla 13.** *Transiciones sistemáticas en términos de ganancias y pérdidas del 2010-2016*

Transición 2010-2016	Tamaño de la huella	Fuerza de la transición	Interpretación de la transición sistemática
<b>Ganancias</b>			
Hm a Bs	1,00	2,45	<b>Bosque gana, Bosque reemplaza el humedal</b>
C a Bs	<u>-0,25</u>	<u>-0,62</u>	Bosque gana, Bosque no reemplaza el cultivo
Pz a C	5,15	2,20	<b>Cultivo gana, Cultivo reemplaza el pastizal</b>
Pr a C	-5,93	-0,98	Cultivo gana, Cultivo no reemplaza el páramo
Pr a Hm	2,32	0,97	Humedal gana, Humedal reemplaza el páramo
Pz a Hm	-0,91	-0,98	Humedal gana, Humedal no reemplaza el pastizal
C a Pr	-0,75	-0,99	Páramo gana, Páramo no reemplaza el cultivo
Hm a Pr	1,60	3,74	<b>Páramo gana, Páramo reemplaza el humedal</b>
Bs a Pz	<u>0,52</u>	<u>1,74</u>	Pastizal gana, Pastizal reemplaza el bosque
Pr a Pz	-1,07	-0,85	Pastizal gana, Pastizal no reemplaza el páramo
<b>Pérdidas</b>			
Pz a C	7,26	31,24	<b>Pastizal pierde, Cultivo lo reemplaza</b>
Bs a C	2,59	18,00	<b>Bosque pierde, Cultivo lo reemplaza</b>
Pr a C	<u>-0,49</u>	<u>-0,81</u>	Páramo pierde, Cultivo no lo reemplaza
Pr a Hm	2,40	1,04	<b>Páramo pierde, Humedal lo reemplaza</b>
Pz a Hm	-0,87	-0,98	Pastizal pierde, Humedal no lo reemplaza
C a Pr	-2,01	-1,00	Cultivo pierde, Páramo no lo reemplaza
Hm a Pr	<u>0,89</u>	<u>0,78</u>	Humedal pierde, Páramo lo reemplaza
Pr a Pz	-4,29	-0,96	Páramo pierde, Pastizal no lo reemplaza

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

La Tabla 13, indica un patrón sistemático en el cual, bosque reemplaza el humedal pero no reemplaza los cultivos. Se indica también que, cuando cultivo gana, reemplaza al pastizal sistemáticamente y no al páramo. Otra transición sistemática es cuando el

humedal gana, reemplaza al páramo pero no al pastizal. Cuando la categoría páramo gana, reemplaza al humedal y no al cultivo. Por último, cuando pastizal gana, este reemplaza el bosque y no el páramo. En términos de pérdidas, se observa que el pasto pierde debido al remplazo por cultivo y no por humedal. Cuando bosque pierde, lo reemplaza el cultivo. Cuando páramo pierde, el humedal lo reemplaza, no el pastizal. Si las ganancias ocurriesen debidos al azar, la diferencia entre el valor observado del mapa y el valor esperado de la clasificación (valor subrayado en la matriz de transiciones) sería igual a cero (ver Anexos 5, 7, 9, 11). La mayoría de las transiciones no obtienen el valor de cero, por lo que se debe interpretar si las transiciones representan cambios relevantes, tomando en cuenta el tamaño de las categorías.

La persistencia de pérdidas evalúa la vulnerabilidad de las clases de tierras a la transición (Braimoh, 2006). Cuando los valores de  $g_p$  o  $l_p$  están por encima de 1, indican que tienen una tendencia más alta de ganancia o pérdida que a persistir, respectivamente. La categoría con mayor vulnerabilidad al cambio, en el primer intervalo de tiempo, fue Hm. Esto quiere decir que los humedales tienen una mayor tendencia a transitar a otras categorías (perder). Los pastizales muestran que tienen una mayor tendencia a ganar que a persistir (Tabla 14). Los resultados en el segundo período muestran que, todas las categorías de uso del suelo exhiben una menor vulnerabilidad al cambio (Tabla 15).

**Tabla 14.** *Proporciones: ganancia-persistencia, pérdida-persistencia, y cambio neto-persistencia de las unidades de uso del suelo en el intervalo 2001-2010.*

<b>Categorías</b>	<b><math>g_p</math></b>	<b><math>l_p</math></b>	<b><math>n_p</math></b>
Bs	0,43	0,96	-0,53
C	0,25	0,54	-0,29
Hm	0,61	2,32	-1,71
Pr	0,57	0,15	0,42
Pz	1,08	0,27	0,81

\*Celeste: Tendencia de una categoría a transitar a otras categorías (perder). Verde: Tendencia de una categoría a ganar. Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

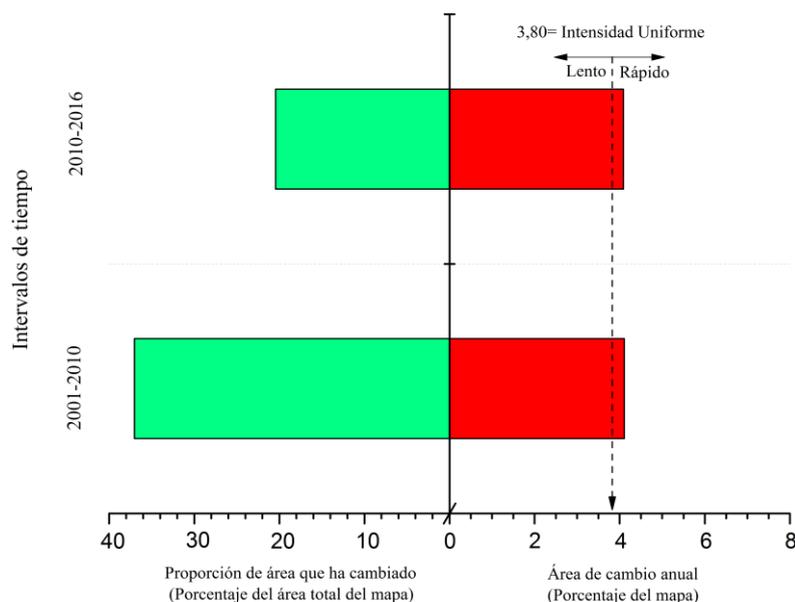
Elaborado por: el autor

**Tabla 15.** *Proporciones: ganancia-persistencia, pérdida-persistencia, y cambio neto-persistencia de las unidades de uso del suelo en el intervalo 2010-2016.*

Categorías	$g_p$	$l_p$	$n_p$
Bs	0,55	0,59	-0,04
C	0,68	0,07	0,61
Hm	0,93	0,89	0,03
Pr	0,06	0,17	-0,10
Pz	0,26	0,92	-0,67

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal. Elaborado por: el autor

Para cumplir el tercer objetivo, se identificó las intensidades de cambio de uso del suelo a nivel de los intervalos de tiempo y a nivel de categorías. La intensidad anual de cambio para el intervalo de tiempo 2001-2010 es de 4,11%, y para el 2010-2016 es de 4,09% (Figura 9). Estos valores nos dan como resultado que los dos períodos de tiempo se caracterizan por tener una intensidad de cambio de uso del suelo, ligeramente acelerada, pues los valores superan, en mínima cantidad, al umbral definido por el 3,80% (Figura 9).

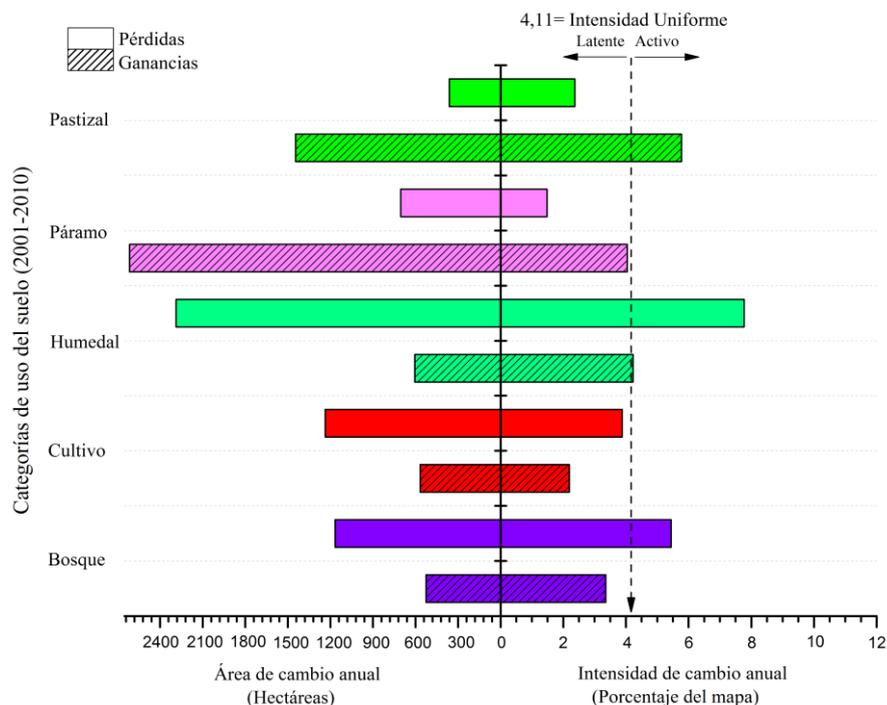


**Figura 9.** Análisis de intensidad de tiempo para dos intervalos de tiempo: 2001-2010 y 2010-2016.

Elaborado por: el autor

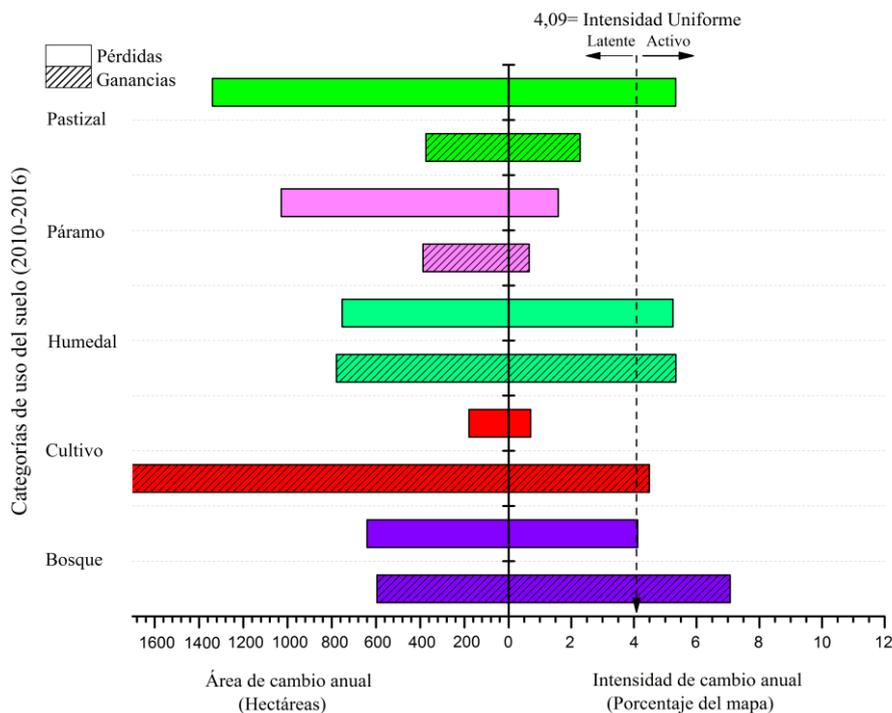
En la Figura 11 y Figura 12 se muestra el resultado del análisis de las intensidades a nivel de categorías de uso del suelo, donde el umbral de cambio, representado por un valor numérico, identifica si las transiciones son latentes o activas. El primer período de tiempo muestra que, los Bs y Hm sobrepasan la intensidad uniforme de 4,11%, siendo las

categorías que están perdiendo más activamente, con una intensidad observada del 5,44% y 7,77%; respectivamente. En el caso de Pz, está ganando más activamente con un porcentaje de 5,78%. La categoría humedal (Hm) y Pr, tienen sus ganancias en la línea del umbral, lo que significa que las ganancias son estacionarias. Es interesante notar que el Pr está perdiendo menos activamente en todo el paisaje, para este intervalo. Lo que puede ser el resultado de las medidas de conservación que rigen en el Parque Nacional Sangay, aunque esta área está ubicado en la zona de transición. El cambio en C es relativamente inactivo, durante este intervalo (Figura 10). En el segundo intervalo temporal, los resultados indican que Pz, y Hm son las categorías que están perdiendo, en mínima cantidad, activamente con referencia al umbral de cambio de 4,09%. El Hm presenta un equilibrio estacionario, debido a que tiene en igual cantidad las ganancias y las pérdidas. La categoría Bs es la categoría que está ganando activamente con el 7,07%. Así mismo, el C está ganando activamente pero con un mínimo porcentaje de 4,5%. En cuanto al Pr, se puede observar que se encuentra con una actividad latente de cambio (Figura 11).



**Figura 10.** Análisis de intensidad de la categoría para el intervalo de tiempo: 2001-2010.

Elaborado por: el autor



**Figura 11.** Análisis de intensidad de la categoría para el intervalo de tiempo: 2010-2016.

Elaborado por: el autor

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 1. Conclusiones

- La clasificación supervisada de las imágenes satelitales Landsat, con el algoritmo de máxima verosimilitud, permitió la identificación de cinco categorías o unidades geográficas bien definidas: Bs; C; Hm; Pr y Pz, en las imágenes correspondientes al año 2001, 2010 y 2016. Esto permitió obtener tres mapas de uso del suelo en los años mencionados.
- En general se observa un aumento sostenido del área destinada a la producción agropecuaria (C + Pz) y este aumento fue para el 2010 de 9 % y para el 2016 de 11 %. Mientras que, se observa una disminución sostenida en la superficie destinada a los ecosistemas naturales (Bs + Hm + Pr); para el 2010 fue de 4 % y para el 2016 fue de 6%.
- Las tendencias de uso derivadas del análisis de las transiciones sistemáticas en el intervalo 2001-2010 muestra que si el Pr gana lo hace a expensas del Hm y si Pz gana lo hace a expensas del C y Bs. Mientras que en el intervalo 2010-2016 se identificó

que si Pr gana lo hace a expensas del Hm, si C gana lo hace a expensas del Pz, si Pz gana lo hace a expensas del Bs. Si el Hm gana lo hace a expensas del Pr.

- En cuanto a la vulnerabilidad al cambio, en el primer intervalo 2001-2010 se aprecia que los Hm son más vulnerables a perder superficie. Mientras que, los Pz son más vulnerables a ganar superficie. En el segundo intervalo 2010-2016 se aprecia que la vulnerabilidad de todas las categorías ha disminuido y se manifiesta una tendencia global a persistir o mantener su superficie sin modificaciones.
- Del análisis de la intensidad de cambios a nivel de intervalos se concluye que en los dos intervalos los cambios han ocurrido de manera acelerada o rápida.
- Del análisis de intensidad de cambio a nivel de categorías en el intervalo 2001-2010, se concluye que los Hm y Bs mantuvieron una intensidad de cambio activa dirigida a la pérdida de sus superficies. Mientras que, los Pz y Hm mantuvieron una intensidad de cambio activa y que ésta fue orientada a la ganancia de superficie. Las otras categorías (Pr y C) mantuvieron una intensidad de cambio latente.
- Del análisis de intensidad de cambio a nivel de categorías en el intervalo 2010-2016, se concluye que los Pz y el Hm mantuvieron una intensidad de cambio activa y que esta fue más dirigida a la pérdida de superficie. Mientras que los Hm, C y Bs mantuvieron una intensidad de cambio activa y que ésta fue más orientada a la ganancia de superficie. Es de resaltar que el Pr mostro una intensidad de cambio latente.

## **2. Recomendaciones**

- La investigación muestra la necesidad de diseñar e implementar planes, proyectos y acciones de gestión para el control y la sostenibilidad de los usos del suelo. Especialmente socializar la información, para la generación de políticas públicas que velen por la protección los ecosistemas analizados.
- Es necesario continuar con el monitoreo del área de estudio e indagar sobre las consecuencias que dichos cambios tienen en la producción de biomasa para el ganado, el mantenimiento de la biodiversidad, la conservación, características físicas y químicas de los suelos, el mantenimiento del régimen hidrológico en la zona, y fijación de carbono atmosférico en el suelo.
- Se sugiere realizar más estudios para profundizar en el entendimiento de los humedales como indicadores sensibles al cambio climático.

## BIBLIOGRAFÍA

- (National Research Council and Geographical Sciences Committee). (2014). *Advancing land change modeling: opportunities and research requirements*. (National Academies Press, Ed.). Washington D,C. Retrieved from <http://www.nap.edu>
- Aldwaik, S. Z., & Pontius, R. G. (2012). Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. *Landscape and Urban Planning*, *106*(1), 103–114. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.010>
- Alo, C. A., & Pontius, R. G. (2008). Identifying systematic land-cover transitions using remote sensing and GIS: The fate of forests inside and outside protected areas of Southwestern Ghana. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *35*(2), 280–295. <http://doi.org/10.1068/b32091>
- Arancibia, M. E. (2008). El uso de los sistemas de información geográfica -SIG- en la planificación estratégica de los recursos energéticos. *Polis (Santiago)*, *7*(20), 227–238. <http://doi.org/10.4067/S0718-65682008000100012>
- Arcos Gonzáles, P. (2009). Errores y sesgos. Fiabilidad y Validez. In P. Arcos González (Ed.), *Manual de Medicina de Urgencia y Emergencia* (p. 197).
- Ariza Alexander. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Centro de Investigación Y Desarrollo En Información Geográfica Del IGAC -CIAF*, 46. <http://doi.org/10.5751/ES-06710-190329>
- Ayala, J., Márquez, C., García, V., Recalde, C., Rodríguez, M., & Damián, D. (2017). Land Cover Classification in an Ecuadorian Mountain Geosystem Using a Random Forest Classifier, Spectral Vegetation Indices, and Ancillary Geographic Data. *Geosciences*, *7*(2), 34. <http://doi.org/10.3390>
- Braimoh, A. K. (2006). Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana. *Science Direct*, *113*, 254–263. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2005.10.019>
- Cerda, J., & Villarroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica : Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, *79*(1), 54–58.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos De Teledeteccion Espacial*. <http://doi.org/23.304-1995>
- Corrales Andino, R. E., & Ochoa López, V. L. (2014). Firmas espectrales de la cobertura de la Tierra , aplicando radiometría de campo . Fase 1 : Región 03 occidente de Honduras. *Revista Ciencias Espaciales*, *7*(1), 21.
- Corrales, G., Plata, W., Hinojoza, G., & Aguilar, J. (2014). Análisis de los cambios de

- uso y cobertura del suelo para el Estado de Sinaloa mediante Sistemas de Información Geográfica. *XVI Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica 25, 26 Y 27 de Junio de 2014*. Alicante, 10.
- Cuvi, M., & Caranqui, J. (2010). *Estudio de la Diversidad Florística a diferente gradiente altitudinal en el bosque montano alto LLucud, cantón Chambo, provincia de Chimborazo. Riobamba – Ecuador*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Dávila, F. (Instituto G. N. (2012). Georeferenciación de documentos cartográficos para la gestión de Archivos y cartotecas “Propuesta Metodológica.” *Revista Catalana de Geografia*, 46, 1–11.
- Falcón García, O. (2014). *Dinamica de cambio en la cobertura/uso del suelo, en una region del estado de Quintana Roo, México. El impcto de las políticas gubernamentales sobre el manejo forestal comunitario*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, T. J., & Mas, J. F. (2008). Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, 67(8701), 13.
- García, V., Marqués, O., Jaramillo, D., Recalde, C., & Rodriguez, M. (2016). Building a resilient future for the Andean páramo ecosystem of Ecuador, 1–5.
- López Escudero, R., & Flamenco Sandoval, A. (2009). Clasificación de Imágenes Multiespectrales: Estudio Previo a la Implementación del Clasificador Basado en Máquinas de Soporte Vectorial, 4.
- López, V. H., Balderas, M. A., Chavez, M. C., Pérez, J. I., & Gutierrez, J. G. (2014). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *Dialnet*, 9.
- Luna, V. (2011). *Análisis multitemporal de la dinámica en el cambio de uso del suelo rural-urbano en la región de Atlixco, Puebla*. Institución de enseñanzas e investigacion en ciencias agrícolas.
- Mena, M. S., & Wong, P. A. (2011). Diagnóstico de la Cobertura Vegetal de la Cuenca Hidrográfica del Río California - Valdivia. *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería En Mecánica Y Ciencias de La Producción*, 276.
- Ministerio del Ambiente de Perú. (2014). Protocolo evaluación de la exactitud temática del mapa de deforestación (p. 32). San Isidro, Lima-Perú.
- Nájera, E., Guadalupe, B., & Pérez, A. (2013). Lema de Neyman – Pearson para distribuciones de confianza basadas en estadísticas suficientes. *Lecturas Matemáticas*, 34(2), 205–223.
- Osuna-osuna, A. K., Díaz-torres, J. D. J., Anda-sánchez, J. De, Villegas, G., Gallardo, J.,

- & Dávila, G. (2015). Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla , Veracruz , México ; periodo 1994-2010. *Ambiente & Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 10, 13. <http://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Paruelo, J., Guerschman, J., & Verón, S. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*, 15(87), 14–23.
- Perea, A. J., Meroño, J. E., & Aguilera, M. J. (2009). Clasificación orientada a objetos en fotografías aéreas digitales para la discriminación de usos del suelo, 34, 612–616.
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2-3), 251–268. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Quétier, F., Lavorel, S., Daigney, S., & de Chazal, J. (2009). Assessing ecological and social uncertainty in the evaluation of land-use impacts on ecosystem services. *Journal of Land Use Science*, 4(3), 173–199. <http://doi.org/10.1080/17474230903036667>
- Quishpe, A. (2017). *Caracterización Hidrometeorológica y estimación del balance hídrico de la cuenca del río Chambo*. Escuela Politécnica Nacional.
- Reid, W. V., Chen, D., Goldfarb, L., Hackmann, H., Lee, Y. T., Mokhele, K., ... Whyte, A. (2010). Earth System Science for Global Sustainability: Grand Challenges. *Science*, 330(6006), 916–917. <http://doi.org/10.1126/science.1196263>
- Rocha, W. P. (2010). Descripción, Análisis y Simulación del Crecimiento Urbano Mediante Tecnologías de la Información Geográfica. El Caso de la Comunidad de Madrid. *Departamento de Geografía Programa de Doctorado En Cartografía, Sistemas de Información Geográfica Y Teledetección*, 314.
- Rodríguez, A. F. (2011). Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos , estudio de caso piedemonte de Villavicencio , Meta Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los princip. *Meta*, 94.
- Rodríguez, N., Pabón, J. D., Bernal, N. R., & Martínez, J. (2010). *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Humboldt. Bogotá. Retrieved from [http://www.mtnforum.org/sites/default/files/publication/files/cambio\\_climatico\\_uso\\_suelo\\_andes\\_colombianos.pdf](http://www.mtnforum.org/sites/default/files/publication/files/cambio_climatico_uso_suelo_andes_colombianos.pdf)
- Rosete, F. A., & Bocco, G. (2009). Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Instituto Nacional de Ecología*, (68), 43–54.
- Santana, L. M., & Salas, J. (2007). Análisis de cambios en la ocupación del suelo

- ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes LANDSAT. *GeoFocus*, 7, 281–313.
- Santos, J. C. (2007). *Extração de atributos de forma e seleção de atributos usando algoritmos genéticos para classificação de regiões*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Suárez Morillo, A. E. (2014). *Anaálisis y comparación de imágenes de diferentes sensores para verificar su eficiencia y utilidad en estudios Multitemporales*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Suganthi, S., & Srinivasan, K. (2010). Digital Elevation Model Generation And Its Application In Landslide Studies Using Cartosat1. *International Journal of Geomatics and ...*, 1(1), 41–50.
- Urbanski, J. (2015). GEOBIA for ArcGIS.
- Vasquez Polo, J. R. (2009). Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en los suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 113. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

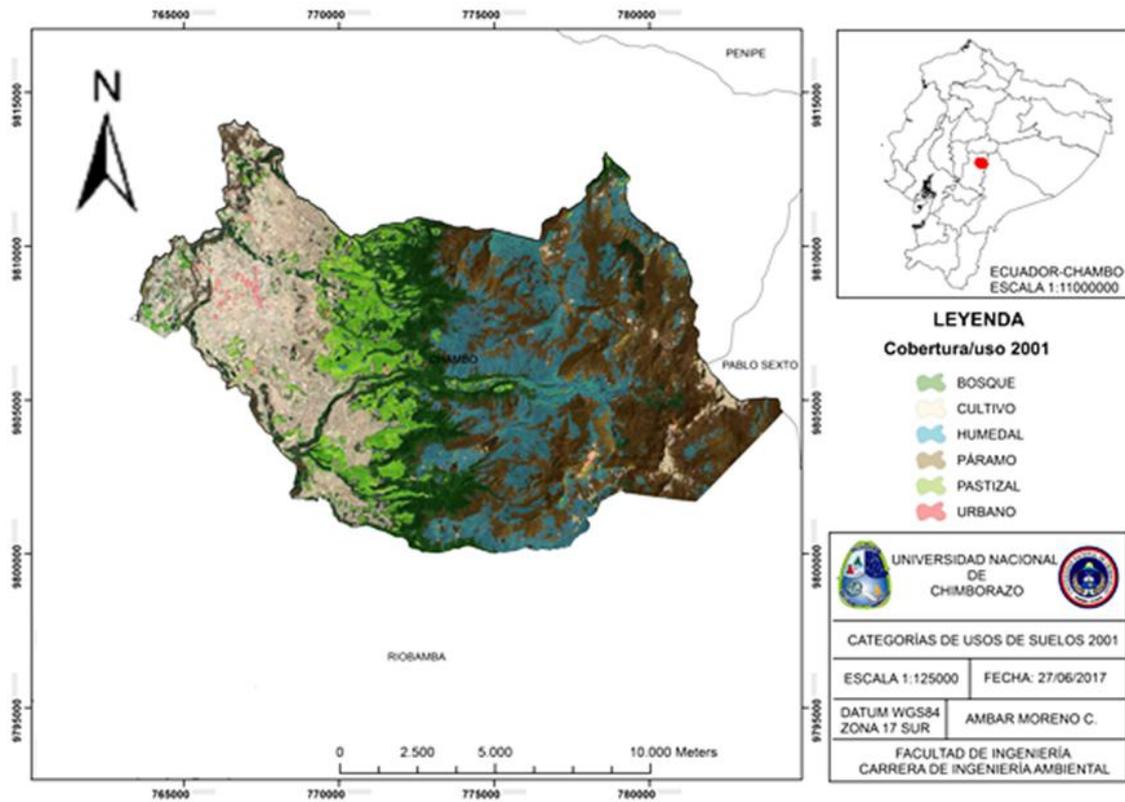
## ANEXOS

### Anexo 1. Valoración de Coeficiente Kappa

Coeficiente de Kappa (k)	Fuerza de concordancia
0.00	Pobre
0.01 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1.00	Casi Perfecta

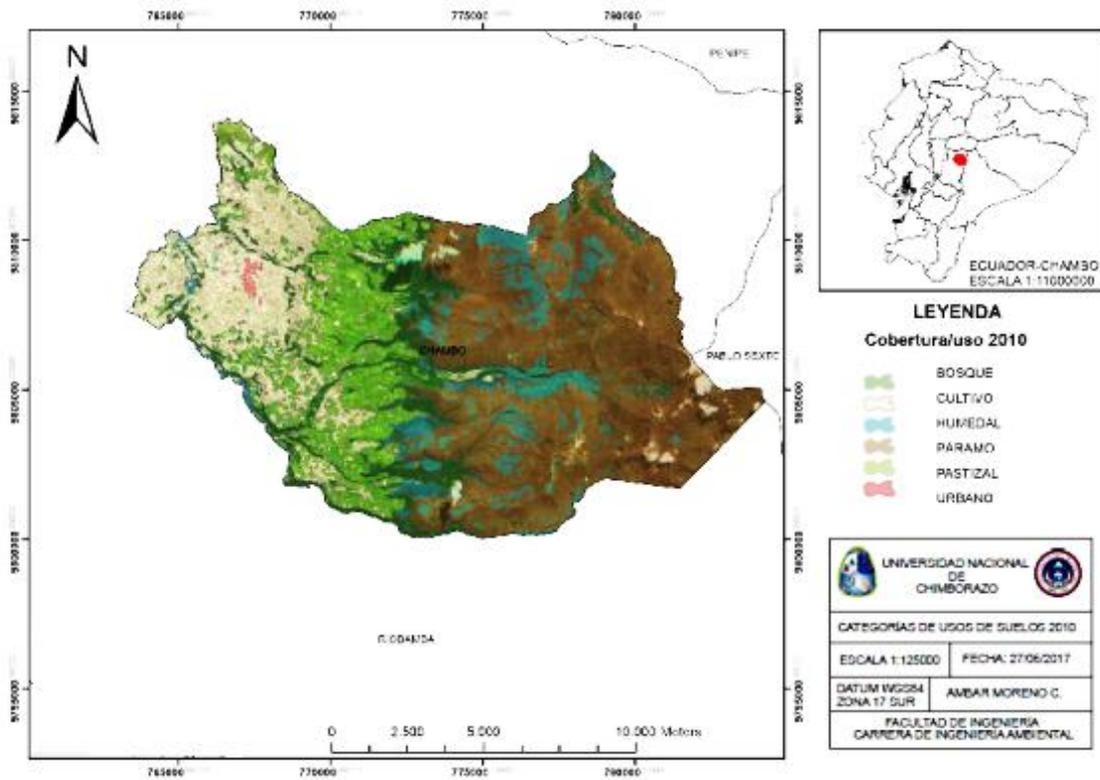
Fuente: (Ministerio del Ambiente de Perú, 2014). Elaborado por: el autor

### Anexo 2. Mapa de categorías de usos de suelo del Cantón Chambo en el año 2001.



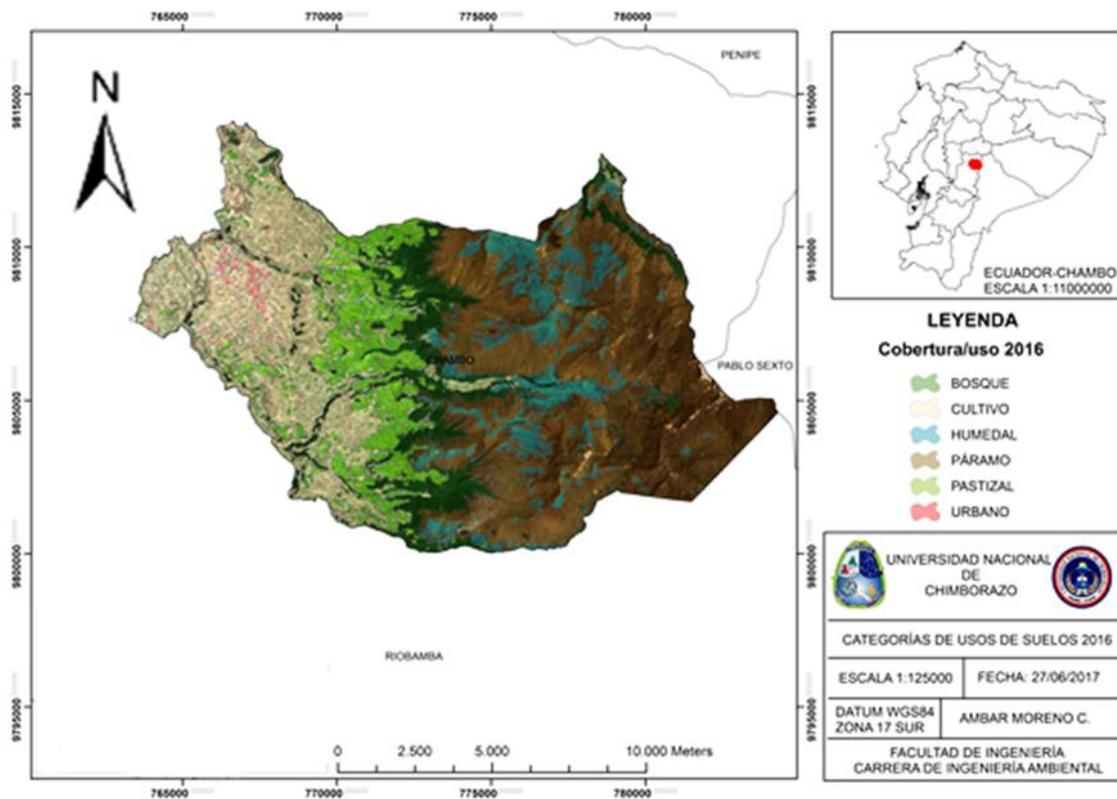
Elaborado por: el autor

**Anexo 3.** Mapa de categorías de usos de suelo del Cantón Chambo en el año 2010.



Elaborado por: el autor

**Anexo 4.** Mapa de categorías de usos de suelo del Cantón Chambo en el año 2016.



Elaborado por: el autor

**Anexo 5.** Tabla de transiciones en términos de ganancias (2001-2010)

		GANANCIAS					Total tiempo 1	
Tiempo 1	Tiempo 2	Bs	C	Hm	Pr	Pz	Sum Pi+	Pérdidas
Bs	7,51	0,74	2,00	1,75	2,73		14,72	7,21
		0,66	0,69	3,54	1,47			
		0,08	1,31	-1,79	1,26			
		0,12	1,89	-0,51	0,86			
C	1,52	14,26	0,15	0,97	5,02		21,91	7,65
	0,77		1,03	5,26	2,19			
	0,74		-0,88	-4,29	2,83			
	0,97		-0,85	-0,82	1,29			
Hm	0,41	0,07	6,09	13,33	0,35		20,23	14,15
	0,77	0,91		4,86	2,02			
	-0,37	-0,84		8,47	-1,67			
	-0,47	-0,93		1,74	-0,83			
Pr	0,78	1,39	1,34	28,29	0,85		32,64	4,36
	1,24	1,47	1,53		3,26			
	-0,46	-0,08	-0,19		-2,42			
	-0,37	-0,05	-0,12		-0,74			
Pz	0,55	1,31	0,25	0,13	8,26		10,49	2,24
	0,40	0,47	0,49	2,52				
	0,15	0,84	-0,24	-2,39				
	0,36	1,78	-0,49	-0,95				
<b>Total tiempo 2</b>								
<b>Sum P+j</b>	10,76	17,76	9,83	44,46	17,20		100,000	35,61
<b>Ganancias</b>	3,25	3,51	3,74	16,17	8,94		35,61	

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal. Elaborado por: el autor

**Anexo 6.** Interpretación de la tabla de transición en términos de ganancias

En términos de ganancias					
	Bs	C	Hm	Pr	Pz
Bs		C,G - C,R,Bs	Hm,G - Hm,R,Bs	Pr,G - Pr,NR,Bs	Pz,G - Pz,R,Bs
C	Bs,G - Bs,R,C		Hm,G - Hm,NR,C	Pr,G - Pr,NR,C	Pz,G - Pz,R,C
Hm	Bs,G - Bs,NR,Hm	C,G - C,NR,Hm		Pr,G - Pr,R,Hm	Pz,G - Pz,NR,Hm
Pr	Bs,G - Bs,NR,Pr	C,G - C,NR,Pr	Hm,G - Hm,NR,Pr		Pz,G - Pz,NR,Pr
Pz	Bs,G - Bs,R,Pz	C,G - C,R,Pz	Hm,G - Hm,NR,Pz	Pr,G - Pr,NR,Pz	

\*G= gana, R= reemplaza, NR= no reemplaza. Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal. Elaborado por: el autor

**Anexo 7.** Tabla de transiciones en términos de pérdidas (2001-2010)

Tiempo 1	Tiempo 2		PERDIDAS			Total tiempo 1	
	Bs	C	Hm	Pr	Pz	Sum Pi+	Pérdidas
Bs	<b>7,51</b>	0,74	<b>2,00</b>	1,75	<b>2,73</b>	14,72	7,21
		1,44	1,41	0,95	0,37		
		<b>-0,70</b>	<b>0,58</b>	<b>0,79</b>	<b>2,36</b>		
		<b>-0,49</b>	0,41	0,83	6,42		
C	1,52	<b>14,26</b>	0,15	0,97	<b>5,02</b>	21,91	7,65
	1,85		3,88	1,42	0,55		
	<b>-0,34</b>		<b>-3,74</b>	<b>-0,45</b>	<b>4,47</b>		
	<b>-0,18</b>		<b>-0,96</b>	<b>-0,32</b>	<b>8,16</b>		
Hm	0,41	0,07	<b>6,09</b>	<b>13,33</b>	0,35	20,23	14,15
	1,71	1,98		1,31	0,51		
	<b>-1,31</b>	<b>-1,92</b>		<b>12,02</b>	<b>-0,16</b>		
	<b>-0,76</b>	<b>-0,97</b>		<b>9,17</b>	<b>-0,31</b>		
Pr	0,78	1,39	1,34	<b>28,29</b>	0,85	32,64	4,36
	2,76	3,20	5,79		0,82		
	<b>-1,98</b>	<b>-1,81</b>	<b>-4,45</b>		<b>0,03</b>		
	<b>-0,72</b>	<b>-0,57</b>	<b>-0,77</b>		<b>0,04</b>		
Pz	0,55	1,31	0,25	0,13	<b>8,26</b>	10,49	2,24
	0,89	1,03	1,86	0,68			
	<b>-0,34</b>	<b>0,28</b>	<b>-1,61</b>	<b>-0,55</b>			
	<b>-0,39</b>	<b>0,27</b>	<b>-0,86</b>	<b>-0,81</b>			
<b>Total tiempo 2</b>	<b>10,76</b>	<b>17,76</b>	<b>9,83</b>	<b>44,46</b>	<b>17,20</b>		
<b>Sum P+j</b>						<b>100,000</b>	<b>35,61</b>
<b>Ganancias</b>	<b>3,25</b>	<b>3,51</b>	<b>3,74</b>	<b>16,17</b>	<b>8,94</b>	<b>35,61</b>	

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

**Anexo 8.** Interpretación de la tabla de transición en términos de pérdidas

	En términos de pérdidas				
	Bs	C	Hm	Pr	Pz
Bs		Bs,P - C,NR,Bs	Bs,P - Hm,R,Bs	Bs,P - Pr,R,Bs	Bs,P - Pz,R, Bs
C	C,P - Bs,NR,C		C,P - Hm,NR,C	C,P - Pr,NR,C	C,P - Pz,R,C
Hm	Hm,P - Bs,NR,Hm	Hm,P - C,NR,Hm		Hm,P- Pr,R,Hm	Hm,P - Pz,NR,Hm
Pr	Pr,P - Bs,NR,Pr	Pr,P- C,NR,Pr	Pr,P - Hm,NR,Pr		Pr,P - Pz,R,Pr
Pz	Pz,P - Bs,NR,Pz	Pz,P - C,R,Pz	Pz,P - Hm,NR,Pz	Pz,P - Pr,NR,Pz	

\*P= pierde, R= reemplaza, NR= no reemplaza. Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal. Elaborado por: el autor

**Anexo 9.** Tabla de transiciones en términos de ganancias (2010-2016)

		GANANCIAS				Total tiempo 1		
Tiempo 1	Tiempo 2	Bs	C	Hm	Pr	Pz	Sum Pi+	Pérdidas
Bs		<b>6,73</b>	2,74	0,06	0,35	0,82	10,70	3,96
			1,45	0,57	5,31	1,29		
			<u>1,29</u>	<u>-0,51</u>	<u>-0,12</u>	<u>0,52</u>		
			0,89	-0,89	-0,25	1,74		
C		0,16	<b>16,44</b>	0,03	0,01	0,91	17,55	1,11
		0,41		0,94	8,72	0,49		
		<u>-0,25</u>		<u>-0,91</u>	<u>-0,75</u>	<u>0,42</u>		
		<u>-0,62</u>		<u>-0,96</u>	<u>-0,99</u>	<u>0,86</u>		
Hm		<b>1,41</b>	0,83	<b>5,21</b>	2,02	<b>0,40</b>	9,86	4,66
		0,41	1,34		0,43	1,19		
		<u>1,00</u>	<u>-0,51</u>		<u>1,60</u>	<u>0,12</u>		
		2,45	-0,38		3,74	0,45		
Pr		<b>1,36</b>	0,11	<b>4,71</b>	<b>38,26</b>	<b>0,18</b>	44,62	6,37
		1,84	6,05	2,39		1,25		
		<u>-0,48</u>	<u>-5,93</u>	<u>2,32</u>		<u>-1,07</u>		
		<u>-0,26</u>	<u>-0,98</u>	<u>0,97</u>		<u>-0,85</u>		
Pz		0,76	<b>7,49</b>	0,02	<b>0,02</b>	<b>8,97</b>	17,26	8,29
		0,71	2,34	0,92	0,75			
		<u>0,05</u>	<u>5,15</u>	<u>-0,91</u>	<u>-0,73</u>			
		<u>0,07</u>	<u>2,20</u>	<u>-0,98</u>	<u>-0,98</u>			
<b>Total tiempo 2</b>		10,42	27,62	10,03	40,65	11,29	100,00	24,39
<b>Sum P+j</b>								
<b>Ganancias</b>		3,68	11,17	4,82	2,39	2,32	24,39	

\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.

Elaborado por: el autor

**Anexo 10.** Interpretación de la tabla de transición en términos de ganancias

		En términos de ganancias				
		Bs	C	Hm	Pr	Pz
Bs			C,G - C,R,Bs	Hm,G - Hm,NR,Bs	Pr,G - Pr,NR,Bs	Pz,G - Pz,NR,Bs
C	Bs,G - Bs,NR,C			Hm,G - Hm,NR,C	Pr,G - Pr,NR,C	Pz,G - Pz,R,C
Hm	Bs,G - Bs,R,Hm	C,G - C,NR,Hm			Pr,G - Pr,R,Hm	Pz,G - Pz,R,Hm
Pr	Bs,G - Bs,NR,Pr	C,G - C,NR,Pr		Hm,G - Hm,R,Pr		Pz,G - Pz,NR,Pr
Pz	Bs,G - Bs,R,Pz	C,G - C,R,Pz		Hm,G - Hm,NR,Pz	Pr,G - Pr,NR,Pz	

\*G= gana, R= reemplaza, NR= no reemplaza. Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal. Elaborado por: el autor

**Anexo 11.** Tabla de transiciones en términos de pérdidas (2010-2016)

Tiempo 1	Tiempo 2	PERDIDAS				Total tiempo 1	
	Bs	C	Hm	Pr	Pz	Sum Pi+	Pérdidas
Bs	<b>6,73</b>	2,74	0,06	<b>0,35</b>	0,82	10,70	3,96
		0,14	0,13	1,23	1,07		
		<u>2,59</u>	<u>-0,07</u>	<u>-0,88</u>	<u>-0,25</u>		
		18,00	<u>-0,52</u>	<u>-0,72</u>	<u>-0,24</u>		
C	0,16	<b>16,44</b>	0,03	<b>0,01</b>	0,91	17,55	1,11
	0,78		0,91	2,02	1,76		
	<u>-0,62</u>		<u>-0,87</u>	<u>-2,01</u>	<u>-0,85</u>		
	<u>-0,80</u>		<u>-0,96</u>	<u>-1,00</u>	<u>-0,48</u>		
Hm	<b>1,41</b>	0,83	<b>5,21</b>	2,02	<b>0,40</b>	9,86	4,66
	0,44	0,13		1,13	0,99		
	<u>0,97</u>	<u>0,70</u>		<u>0,89</u>	<u>-0,59</u>		
	2,21	5,26		0,78	<u>-0,59</u>		
Pr	<b>1,36</b>	0,11	<b>4,71</b>	<b>38,26</b>	<b>0,18</b>	44,62	6,37
	1,98	0,60	2,31		4,47		
	<u>-0,62</u>	<u>-0,49</u>	<u>2,40</u>		<u>-4,29</u>		
	<u>-0,31</u>	<u>-0,81</u>	1,04		<u>-0,96</u>		
Pz	0,76	<b>7,49</b>	0,02	<b>0,02</b>	<b>8,97</b>	17,26	8,29
	0,77	0,23	0,89	1,98			
	<u>0,00</u>	<u>7,26</u>	<u>-0,87</u>	<u>-1,97</u>			
	<u>-0,01</u>	31,24	<u>-0,98</u>	<u>-0,99</u>			
<b>Total tiempo 2</b>	10,42	27,62	10,03	40,65	11,29	100,00	24,39
<b>Sum P+j</b>							
<b>Ganancias</b>	3,68	11,17	4,82	2,39	2,32	24,39	

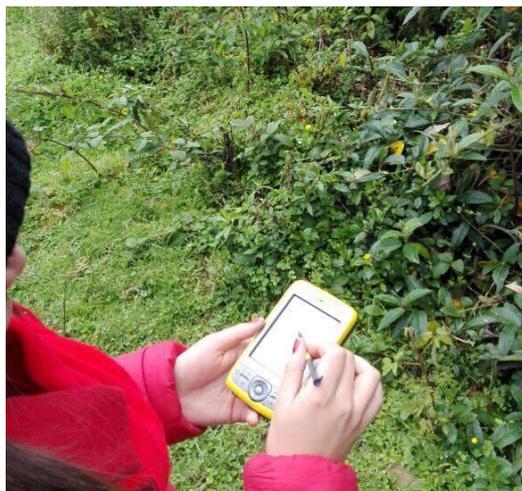
\*Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal.  
Elaborado por: el autor

**Anexo 12.** Interpretación de la tabla de transición en términos de pérdidas

	En términos de pérdidas				
	Bs	C	Hm	Pr	Pz
Bs		Bs,P - C,R,Bs	Bs,P - Cu,NR,Bs	Pa,P - Pz,NR,Pa	Pa,P - Hu,NR, Pa
C	C,P - Bs,NR,C		C,P - Hm,NR,C	C,P - Pr,NR,C	C,P - Pz,NR,C
Hm	Hm,P - Bs,R,Hm	Hm,P - C,R,Hm		Hm,P- Pr,R,Hm	Hm,P - Pz,NR,Hm
Pr	Pr,P - Bs,NR,Pr	Pr,P - C,NR,Pr	Pr,P - Hm,R,Pr		Pr,P - Pz,NR,Pr
Pz		Pz,P - C,R,Pz	Pz,P - Hm,NR,Pz	Pz,P - Pr,NR,Pz	

\*P= pierde, R= reemplaza, NR= no reemplaza. Bs: Bosque, C: Cultivo, Hm: Humedal, Pr: Páramo, Pz: Pastizal. Elaborado por: el autor

**Anexo 13.** Posicionador geográfico de alta precisión (GPS) para la toma de puntos.



**Anexo 14.** Toma de puntos de control en pastizales.



**Anexo 15.** Toma de puntos de control en bosque



**Anexo 16.** Toma de puntos de control en cultivos



**Anexo 17.** Ecosistema de bosque y pastizales en el Cantón Chambo.



**Anexo 18.** Toma de puntos de control en pasto.

