

UNIVERSIDAD NACIONAL
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

PROGRAMA MAESTRÍA PROFESIONAL EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICAS Y TELEDETECCIÓN

EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE USO DE LA TIERRA Y FRAGMENTACIÓN DE
LA COBERTURA FORESTAL EN EL CORREDOR BIOLÓGICO LAGO ARENAL
TENORIO, MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN,
COSTA RICA

Trabajo Final de Investigación Aplicada, sometida a la Comisión del Programa de Estudios
de Posgrado en Geografía, para optar por el grado y título de Maestría Profesional en
Sistemas de Información Geográfica y Teledetección

GABRIEL BERMÚDEZ RUIZ

Campus Omar Dengo, Heredia

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Montes De Oca

Costa Rica, 2018

Dedicatoria

A mi hija, Amyris...

Agradecimientos

Al Consejo Local del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, por el apoyo en la elaboración de este proyecto.

A León Javier Saborío Bejarano, por su apoyo y seguimiento.

A Max Ureña Ferrero, por brindar los principios técnicos e insumos.

A Gustavo Hernández Sánchez, por su apoyo y contribución en la revisión del documento.

A Felipe Morera Vargas del SINAC-ACAT, por contribuir en la validación de la clasificación.

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por la Comité de Gestión Interinstitucional del Programa (CI) de Maestría en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección UNA-UCR, en la Escuela de Geografía de la Universidad Nacional de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Magíster en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

Francisco Rodríguez Soto

Coordinador del Programa de Maestría en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección

Marvin Alfaro Sánchez

Profesor responsable

León Javier Saborio Bejarano

Tutor

Gustavo Hernández Sánchez

Lector

Gabriel Bermúdez Ruiz

Sustentante

Resumen

El estudio tuvo como objetivo determinar el cambio en el uso de la tierra y la fragmentación de las zonas boscosas en el Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio (CBLAT), en el periodo 2000 – 2017. Se utilizó imágenes del programa Landsat, a las cuales se les aplicó corrección radiométrica y atmosférica. Se realizó una clasificación supervisada utilizando el algoritmo de máxima probabilidad. Se establecieron siete clases temáticas: (1) Bosque Maduro, (2) Bosque Secundario, (3) Pasto y Charral, (4) Urbano, 5) Cuerpos de Agua, (6) Nubes y (7) Sombras. La clasificación obtenida se validó por un especialista en SIG del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). Se realizó una matriz de cambio de uso de la tierra y se determinó los cambios entre categorías considerando las pérdidas y ganancias; se excluyeron las áreas cubiertas por Nubes y Sombras de ambos periodos. También se calculó las métricas del paisaje para el Bosque Maduro, Bosque Secundario y el Paisaje para el total de área clasificada. Se obtuvo que la cobertura forestal se redujo de un 40.21 % para el año 2000 a un 38.18 % en el 2017, con ganancias de Bosque Maduro y perdidas de Bosque Secundario. Se presentó un dinamismo del 18.23 % (ganancias y pérdidas) del área del CBLAT, especialmente entre Bosque Secundario y áreas de Pasto y Charral, mientras que el 81.76 % del área se ha mantenido persistente, presentando una tendencia de cambio negativa de -0.15 %, es decir que por cada año transcurrido se pierden 45.16 ha de bosques. Las áreas de pastos pasaron de un 28.56 % a un 31.5 %. A nivel de paisaje obtuvo un descenso en el factor de diversidad (SDI), una distribución de parches menos homogénea (SEI), a pesar de que disminuyó la Distancia Media al Vecino más Cercano (MNN). A nivel de clase se presentó un aumento en el tamaño medio del parche (MPS) y el número de parches (NumP) en Bosque Maduro, mientras se redujo el MPS y NumP en Bosque Secundario. Adicionalmente aumentó el número de fragmentos con valores de fragilidad altos. Tomando como referencia el año 2000, se concluye que hay una pérdida de cobertura forestal especialmente de Bosque Secundario y un paisaje altamente fragmentado en el CBLAT. Se recomienda aumentar la cobertura boscosa en zonas de protección de ríos, quebradas y zona de protección del embalse, para crear corredores entre fragmentos a lo interno de las subcuencas.

Palabras claves: clasificación supervisada, Corredor Biológico, fragmentación, métricas del paisaje, uso de la tierra, Costa Rica

Índice de contenidos

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
Planteamiento del problema y justificación	- 1 -
Objetivos	- 5 -
Objetivo general	- 5 -
Objetivos específicos	- 5 -
Limitaciones	- 6 -
Términos técnicos	- 7 -
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	- 10 -
Principios de teledetección	- 10 -
Factores que modifican la radiación electromagnética	- 11 -
Descripción de imágenes satelitales usado para el monitoreo de recursos naturales	- 12 -
Descripción de imágenes Landsat	- 14 -
Ventajas de las imágenes Landsat	- 17 -
Tratamiento digital de imágenes	- 18 -
Correcciones de imágenes – operaciones de pre procesamiento	- 18 -
Corrección radiométrica	- 18 -
Corrección atmosférica	- 19 -
Corrección geométrica	- 19 -
Generación de información temática - procesamiento de imágenes	- 20 -
Segmentación de imágenes de satélite	- 21 -
Creación de regiones de interés	- 21 -
Verificación de los resultados - pos procesamiento de imágenes	- 22 -
Determinación de la estructura espacial	- 23 -
Paisaje	- 23 -
Componentes del paisaje	- 24 -
Fragmentación	- 24 -

Corredores Biológicos	- 27 -
Tecnología SIG y percepción remota aplicada en el análisis del paisaje	- 29 -
Métricas del paisaje	- 30 -
Descripción del área de estudio	- 34 -
Antecedentes de la gestión territorial del Corredor Biológico	- 37 -
CAPITULO III. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	- 41 -
Instrumentos	- 41 -
Procedimientos	- 41 -
Sistema de clasificación	- 42 -
Selección de imágenes	- 46 -
Corrección de las imágenes	- 46 -
Creación de archivo multiespectral	- 47 -
Clasificación de imágenes y Regiones de Interés	- 48 -
Análisis de separabilidad	- 48 -
Agrupación espectral	- 49 -
Validación de resultados	- 49 -
Diseño y tamaño de la muestra	- 49 -
Matriz de confusión	- 50 -
Fiabilidad global	- 51 -
Errores de omisión y comisión	- 51 -
Exactitud del usuario y del productor	- 52 -
Índice de kappa (k)	- 52 -
Suavización de los resultados	- 53 -
Edición visual y afinamiento de la clasificación	- 54 -
Detección de cambios	- 55 -
Cálculo de métricas de paisaje para el estado de fragmentación	- 57 -
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSION	- 58 -

Uso de la tierra y detección de cambios	- 61 -
Análisis del paisaje	- 70 -
Métricas de diversidad	- 70 -
Métrica de densidad y tamaño de parche	- 72 -
Métricas de forma	- 74 -
Propuesta de manejo del Corredor Biológico	- 77 -
CONCLUSIONES	- 84 -
RECOMENDACIONES	- 85 -
ANEXOS	- 86 -
REFERENCIAS	- 99 -

Lista de cuadros

Cuadro 1. Características de las imágenes de satélite adquiridas por los sensores del programa Landsat 1 a Landsat 5	- 15 -
Cuadro 2. Características de las imágenes de satélite adquiridas por los sensores del programa Landsat 7 y 8	- 16 -
Cuadro 3. Métricas de paisaje y clase empleadas en el estudio	- 32 -
Cuadro 4. Leyenda temática para las categorías de uso de la tierra	- 43 -
Cuadro 5. Descripción pictórico-morfológico de las categorías de uso de la tierra	- 44 -
Cuadro 6. Matriz de cambio para la comparación de mapas de diferentes tiempos, con pérdidas y ganancias	- 55 -
Cuadro 7. Ecuaciones para determinar cambios entre categorías considerando las pérdidas y ganancias	- 56 -
Cuadro 8. Matriz de confusión de la clasificación del uso de la tierra para el año 2000 (escena 1653-Lansat 7)	- 60 -
Cuadro 9. Matriz de confusión de la clasificación del uso de la tierra para el año 2000 (escena 1553 - Landsat 5)	- 60 -
Cuadro 10. Matriz de confusión de la clasificación del uso de la tierra para el año 2017	- 61 -
Cuadro 11. Inventario del uso de la tierra mediante clasificación de Imágenes Landsat del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio	- 62 -
Cuadro 12. Matriz cruzada de cambio de uso de la tierra, para el año 2000 y 2017	- 67 -
Cuadro 13. Área y porcentaje de pérdidas, ganancias, cambio neto, intercambio y cambio total para los diferentes Usos de la Tierra, CBLAT 2000 -2017	- 68 -
Cuadro 14. Índice de Diversidad del Paisaje entre el año 2000 y 2017	- 70 -
Cuadro 15. Métrica de densidad y tamaño de parche en el Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, 2000 – 2017	- 72 -
Cuadro 16. Distribución de los parches según el área, para Bosques Maduros y Bosque Secundario en el Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, 2000 – 2017	- 73 -
Cuadro 17. Valores de las métricas de forma empleadas en el Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio para el año 2000 y 2017	- 74 -

Cuadro 18. Frecuencia y porcentaje del índice de compactación (K) por clase y año, para las áreas de cobertura forestal del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio - 75 -

Cuadro 19. Capas vectoriales para el diseño de propuesta de manejo del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio - 80 -

Lista de figuras

Figura 1. Formas de teledetección (i) reflexión; (ii) emisión y (iii) emisión reflexión - 10 -

Figura 2. Satélites de la Misión Landsat - 14 -

Figura 3. Representación gráfica de los elementos del paisaje - 25 -

Figura 4. Proceso de fragmentación de los ecosistemas naturales - 27 -

Figura 5. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, Ubicación Geográfica, 2017 - 35 -

Figura 6. Esquema metodológico - 42 -

Figura 7. Representación gráfica de las escenas Landsat - 46 -

Figura 8. Uso de la tierra del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio para el año 2000 según fuentes de información - 63 -

Figura 9. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, uso de la tierra, 2000 - 64 -

Figura 10. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, uso de la tierra, 2017 - 65 -

Figura 11. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, distribución espacial de las zonas de cambio y zonas estables del conjunto de clases de uso de la tierra, 2000- 2017 - 66 -

Figura 12. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, distribución espacial del estado de cambio de la cobertura forestal entre el año 2000 y 2017 - 69 -

Figura 13. Distribución porcentual de la forma de los fragmentos en Bosque Maduro y Bosque Secundario para el año 2000 y 2017 - 75 -

Figura 14. Ausencia o deterioro de las áreas de protección de ríos y quebradas - 77 -

Figura 15. Ausencia de áreas de protección de los riachuelos (15a) y evidencia de fuertes procesos de erosión (15b) - 78 -

Figura 16. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, áreas prioritarias para reforestar en zonas de protección - 82 -

Lista de gráficos

Gráfico 1. Valores de firmas espectrales para la imagen del año 2000 (Escena 1653 – Landsat 7)	- 58 -
Gráfico 2. Valores de firmas espectrales para la imagen del año 2000 (Escena 1553 - Landsat 5)	- 59 -
Gráfico 3. Valores de firmas espectrales para la imagen del año 2017 (Escena 1553 – Landsat 8)	- 59 -
Gráfico 4. Distancia media al fragmento más cercano de los fragmentos de Bosque Maduro y Bosque Secundario, Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio	- 71 -

Lista de Anexos

Anexo 1. Valores de reflectancia y desviación estándar para la escena 1653 – Landsat 5	- 86 -
Anexo 2. Valores de reflectancia y desviación estándar para la escena 1553 – Landsat 7	- 87 -
Anexo 3. Valores de reflectancia y desviación estándar para la escena 1653 – Landsat 8	- 88 -
Anexo 4. Valores del algoritmo Jeffries-Matusita distance, para la clasificación de la imagen Landsat con respecto a las clases de referencia	- 89 -
Anexo 5. Detalle de maya de puntos aleatorios para la validación de la clasificación de la escena 1653 – Landsat 5	- 90 -
Anexo 6. Detalle de maya de puntos aleatorios para la validación de la clasificación de la escena 1553 – Landsat 7	- 92 -
Anexo 7. Detalle de maya de puntos aleatorios para la validación de la clasificación de la escena 1653 – Landsat 8	- 95 -

Lista de abreviaturas

ACAT	Área de Conservación Arenal (ACAT)
ACAT	Área de Conservación Arenal Tempisque
ARCOSA	Complejo Arenal-Corobicí-Sandillal
ASADAS	Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios
ASP	Áreas Silvestres Protegidas
CB	Corredor Biológico
CBLAT	Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio
ETM+	Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus
ha	Hectáreas
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
LECOS	Landscape Ecology Statistics
MINAE(T)	Ministerio de Ambiente y Energía (y Telecomunicaciones)
MSS	Multispectral Scanner Sensor
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Nivel Digital
OLI	Operational Land Imager
PN	Parque Nacional
ROIs	Áreas de Entrenamiento
SCP	Semi-Automatic Classification Plugin
SIG	Sistema de Información Geográfica
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
TM	Thematic Mapper
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema y justificación

¿Cuál ha sido la dinámica de uso de la tierra del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio en el período 2000 – 2017? ¿Cuál es el estado actual de la fragmentación de este ecosistema?

Según Morera, Pintó y Romero (2007) la transformación del paisaje asociada a dinámicas territoriales contribuye a la expansión de los espacios agrícolas y/o residenciales en detrimento de las áreas naturales. Los procesos de fragmentación de los ecosistemas han sido la causa de la pérdida de fertilidad de los suelos, del aceleramiento de los procesos erosivos, de la pérdida de capacidad de recarga de los acuíferos y de la reducción de bienes y servicios ecosistémicos (SINAC, 2016) y por supuesto de la reducción de las funciones que los espacios naturales efectúan en los procesos de infiltración, retención e interceptación de las precipitaciones (Morera et al., 2007).

Desde la perspectiva ecológica, las consecuencias de la transformación del paisaje se centran en la reducción o desaparición de los hábitats naturales (Morera et al., 2007). Según Williams-Linera, Manson y Isunza (2002), la destrucción del hábitat disminuye las poblaciones de flora y fauna, aumenta el riesgo de extinción local de las especies típicas de plantas y animales ya que son expuestas a una disminución de la humedad. Adicionalmente la fragmentación trae como consecuencia cambios en la abundancia y composición de las especies, invasión de nuevas especies a los fragmentos nativos, debido a los cambios micro climáticos que ocurren en ellos, afectando la intensidad y calidad de las interacciones biológicas y la modificación de algunos procesos ecosistémicos, como la descomposición de la materia orgánica (Bustamante y Grez, 1995).

En Costa Rica las políticas de conservación se han basado históricamente en el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), que fue concebido y diseñado para el manejo múltiple entre las Áreas Silvestres Protegidas (ASP), la propiedad privada y fomentar el desarrollo de la economía y la cultura regional, sin embargo, estas áreas se establecieron de forma aislada y sin corresponder a las necesidades de conectividad de áreas núcleo (SINAC, 2007).

Ante el reconocimiento de la complejidad e importancia de la dinámica de los procesos y patrones ecológicos a grandes escalas espacio-temporales y ante la necesidad de un manejo integral de grandes territorios, las estrategias de conservación de la biodiversidad han venido cambiando rápidamente como parte de un sistema o red de conservación (Noss, 1986) y se ha incluido un sistema adicional de corredores biológicos con la intención de conectar las áreas protegidas y mejorar y ampliar los hábitats naturales de las especies silvestres.

No obstante, Bustamante y Grez (1995) señalan que en Costa Rica los bosques se han reducido drásticamente producto del crecimiento de la actividad agropecuaria lo cual ha generado su fragmentación. Morera y Sandoval (2016) señalan que la cobertura forestal en Costa Rica para el año 2000, excluyendo las Áreas Silvestres Protegidas, evidencia la presencia de una alta proporción de la cobertura boscosa, especialmente de baja densidad que es producto de procesos acelerados de regeneración natural y una reducida superficie de la cobertura boscosa de alta densidad por región de conservación. También mencionan y que el área de conservación con mayor superficie de bosque es el Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT), con un 51 % (125,252 ha), de los cuales 51,865 ha (29 %) corresponde a cobertura boscosa de alta densidad y 73,387 ha (30 %) corresponde a baja densidad, lo que constituye una línea base importante para la conservación y desarrollo de los corredores biológicos.

Adicionalmente, Canet-Desanti y Finegan (2010) realizaron un análisis de los perfiles técnicos de los Corredores Biológicos (CB) y encontraron que solo seis de los 35 perfiles de los CB de Costa Rica fueron clasificados como óptimos. Para dicho análisis se tomó en cuenta 14 parámetros establecidos por Rojas y Chavarría (2005), que corresponden con el mínimo necesario de temas que deben desarrollarse en estos documentos. Obtuvieron que un 86 % de los CB no han tenido evaluaciones ecológicas rápidas o estudios similares, y un 83 % no tiene información relacionada con la biología de las especies que se espera sean favorecidas con el establecimiento del CB. En cuanto a la configuración espacial, un 18 % de los perfiles técnicos de los CB no indican la ubicación geográfica, y tan solo un 14 % presentan mapas.

A pesar de que el Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio (CBLAT) tiene una clasificación como intermedia de los 35 perfiles Técnicos de CB analizados por Canet-Desanti y Finegan

(2010), hay que rescatar que cuenta con un espejo de agua (el Lago o Embalse Arenal) que cubre 8,317 ha (Vargas y León, 2012), el cual fue inundado entre 1973 y 1979. Desempeña un papel hidrológico, biológico y ecológico significativo, para el funcionamiento natural de la cuenca hidrográfica y que por su cercanía con las ASP permite mantener la diversidad genética y ecológica de la flora y fauna (Carrión et al., 2011). La topografía y el clima de la zona la hacen poseedora de gran riqueza biológica. Además de la presencia de valiosos recursos geológicos y rasgos sobresalientes de carácter vulcanológico, paisajístico y cultural que acentúan aún más su valor (Vargas y León, 2012).

El embalse Arenal ubicado en el CB, es de valor especial para mantener la diversidad genética y ecológica de las áreas silvestres protegidas que conectan el corredor (Aguilar, 1999). Fue declarado Sitio Ramsar en el año 2000 por la Convención de Humedales de Importancia Internacional en el puesto 1,022 de importancia a nivel mundial, principalmente por la importancia ecológica de este embalse y de las actividades productivas que en él se desarrollan (Vargas y León, 2012).

El CB pertenece a la cuenca del Embalse Arenal, está contribuye con el 41.7 % de la producción hidroeléctrica nacional (Vargas y León, 2012). Adicionalmente transfiere 30-65 m³/s de agua del Lago Arenal través de canales hasta un distrito de irrigación y permite el desarrollo de la agricultura en una región que otrora fue primordialmente pecuaria (Jiménez y González, 2001).

El agua potable es un servicio importante para las comunidades. La cuenca Arenal provee agua potable para diversos usos domésticos y agroindustriales (Vargas y León, 2012). Para el año 2016, se cuenta con 16 ASADAS las cuales en su mayoría han adquirido terrenos privados para reforestar, sin embargo, las selecciones de las fincas se han realizado en función de las áreas circundantes a la toma del agua y no responde a las zonas de recarga acuífera, principalmente porque esa información no existe o no es accesible (F. Aguilar, comunicación personal, 19 de septiembre, 2016).

Adicionalmente, en este Corredor Biológico, se desconoce el uso actual del suelo, el estado de la cobertura, la tasa de ganancia y pérdida de la cobertura desde la conformación del CBLAT. En este sentido F. Aguilar (comunicación personal, 19 de septiembre, 2016),

menciona que no cuenta con una herramienta de plan de gestión a largo plazo que le permita definir las estrategias de acción para mejorar la conectividad de las áreas núcleo del CB.

A pesar de todo lo anterior, falta determinar los tipos de bosque y los cambios en la cobertura forestal (Carrión et al., 2011). Desde la perspectiva de la conservación de la biodiversidad Bustamante y Grez (1995) mencionan que es importante averiguar cómo la fragmentación de los bosques afecta al funcionamiento general de la flora y fauna remanente. Los bosques saludables son muy importantes en la purificación del agua y para controlar la erosión de los suelos, el azolve de los ríos y para minimizar el riesgo de inundaciones y deslaves (Myers, como se citó en Williams-Linera et al., 2002).

Las condiciones anteriores evidencian la ausencia de insumos para una gestión adecuada del CBLAT o para establecer estrategias de intervención. La información científica disponible es insuficiente, a pesar de ser una de las cuencas más importantes del país (F. Aguilar, comunicación personal, 19 de septiembre, 2016). Por lo anterior, este estudio permitirá sentar las bases para el Consejo Local del Corredor Biológico y que cuente con información para la elaboración de un plan de gestión para fortalecer la conectividad del CB.

El siguiente estudio se llevó a cabo en el Corredor Biológico Arenal Tenorio, ubicado en el Área de Conservación Arenal Tempisque del Sistema Nacional de Áreas de Conservación. La investigación pretende desarrollar acciones que permitan fortalecer el esfuerzo que ha venido desarrollando el Consejo Local, el cual ha establecido como objetivo general restablecer la conectividad entre los Parques Nacionales Volcán Arenal y Volcán Tenorio, incorporando procesos de restauración y conservación de hábitats.

Objetivos

Objetivo general

- Determinar el cambio en el uso de la tierra y la fragmentación de las zonas boscosas en el Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, mediante técnicas de teledetección.

Objetivos específicos

- Calcular el cambio de uso de la tierra del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio en el período 2000 – 2017.
- Determinar el grado de fragmentación del área de cobertura forestal del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio en el período 2000 – 2017, a partir de métricas de paisaje.
- Ofrecer elementos de gestión territorial como línea base para el plan de manejo del Corredor Biológico.

Limitaciones

Las imágenes Landsat que abarcan el Corredor Biológico Arenal Tenorio en el período de estudio presentan un alto porcentaje de nubosidad y sombras, lo que generó áreas sin clasificar.

El contraste altitudinal y topográfico del Corredor Biológico, dificulta la discriminación de las coberturas, especialmente entre Bosque Maduro y Bosque Secundario.

Las condiciones climáticas, así como su ubicación geográfica y la presencia de un alto porcentaje de cuerpo de agua, hacen que el vapor de agua de la zona obstaculice la discriminación de Usos de la Tierra, especialmente en el sector Noroeste del Corredor Biológico.

.

Términos técnicos

Corredor biológico: Territorio delimitado cuyo fin es proporcionar conectividad entre paisajes, ecosistemas y hábitat, naturales o modificados, para asegurar el mantenimiento de la biodiversidad y los procesos ecológicos y evolutivos. Está integrado por áreas naturales bajo regímenes de administración especial, zonas núcleo, de amortiguamiento, o de usos múltiples; proporcionando espacios de concertación social para promover la inversión en la conservación y uso sostenible de la biodiversidad, en esos territorios (Reglamento a la Ley de Biodiversidad, MINAE, 2008).

Bosque: Ecosistema nativo o autóctono, intervenido o no, regenerado por sucesión natural u otras técnicas forestales, que ocupa una superficie de dos o más hectáreas, caracterizada por la presencia de árboles maduros de diferentes edades, especies y porte variado, con uno o más doseles que cubran más del setenta por ciento (70 %) de esa superficie y donde existan más de sesenta árboles por hectárea de quince o más centímetros de diámetro medido a la altura del pecho (Ley Forestal N° 7575. 1996).

Cobertura forestal: Son aquellas áreas con vegetación leñosa, comúnmente denominadas bosques. En algunos casos se incluyen las plantaciones forestales (Diccionario Enciclopédico Dominicano de Medio Ambiente, n.d.). El término de cobertura forestal incluye el bosque primario, intervenido, secundario y plantaciones forestales (IDA/PNUD/FAO como se citó en SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015).

De la definición bosque mencionada anteriormente se derivan los siguientes tipos de cobertura forestal:

Bosque Maduro: Este bosque es producto de un proceso de sucesión que se ha mantenido ininterrumpido durante 75-100 o más años; compuesto por especies nativas de árboles; no presenta huellas evidentes de actividad humana; sus procesos ecológicos no han sido alterados de forma apreciable (SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015).

Bosque Secundario: Tierra con vegetación leñosa de carácter sucesional secundario que se desarrolló una vez que la vegetación original fue eliminada por actividades humanas y/o fenómenos naturales. Tiene una superficie mínima de 0.5 ha y una

densidad no menor a 500 árboles por hectárea de todas las especies, con diámetro mínimo a la altura del pecho de 5 cm. Se incluyen también las tierras de Bosque Secundario inmediatamente después de aprovechadas bajo el sistema de cortas de regeneración (Decreto 27388 - MINAE, 1998).

Bosque deciduo: Formación vegetal en la que la mayoría de los árboles pierden sus hojas simultáneamente en la época seca de cada año (SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015).

Plantación forestal: Terreno de una o más hectáreas cultivado con una o más especies forestales, cuyo objetivo principal, aunque no necesariamente el único, es la producción de madera (Ley Forestal N° 7575. 1996). También se adopta la definición de una superficie arbolada producida en forma artificial mediante plantación o siembra (SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015).

Los siguientes términos fueron adoptados en este estudio para definir los tipos de cobertura no forestal:

Sistema Agroforestal (pasto con árboles): Forma de usar la tierra que implica la combinación de especies forestales en tiempo y espacio con especies agronómicas, en procura de la sostenibilidad del sistema (Ley Forestal N° 7575. 1996).

Pasto sin árboles: Áreas cubiertas por pastos herbáceos, carentes de cobertura forestal o con una cobertura menor al 10 % (SINAC – Programa REDD-CCAD-GIZ., 2015).

Cultivos: Son áreas con ocupación agrícola que puede ser permanentes o estacionales (Morera y Sandoval, 2016).

Urbano: Están representados por la ocupación urbano - residencial, acompañado de servicios públicos institucionales, industrial, comercial (Morera y Sandoval, 2016).

Cuerpos de Agua: Son todos los Cuerpos de Agua, tales como ríos, mares u océanos que cubren parte de la tierra de forma natural. Duarte, Emanuelli, Milla, Orellana y López (2015).

Fragmentación: División progresiva de un hábitat a priori relativamente continuo en un conjunto de fragmentos aislados y de menor tamaño, que quedan embebidos en una matriz de hábitat degradado, cualitativamente muy diferente al original (Saunders, Hobbs y Margules, 1991).

Imagen de satélite: Representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen información reflejada para la superficie de la tierra que luego es enviada a la Tierra y que procesada convenientemente entrega valiosa información sobre las características de la zona que cubre (Cabrera, Vargas, Galindo, García y Ordoñez, 2011).

Nivel Digital (ND): Se trata del valor numérico discreto asignado por el sistema formador de imágenes a cada celda, en respuesta a la irradiancia recibida sobre el plano focal del sensor. Se le conoce así mismo como nivel de gris, luminancia, número digital, valor de pixel, etc. Existe una relación lineal entre el ND grabado y la radiancia correspondiente a cada celda de terreno (Cabrera et al., 2011).

Bandas espectrales: Se refiere a una selección de longitudes de onda con comportamiento electromagnéticos similares (Chuvieco, 1995).

Firma espectral: Es la reflectancia en función de la longitud de onda. Cada material tiene una firma única, por lo tanto puede ser usada para la clasificación de materiales (NASA, 2013).

Teledetección: Técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre (Chuvieco, 2008).

Uso del suelo: Comprende todas las acciones que realice el hombre sobre una cobertura específica parcial o permanente con la intención de cambiarla o mantenerla (Aviles, Araneda, Duarte, Szejner y Vergara 2015).

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

Principios de teledetección

La Teledetección se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biósfera, que está basado en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre (Romero, 2006). Esto implica que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción (Chuvieco, 2008), como el flujo energético proveniente de la energía emitida por el propio sensor; o bien, la reflexión de la luz solar en la superficie terrestre (Aguilar, Mora y Vargas, 2014).

De esta forma, Chuvieco (2008) menciona que es posible adquirir información de las cubiertas u objetos por medio de reflexión, emisión o por emisión-reflexión (**Figura 1**). La reflexión es la forma más importante de teledetección, debido a que el sol ilumina la superficie terrestre que refleja esa energía en función del tipo de cobertura presente sobre ella; ese flujo de energía reflejado es recogido por el sensor, que lo transmite posteriormente a un almacenamiento digital (Aguilar et al., 2014).

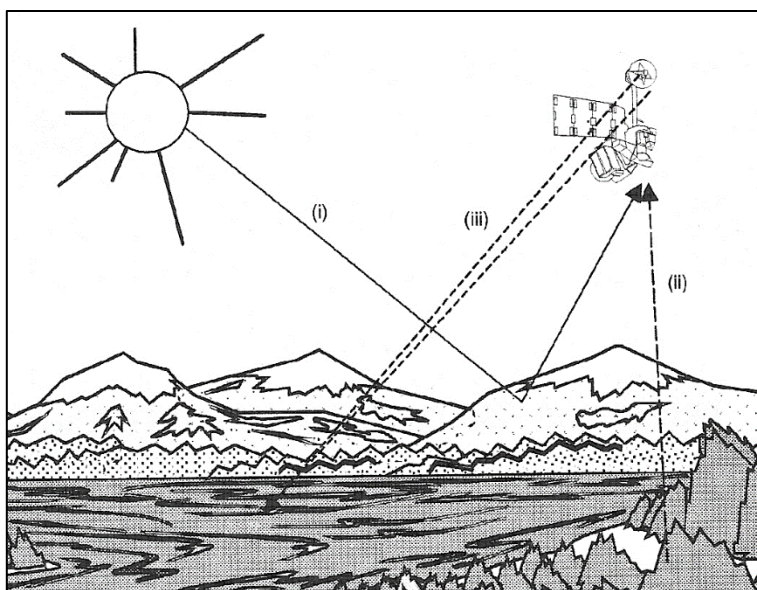


Figura 1. Formas de teledetección (i) reflexión; (ii) emisión y (iii) emisión reflexión

Fuente: Chuvieco (2008).

Factores que modifican la radiación electromagnética

Las señales de radiación electromagnética colectadas por los sensores de los satélites en el espectro solar, son modificadas por absorción, dispersión y emisión producidas por gases y aerosoles que viajan por medio de la atmósfera, desde la superficie de la Tierra hasta el sensor (Aguilar et al., 2014). Así mismo, la atmósfera puede afectar la velocidad de la radiación, su longitud de onda, su intensidad y su distribución espectral, además puede ser desviada de su dirección original debido a refracción (Castillo, 2012).

La dispersión de la radiación se da por partículas atmosféricas y se presenta bajo tres formas distintas: la dispersión de Rayleigh, que ocurre cuando el diámetro efectivo de la materia (moléculas de aire tales como oxígeno y nitrógeno en la atmósfera) es muchas veces más pequeño que la longitud de onda de la radiación electromagnética incidente (Castillo, 2012). Adicionalmente, se da por la dispersión de Mie o dispersión por los aerosoles, que se produce sobre partículas más grandes (Rejas, 2008) y que sucede por debajo de los 4.5 km de la atmósfera (Castillo, 2012). Finalmente, la dispersión no selectiva toma lugar en las porciones más bajas de la atmósfera donde hay partículas de 10 veces más grandes diametralmente que la longitud de onda de la radiación electromagnética incidente (Castillo, 2012).

La absorción por las moléculas de la atmósfera es un proceso selectivo que convierte la radiación incidente en calor (Rejas, 2008) y que puede tomar lugar en la atmósfera o sobre el terreno (Castillo, 2012). Por otro lado, la emisión, referente a la radiación propia que emite cualquier cuerpo con temperatura mayor a -273 K , tiene mayor importancia de estudio en el infrarrojo térmico de los sensores remotos (Aguilar et al., 2014).

Los efectos de estos tres factores mencionados anteriormente, se manifiestan en un difuminado de la imagen, disminución de contraste y la cantidad total de radiación que llega al sensor (Aguilar et al., 2014). Según Castillo (2012), las imágenes de satélite requieren de operaciones de procesamiento o correcciones previas a la extracción de la información, con el fin de minimizar los errores más comunes encontrados en sensores remotos, los cuales son de tipo radiométrico y geométrico. Las deformaciones en las imágenes de satélite pueden ser originadas por la plataforma, el sensor, la rotación terrestre y por la atmósfera (Arango, Branch y Botero, 2005).

Es por lo anterior, que es importante conocer los procesos que implica el manejo de imágenes de satélite antes y después de la clasificación. Según Salvador, Pons y Diego (1996), en la fase de previa a la clasificación, las imágenes de satélite requieren de correcciones geométricas mediante algoritmos que tienen en cuenta las deformaciones provocadas por el relieve, aplicando posteriormente la corrección radiométrica a dichas imágenes. Seguidamente se realiza la clasificación temática en clases espectrales y finalmente se evalúa los valores de acierto de las clasificaciones.

Descripción de imágenes satelitales usado para el monitoreo de recursos naturales

Las imágenes de satélite, son una herramienta fundamental para la elaboración de inventarios del uso del suelo, las cuales brindan información básica, para la planificación, ordenación y gestión del territorio (Zerda, 2001). El uso de la teledetección a través de imágenes de satélite, facilita la elaboración de mapas temáticos que denotan el estado de los recursos agrícolas y forestales. Con el tratamiento informático de las imágenes satélite se pueden discriminar los tipos de vegetación, su estado y el nivel de protección del suelo (Aviles et al., 2015).

El desarrollo de los sensores remotos ha facilitado la generación de nuevos métodos basados en interpretación de imágenes de satélite y el uso de equipo computarizado, que ofrece mayor rapidez y confiabilidad en la generación de la cartografía de los recursos naturales (Buendía, Terrazas y Vargas, 2002). La teledetección desde satélite ofrece múltiples ventajas, frente a otros medios de observación convencionales como la fotografía aérea o los trabajos de campo, entre las cuales Chuvieco (2008) menciona los siguientes:

- Las imágenes de satélite permiten realizar estudios de grandes extensiones de cobertura terrestre. Es una de las pocas fuentes de información globales, ya que ofrecen información prácticamente de totalidad del planeta en condiciones comparables (mismo sensor, similitud de altura).
- En comparación con los estudios con fotografía aérea, este último resulta más onerosos en la relación costo-beneficio con respecto al uso de imágenes de satélite

- Perspectiva panorámica: la altura orbital del satélite le permite detectar grandes espacios, es decir abarca varios miles de millones de kilómetros cuadrados con una sola imagen.
- Observación multiescala y no destructiva: se pueden utilizar las imágenes para extender las observaciones locales a ámbitos de observación mucho más amplios.
- Información sobre regiones no visibles del espectro: los sensores facilitan imágenes sobre tipos de energía que no son accesibles al ojo humano o a la fotografía convencional.
- Cobertura repetitiva: las características orbitales de los satélites de observación terrestre, les permiten adquirir imágenes repetitivas de toda la tierra en condiciones comparables de observación, lo que resulta idóneo para abordar estudios multitemporales.
- Transmisión inmediata: las imágenes de satélite son transmitidas a las estaciones terrestres en tiempo real, siendo muy útiles en la gestión de catástrofes.
- Formato digital: agiliza el proceso de interpretación y facilita una evaluación más real del paisaje.

A nivel global existen diferentes proyectos de teledetección espacial para el monitoreo ambiental, que tienen como característica una órbita helio sincrónica, que les permite pasar por un mismo punto a la misma hora y con una cobertura completa del planeta. Por un lado, las constelaciones QuickBird, RapidEye y SPOT presentan un período de revisita entre uno a tres días con una resolución espacial entre 0.60 y 5 m de tamaño de pixel. Por otro lado, los satélites Sentinel -2 y Landsat presentan un periodo de revisita de cada 16 días y sus productos son gratuitos, con objetivo de investigación o educación (Rodríguez, Sánchez y Domínguez 2015), por lo cual será objeto de este estudio.

Descripción de imágenes Landsat

Landsat fue el primer satélite de recursos naturales lanzado en julio de 1972 (Romero, 2006) y desarrollado por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) en conjunto con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) (USGS, 2016).

El programa Landsat, lo forman 8 satélites (**Figura 2**), de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada (Ariza, 2013). En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM).

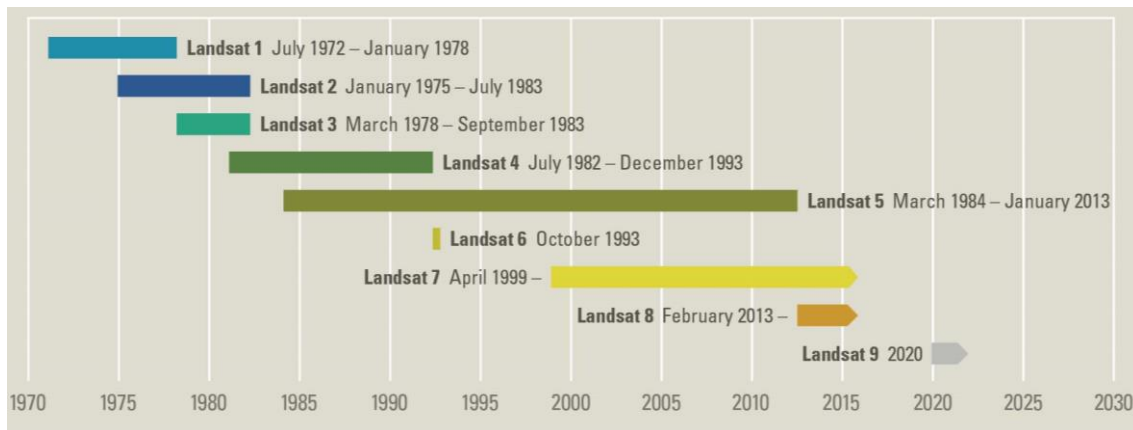


Figura 2. Satélites de la Misión Landsat

Fuente: (USGS, 2017b).

El sensor Multispectral Scanner Sensor (MSS), se llevó a cabo en Landsats 1-5, y las imágenes consisten en cuatro bandas espectrales con 60 metros de resolución espacial. El sensor Landsat Thematic Mapper (TM) se llevó a cabo en Landsat 4 y Landsat 5; las imágenes consisten en seis bandas espectrales (**Cuadro 1**), con una resolución espacial de 30 metros para las bandas 1-5 y 7 y una banda térmica (banda 6) de 120 metros de resolución espacial (USGS, 2017).

Cuadro 1. Características de las imágenes de satélite adquiridas por los sensores del programa Landsat 1 a Landsat 5

Landsat 1-3		Landsat 4-5	
Bandas	Longitud de onda (μm)	Bandas	Longitud de onda (μm)
		Banda 1 - Azul	0.45-0.52
Banda 4 - Verde	0.5-0.6	Banda 2 - Verde	0.52-0.60
Banda 5 - Rojo	0.6-0.7	Banda 3 - Rojo	0.63-0.69
Banda 6 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.7-0.8	Banda 4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.76-0.90
Banda 7 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.8-1.1		
		Banda 5 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.55-1.75
		Banda 6 - Térmica	10.40-12.50
		Banda 7 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.08-2.35

Fuente: USGS, (2017).

Por otro lado, el Sensor Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) se lleva a cabo en Landsat 7 y las imágenes consisten en siete bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas 1-5 y 7(**Cuadro 2**), siendo la térmica (banda 6) con una resolución espacial de 60 metros, pero remuestreada a píxeles de 30 metros (USGS, 2017).

Cuadro 2. Características de las imágenes de satélite adquiridas por los sensores del programa Landsat 7 y 8

Landsat 7 (ETM+)		Landsat 8 (OLI)	
Bandas	Longitud de onda (µm)	Bandas	Longitud de onda (µm)
		Banda 1 - Aerosol costero	0-43-0-45
Banda 1 - Azul	0.45-0.52	Banda 2 - Azul	0-45-0-51
Banda 2 - Verde	0.52-0.60	Banda 3 - Verde	0.53-0.59
Banda 3 - Roja	0.63-0.69	Banda 4 - Rojo	0.64-0.67
Banda 4 - Infrarrojo cercano 1	0.76-0.90	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 -0.88
NIR 1			
Banda 5 - Infrarrojo cercano 2	1.55-1.75	Banda 6 - SWIR 1	1.57 -1.65
NIR 2			
Banda 7 - Infrarrojo medio	2.08-2.35	Banda 7- SWIR 2	2.11 -2.29
Banda 8 - Pancromático	0.52-0.90	Banda 8 - Pancromático	0.50-0.68
		Banda 9 - Cirrus	1.33-1.38
Banda 6 – Infrarrojo térmico	10.4-12.5	Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60-11.19
		Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50-12.51

Fuente: Recopilado de Ariza, 2013;USGS, 2017.

Finalmente, El satélite Landsat 8 (**Cuadro 2**), consta de una plataforma con capacidad de carga de dos de sensores de observación terrestre: el primero de ellos denominado OLI (Operational Land Imager) con nueve bandas en el espectro óptico, y el segundo, el sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor) con dos bandas en el infrarrojo térmico (Ariza, 2013).

Ambos sensores, presentan imágenes con una resolución espacial de 30 metros y resolución temporal de 16 días, siendo la banda pancromática de 15 metros de resolución espacial (USGS, 2017). Se diferencian en que Landat 7 presenta 8 bits de resolución radiométrica, mientras que Landsat 8 de 12 bits.

Ventajas de las imágenes Landsat

- Las características de resolución espectral, espacial y temporal de las imágenes Landsat, la disponibilidad de datos históricos, las facilidades para su adquisición y la política de toma continua y a largo plazo del programa (Cabrera et al., 2011) convierten a estas imágenes en una alternativa adecuada para los objetivos que se plantean en este estudio.
- La comparación entre imágenes de dos períodos se realiza en el mismo sistema de referencia, debido a que todos los datos del LDCM son referenciados al mismo sistema de coordenadas, continuando con el registro de datos desde hace décadas (Ariza, 2013).
- Las imágenes presentan un nivel de procesamiento 1T (ortorectificado), en formato GeoTIFF (Ariza, 2013). Estas se consideran adecuadas para análisis de series de tiempo puesto que tienen una radiometría bien caracterizada lo que permite su calibración (USGS, 2017b).
- El programa Landsat 8 (LDCM) mantiene la misma calidad de sus siete predecesores. Adicionalmente los datos son compatibles en términos de la geometría de adquisición, calibración, características de cobertura espectral y espacial, así como en la calidad del producto (USGS, 2017a).
- La misión es continua, considerando que el USGS está desarrollando la misión Landsat 9 (OLI-2), siendo una copia del OLI de Landsat 8 y proporcionará imágenes infrarrojas visible, infrarrojas cercano e infrarroja de onda corta, consistentes con las características espectrales, espaciales, radiométricas y geométricas de las misiones Landsat anteriores (USGS, 2017c).
- Las imágenes del Landsat 8 añaden bandas en el visible (azul) y en el IR (medio, de onda corta y térmico) que les permiten abortar estudios sobre vegetación, suelos, o

zonas urbanas que no son viales con las imágenes de otros sensores como en el Quickbird o el SPOT (Rodríguez et al., 2015).

Tratamiento digital de imágenes

Es importante conocer los procesos que implica el manejo de imágenes de satélite antes y después de la clasificación. Según Salvador et al., (1996), en la fase de previa a la clasificación, las imágenes de satélite requieren de correcciones geométricas mediante algoritmos que tienen en cuenta las deformaciones provocadas por el relieve, aplicando posteriormente la corrección radiométrica a dichas imágenes. Posteriormente se realiza la clasificación temática en clases espectrales y finalmente se evalúa los valores de acierto de las clasificaciones. Estas fases se clasifican en operaciones de pre procesamiento, procesamiento y pos proceso, las cuales se detallan a continuación.

Correcciones de imágenes – operaciones de pre procesamiento

Corrección radiométrica

La corrección o calibración radiométrica está relacionada con la mejora en la precisión de la reflectancia espectral, emitancia en la superficie, o mediciones de retrodispersión obtenidas usando un sistema de sensores remotos (Castillo, 2012). Este método permite convertir la información de la imagen original de cada pixel , de niveles digitales (ND) a niveles de reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmósfera (SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015).

Este proceso de corrección, permite remover el efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra – Sol (SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015), eliminar los efectos de iluminación causados por la orientación y la pendiente del relieve (Salvador et al., 1996), además de deficiencias en la construcción del sensor (Duarte et al. 2015). Según Salvador et al., 1996) estas condiciones pueden llevar a respuestas espectrales muy diversas de un mismo tipo de formación vegetal o de cubierta del suelo, aumentando de forma considerable la varianza interna de su respuesta.

En este sentido, Salvador et al., (1996) mencionan que la heterogeneidad del relieve es uno de los factores que puede aportar más varianza y confusión espectral en cualquier tipo de imagen captada por un sensor remoto, los cuales son de elevada complejidad y de difícil modelización. La corrección radiométrica también es conveniente en el caso de utilizar imágenes de diferentes tipos de sensores, pues permite normalizar las diferencias de valores de la radiación solar causados por las diferencias de los rangos espectrales entre las bandas de las imágenes (Cabrera et al., 2011; SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015).

Corrección atmosférica

La corrección atmosférica es un proceso que se aplica a las imágenes digitales, con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera (SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015). Para esto se requiere convertir los ND de cada banda a valores de radiancia, que posteriormente se transforma a valores de reflectividad en el techo de la atmósfera (Aguilar, Zamora y Vargas, 2014). Este proceso de corrección es importante porque mejora los resultados finales del proceso de clasificación (Cabrera et al. 2011).

Corrección geométrica

La corrección geométrica se utiliza para corregir los desplazamientos y distorsiones geométricas presentes en una imagen, causados por la inclinación del sensor (posición del sensor en el momento de la toma), la influencia del relieve y los errores sistemáticos asociados con la imagen (SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015). Según Castillo (2012), la corrección geométrica se refiere a la ubicación de lo reflejado, emitido o productos derivados en su propia localización planimétrica. Adicionalmente, según Cabrera (2011) este proceso tiene implicaciones directas en la precisión de la posición de los resultados a obtener en el procesamiento de estimación de cambios entre coberturas, que garantiza que los cambios reportados entre dos imágenes de la misma zona y distintas fechas se deban a

cambios en las coberturas de la tierra detectadas durante el periodo establecido, y no a diferencias en la posición de las imágenes en el periodo de análisis.

Generación de información temática - procesamiento de imágenes

Una vez que las imágenes han sido corregidas, es posible hacer una clasificación o segmentación digital de la imagen, que puede ser bajo esquemas supervisados, no supervisados, clasificación orientada a objetos, técnicas de clasificación basada en lógica difusa, o técnicas de clasificación basadas en árboles de decisión (Cabrera et al. 2011). La imagen segmentada es posteriormente editada para generar el archivo de clasificación de uso de la tierra, mediante el uso de clases espectrales.

Por un lado, el método supervisado parte de un conocimiento previo del terreno, adquirido por experiencia previa o por trabajo de campo y permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas piloto o campos de entrenamiento, que se consideran suficientemente representativas de las categorías que componen la leyenda y a partir de ellas el ordenador calcula los ND que definen cada una de las clases y posteriormente el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de su ND (Chuvieco, 1995).

Por otro lado, la clasificación no supervisada se define como proceso de agrupación de píxeles con valores digitales similares para todas las bandas y cada una de estas agrupaciones son llamadas clases espectrales (Arango et al., 2005). Tienen como principal ventaja el reconocimiento de patrones espectrales de manera autónoma e interactiva, sin sujetarse a un estricto conocimiento del sitio de estudio y permitiendo concentrar la tarea humana en la interpretación más que en la consecución de los resultados (Arango et al., 2005; Chuvieco, 1995).

También pueden emplearse métodos mixtos de clasificación, como el empleo de análisis supervisado para guiar el no supervisado, especialmente cuando se presentan coberturas conocidas en la imagen. También, se pueden aplicar ambos métodos por separado en la misma imagen, ganando significado espectral e informacional de las clases resultantes, en este último se utiliza el método no supervisado para estratificar la imagen quedando el no supervisado para las áreas no clasificadas previamente (Chuvieco, 1995).

Segmentación de imágenes de satélite

Para facilitar el proceso de clasificación se recomienda implementar un esquema de segmentación, el cual es un proceso digital de agrupamiento de píxeles a objetos más significativos, usados para simplificar la imagen (Cabrera et al., 2011; Duarte et al., 2015). Un incremento en el número de clases espectrales en una clasificación, puede permitir la caracterización de las diferentes respuestas espectrales de un tipo de cubierta del suelo bajo diferentes condiciones de iluminación; posteriormente estas clases espectrales pueden ser reagrupadas en su clase temática correspondiente mediante el uso de áreas de entrenamiento o regiones de interés (Salvador et al., 1996).

Creación de regiones de interés

Las técnicas de clasificación mencionadas anteriormente (a excepción de la no supervisada) requieren un conjunto de áreas de entrenamiento con coordenadas conocidas (espacialmente explícitas), las cuales serán luego asociados a los segmentos generados (Cabrera et al., 2011). Las Regiones de interés se distribuyen de manera sistemática o aleatoria en toda la imagen a clasificar de tal forma que sea homogéneo en todas las clases (Cabrera et al., 2011; Coronado, 2014).

Como regla general la cantidad de áreas de entrenamiento deben ser representativas de la variabilidad del universo a clasificar, siendo recomendable contar con alrededor del 1 % del universo total, es decir, del total de los segmentos generados para una imagen determinada (Cabrera et al., 2011). Osuna-Osuna et al. (2015) indica que es necesario seleccionar al menos 30 campos de entrenamiento por clase, con 12 a 16 píxeles por campo para cada imagen, lo que representa áreas mayores a una hectárea.

Posteriormente a la segmentación se inicia la fase de asignación, la cual trata de adscribir cada uno de los píxeles de la imagen a una de las clases respectivas y para cada una de las bandas que intervienen en el proceso mediante funciones (Chuvienco, 1995). Los criterios más

empleados para establecer estas fronteras estadísticas son 1) el mínimo de la distancia donde el pixel se asigna a la clase más cercana, 2) paralelepípedos y 3) máxima probabilidad.

El clasificador de máxima probabilidad, es ampliamente usado en la clasificación de imágenes de detección remota, donde el pixel se asigna a aquella clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia (Eastman, 2003). Chuvieco (1995) señala que el clasificador de paralelepípedos permite señalar al usuario unos umbrales de dispersión asociados a cada clase, pero que entre más grande el umbral, más riesgo de confusión con categorías vecinas. Esto implica zonas comunes en dos o más categorías, además que algunos pixeles queden sin clasificar, por lo que recomienda revisar la definición espectral de las categorías.

Verificación de los resultados - pos procesamiento de imágenes

El mapa temático producto de una clasificación digital no está exento de errores y tienen cierto grado de confiabilidad que debemos tener presente en los resultados (Morales-Hernández y Carrillo-González, 2016). Las fuentes de error de una clasificación temática pueden estar relacionadas con el terreno objeto de estudio (forma, orientación tamaño de las parcelas y contraste entre cubiertas vecinas), con el nivel de precisión requerido (segregación de la leyenda), con la adquisición de la imagen y con los factores medioambientales externos (Chuvieco, 1996).

Duarte et al., (2015) mencionan que para mejorar la precisión de los mapas, se puede seleccionar un área de verificación, mediante una malla de puntos distribuida sistemáticamente en toda el área de estudio, cuya verificación es realizada por un técnico externo al que elabora los mapas con el fin de lograr más objetividad en los procesos. Este análisis es importante porque permite obtener conclusiones que servirán de base para la elaboración de una nueva versión del mapa, mejorando su calidad. El grado de fiabilidad de un mapa, también puede determinarse comparando el inventario de la clasificación con el obtenido por otras fuentes, o bien, determinar la fiabilidad de las áreas de entrenamiento (Chuvieco 1996).

Es importante señalar que el éxito de la clasificación se puede verificar por medio de una matriz de confusión (Salvador et al., 1996). La matriz examina la exactitud global e

individual de las clases de usos y coberturas clasificadas, en comparación con las regiones de interés seleccionadas por el experto (Coronado, 2014). La matriz proporciona información relacionada con la exactitud del productor (porcentaje de aciertos que se han producido en la clasificación) y del usuario (que corresponde al porcentaje de casos que según la clasificación pertenecen a la clase).

Adicionalmente, la exactitud de la clasificación puede medirse mediante el coeficiente de Cappa, que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y al que cabría esperar simplemente por azar (Morales-Hernández y Carrillo-González, 2016).

Determinación de la estructura espacial

Paisaje

Según (Morera et al., 2007) el paisaje se refiere al mosaico de elementos , dispuestos en unas determinadas proporciones de número, forma, posición geográfica y superficie, que caracterizan un territorio concreto. La ecología del paisaje reconoce al paisaje como un mosaico de diferentes tipos de hábitat que en la mayoría de los casos está influenciado por las actividades humanas de uso de la tierra, resultando en una mezcla de parches desde hábitat naturales hasta tierras de uso intensivo (Turner, 1989).

Otros autores también incluyen en su definición los efectos antropogénicos en la definición del paisaje. Por un lado, el Convenio Europeo del Paisaje lo define como cualquier parte del territorio tal como la percibe la población, cuyo carácter sea el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/o humanos (Consejo de Europa, 2000). Por otro, Zonneveld (como se citó en Morera et al.,2007) define el paisaje como:

Un complejo de sistemas relacionados, generados y sostenidos por la acción mutua de fuerzas bióticas y abióticas, así como por la actuación humana, y que, debido a la fisonomía que presenta, permite individualizar partes diferenciadas de la superficie terrestre.

Es por ello que los patrones o mosaicos resultan de las interacciones entre los condicionantes ambientales naturales y las actividades humanas en un territorio concreto y constituyen

fenómenos únicos que emergen al nivel del paisaje (Morera et al., 2007). Esto permite a la ecología del paisaje estudiar como los mosaicos de hábitat naturales y antropogénicos están estructurados, cómo el patrón espacial influye en los procesos ecológicos y cómo el mosaico del paisaje cambia a través del tiempo (Bennett, 1999).

Componentes del paisaje

En el estudio del paisaje es importante tomar en cuenta tres características, que son la estructura, la función y el cambio (Ramos, 2004; Turner, 1989). Según (Bermúdez, 2015) estos componentes se ven influenciados por las actividades antropogénicas y naturales a diferentes escalas, magnitudes y en tiempo, por lo que la composición de un sitio siempre va a ser diferente si se compara con otro, único y propio de cada lugar .

La estructura se refiere a la disposición espacial de los distintos ecosistemas, como la distribución de energía, materiales y especies en relación con los tamaños, formas, cantidad, tipos y configuración de los componentes (Turner, 1989). En cuanto a la función, se refiere a las interacciones de los elementos espaciales, esto es, el flujo de energía, materiales y organismos entre los componentes del ecosistema (Chassot et al., 2007; Turner, 1989). Por último, el cambio se refiere a la alteración de la estructura y función del mosaico ecológico a través del tiempo (Turner, 1989).

Fragmentación

La fragmentación de los ecosistemas y del bosque en particular, es para muchos ecólogos uno de los procesos que afectan más severamente a la biodiversidad. En general, se considera que tiene un efecto negativo sobre muchas especies de plantas y animales y sobre algunos procesos ecológicos (Morera et al. 2007). Según Bennett (1999) los procesos de fragmentación tienen tres reconocibles procesos: a) pérdida o destrucción total del hábitat en el paisaje, b) reducción del hábitat y c) aislamiento de los fragmentos de hábitat.

Los mosaicos paisajísticos se consideran compuestos por tres tipos de elementos: la matriz, los fragmentos (también llamados parches o polígonos) y los corredores (Chassot et al., 2007). Los fragmentos son los polígonos discretos que pueden llegar a individualizarse en la

fotointerpretación: campos de cultivo, fragmentos de bosque, pastos, núcleos de población, edificios aislados, láminas de agua, otros (Morera et al., 2007). Chassot et al., (2007) mencionan que los fragmentos son unidades físicas observables y cuantificables a través del cálculo de atributos como la forma, tamaño, distribución espacial, cercanía entre fragmentos, lo cuales pueden ser individuales y/o de distintos usos del suelo (**Figura 3**).

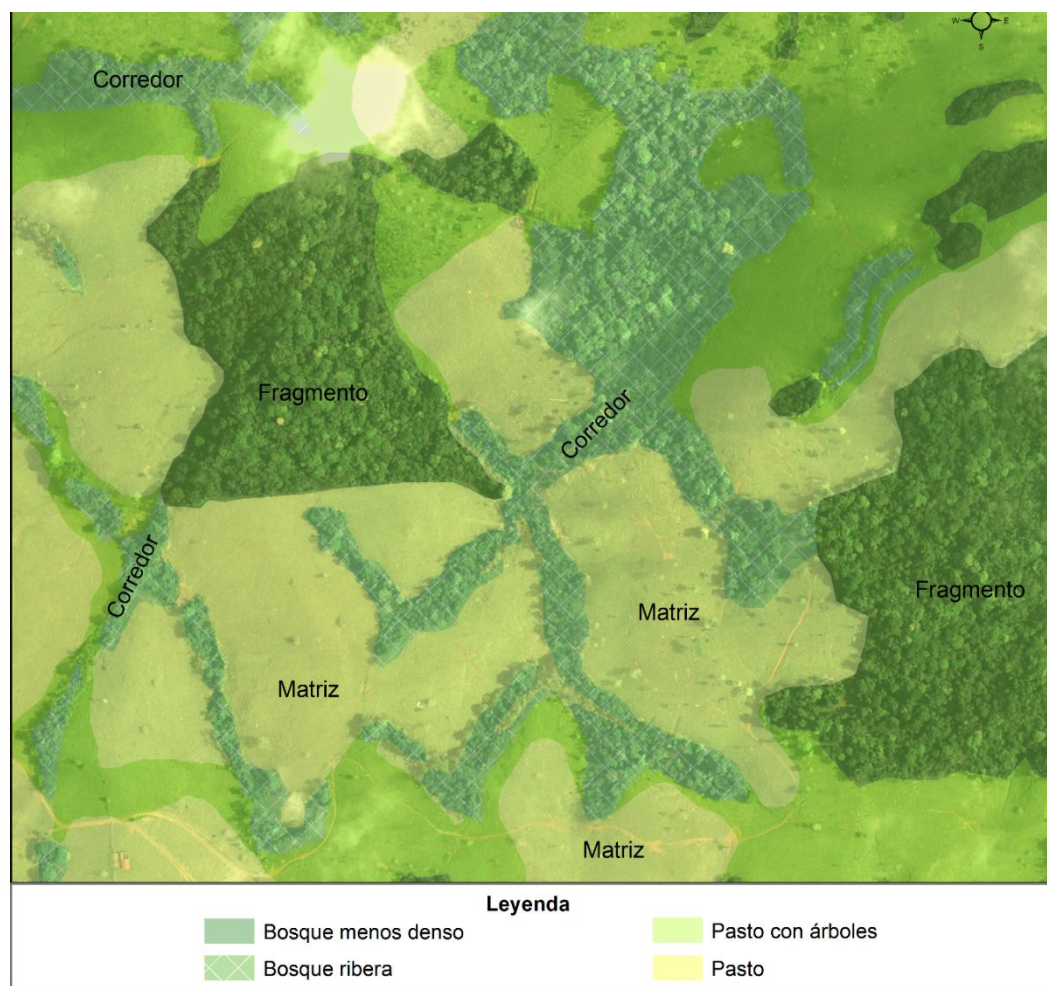


Figura 3. Representación gráfica de los elementos del paisaje

Fuente: Morera et al., 2007.

En cuanto a los corredores (**Figura 3**), se han definido como elementos de forma longitudinal: cursos de agua, carreteras, setos vivos, trincheras de líneas eléctricas, otros. En el análisis del paisaje orientado a la gestión de los espacios naturales se tiende a considerar únicamente como corredores aquellos elementos que pueden garantizar el flujo de especies entre diferentes piezas del paisaje matriz (Morera et al., 2007). Mientras tanto, la matriz, hace

referencia a la cubierta del suelo que predomina netamente en el paisaje matriz (Morera et al., 2007), en los movimientos de energía materiales y organismos (Chassot et al., 2007).

Como se mencionó anteriormente la reducción de hábitats, trae como consecuencia la extinción de especies. Este proceso se da por dos fenómenos que ocurren a dos escalas espaciales diferentes: 1) a escala de paisaje, la deforestación reduce la heterogeneidad espacial y la disponibilidad de hábitat, afectando a las especies que necesitan hábitats continuos de gran tamaño para mantener poblaciones viables, y 2) a escala de fragmento, en donde las poblaciones remanentes pueden tender a ser pequeñas, lo que aumenta su vulnerabilidad a la extinción por factores demográficos o estocásticos (Kattan, 2002)

Un bosque fragmentado puede ser descrito por atributos tales como número de fragmentos, tamaño, forma y grado de aislamiento de los fragmentos, los cuales pueden estar rodeados de vegetación secundaria, cultivos, asentamientos humanos y vías de acceso (Bustamante y Grez, 1995). Adicionalmente, los cambios en el patrón del paisaje que pueden presentarse a partir de la fragmentación pueden ser identificados y descritos a partir de la medición de atributos, tales como: el área total del hábitat natural remanente, la distribución de frecuencia de tamaño de los fragmentos, la forma de los fragmentos, la distancia entre fragmentos, y el nivel de contraste entre los hábitats remanentes y el uso de las tierras adyacentes (Bennett, 1999).

Según Morera et al., (2007) la fragmentación de los ecosistemas atraviesa varias etapas:

En su estadio inicial, intacto, el ecosistema solo exhibe una alteración menor al 10 % de la superficie, producto de los mismos procesos naturales del ecosistema, por ejemplo, “gaps” o claros del bosque donde se produce la regeneración de estos ambientes naturales (**Figura 4**). De continuar con el proceso de fragmentación, el ecosistema alcanza un estadio denominado salpicado, significa que la superficie del ecosistema ha sido alterada entre 10 y 40 %, sin embargo, los procesos ecológicos naturales aún son dominantes. Si el proceso de alteración continua, los espacios naturales alcanzan el estadio denominado fragmentado, en el que las áreas cubiertas por los ecosistemas naturales no sobrepasan el 40 o 60 %.

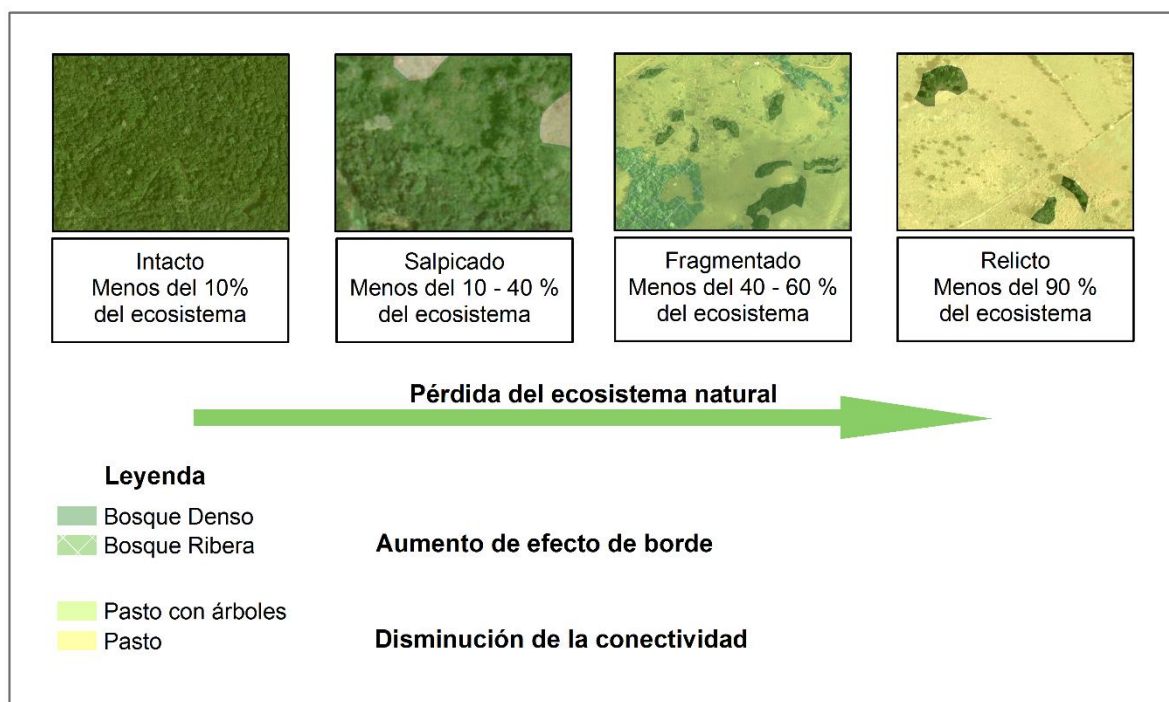


Figura 4. Proceso de fragmentación de los ecosistemas naturales

Fuente: Morera et al. 2007.

Corredores Biológicos

Los corredores son estructuras espaciales conformadas por una serie de fragmentos de bosque u otro ecosistema, cuyos tamaños, distancia próxima, y forma geométrica hace posible el flujo e intercambio de especies, materia, energía e información proveniente de los hábitats nodales. Están formados por ecosistemas naturales o fragmentos remanentes cuyas estructuras paisajísticas tienen formas lineales, alargadas, angostas e irregulares y funcionan como hábitats permanentes o temporales cuya conexión permite el flujo de especies (Morera et al., 2007)

En este contexto, Beier y Noss, (1998) definen los corredores biológicos como un hábitat lineal, que difiere de la matriz y conecta dos o más fragmentos de hábitat. La finalidad de estos es permitir la dispersión de plantas y animales de una reserva a otra o de un fragmento de bosque a otro, facilitando el flujo de genes y la colonización de sitios adecuados, así como facilitar la migración estacional de especies en busca de alimento entre diferentes hábitat (Ramos, 2004).

Según el (SINAC, 2008) los componentes estructurales de un corredor biológico son:

Áreas núcleo: son áreas naturales protegidas cuyo propósito es que los ecosistemas continúen manteniendo la biodiversidad y la provisión de bienes y servicios ecosistémicos para la sociedad.

Rutas de conectividad: son propuestas de enlace entre dos o más zonas núcleo, que surgen del paso entre los diferentes usos del suelo y que proveen una menor resistencia al movimiento de especies; así como, la adaptación a los cambios y presiones del ambiente y del clima

Hábitats sumideros: son fragmentos del ecosistema original. Por sus características en cuanto a tamaño y salud del ecosistema en sí, no son capaces de mantener poblaciones viables de especies, por lo que necesitan de la inmigración de individuos provenientes de las zonas núcleo.

Matriz del corredor biológico: área dedicada a usos múltiples (actividades agropecuarias, asentamientos humanos, aprovechamiento forestal, ecoturismo, otros).

Forman y Godron, (1986) indica que los corredores se pueden identificar según su origen en:

- **Corredores perturbados:** resultan de la perturbación de una franja, por ejemplo, un carril forestal empleado para el arrastre y transporte de la madera, carreteras o vías de tren y líneas de tensión eléctrica.
- **Corredores remanentes:** son el resultado de una perturbación en la matriz paisajística: una franja de árboles remanente de un bosque talado, una franja de pradera nativa a ambos lados de una vía de tren.
- **Corredores ambientales:** resultan de la heterogénea distribución linear de los recursos ambientales en el espacio: corredores de ribera, o rutas faunísticas a lo largo de puentes angostos son un ejemplo de corredores ambientales.
- **Plantaciones corredor o corredores verdes:** los parques o zonas verdes de las zonas urbanas, o los setos plantados en hilera.
- **Corredores de regeneración:** que resultan de la regeneración de una franja de vegetación dentro de un área ambientalmente degradada o perturbada. Muchas hileras

de setos vivos crecen a lo largo de vallas o cercas, y algunas áreas verdes urbanas son producto de la regeneración espontánea).

Por último, Forman y Godron, (1986) les atribuye cinco funciones principales: 1) constituyen hábitat de ciertas especies, 2) conducto para las especies, 3) filtro, 4) fuente y 5) sumidero tanto de especies como de materia que circula en el paisaje (sedimentos, semillas, contaminantes, etc.) con efectos ambientales y ecológicos en el entorno.

Tecnología SIG y percepción remota aplicada en el análisis del paisaje

Las imágenes de percepción remota procesadas con la tecnología de los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen una importante herramienta de trabajo en la investigación en ecología de paisajes, que permiten integrar y analizar la heterogeneidad espacial en formato digital, fácilmente mensurable (Moizo Marrubio, 2004). A su vez, proporcionan el insumo básico para el análisis de los mosaicos espaciales y su estructura (Pinto, 2001).

En este contexto de la ecología de paisaje, la percepción remota se ha constituido en una herramienta importante para el análisis, facilitando y ampliando la representación, la interpretación y el análisis de los datos espaciales (Moizo, 2004). A través del procesamiento de imágenes de satélites se logra obtener gran cantidad de información tanto espacial como la asociada a los cambios en el tiempo o a los impactos del hombre sobre algunos sistemas ecológicos (Delgado, Ramos, Martínez y García, 2003).

La estructura del paisaje se cuantifica mediante el conteo de píxeles o de puntos, siendo la primera opción la técnica más usada en ecología del paisaje. El conteo se realiza superponiendo a la imagen que se estudia una grilla dividida en cuadrados (Moizo, 2004). Hay que hacer notar que el enfoque holístico de la ecología de paisaje, así como con todas las variables asociada hace que el análisis de grandes volúmenes de información no pueda hacerse de manera tradicional, solo con avanzada tecnología como los SIG permiten el manejo y la integración de la misma (Delgado et al., 2003).

Sánchez, Granados, Chávez, Villegas y Mendoza, (2010) mencionan que la integración de la ecología del paisaje y la percepción remota, puede ser muy útil para una evaluación exacta y oportuna de la dinámica y función del paisaje derivadas de los cambios de uso del suelo, que pueden detectarse mediante la diferencia en los valores de reflectancia de dos objetos registrados en dos fechas distintas. El uso de tecnologías modernas como los SIG y los Sensores Remotos, se convierte en una herramienta de gran utilidad para la planeación, conservación y manejo de los recursos naturales. (Gómez, Anaya y Alvarez, 2005).

Métricas del paisaje

Los índices del paisaje a portan datos numéricos sobre la composición y configuración del paisaje, la proporción de cada cubierta del suelo y la forma de los elementos del paisaje (Vila, Varga, Llausàs y Ribas, 2006). Estos índices forman parte de los métodos cuantitativos en ecología del paisaje, que según McGarigal y Marks, (1994) se aplican en los siguientes niveles:

- a) *A nivel de fragmento.* Los cálculos se aplican a cada fragmento individualmente.
- b) *A nivel de clase.* Los cálculos se aplican a cada conjunto de fragmentos de la misma clase, es decir, a aquéllos que tienen el mismo valor o que representan el mismo tipo de cobertura.
- c) *A nivel de paisaje.* Los cálculos se aplican al conjunto del paisaje, es decir, a todos los fragmentos y clases a la vez.

Adicionalmente, los índices del paisaje se pueden agrupar en cinco grandes tipos McGarigal y Marks, (1994):

- a) *Índices de área, superficie, densidad y variabilidad:* centrado en las características de dimensión y en el número de fragmentos que conforman el área de estudio.
- b) *Índices de forma:* que están fundamentados en las características de forma de los fragmentos que constituyen un determinado paisaje.
- c) *Índices de ecotono y hábitat interior:* permiten hacer cálculos sobre la amplitud del ecotono, o hábitat de borde, en relación con el hábitat interior.

- d) *Índices de distancia, vecindad y conectividad*: Estos índices calculan la distancia desde el hábitat de borde y ecotono de un fragmento hasta el fragmento más próximo al mismo tipo.
- e) *Índices de diversidad del paisaje*. Estos índices aportan información relevante para poder comparar distintos paisajes o la evolución de un paisaje en diferentes momentos históricos.

Según Vila et al., (2006) existe una gran variedad de software desarrollado con la finalidad de cuantificar las características de la estructura del paisaje, tales como Fragstats, Grass, Patch Grid y V-Late. También existen complementos para el software QGIS tales como Lecos (landscape ecology statistics), que calcula las estadísticas para la ecología del paisaje a nivel de clase y de paisaje (Jung, 2016).

Adicionalmente existen diversas experiencias de estudios del paisaje empleando Sistemas de Información Geográfica, en los que resalta Lozano, Gómez y Valderrama (2011), Galván-Guevara et al. (2015) y Cardona et al. (2013). Otros estudios realizan comparaciones entre las diversas métricas del paisaje como los elaborados por Couto, (2004) y Matteucci y Silva (2009).

La definición teórica y las fórmulas de cálculo de las métricas del paisaje se describen en McGarigal (2015), así como en la herramienta de ayuda de la extensión Patch Grid (Rempel, Kaukinen y Carr., 2012). A continuación, se brinda en detalle las principales métricas del paisaje empleadas comúnmente en aplicaciones SIG, específicamente con la Extensión Patch Grid y Lecos de QGIS, que además fueron seleccionadas para este estudio (**Cuadro 3**):

Cuadro 3. Métricas de paisaje y clase empleadas en el estudio

Tipo	Métrica	id	Software	Definición e interpretación
Métricas de diversidad	Índice de Diversidad de Shannon.	SDI	Lecos, Patch Grid.	➤ Analiza la diversidad paisajística. Entre más se aleja el valor de 1, la diversidad de clases va a ser mayor, mostrando el grado de fragmentación del paisaje. ➤ El índice será igual a cero cuando solo hay un parche en el paisaje y aumenta a medida que aumenta el número de tipos de parches o la distribución proporcional de los tipos de parches. ➤ Está disponible únicamente a nivel de paisaje.
	Índice de la uniformidad de Shannon.	SEI	Lecos, Patch Grid.	➤ Medida de distribución y abundancia de parches. ➤ Es igual a cero cuando la distribución de parches observada es baja y se aproxima a uno cuando la distribución de los tipos de parches se vuelve más pareja. ➤ Está disponible únicamente a nivel de paisaje.
	Distancia media al vecino más cercano (m).	MNN	Lecos Patch Grid.	➤ Calcula un índice de vecino más cercano basado en la distancia promedio de cada característica a su característica vecina más cercana. ➤ Indica la distancia mínima que se debe recorrer para encontrar un parche de una misma categoría.
Métrica de densidad v	Tamaño medio del parche.	MPS	Lecos, Patch Grid.	➤ El área de parche promedio sirve como un índice de fragmentación. ➤ Un paisaje con un área de parche media más pequeña para el tipo de parche

Métrica de forma	Tipo	Métrica	id	Software	Definición e interpretación
					objetivo que otro paisaje podría considerarse más fragmentado.
	Número de Parches.	<i>NumP</i>	Lecos, Patch Grid.	➤	Se analiza a nivel de clase y de paisaje.
	Desviación estándar del tamaño del parche.	<i>PSSD</i>	Patch Grid.	➤	Es una medida de variación absoluta.
				➤	Es una función del tamaño medio del parche y la diferencia en el tamaño del parche entre parches. Su interpretación se realiza junto con el tamaño medio del parche.
	Mediana del tamaño del parche.	<i>MedPS</i>	Lecos, Patch Grid.	➤	El tamaño del parche medio, o percentil 50.
	Índice de diversidad de forma.	<i>MSI - SI</i>	Patch Grid.	➤	Cuando el índice de diversidad es 1, la forma del fragmento semeja un círculo, y a medida que éste va en aumento, la forma se torna más compleja e irregular y aumenta el efecto de borde de las áreas circundantes o adyacentes.
				➤	El índice de diversidad se agrupa en 5 rangos: • Redondo < 1.25 • Oval – redondo 1.25-1.50 • Oval – oblongo 1.50-1.75 • Rectangular 1.76-2 • Amorfo o irregular >2
	Índice de compactación.	<i>K</i>	Calculadora de campos.	➤	Indica el grado de fragilidad o exposición del fragmento a los efectos de la matriz. Varía entre cero, para fragmentos con mayor exposición periférica a la matriz circundante, y uno para fragmentos compactos o menos frágiles.

Tipo	Métrica	id	Software	Definición e interpretación
	Promedio de Dimensión Fractal.	MPFD	Lecos, Patch Grid.	➤ Es una medida de la complejidad de la forma. ➤ La dimensión fractal media se aproxima a uno para las formas con perímetros simples y se aproxima a dos cuando las formas son más complejas.

Fuente: Elaboración propia con datos de Lozano Botache et al., (2011); Mcgarigal, (2015); Patton, (1975); Pincheira-Ulbrich et al., (2009); Rempel et al., (2012).

Descripción del área de estudio

El CBLAT tiene una extensión de 33,908 ha. Se encuentra dentro de la cuenca del Lago Arenal (coordenadas geográficas del centroide; -84.87055, 10.48084) y esta a su vez dentro de la gran cuenca del río San Juan en la Vertiente Atlántica (**Figura 5**). La cuenca del Embalse Arenal tiene una extensión de 50,050 ha (Vargas y León, 2012). Se encuentra conformado por 14 sub cuencas, las cuales poseen gran importancia ecológica. todos los ríos provenientes de esta cuenca desembocan en el Lago Arenal, el cual posee una extensión de 8,017 ha (23.6 % del área del Corredor Biológico).

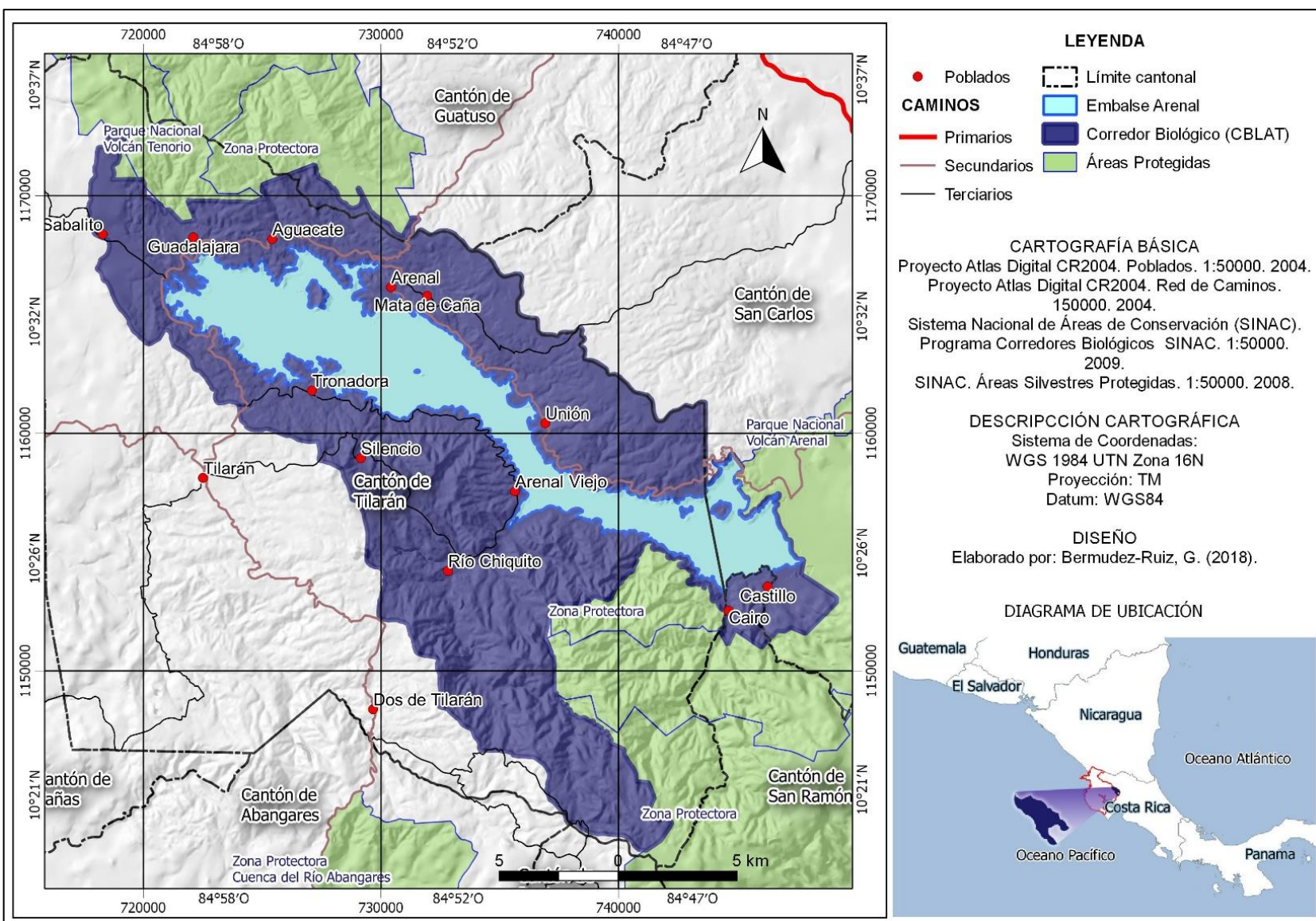


Figura 5. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, Ubicación Geográfica, 2017

El Corredor Biológico se encuentra en los cantones de Tilarán (92.3 %), San Carlos (5.3 %) y en San Ramón, Guatuso y Abangares en menor representación (2.4 %). Los centros de población más importantes son los poblados de Nuevo Tronadora, Tierras Morenas, Río Piedras, Río Chiquito, Silencio, Castillo, La Unión, Mata Caña, Arenal, Aguacate, San Luis y Viejo Arenal (Campos, 2012).

EL CBLAT colinda en el sector Noreste con Parque Nacional (PN) Volcán Tenorio y la Zona Protectora Tenorio, al Sureste con el PN Volcán Arenal, Zona Protectora Arenal-Monteverde **(Figura 5)**. Adicionalmente está conectado espacialmente al Noreste con el Corredor Biológico Ruta Los Malekus-Medio Queso y al Suroeste con el Corredor Biológico Pájaro Campana.

El clima de la región está dominado por el régimen atlántico (ausencia de período seco largo). Presenta una precipitación promedio 3569 mm anuales (min: 2100; máx.: 6000 mm), con temperatura promedio de 23 °C (min.: 10 °C; máx.: 28 °C). Recibe los vientos alisios del noreste, flujos del sur este, brisas marinas del sur oeste con velocidades entre 15-30 km/h (Aguilar, 1999).

La elevación máxima es de 1734 metros y la mínima es de 500 msnm. La zona se caracteriza por poseer un 38 % del área con pendiente de plano a ligeramente ondulado, un 39 % de moderadamente ondulado a ondulado y por ultimo un 23 % fuertemente ondulado, con mayor incidencia en el sector sur del CBLAT.

De acuerdo al sistema de clasificación de zonas de vida de L.R. Holdridge (CCT - MAG, 2004), se encuentra constituida principalmente por ocho Zonas de Vida: Bosque Pluvial Premontano (bp-P), Bosque Pluvial Montano Bajo (bp-MB), Bosque Muy Húmedo Tropical transición a premontano (bmh-T12), Bosque Muy Húmedo Premontano transición a pluvial (bmh-T12), Bosque Muy Húmedo Premontano (bmh-P), Bosque Muy Húmedo Montano Bajo (bmh-MB), Bosque Húmedo Tropical transición a premontano (bh-T12) y Bosque Húmedo Premontano (bh-T). La mayor parte del área del CBLAT es utilizada para la producción de ganadería de carne, de leche y doble propósito, y en menor cantidad la agricultura de carácter anual (frijoles, maíz, hortalizas), semipermanente (yuca, plátano), permanentes (café, frutales), cultivos de pastos (cultivos densos y porte rastreros) son presentes (Campos Castillo, 2012).

Según el Mapa de Tipo de Bosques de Costa Rica generado en formato vectorial elaborado por SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ, (2015), como producto del Inventario Forestal Nacional, hay un 33.3 % (11,438 ha) de cobertura forestal para el Corredor Biológico. Se estima que un 24.2 % (8,321 ha) del territorio corresponde a Bosque Maduro, un 9 % (3,096) a Bosque Secundario y 0.1 % (21 ha) corresponde a plantaciones forestales. Además, un 33.4 % (11,474 ha) corresponde a pastos y un 26.7 % (9,166 ha) corresponden a usos no forestales (uso agrícola, humedal, agua, suelo desnudo, arena e infraestructura). El 6.5 % (2,235 ha) del territorio no se logró identificar por los efectos de las nubes.

Antecedentes de la gestión territorial del Corredor Biológico

La Cuenca del Embalse Arenal, también conocida como “el Corazón energético de Costa Rica” es una de las regiones más estudiadas del país por sus grandes aportes a la producción energética nacional (Área de Conservación Arenal - ACA, 1992). En la década de los 90 se realizaron grandes esfuerzos para orientar la toma de decisiones de las instituciones del estado y de las instancias privadas para establecer políticas y estrategias de conservación y desarrollo socio productivo en la zona.

Es así como en el año 1992, se concreta un instrumento técnico científico llamado El Plan General de uso de la tierra para el ACA, preparado por un grupo multidisciplinario con el fin de lograr un desarrollo acorde a las características, potencialidades y los recursos naturales existentes (ACA, 1992). Este documento permitió realizar una caracterización física, natural y socioeconómico, además, propone el Uso Potencial de la Tierra y lineamientos de manejo, así como los programas y subprogramas seleccionados para poner en práctica su ejecución. El plan de manejo fue dividido en cinco tomos que comprende los antecedentes técnicos y administrativos, diagnósticos sectoriales, propuestas, programas y subprogramas, así como una memoria cartográfica.

En el área de Influencia del Corredor Biológico, se encuentra la Fundación para el Desarrollo del Área de Conservación Arenal (FUNDACA) creada el día 6 de diciembre de 1994, orientada a la gestión integral de recursos para el desarrollo socio ambiental en el espacio geográfico del ACAT y la zona de influencia. Además, tiene entre sus principales objetivos

la realización de actividades de extensión comunal, incentivando la participación de los ciudadanos en los programas de conservación y desarrollo sostenible, la promoción de actividades orientadas a la educación ambiental y la planificación, manejo, protección y la investigación de los recursos naturales y culturales (FUNDACA, 2014).

En consecuencia, el 21 de octubre de 1997, se creó la comisión de Implementación del Plan de Manejo y Desarrollo de la Cuenca del Embalse Arenal (Decreto 26395 - MINAE, 1997), cuya principal función fue la de canalizar los recursos técnicos, financieros y de infraestructura que se requerían para apoyar efectivamente la implementación del Plan de Manejo y Desarrollo de la Cuenca del Embalse Arenal. También establece la integración y organización administrativa interna de la Comisión

Adicionalmente el Consejo Local que conforma formalmente el CBLAT fue juramentado en el año 2010 (Campos, 2012). El CB busca mejorar la conectividad ecológica entre el PN Volcán Tenorio y PN Volcán Arenal, la protección y el manejo del ambiente, así como el mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades.

La Cuenca del Embalse es gestionado también por el ICE. El Decreto 5706 (Asamblea Legislativa, 1975), establece que el ICE procurará en forma directa o coordinada dar protección a las cuencas de los ríos cuyas aguas desembocan en el Embalse Arenal. Además, el ICE tiene como propósito conservar y defender los recursos hidráulicos del país, protegiendo las cuencas, las fuentes y los cauces de los ríos y corrientes de agua (Ley 449 - Poder Legislativo, 1949).

Sin embargo, considerando la necesidad de involucrar a las diferentes poblaciones bajo un esquema participativo de manejo de cuencas, en el proceso de conservación y manejo de los recursos naturales, se modificó los límites del Área de Conservación Arenal para incluir la parte media y baja de la cuenca hasta la desembocadura del Río Tempisque. Esto generó como resultado que las funciones iniciales de esta comisión para ejecutar el Plan de Manejo y Desarrollo de la Cuenca del Embalse Arenal, se proyecte e implemente con fundamento técnico y administrativo a la Cuenca Arenal-Tempisque, conformando la Comisión de Implementación y Desarrollo de la Cuenca Arenal Tempisque (CIDECAT), publicado en el Diario La Gaceta N° 170 del 4 de setiembre del 2012 (Decreto 37187 MINAET, 2012) derogando el Decreto 26395-MINAE.

LA CIDECAT tiene como objetivos promover la coordinación que determine el desarrollo de planes, programas y proyectos que respondan al manejo integral de los recursos de la Cuenca Arenal- Tempisque, logrando un equilibrio entre las necesidades de la población y la naturaleza. Además de efectuar las gestiones pertinentes para canalizar recursos de infraestructura, técnicos y financieros, a nivel interno o externo del país, para apoyar de manera efectiva la ejecución de acciones que promuevan el manejo integral de la Cuenca. Finalmente, la comisión tendrá que participar en el análisis, propuesta de soluciones y seguimiento a los diferentes problemas puntuales que se presentan en la Cuenca Arenal – Tempisque (Decreto 37187, 2012).

La Comisión mencionada anteriormente, está conformada por un representante del MINAE través de la Dirección del Área de Conservación Arenal –Tempisque (ACAT), Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ministerio de Salud, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Instituto Costarricense de Electricidad, Instituto de Desarrollo Agrario, Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento, Municipalidad de Cañas, Municipalidad de Tilarán, Fundación para el Desarrollo del Área de Conservación Arenal-Tempisque, Diócesis de Tilarán y de la sociedad civil nombrado por el Consejo Regional del Área de Conservación Arenal Tempisque (Decreto 37187, 2012)

Según Rojas (2014), el CIDECAT ha logrado reforestar más de 120 hectáreas con el apoyo de diversas instituciones y comunidades aledañas al Embalse, además de los cantones de Cañas y Tilarán. Adicionalmente ejecutó estudios de vulnerabilidad de acuíferos en la Cuenca del Embalse Arenal, mediante el apoyo y coordinación con la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica, la empresa privada y las instituciones que integran la Comisión. También implementó 10 biodigestores procesando 30 toneladas de estiércol que antes eran depositadas en quebradas que drenaban al Embalse Arenal.

Rojas (2014), señala que el CIDECAT enfrenta entre los principales retos la sostenibilidad financiera, el alcance de la comisión ha sido muy limitado en acciones y geografía, puesto que no contempla la visión de sistema de la cuenca y además que no existe un acompañamiento por parte del estado para promover el manejo de ambas cuencas. El mismo autor señala que el fracaso de los organismos de cuenca se debe principalmente a las limitaciones técnicas y presupuestarias, acompañado de una débil estructura organizativa,

falta de capacitaciones y empoderamiento, así como la ausencia de un respaldo legal eficiente que apoye la logística y vinculación de estos organismos.

Según Alfaro (2016) para la legislación ambiental del país, no hay claridad entre entes rectores y operadores, por lo que muchas de las instituciones nacionales tienen combinadas sus competencias, lo cual repercute en el diseño de los procesos de planificación estratégica y, por tanto, en la operación, este hecho repercute en la burocratización de acciones que llevan a la ingobernabilidad. Adicionalmente, la Ley de Aguas 276 relacionada directamente con el manejo de cuencas y de las áreas de protección no se ajusta a las necesidades de gestión del territorio.

Según se describe en el diagnóstico del sector forestal del Plan General de Uso de la Tierra (Mora, 1992), los proyectos que fueron sometidos a régimen forestal, que se establecieron en la cuenca y que se estima se ubican dentro del Corredor Biológico, enfrentaron entre las principales limitaciones la alta precipitación y humedad ambiental, alta nubosidad y por ende bajo número de horas de brillo solar y ausencia de meses secos. Además, se indica que la asistencia técnica a los productores fue insuficiente, baja calidad del material genético y con práctica de manejo incorrecto. Lo anterior generó un desinterés de los propietarios por reforestar para fines productivos.

El uso de sistemas agroforestales y silvopastoriles en la cuenca y por consiguiente en el Corredor Biológico, es muy reducido y se limita a sombras de repasto, cercas vivas y rompe vientos principalmente por la escasez de árboles maderables utilizados tradicionalmente para postería y que en las zonas de fuertes vientos las cercas vivas son poco utilizadas debido a que sufren volcamientos frecuentes (Mora, 1992). Es por lo anterior, que el establecimiento de una propuesta de manejo del CBLAT, debe tomar en cuenta las características del sitio, las condiciones biofísicas, sociales y económicas de la región.

CAPITULO III. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

Instrumentos

En el Corredor Biológico se realizó un análisis del cambio de cobertura y de fragmentación del paisaje, mediante el uso de los siguientes programas:

- QGIS. Es una aplicación SIG profesional que se basa en el Software Libre y de Código Abierto (FOSS). Se usaron los siguientes complementos:
 - SCP Plugin versión 5.3.11. Complemento de Clasificación Semi Automática, creado por Lucas Congedo. <https://fromgistors.blogspot.com/p/semi-automatic-classification-plugin.html>
 - LecoS - Landscape Ecology Statistics versión 2.0.7. Creado por Martin Jung para la cuantificación de índices de métricas de paisaje (Jung, 2016). Disponible en: <http://conservationecology.wordpress.com/lecos-land-cover-statistics/>
 - Además, se implementaron algoritmos de la caja de herramientas ORFEO: SAGA, GDAL/OGR y órdenes GRASS.
- Erdas Imagine versión 2014. Intergraph Corporation (HEXAGON), para las clasificaciones preliminares.
- Google Earth Pro para la visualización rápida y verificación de datos.
- ArcGIS 10.3 for Desktop. Environmental Systems Research Institute (Esri). 2016.
 - Extensión Patch Grid. (Rempel et al., 2012). Disponible en: <http://cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/>

Procedimientos

La representación esquemática de la metodología empleada para la consecución de los resultados en este estudio se brinda en el esquema a continuación (**Figura 6**).

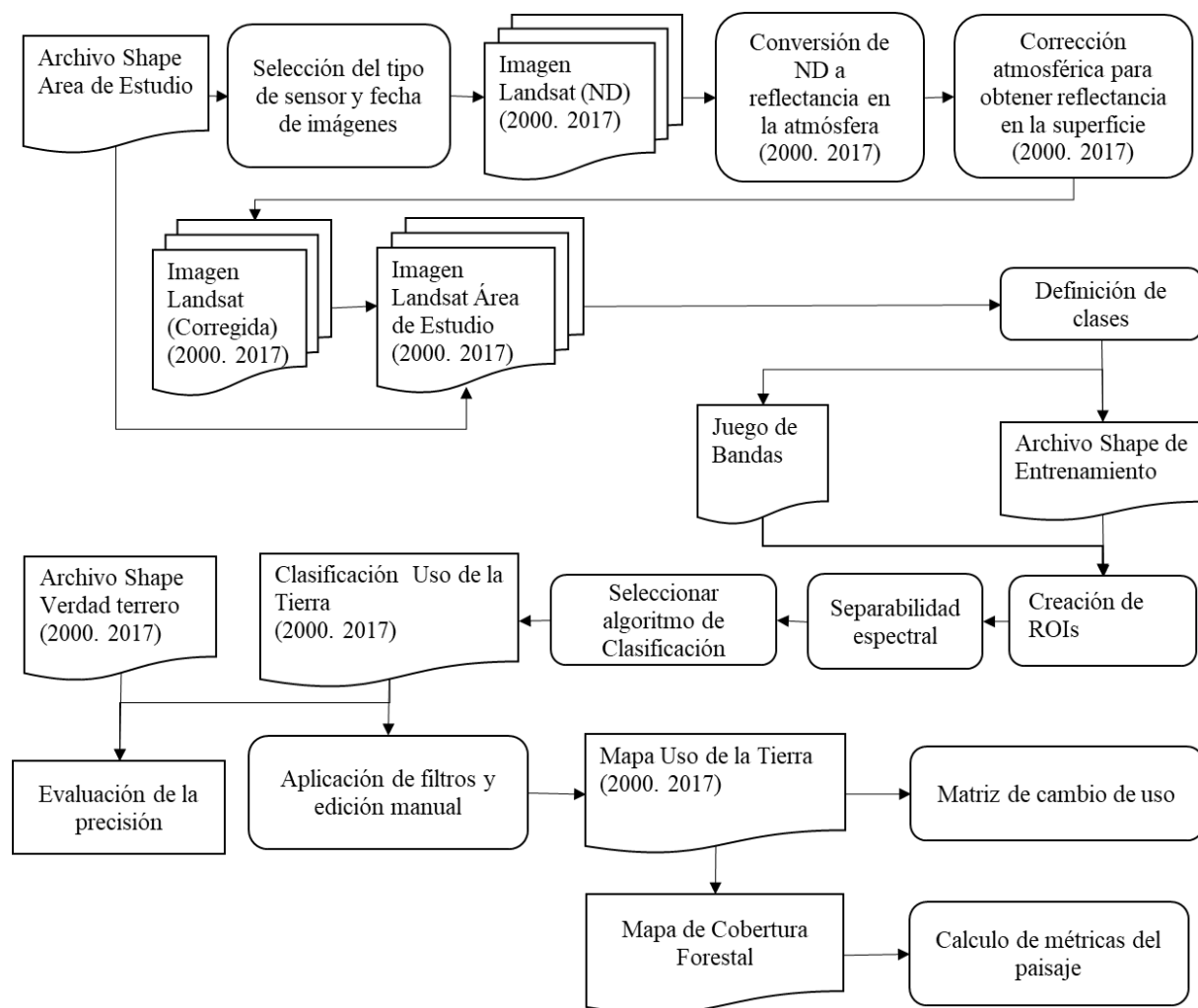


Figura 6. Esquema metodológico

Fuente: elaboración propia con datos de Rajendaran y Mani (2015).

Sistema de clasificación

El sistema de clasificación definido para el análisis de la cobertura de la tierra del Corredor Biológico contempla un total de siete categorías (macroclases), que posteriormente se reclasificaron en tipos de cobertura (forestal y no forestal), de utilidad para la creación del mapa de cobertura (**Cuadro 4**). Para facilitar la identificación individual de las áreas de entrenamiento en la interfaz de la aplicación, se codificaron usando valores que se especifican en la columna Clase_ID.

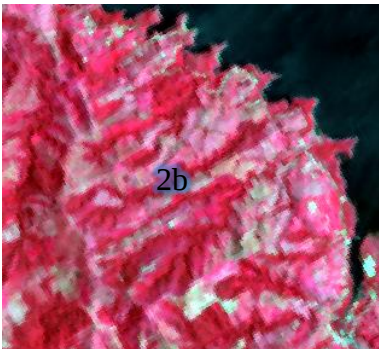
Cuadro 4. Leyenda temática para las categorías de uso de la tierra

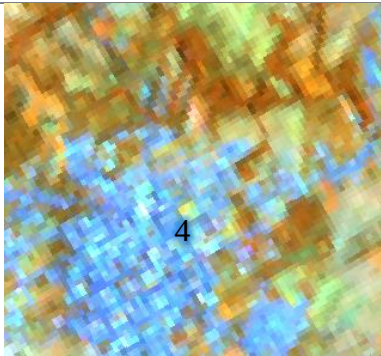
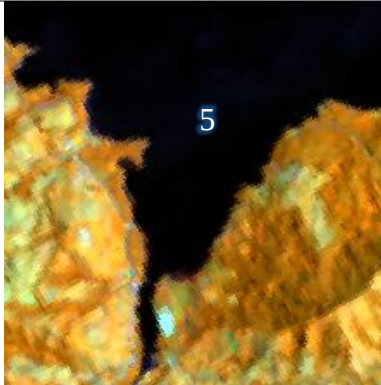
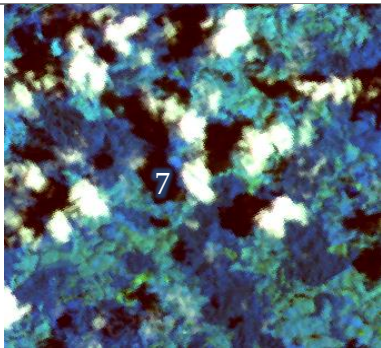
Macroclase_ID (MC_ID)	Clase_ID (C_ID)	Nombre de categoría (MC_Info)	Tipo de cobertura
1	100-199	Bosque Maduro	Forestal
2	200-299	Bosque Secundario	
3	300-399	Pasto - Charral	
4	400-499	Urbano	No Forestal
5	500-599	Cuerpos de Agua	
6	600-699	Nubes	
7	700-799	Sombras	No Clasificado

Fuente: elaboración propia.

En la interpretación de las unidades de cobertura y uso de la tierra, se usó como referencia el Manual para la interpretación de imágenes de sensores remotos de las principales coberturas y usos de la tierra de Costa Rica (Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), 2013) con los criterios ajustados a las categorías del área de estudio (**Cuadro 5**).

Cuadro 5. Descripción pictórico-morfológico de las categorías de uso de la tierra

Categoría	Descripción	Imagen de referencia
Bosque Maduro	En la composición RGB 4-5-3 el tono es café oscuro (1) , con apreciación de drenajes naturales en zonas de pendientes.	
Bosque Secundario	Presenta un patrón irregular, con la presencia intercalada de claros y otros elementos que denotan la presencia del hombre. Presenta una textura moderada con claros. En la composición RGB 4-3-2 es color rojo claro (2a) . En esta categoría se incluyen los bosques riparios asociados a los cursos de agua (2b) .	 
Pasto - Charral	De forma irregular asociado a los espacios naturales como bosque de galería, Bosque Maduro y Bosque Secundario. En la composición RGB 4-5-3 los colores varían del verde claro al anaranjado claro, así como colores cafés (3) .	

Categoría	Descripción	Imagen de referencia
Urbano	Pequeños cuadros en diferentes tonos celestes para la composición RGB 4-5-3 (4).	
Cuerpos de Agua	De textura fina, con variaciones de color de azul cuando el agua tiene muchas partículas en suspensión a negro cuando el agua es clara, para la composición RGB 4-5-3 (5).	
Nubes	Se representan en la mayoría de la combinación de bandas, especialmente en la composición RGB 3-2-1 y son muy fácil de identificar por su color blanco (6).	
Sombras	Se identifica fácilmente en la composición RGB 3-5-4, generalmente contiguo a las Nubes que le dan origen (7).	

Fuente: elaboración propia con datos del MAG (2013).

Selección de imágenes

Se utilizaron imágenes del programa Landsat obtenidas del portal de internet del Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey - USGS). En el caso de las imágenes del año 2000, a pesar de que la escena 1653 del 29 de enero de 2001 (Landsat 7 - sensor ETM) cubrió toda el área de estudio (**Figura 7**), fue necesario complementar con la escena 1553 del 14 de enero del 2001 (Landsat 5 - sensor TM) para compensar las áreas de Nubes y sombras. Para fines de este documento se referirá únicamente al año 2000.

Por otro lado, se usó imágenes de la misión Landsat 8 (escena 16053 - sensor OLI) del 18 de febrero de 2017 para el uso de la tierra del año 2017. Se seleccionó este período debido al interés del Consejo Local de CBLAT de establecer una base comparable con otros estudios a nivel nacional realizados en el año 2000, además de establecer una línea base del estado actual de la cobertura forestal para la toma de decisiones.



Figura 7. Representación gráfica de las escenas Landsat

Fuente: Elaboración propia con datos de USGS.

Corrección de las imágenes

Se realizó la calibración radiométrica en las imágenes de ambos períodos (2000 y 2017) utilizando las escenas completas, para convertir los valores digitales a reflectancia en la

superficie de la atmósfera o reflectancia sobre la atmósfera (TOA, top of atmosphere). El procedimiento se realizó para cada una de las bandas debido a que los parámetros de calibración son diferentes, excluyendo el Infrarrojo Térmico (banda seis en Landsat 5 y Landsat 7, bandas 10 y 11 en Landsat 8), por ser un poco sensibles para mostrar contrastes entre las cubiertas que forman la escena (Chuvieco, 1995). Este proceso se realizó con el complemento de Clasificación Semiautomática de QGIS, en donde se indicó la ubicación del directorio de los archivos de las bandas Landsat.

La corrección atmosférica se realizó mediante el método de Substracción de Objetos Oscuros (DOS1, por sus siglas en inglés) propuesto por Chavez (2006), incluido entre los parámetros de corrección de la herramienta SCP. Los valores de los parámetros del tipo de sensor, fecha de adquisición de la imagen, elevación del sol (grados) y distancia tierra sol, se obtuvieron del archivo “header” de la imagen en formato MTL. Además, se obtuvo los factores de corrección de los detectores del Thematic Mapper, necesarios para la obtención de la irradianza exo-atmosférica (radianza espectral máxima (LMAX) y mínima (LMIN)).

Seguidamente, se realizó el recorte de los archivos de imagen de cada banda, usando los límites definidos por el Corredor Biológico, donde se consideró un área buffer de 500 metros para asegurar continuidad espacial, especialmente en la aplicación de filtros de generalización que se detallan más adelante.

Creación de archivo multiespectral

Se generó un archivo de juego de bandas mediante el complemento SCP de QGIS, para las bandas del espectro visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (SWIR2). Se estableció la unidad de longitud de onda (μm – 6m) y el centro de longitud de onda para cada banda del sensor según los parámetros de configuración almacenados en la aplicación, los cuales se verificaron con los puntos medios establecidos en la descripción de los productos.

Clasificación de imágenes y Regiones de Interés

Se realizó una clasificación no supervisada preliminar mediante el uso del software ERDAS Imagine 2014 para el año 2000 y 2017. Debido a que se obtuvo una alta confusión de firmas de las áreas urbanas con otras clases temáticas, se optó por realizar un levantamiento manual mediante fotointerpretación, que permitió elaborar una capa máscara para excluir estas áreas manualmente. La máscara de áreas urbanas se usó en ambos períodos, debido a que los cambios fueron pocos significativos en el área de estudio. Este proceso se realizó con la herramienta de Extracción usando los geoalgoritmos GDAL/OGR del software QGIS.

En seguida se procedió con la clasificación supervisada de las imágenes del año 2000 y 2017. Primeramente, se establecieron las capas de entrada de datos que comprendió el juego de bandas (archivo multiespectral) y un archivo de áreas de entrenamiento para cada imagen, donde se almacenó los valores de las firmas espectrales.

Seguidamente, se establecieron en la imagen campos de entrenamiento representativos de cada categoría de cobertura y uso de la tierra. Para definir el tamaño mínimo de la muestra, se utilizó el criterio general, donde el campo de entrenamiento o la región de interés (ROI) debe ser mayor al resultado del número de bandas + 1, lo que permite asegurar representatividad estadística de la misma. Los campos de entrenamiento se digitalizaron apoyándose en imágenes históricas, composiciones en falso color de las escenas y aplicación de realces, que permitieron identificar las diferentes clases temáticas.

Análisis de separabilidad

Se realizó una evaluación estadística de la separabilidad espectral de las clases. Se verificó la superposición de clases, tomando en cuenta la desviación estándar y el rango mínimo y máximo. Para ello se realizó un diagrama de firmas donde se ubicaron en las abscisas las bandas que se incluyeron en el análisis, y en las ordenadas los ND medios de cada categoría.

Agrupación espectral

Se aplicó la función de máxima probabilidad por ser el más empleado en teledetección (Chuvieco, 1996), en la que cada píxel es asignado a la clase de mayor probabilidad de pertenencia, basado en la información espectral de la imagen. Para evaluar la separabilidad espectral, se utilizaron los siguientes criterios:

- | | |
|---------------------------|--|
| Separabilidad > 1.9: | buena separación entre las clases. |
| 1 > separabilidad > 1.9 : | se requiere revisión de muestras para reubicación o eliminación de ROIs. |
| Separabilidad < 1: | se requiere unir clases (merge ROIs). |

Validación de resultados

Diseño y tamaño de la muestra

Se procedió con la creación de una maya de puntos aleatorios sobre el área del Corredor Biológico. Se usó la herramienta de creación de puntos aleatorios dentro de polígonos disponible en el programa QGIS, para garantizar muestras representativas en cada clase de cobertura. Adicionalmente se estableció una distancia de al menos 1 km entre puntos basado en el criterio de Cabrera et al. (2011).

Para seleccionar el tamaño de la muestra se aplicó la siguiente fórmula:

$$n = (z^2 p q) \cdot (E^2)^{-1}$$

Donde:

- z = es la abscisa de la curva normal para un nivel determinado de probabilidad (1.96).
- p = porcentaje de aciertos estimados (85 %).
- q = porcentaje de errores estimados ($q = 1-p$) (15 %).
- e = nivel permitido de error.

Se definió un porcentaje de aciertos estimados del 80 % y un nivel de error del 5 %.

Se contó con la participación independiente de un especialista en SIG del SINAC en conjunto con el Consejo Local del Corredor Biológico quienes fueron designados como “Validadores

de la clasificación de imágenes”. La clasificación en pantalla del uso de la tierra para el año 2000 se apoyó usando las Ortofotos 2005 del Programa de Regularización del Catastro y Registro (PRCR). El uso de la tierra del año 2017, se apoyó usando combinaciones de bandas de las imágenes del sensor Sentinel 2 (L1C_T16PGS_A008245_20170119T162005), así como imágenes históricas de la plataforma Google Earth Pro. Se usó el complemento GearthView para sincronizar Google Earth con QGIS, lo que facilitó la edición de las capas.

La maya de puntos Test, se usó para obtener valores de firmas espectrales usando el Algoritmo de Región Incremental, con valores de distancia espectral entre los píxeles de origen y los píxeles del alrededor de $0.01 \mu\text{m}$ y los polígonos de ancho máximo de 100 píxeles centrado en el pixel de origen. En el caso de las clases representadas por Nubes y sombras, se establecieron unidades de muestreo adicionales por su baja representación en la imagen.

Matriz de confusión

Posterior a la fase de muestreo y con la lista de puntos test se formó una matriz que presentó los conflictos que se presentaron entre la cobertura real y la deducida de la clasificación. En la matriz las filas fueron ocupadas por las clases de referencia y en las columnas por las categorías deducidas de la clasificación. El análisis se realizó según los siguientes criterios de interpretación (Chuvieco, 1995):

- Diagonal = expresa el número de puntos de verificación en donde se generó acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad).
- Marginales = supone errores de asignación.
- Residuales en filas = indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa (Errores de Omisión).
- Residuales en columna = implican cubiertas del mapa que no se ajustaron a la realidad (Errores de Comisión).

Fiabilidad global

La fiabilidad global del mapa se calculó a partir de la matriz de confusión, relacionando los elementos de la diagonal o píxeles clasificados correctamente, con el total de puntos muestreados o lugares de referencia (Chuvieco, 1995), según la siguiente fórmula:

$$F_m = \sum X_i \cdot (\sum X_{ij})^{-1} 100$$

Donde:

- F_m es el porcentaje de exactitud o fiabilidad global
- $\sum X_i$ es la suma de píxeles asignados correctamente
- $\sum X_{ij}$ es la suma de puntos muestreados para la elaboración de la matriz

Errores de omisión y comisión

Los errores de omisión se estimaron usando las celdillas marginales de las filas, indicando el porcentaje de píxeles que perteneciendo a una determinada categoría no fueron incluidos en ella.

mediante la siguiente formula:

$$E_{o,i} = (X_i - X_{ij}) \cdot X_j^{-1}$$

En donde:

X_i = indica el marginal de la fila i

X_{ij} = indica la diagonal de dicha fila

Los errores de comisión se calcularon usando las celdillas no diagonales de las columnas, representando los píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra mediante la siguiente formula:

$$E_{ci} = (X_i - X_{ij}) \cdot X_j^{-1}$$

En donde:

X_i = indica el marginal de la columna i

X_{ij} = indica la diagonal de dicha columna

Exactitud del usuario y del productor

La precisión del productor se calculó dividiendo el número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría por el número total de píxeles que fueron clasificados en dicha categoría:

$$P_p = X_{ii} \cdot X_{\Sigma i}^{-1}$$

Donde:

- P = Precisión del productor.
- X_{ii} = Pixel correctamente clasificado en cada categoría
- $X_{\Sigma i}$ = Número de píxeles de referencia utilizados para la categoría

La precisión del usuario se calculó de dividir el número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría por el número de píxeles de referencia utilizados para dicha categoría

$$P_u = X_{ii} \cdot X_{i\Sigma}^{-1}$$

Donde:

- P = Precisión del productor.
- X_{ii} = Pixel correctamente clasificado en cada categoría
- $X_{i\Sigma}$ = Número de píxeles de referencia utilizados para la categoría

Índice de kappa (k)

Según (Chuvieco , 1996) este índice mide la diferencia entre el acuerdo mapa – realidad observado y el que debería esperar simplemente por azar. Además, intenta delimitar el grado

de ajuste debido solo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo solo del causado por factores aleatorios.

Un valor de k igual a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar (Chuvieco , 1996). Se consideran tres clases de resultados: un valor k menor que 0.4 representa una concordancia pobre; un valor entre 0.4 y 0.8, una concordancia moderada y un valor mayor de 0.8, una fuerte concordancia (Morales-Hernández y Carrillo-González, 2016).

La estimación de K se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$K = (N \sum_{i=1,n} X_{ii} - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{i+}) / (N^2 - \sum_{i=1,n} X_{i+} X_{i+})$$

Donde:

N es igual al total de datos muestreados

X_{ii} indica el acuerdo observado (diagonal de la matriz)

$X_{i+} X_{i+}$ indica el acuerdo esperado en cada categoría i .

Suavización de los resultados

Se realizó una generalización de la clasificación mediante la aplicación de filtros, de manera que las clases dominantes absorbieron estas unidades, usando las herramientas de postproceso del complemento SCP. Se estableció un área mínima de mapeo de 1 ha. Se definió como datos de entrada el tamaño del umbral en unidades de píxeles (12px) y la conexión de píxeles (4), este último representa una ventana en donde los píxeles diagonales no son considerados conectados.

Edición visual y afinamiento de la clasificación

Para realizar un afinamiento en la consistencia de las unidades temáticas, se exportó la clasificación en formato Shapefile (formato nativo de ArcGIS) usando la herramienta de Clasificación a vectorial del complemento SCP de QGIS.

Se aplicó un enmascaramiento de Nubes y sombras en la clasificación del año 2000, para reducir el porcentaje de áreas sin clasificar. Se usó la capa de clasificación de la imagen Landsat 7 como imagen base. Para esto, se realizó una conversión de formato raster a vectorial y se generó dos capas vectoriales correspondientes a la clasificación de la imagen de referencia; por un lado, se generó una capa con las clases 1, 2, 3 y 5 correspondiente a las clasificaciones que permaneció en la imagen, por otro, se generó una capa con las clases 6 y 7 que permitieron extraer las áreas clasificadas de la imagen landsat 5. Para generar la capa de clasificación del uso de la tierra del año 2000, se convirtieron las capas anteriores a formato raster y se realizó una combinación de capas mediante la herramienta “Miscelánea” del algoritmo GDAL. El archivo resultante se convirtió nuevamente en formato vectorial. La capa de la clasificación del año 2017 no requirió del proceso de enmascaramiento de Nubes.

Se procedió a la unión de la capa del proceso anterior, con la capa respectiva de áreas urbanas (MC_ID = 4), tanto para el año 2000 y 2017. El Uso Urbano se generó mediante levantamiento visual en las Ortofotos 2005 del Programa de Regularización del Catastro y Registro (PRCR), imágenes de Google Earth e imágenes satelitales RapidEye 2012. En este proceso también se afinó la clase 5 (Cuerpos de Agua), por ser muy similar en ambos periodos. Adicionalmente se realizó un afinamiento manual en las clases de Nubes y Sombras.

El producto resultante, se convirtió en formato raster (TIFF) y se recortó utilizando la capa del Corredor Biológico como capa de borde. Finalmente, se le aplicó un filtro para excluir aquellas áreas menores a 1 ha (12 px), generando las capas de uso de la tierra del año 2000 y 2017.

Detección de cambios

El análisis de cambio del uso de la tierra se realizó comparando la clasificación de las imágenes de las dos fechas, utilizando como herramienta la matriz de transición generada mediante el reporte de la herramienta Cambio de Cobertura del Suelo del complemento SCP. Se realizó una tabla que contiene en las filas las clases del primer año (2000) y en las columnas las clases del segundo año (2017). Los datos de la diagonal principal de la tabla correspondieron a las áreas que permanecieron en la misma clase en las dos fechas (intactas), mientras que aquellos fuera de la diagonal, correspondieron a las áreas que presentaron transición de una clase a otra entre el año 2000 y 2017, siendo las pérdidas representadas por filas y las ganancias por columnas (**Cuadro 6**).

Para el cálculo de cambio de uso de la tierra se excluyeron las áreas cubiertas por Nubes y Sombras de ambos períodos y que no lograron clasificarse. Este proceso se realizó mediante una máscara que se generó a partir de la herramienta de selección, excluyendo aquellos objetos espaciales identificados en la columna de código de cambio “ChangeCode” que contenían las clases de Nubes y Sombras en las clase de referencia (2000) y la nueva clase (2017).

Cuadro 6. Matriz de cambio para la comparación de mapas de diferentes tiempos, con pérdidas y ganancias

Tiempo1	Tiempo 2				Total Tiempo 1	Pérdidas
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4		
Categoría 1	P11	P12	P13	P14	P1+	P1+ - P11
Categoría 2	P21	P22	P23	P24	P2+	P2+ - P22
Categoría 3	P31	P32	P33	P34	P3+	P3+ - P33
Categoría 4	P41	P42	P43	P44	P4+	P4+ - P44
Total Tiempo 2	P+1	P+2	P+3	P+4	1	
Ganancias (ha)	P+1 - P11	P+2 - P22	P+3 - P33	P+4 - P44		

Fuente: Pontius, Shusas y McEachern, (2004).

A partir de la matriz anterior (**Cuadro 6**), se aplicó una metodología desarrollada por (Pontius et al., 2004), que permite analizar los cambios que ocurren fuera de la diagonal, la

cual considera las ganancias y pérdidas por separado. Se realizaron los siguientes cálculos
(Cuadro 7):

Cuadro 7. Ecuaciones para determinar cambios entre categorías considerando las pérdidas y ganancias

Indicador	Expresión matemática	Descripción
Ganancia (G_{ij})	$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj}$	Es la diferencia entre la columna del total del tiempo 2 (P_{+j}) y la persistencia (P_{jj})
Pérdida (L_{ij})	$L_{ij} = P_{j+} - P_{jj}$	Es la diferencia entre la fila del total del tiempo 1 (P_{j+}) y la persistencia (P_{jj}).
Cambio neto (D_j)	$D_j = P_{+j} - P_{j+} $	Se define como el valor absoluto de la diferencia de las pérdidas y las ganancias de cada categoría.
Intercambio entre categorías (S_j)	$S_j = 2 \cdot \text{MIN} (P_{j+} - P_{jj}, P_{+j} - P_{jj})$	Se calcula como dos veces el valor mínimo de las ganancias y las pérdidas
Cambio total para cada categoría (C_j)	$C_j = (D_j + S_j)$	Se establece como la suma del cambio neto (D_j) y el intercambio (S_j)
Tasa de deforestación	$Td = [(S2/S1)^{(1/n)} - 1] \cdot 100$	- Td, es igual a la tasa de deforestación anual en tanto por ciento - S2, es igual al área arbolada en el año final - S1, es igual al área arbolada en el año inicial - n, igual al número de años del periodo de análisis.

Fuente: Elaborado con datos de Pineda, Bosque, Gómez y Plata, (2009); Pontius et al., (2004).

Cálculo de métricas de paisaje para el estado de fragmentación

Para realizar el análisis de fragmentación y conocer el estado del paisaje se usó la clase de Bosque Maduro (MC_id =1), Bosque Secundario (MC_id = 2) y No Forestal (MC_id = 3, 4, 5, 6 y 7). La unidad mínima de mapeo fue de 1 ha (12 píxeles). Para recodificar las clases se empleó el complemento SCP de QGIS. El análisis se realizó en formato vectorial y se utilizó el complemento LecoS - Landscape Ecology Statistics del repositorio del Software QGIS y la extensión Patch Grid para Arc Gis.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSION

A partir de la corrección radiométrica y atmosférica de las imágenes Landsat se obtuvo los valores de las firmas espectrales. Se obtuvo una separabilidad confiable tanto para la escena 1653 (**Gráfico 1, Anexo 1**) y 1553 (**Gráfico 2, Anexo 2**) correspondientes al año 2000, como en la escena 1653 correspondiente al año 2017 (**Gráfico 3, Anexo 3**). No obstante, es importante considerar las estadísticas de entrenamiento que presenta la comparación entre firmas espectrales de Bosque Maduro y Bosque Secundario para el año 2000 son relativamente bajas, aplicando el algoritmo Jeffries-Matusita distance, con valores de 1.306 y 1.089 para las escenas 1653 y 1553 respectivamente (**Anexo 4**). No fue posible obtener una mayor separabilidad entre la clase Bosque Maduro y Bosque Secundario, posiblemente debido a la dificultad de discriminación de estas coberturas en la imagen. Es importante resaltar que el Uso Urbano no fue considerado en la clasificación en ambos períodos, por lo que fue necesario incorporar los polígonos posteriormente, mediante edición manual.

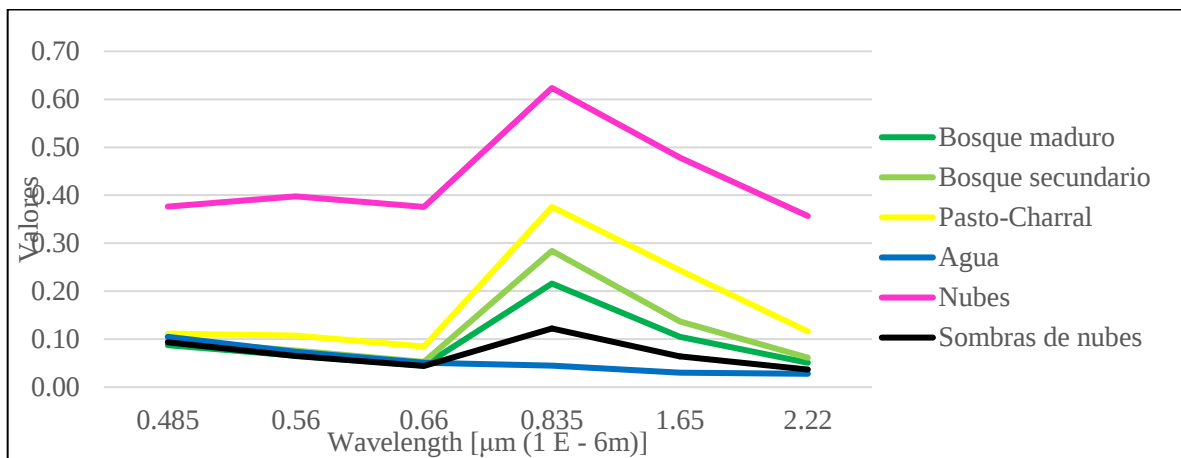


Gráfico 1. Valores de firmas espectrales para la imagen del año 2000 (Escena 1653 – Landsat 7)

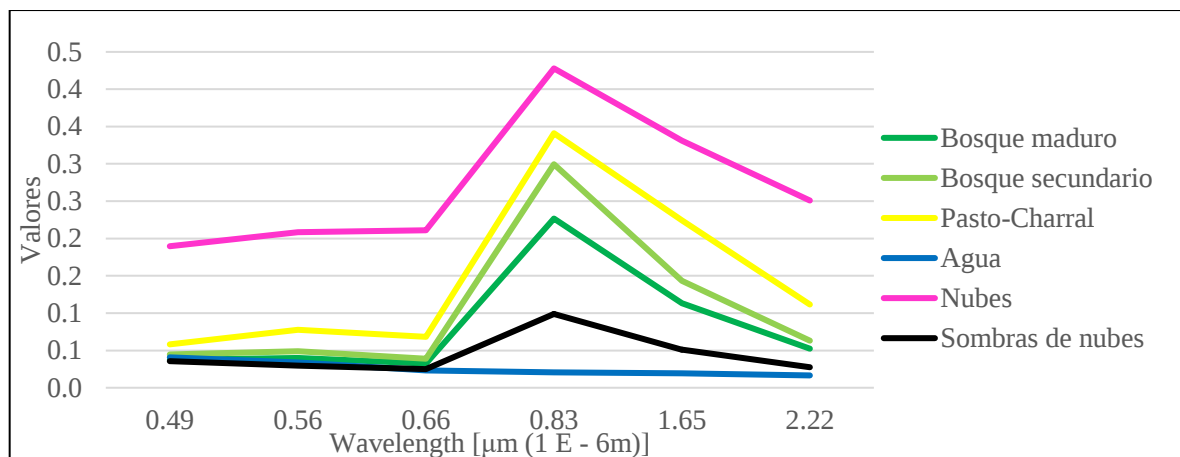


Gráfico 2. Valores de firmas espectrales para la imagen del año 2000 (Escena 1553 - Landsat 5)

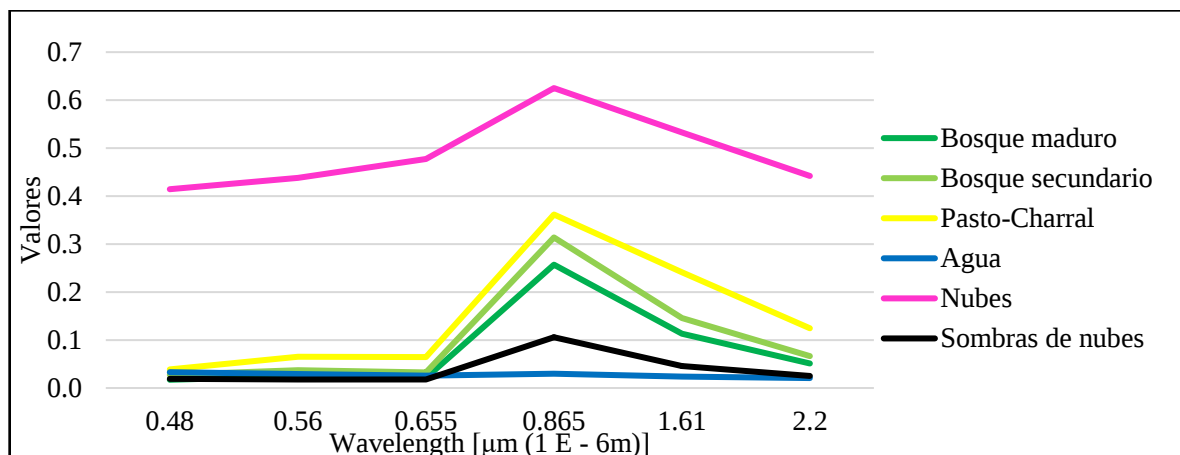


Gráfico 3. Valores de firmas espectrales para la imagen del año 2017 (Escena 1553 – Landsat 8)

A partir de la maya de puntos aleatorios (**Anexo 5, Anexo 6 y Anexo 7**), se obtuvo la matriz de confusión correspondiente a la clasificación de los períodos de evaluación para su validación. La precisión global de las escenas 1653 y 1553 fue de 99.73 y de 99.34 respectivamente para las imágenes del año 2000 (**Cuadro 8 y 9**). Se obtuvieron errores de omisión relativamente bajos, lo que indica una alta probabilidad de que la superficie ocupada por estas clases de cobertura está realmente incluida en el mapa, excepto para la clase de Bosque Secundario de la imagen Landsat 5 con un error del 18.4 %. Esta última imagen se usó únicamente para enmascarar el área de Nubes y sombras de la imagen Landsat 7. Además, en la imagen Landsat 5 se obtiene errores de comisión cercanos al 20 % en la Clase 1 (Bosque Maduro),

lo que representa el porcentaje de riesgo del usuario en el uso de la información de estas zonas enmascaradas.

Cuadro 8. Matriz de confusión de la clasificación del uso de la tierra para el año 2000 (escena 1653-Lansat 7)

	Clases	Clasificación						Total	Ex.P. (%)	E.O. (%)	Coeficiente Kappa
		1	2	3	5	6	7				
Referencia	1	342	3	0	0	0	4	349	98.0	2.0	0.90
	2	30	358	4	0	0	0	392	91.3	8.7	0.89
	3	6	25	616	0	0	0	647	95.2	4.8	0.95
	5	0	0	0	39,074	0	0	39,074	100.0	0.0	1.00
	6	0	0	28	0	3,969	0	3,997	99.3	0.7	1.00
	7	4	17	0	0	2	302	325	92.9	7.1	0.99
	Total	382	403	648	39,074	3,971	306	44,784	99.73		0.99
	Ex.U. (%)	89.5	88.8	95.1	100.0	99.9	98.7				
	E.C. (%)	10.5	11.2	4.9	0.0	0.1	1.3				

Nota: Ex. P: exactitud del productor; Ex. U: exactitud del usuario; E.O: errores de omisión y E.C: errores de comisión

Cuadro 9. Matriz de confusión de la clasificación del uso de la tierra para el año 2000 (escena 1553 - Landsat 5)

	Clases	Clasificación						Total	Ex.P. (%)	E.O. (%)	Coeficiente Kappa
		1	2	3	5	6	7				
Referencia	1	381	12	0	0	0	5	398	95.7	4.3	0.8
	2	88	892	111	0	2	0	1,093	81.6	18.4	0.97
	3	5	16	781	0	31	0	833	93.8	6.2	0.87
	5	0	0	0	38,554	0	0	38,554	100	0.0	1.00
	6	0	0	0	0	148	0	148	100	0.0	0.82
	7	1	0	0	0	0	42	43	97.7	2.3	0.89
	Total	475	920	892	38,554	181	47	41,069	99.34		0.94
	Ex.U. (%)	80.2	97.0	87.6	100.0	81.8	89.4				
	E.C. (%)	19.8	3.0	12.4	0.0	18.2	10.6				

Nota: Ex. P: exactitud del productor; Ex. U: exactitud del usuario; E.O: errores de omisión y E.C. errores de comisión.

La precisión para el año 2017 fue de 99.21 % (**Cuadro 10**). En las clases de cobertura forestal (Clase 1 y 2) la exactitud del productor supera el 95 %, por lo que las superficies fueron discriminadas adecuadamente en la clasificación. En lo que respecta a la exactitud del usuario para el Bosque Secundario, nueve de cada 10 de las zonas clasificadas como Bosque Secundario realmente lo es, cumpliendo con un porcentaje de acierto aceptable.

En lo concerniente al índice de Kappa se obtuvieron valores de 0.99 y 0.94 para la clasificación del año 2000 (**Cuadro 8 y 9**) y 0.93 para la clasificación del año 2017 (**Cuadro 10**), por lo que las clasificaciones realizadas se aproximan a 1, lo que indica una fuerte concordancia entre la realidad y el mapa.

Cuadro 10. Matriz de confusión de la clasificación del uso de la tierra para el año 2017

	Clases	Clasificación						Total	Ex.P. (%)	E.O. (%)	Coefficiente Kappa
		1	2	3	5	6	7				
Referencia	1	578	17	1	0	3	3	602	96.0	4.0	0.97
	2	9	368	4	0	1	2	384	95.8	4.2	0.9
	3	1	11	522	0	0	0	534	97.8	2.3	0.99
	5	0	10	0	60,551	270	168	60,999	99.3	0.7	1
	6	0	0	1	0	1,309	0	1,310	99.9	0.1	0.82
	7	5	4	0	0	0	786	795	98.9	1.1	0.82
	Total	593	410	528	60,551	1,583	959	64,624	99.21		0.93
	Ex.U. (%)	97.5	89.8	98.9	100.0	82.7	82.0				
	E.C. (%)	2.5	10.2	1.1	0.0	17.3	18.0				

Nota: Ex. P. exactitud del productor; Ex. U. exactitud del usuario; E.O. errores de omisión y E.C. errores de comisión.

Uso de la tierra y detección de cambios

La detección de cambios, para efecto de análisis se realizó excluyendo la Clase 6 y 7 (Nubes y Sombras), correspondientes a las áreas sin clasificar de ambos períodos, para un área total efectiva de 30,105.18 ha (88.76 %). Estas áreas fueron excluidas debido que no fue posible clasificar el 100 % de la superficie del Corredor Biológico. Los porcentajes de área sin clasificar correspondieron a 5.68 % (1,926 ha) y 8.26 % (2,800 ha) para los años 2000 y 2017 respectivamente.

En el año 2000, el área de cobertura forestal (Bosque Maduro y Bosque Secundario) ocupó un 40.21 % (12,107 ha) de la superficie clasificada del Corredor Biológico (**Cuadro 11**), los Pastos Y Charrales un 29.49 % (8,879 ha), el Uso Urbano un 1.73 % (520 ha), mientras que los Cuerpos de Agua ocuparon un 28.56 % (8,599 ha) Para el año 2017 la cobertura forestal ocupó un 38.18 % (11,796 ha), los Pastos y Charrales 30.24 % (9,105 ha), el Uso Urbano 1.76 % (531 ha) y los Cuerpos de Agua un 28.81 % (8,673 ha).

Cuadro 11. Inventario del uso de la tierra mediante clasificación de Imágenes Landsat del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio

Clase	Nombre de la Clase	Cobertura 2000			Cobertura 2017		
		Σ Píxeles	Área (ha)	%	Σ Píxeles	Área (ha)	%
1	Bosque Maduro	45,229	4,071	13.52	55,644	5,008	16.63
2	Bosque Secundario	89,289	8,036	26.69	75,421	6,788	22.55
3	Pasto Charral	98,659	8,879	29.49	101,166	9,105	30.24
4	Urbano	5,782	520	1.73	5,900	531	1.76
5	Cuerpos de Agua	95,543	8,599	28.56	96,371	8,673	28.81

Al comparar porcentualmente los resultados obtenidos por Morera y Sandoval, (2016) para el año 2000 donde se evaluó la cobertura boscosa a nivel de Áreas de Conservación usando imágenes Landsat, se obtiene que a nivel de Corredor Biológico (excluyendo las áreas de Nubes), los resultados son similares, puesto que obtienen un 43.78 % de cobertura forestal, de los cuales un 13.4 % correspondió a Bosque de Alta Densidad (Bosque Maduro) y un 30.5 % a Bosque de Baja Densidad (Bosque Secundario). Adicionalmente un 31.5 % de la cobertura se clasificó como áreas de pastos, y un 24.96 % de Cuerpos de Agua (**Figura 8**).

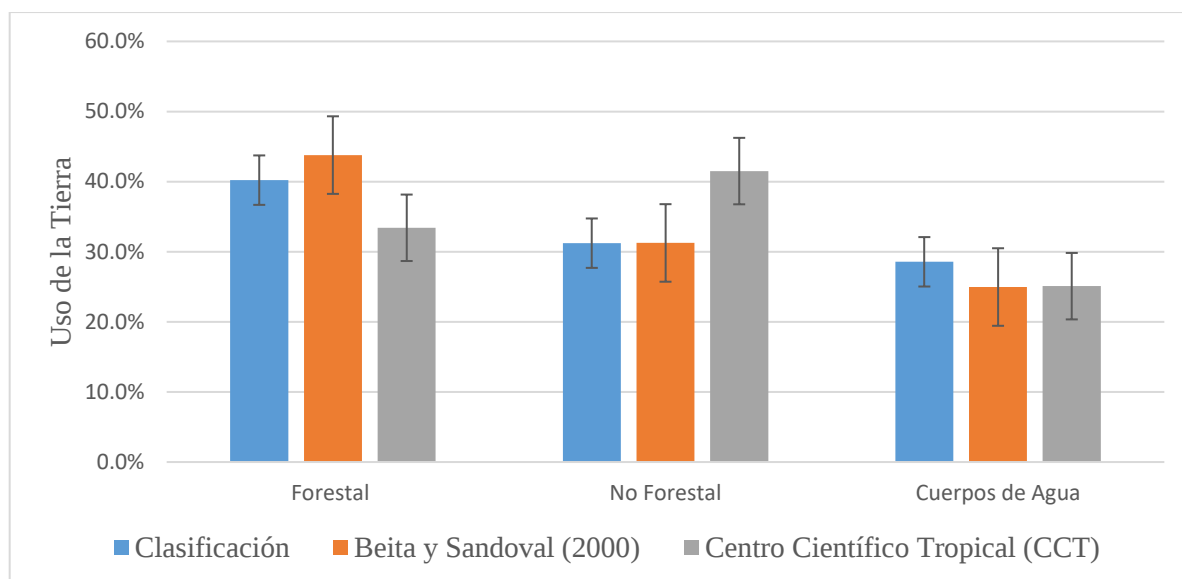


Figura 8. Uso de la tierra del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio para el año 2000 según fuentes de información

Fuente: elaboración propia con datos de Calvo (2009); Morera y Sandoval (2016).

Sin embargo, el Mapa de Cobertura del año 2000 para Costa Rica elaborado por el Laboratorio de Sistemas de Observación Terrestre (EOSL) del Departamento de Ciencias de la Tierra y la Atmósfera de la Universidad de Alberta estableció un 33.90 % de cobertura boscosa para el Corredor Biológico (Calvo, 2009), mientras que un 41.52 % se clasificó como Agropecuario (Pastos -Charral y cultivos), con una precisión global de 92 % (**Figura 8**). Estas diferencias entre las clasificaciones podrían estar relacionadas con el algoritmo de clasificación empleado, el nivel de precisión y el número de áreas de entrenamiento establecidas dentro del Corredor Biológico.

Por otra parte, al contrastar el uso de la tierra del año 2000 (**Figura 9**) con respecto al año 2017 (**Figura 10**), se obtiene que un 81.76 % del uso de la tierra clasificado se ha mantenido intacta o persistente, mientras que el restante 18.23 % ha sufrido de algún cambio (ganancia o pérdida) en 17 años, lo que representa en términos absolutos un total de 5,488 ha (**Figura 11**). Las zonas con mayores cambios entre clases, se observan al costado este de los poblados de La Unión y El Castillo, posiblemente por mayor influencia de efectos antropogénicos.

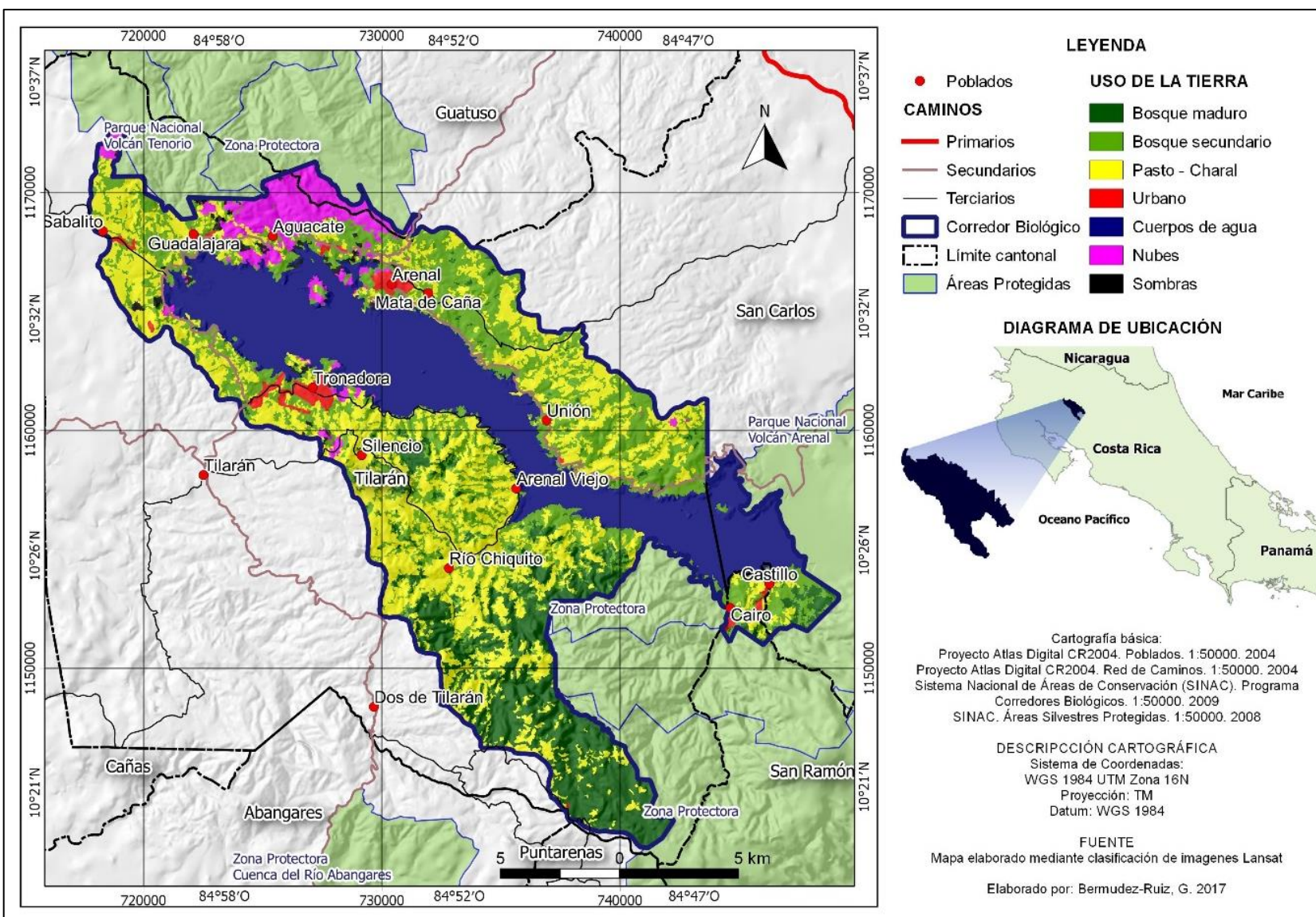


Figura 9. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, uso de la tierra, 2000

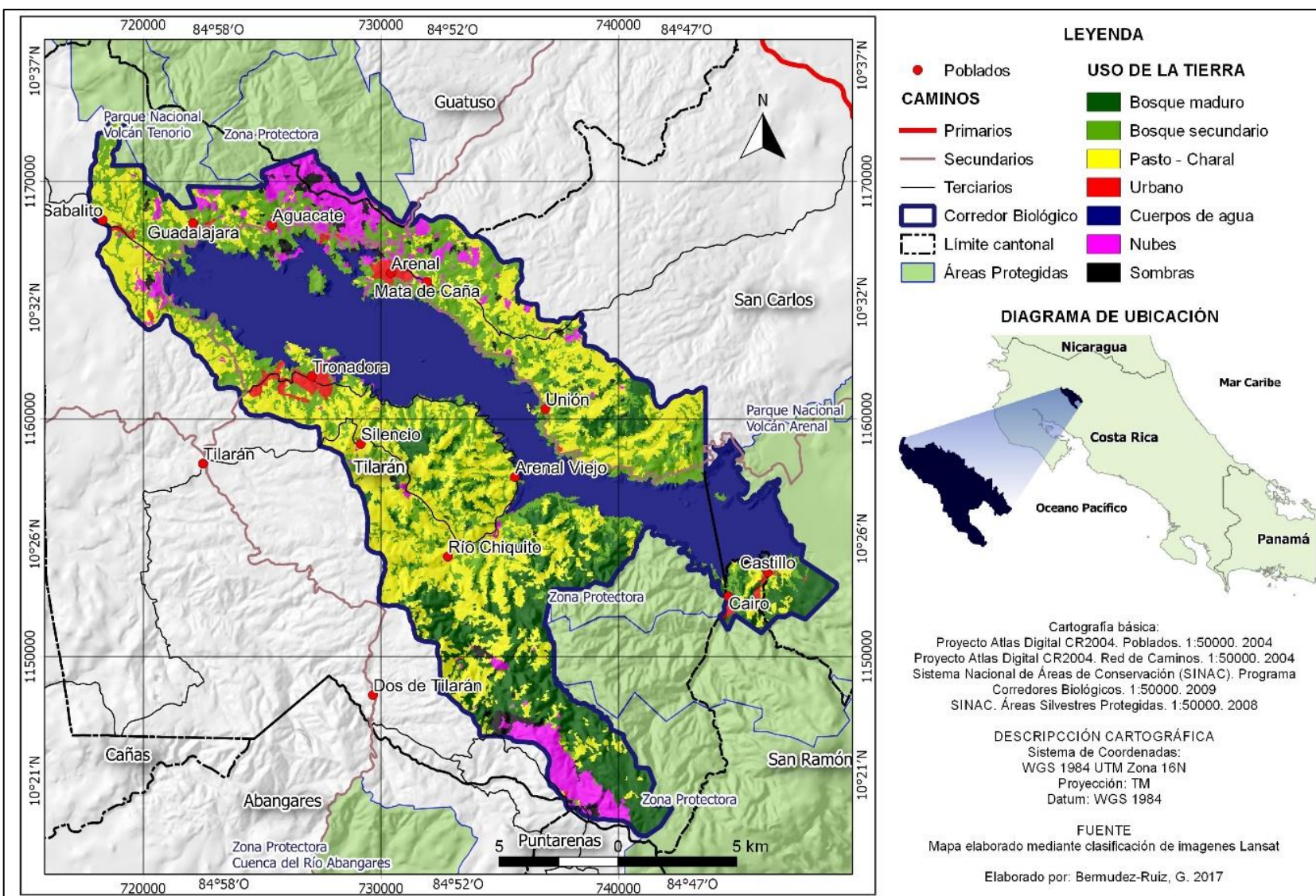


Figura 10. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, uso de la tierra, 2017

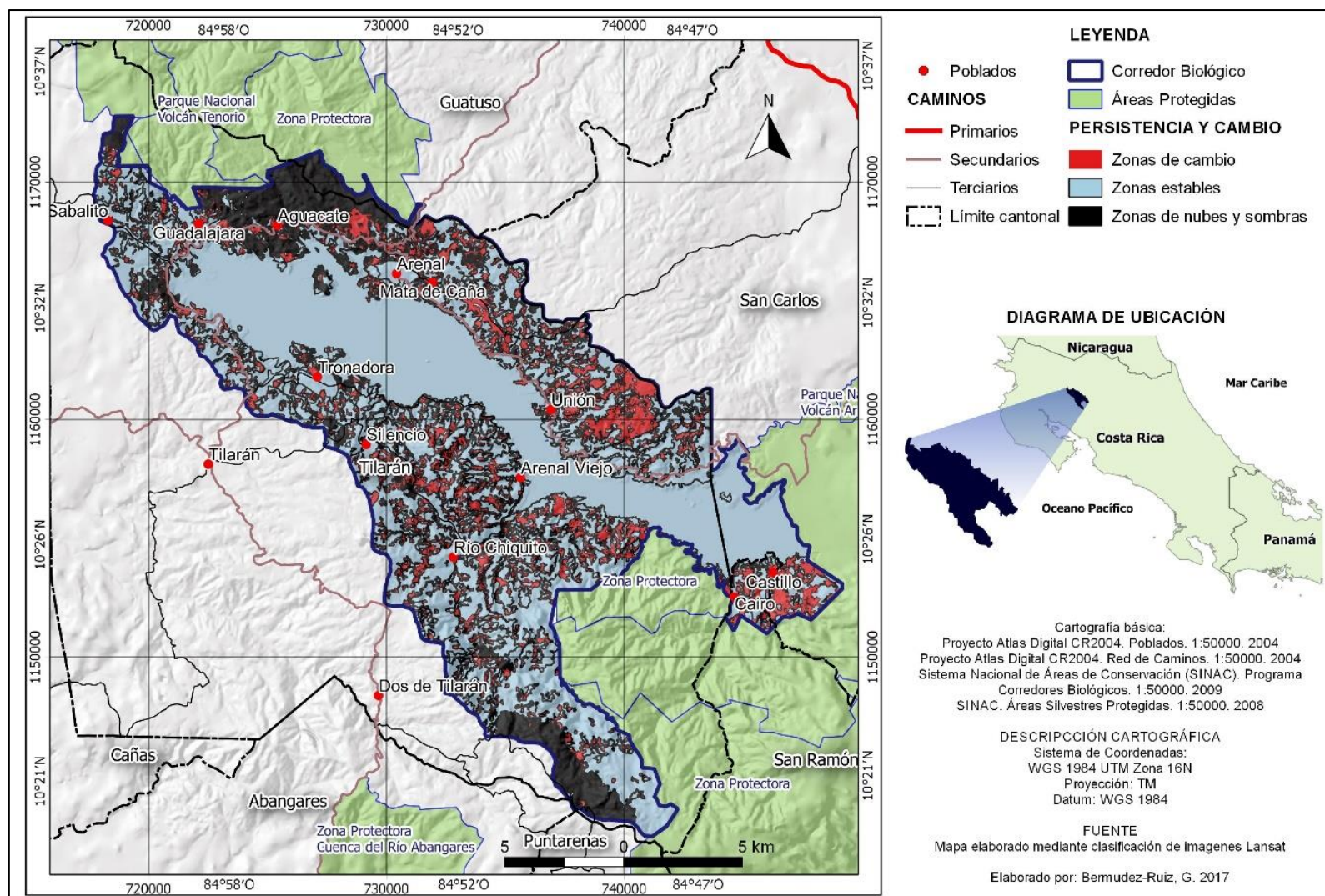


Figura 11. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, distribución espacial de las zonas de cambio y zonas estables del conjunto de clases de uso de la tierra, 2000- 2017

La matriz de confusión del año de referencia (año 2000) con respecto al año de comparación (año 2017), muestra que, en términos de pérdidas para la clase de Bosque Secundario, donde fue más significativo los cambios, un 5.54 % (1,667.3 ha) pasó a ser pastos en el 2017 (**Cuadro 12**), mientras que se logró recuperar 4.92 % (1,482.6 ha) de Pastos que pasaron a ser Bosque Secundario en otros sectores del Corredor Biológico. En total se obtuvo una pérdida de 10.22 % (3,076.83 ha), sin embargo, un 4.38 % de este porcentaje se puede considerar como una ganancia a nivel de cobertura, puesto pasó a la clase de Bosque Maduro.

Cuadro 12. Matriz cruzada de cambio de uso de la tierra, para el año 2000 y 2017

	Uso 2017						Total (ha)	Pérdidas (ha)
	Bosque - maduro	Bosque - secundario	Pasto - Charral	Urbano	Cuerpos de Agua			
Uso 2000	Bosque Maduro	3,440.5	319.5	306.4	1.1	3.2	4,070.6	630.1
	Bosque Secundario	1,317.2	4,959.2	1,667.3	7.9	84.4	8,036.0	3,076.8
	Pasto Charral	249.0	1,482.6	7,128.5	7.8	11.3	8,879.3	1,750.8
	Urbano	0.9	4.4	0.9	514.2	0.0	520.4	6.2
	Cuerpos de Agua	0.3	22.2	1.9	0.0	8,574.5	8,598.9	24.4
	Total (ha)	5,008.0	6,787.9	9,104.9	531.0	8,673.4	30,105.2	
	Ganancias (ha)	1,567.4	1,828.7	1,976.4	16.8	98.9		

La tasa de cambio de la cobertura boscosa presentó una tendencia negativa de -0.15 %, es decir que por cada año transcurrido se pierden 45.16 ha de bosques del Corredor Biológico. En este sentido, Calvo (2009) indicó que la tasa de cambio del CBLAT es de -1.8 en el período 2000 – 2005, siendo un valor bastante alto.

A pesar de que se presentó una reducción de la cobertura forestal, la mayor parte del cambio neto (se presentó en el Bosque Secundario (1,248.12 ha), mientras que se logró recuperar 937.35 ha de bosque que lograron alcanzar características espectrales similares al Bosque Maduro (**Cuadro 13**). Este resultado concuerda con lo establecido por Calvo (2009), en el período 2000 – 2005, señalando que el CBLAT mostró procesos de deforestación y de recuperación de la cobertura forestal en forma simultánea.

Cuadro 13. Área y porcentaje de pérdidas, ganancias, cambio neto, intercambio y cambio total para los diferentes Usos de la Tierra, CBLAT 2000 -2017

Nombre de la Clase	Ganancias		Pérdidas		Cambio		Intercambio		Cambio	
	(Gij)		(Lij)		Neto (Dj)		(Sj)		Total(Cj)	
	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%
Bosque Maduro	1,567.4	5.21	630.1	2.09	937.4	3.11	1,260.2	4.19	2,197.5	7.30
Bosque Secundario	1,828.7	6.07	3,076.8	10.22	1,248.1	4.15	3,657.4	12.15	4,905.5	16.29
Pasto Charral	1,976.4	6.56	1,750.8	5.82	225.6	0.75	3,501.5	11.63	3,727.2	12.38
Urbano	16.8	0.06	6.2	0.02	10.6	0.04	12.4	0.04	23.0	0.08
Cuerpos de Agua	98.9	0.33	24.4	0.08	74.5	0.25	48.8	0.16	123.3	0.41

Nota: Área en hectáreas.

La clase de uso de la tierra que presentó un mayor porcentaje de cambio neto (**Cuadro 13**), fue Bosque Secundario (4.15 %), que además presentó un mayor porcentaje de intercambio (12.15 %). Con respecto al Bosque Maduro, a pesar que un alto porcentaje permaneció en esta clase (11.43 %), se presentó un 4.19 % de intercambio con otras clases de uso, como el Bosque Secundario que de por sí presentó un alto porcentaje de intercambio y pérdidas. Adicionalmente la clase de Pasto y Charral a pesar de que presentó un cambio neto de 0.75 %, mostró un alto porcentaje de intercambio (11.63 %), posiblemente debido a las ganancias de otras categorías como Bosque Maduro y Bosque Secundario.

Los Cuerpos de Agua tendieron a aumentar en 0.25 %, con tasa de intercambio relativamente baja (0.04), por su estabilidad en ambos períodos. Lo anterior coincide con el aumento del nivel del embalse por encima de la cota establecida reportada por Instituto Costarricense de Electricidad -ICE (2017). Esta ganancia fue obtenida de los Bosques Secundarios y áreas de pastos en las márgenes del embalse, con afectación también a 3.2 ha clasificadas como Bosque Maduro. Especialmente, las pérdidas de cobertura boscosa se concentraron alrededor del poblado de Mata de Caña y Arenal (**Figura 12**).

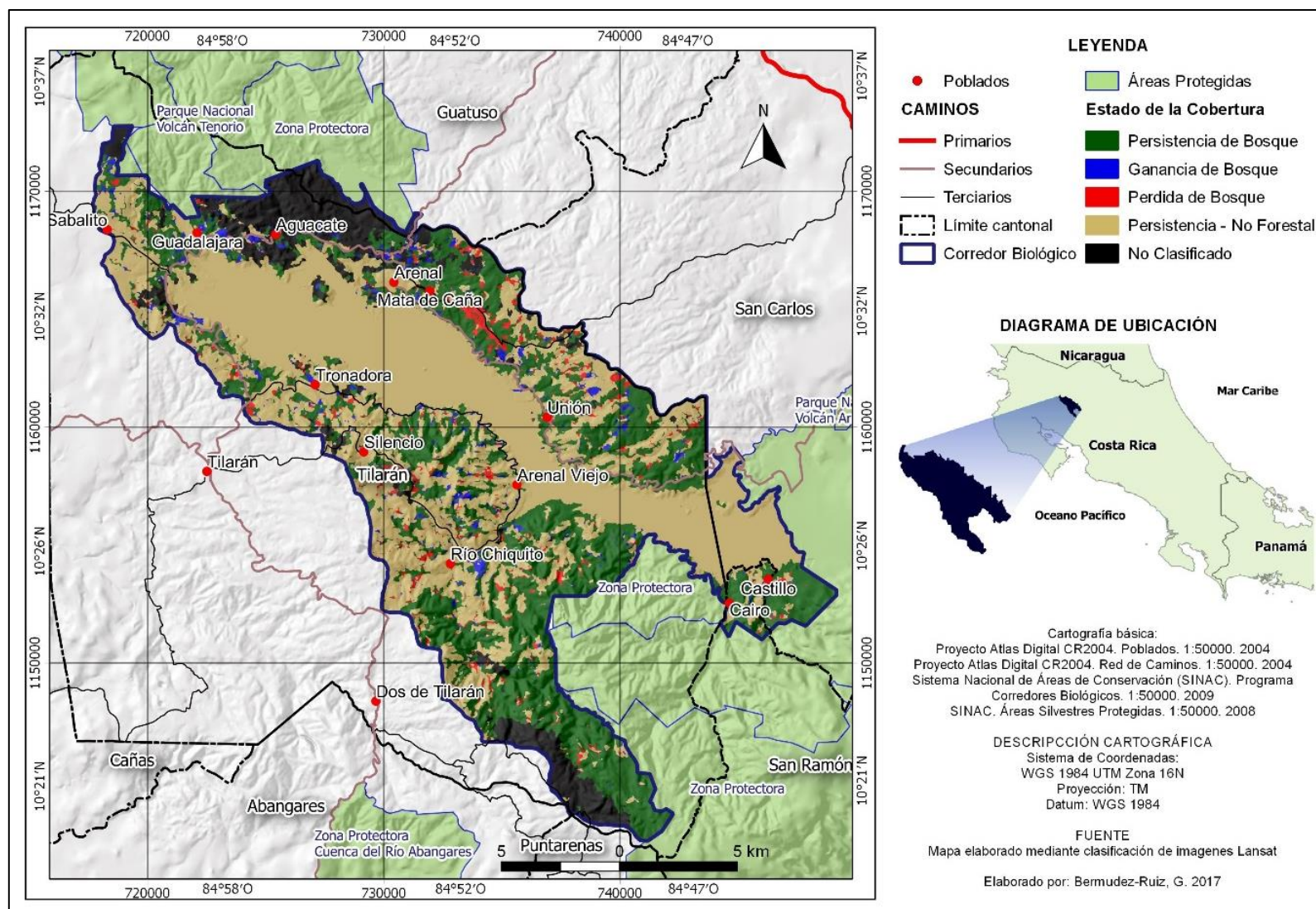


Figura 12. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, distribución espacial del estado de cambio de la cobertura forestal entre el año 2000 y 2017

Análisis del paisaje

El CBLAT presenta un paisaje altamente fragmentado, primero porque se encuentra inmerso en una matriz con un 30.24 % del área cubierta por áreas de pastos y segundo porque además un 28.81% del área está cubierto por agua. Según Calvo Obando (2009), el mayor costo para la conectividad funcional de este Corredor Biológico se debe principalmente a la presencia de un gran porcentaje de cobertura no forestal y de agua, siendo esta última la que presenta valores de resistencia máxima y altos de fragmentación.

Es importante resaltar que en este estudio no se incluyó la fragmentación generada por el área cubierta por caminos que suman alrededor de 342 km lineales, además de las áreas cubiertas por líneas de transmisión eléctrica. Lo anterior debido a que estos elementos no se representan bien en la imagen por ser de un ancho menor al tamaño del pixel (30 m); además no se encontró información de caminos actualizada y a una escala aceptable para la zona de estudio. Los elementos lineales mencionados, requieren de condiciones libre de árboles, por lo que contribuye también a la fragmentación del ecosistema.

Métricas de diversidad

A nivel de paisaje, se presenta un ligero descenso en el factor de diversidad expresado a través del Índice de Diversidad de Shannon (SDI), esto indica que disminuyó el número de tipos de parches o su distribución (**Cuadro 14**). Según Rajendaran y Mani (2015), el aumento en la diversidad se correlaciona positivamente con la riqueza y uniformidad. Villavicencio (2012) obtuvo un valor de SDI de 1.24 para la cuenca media del río Aranjuez, Costa Rica, ubicada a 35 km al Noroeste del CBLAT, siendo este ecosistema mencionado más diverso que el Corredor Biológico en estudio. El índice de uniformidad de Shannon (SEI) muestra también que el CBLAT tuvo un descenso de 0.02 valores, tendiendo hacia una distribución de parches baja y menos homogénea, lo que contribuye a la fragmentación.

Cuadro 14. Índice de Diversidad del Paisaje entre el año 2000 y 2017

Métrica	Año 2000	Año 2017
Shannon's Diversity Index (SDI)	0.925	0.907
Shannon's Evenness Index (SEI)	0.842	0.825

La Distancia media al vecino más cercano (MNN) indica que la distancia mínima que se debe recorrer para encontrar un parche de Bosque Maduro se redujo de 621 m en el año 2000 a 484 en el año 2017 (**Gráfico 4**), posiblemente por el aumento en la cobertura de esta clase, adicionalmente, en Bosque Secundario la distancia mínima es de 414 y 408 para el año 2000 y 2017, siendo un cambio poco significativo en comparación al Bosque Maduro. Este resultado difiere sustancialmente con lo encontrado por Calvo (2009), al indicar que el MNN para el CBLAT es de 307 m y por González, Castells y Baraut, (2010) a nivel del ACAT, donde establecieron una MNN de 286 m para el año 2005, posiblemente porque la distancia se midió de borde a borde y no al centroide del fragmento.

También Calvo (2009) encontró que los corredores a nivel nacional que presentan el menor MNN son el Corredor biológico Río Cañas (MNN = 222 m) y el Corredor biológico Miravalles-Santa Rosa (MNN = 240 m), mientras que el Corredor biológico Cobri Surac (MNN = 374 m), el Corredor biológico Osreo (MNN = 371 m) y Corredor biológico Tenorio-Miravalles (MNN = 330) presentaron MNN mayores. En este sentido se comprende que el CBLAT presenta un MNN cerca del promedio a nivel nacional.

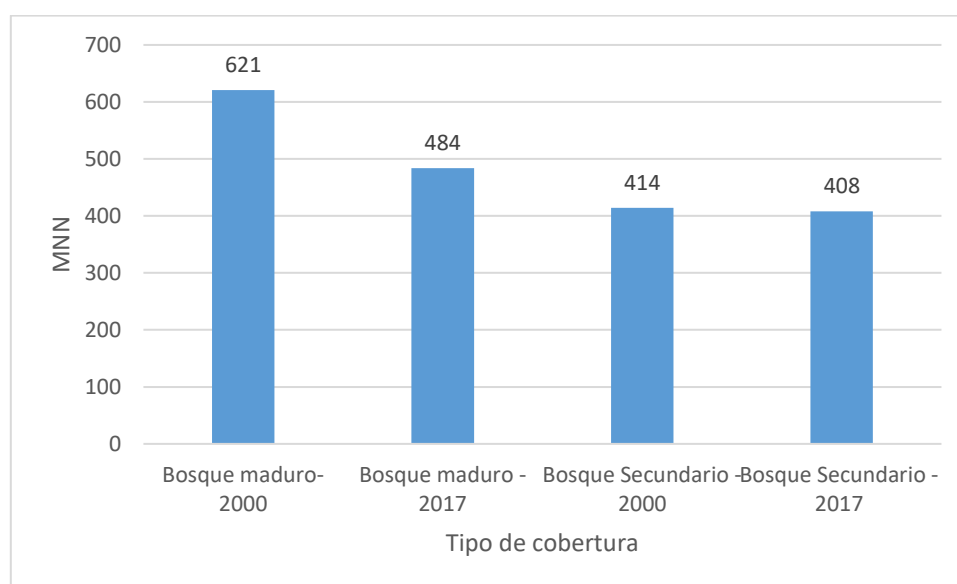


Gráfico 4. Distancia media al fragmento más cercano de los fragmentos de Bosque Maduro y Bosque Secundario, Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio

Métrica de densidad y tamaño de parche

EL tamaño medio del parche (MPS) en Bosque Maduro aumentó de 29.9 a 30.33 ha, lo que concuerda también con el aumento del área de esta cobertura y con el número de parches (NumP) pasando de 158 a 165 parches en 17 años (**Cuadro 15**). El aumento en la desviación estándar (PSSD) en Bosque Maduro indica la tendencia a una distribución desigual en el tamaño de los parches presentándose una mayor diferencia entre áreas pequeñas y áreas grandes de este tipo de cobertura.

Cuadro 15. Métrica de densidad y tamaño de parche en el Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, 2000 – 2017

Clase	Nombre de la clase	MPS		NumP		MedPS		PSSD	
		2000	2017	2000	2017	2000	2017	2000	2017
1	Bosque Maduro	29.94	30.33	158	165	2.25	2.79	204.64	210.22
2	Bosque Secundario	17.75	16.70	483	450	2.43	2.79	111.35	85.87
3	No Forestal	72.07	105.41	286	203	3.56	2.79	1,008.77	1,173.23
	Paisaje	36.59	41.46	927	818	2.52	2.79	572.83	596.61

El número de parches (NumP) de Bosque Secundario es en promedio tres veces mayor que en Bosques Maduros (**Cuadro 15**), lo cual coincide con lo encontrado por Morera y Sandoval, (2016) a nivel de áreas de conservación, donde los Bosques de Alta Densidad (Bosque Maduro) el número de fragmentos siempre es menor que los Bosques de Baja Densidad (Bosque Secundario). Además, el MPS y NumP descendió, lo que indica a nivel de clase, los parches de mayor área han disminuido en área y cantidad, lo cual es un indicador de alta fragmentación. A nivel de ACAT González et al., (2010) señalan que el MPS de cobertura boscosa es de 18.15 ha para el año 2005, el cual se encuentra dentro de los rangos establecidos en este estudio. Al respecto, Turner (1996) menciona que la continua reducción de la superficie de los fragmentos que trae como consecuencia una pérdida de hábitat que puede reducir el tamaño de las poblacionales.

Al analizar la distribución de frecuencias del número de parches por área, muestra que tanto en Bosque Maduro como en el Bosque Secundario (**Cuadro 13**), se presenta una reducción del número de parches con áreas menores a 2.25 ha y un aumento en el número de parches

en las clases de 2.25 a 5 ha y de 5 a 20 ha de Bosque Secundario (**Cuadro 16**), lo que hace que el MPS y NumP se reduzca, partiendo de que el MPS de Bosque Secundario fue de 17.75 para el año 2000. Ramos (2004), menciona que la deforestación reduce la heterogeneidad espacial y la disponibilidad de hábitat, afectando a las especies que necesitan hábitats continuos de gran tamaño para mantener poblaciones viables.

Cuadro 16. Distribución de los parches según el área, para Bosques Maduros y Bosque Secundario en el Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, 2000 – 2017

Clase estadística		Cobertura_2000				Cobertura_2017			
		Bosque Maduro		Bosque Secundario		Bosque Maduro		Bosque Secundario	
		Frecuencia	%	Frecuencia	%	Frecuencia	%	Frecuencia	%
1.00	2.25	81	51.3	239	49.5	74	44.8	194	43.1
2.25	4.99	34	21.5	110	22.8	36	21.8	117	26.0
5.00	19.99	31	19.6	94	19.5	42	25.5	100	22.2
20.00	99.99	7	4.4	28	5.8	7	4.2	27	6.0
100.00	499.99	3	1.9	10	2.1	5	3.0	9	2.0
500.00	999.99	1	0.6	0	0.0	0	0.0	1	0.2
>1000		1	0.6	2	0.4	1	0.6	2	0.4

En las clases de 5 a 20 ha (**Cuadro 16**), se da un aumento considerable del número de parches de Bosque Maduro. Lo anterior concuerda con el aumento el tamaño medio del parche para Bosque Maduro. Es importante destacar que en el Corredor Biológico se identificaron para el año 2017 seis parches de Bosque Maduro con áreas mayores a 100 ha en los que destaca uno de 2,620 ha, posiblemente por el establecimiento de conectividad entre parches de las clases superiores. En Bosques Secundarios se identificaron 12 parches mayores a 100 ha entre los cuales se presentaron dos parches con 1,114 y 1,167 ha.

De acuerdo con Forman y Godron (1986), cuanto más pequeños son los fragmentos de bosque remanente, resultantes del proceso de perturbación, menor será la densidad de las poblaciones y mayor el riesgo de extinción de especies. Particularmente porque la fragmentación en muchos de los ambientes produce un aislamiento geográfico de los ecosistemas y reduce la probabilidad de recolonización de la vegetación desde su núcleo o interior y la calidad del hábitat que le rodea (Morera et al. 2007).

Métricas de forma

El índice de diversidad de formas de Patton (SI ó MSI) en el Bosque Maduro se mantuvo constante en el período de evaluación, predominando formas amorfo o irregular con valores de 2.21 (**Cuadro 17**). En el Bosque Secundario, aunque predominó formas amorfo o irregular, este aumento su valor, lo que indica una mayor dinámica en la forma de los fragmentos. A nivel de distribución porcentual, en el Bosque Maduro se presenta una reducción de las formas Oval-oblongo (**Figura 13**), mientras que en Bosque Secundario se reducen tanto las áreas oval-oblongo como rectangulares para sumar un mayor porcentaje en las formas irregulares como se mencionó anteriormente, posiblemente porque son zonas de proyección y bosques de galería que tienden a ser más irregulares. La forma menos frecuente es la redonda (compacta) y oval redonda con un 6.75 %. mientras que un 93.25 % del paisaje fue dominado por formas irregulares. Según Lozano et al., (2011), las formas compactas son resistentes a los efectos negativos de esta matriz, mientras que las formas amorfas, o formas irregulares, pueden tener un perímetro más largo por unidad de área y ser significativamente sensibles a los efectos negativos externos.

Cuadro 17. Valores de las métricas de forma empleadas en el Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio para el año 2000 y 2017

Clase	Nombre de la clase	MSI (SI)		K		PMFD	
		2000	2017	2000	2017	2000	2017
1	Bosque Maduro	2.21	2.21	0.50	0.50	1.38	1.38
2	Bosque Secundario	2.32	2.38	0.49	0.48	1.39	1.39
3	No Forestal	2.14	2.24	0.53	0.52	1.36	1.37
	Paisaje	2.25	2.31	0.50	0.50	1.38	1.38

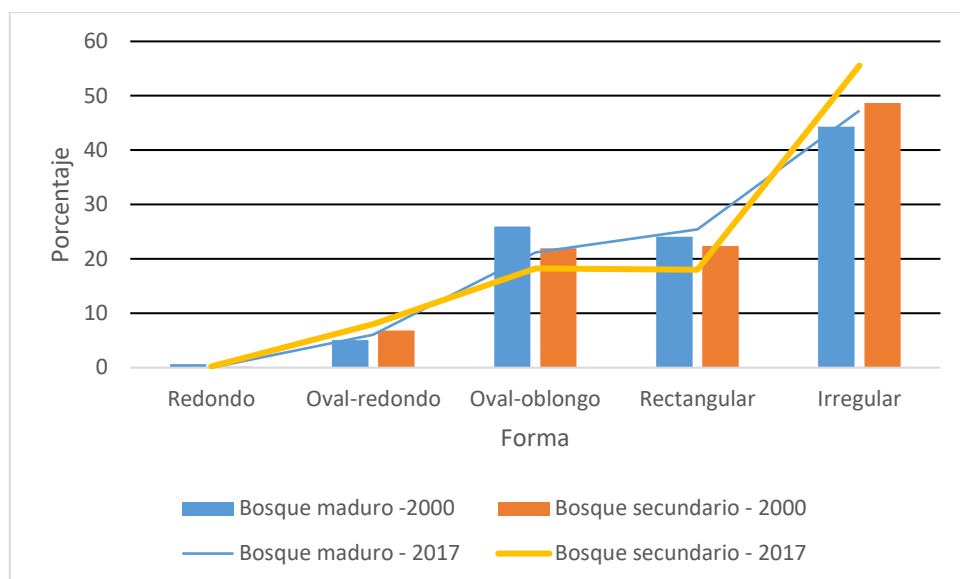


Figura 13. Distribución porcentual de la forma de los fragmentos en Bosque Maduro y Bosque Secundario para el año 2000 y 2017

Los valores del índice de compactación (K) por clase muestran que los parches de Bosque Secundario son más frágiles y menos compactos que los bosques maduros (**Cuadro 18**). A nivel de cobertura boscosa (Bosque Maduro y Bosque Secundario), hay un aumento en el número de fragmentos cuyo valor de fragilidad se aproxima a uno (menos frágiles), pero una tendencia a mayor número de fragmentos con valores de fragilidad altos pasando de un 47.58 % en el año 2000 a un 53.33 % en el año 2017 (Cuadro 18).

Cuadro 18. Frecuencia y porcentaje del índice de compactación (K) por clase y año, para las áreas de cobertura forestal del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio

Clases(K)	2000		2017	
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje
< 0.25	30	4.68	28.00	4.55
0.25 - 0.50	275	42.90	300.00	48.78
0.50 - 0.75	328	51.17	271.00	44.07
> 0.75	8	1.25	16.00	2.60
Total	641	100.00	615.00	100.00

El Promedio de Dimensión Fractal (MPFD) del CBLAT se mantuvo invariable en el período de estudio tanto en Bosque Maduro (1.38) como en Bosque Secundario (1.39). Estos valores indican que las formas se mantuvieron complejas o irregulares. En valor se conserva más bajo en Bosques Maduros posiblemente por concentrarse en menor cantidad de parches con área promedio (MPS) mayor que en Bosque Secundario. Según Bustamante y Grez, (1995) los fragmentos pequeños tienen una relación perímetro/área mayor que fragmentos grandes, lo cual significa una mayor influencia de la matriz circundante. Adicionalmente considera que el efecto de borde puede llegar a ser importante si los fragmentos son alargados o de formas irregulares, considerando que los fragmentos irregulares también poseen una relación perímetro/área mayor que fragmentos más regulares.

Propuesta de manejo del Corredor Biológico

El Consejo Local del CB ha venido desarrollando acciones para reestablecer la conexión entre el PN Volcán Arenal y PN Volcán Tenorio, según consta en el Plan de Trabajo Anual (CBLAT, 2014). Sin embargo, muchos de los fragmentos de Bosque Maduro o áreas núcleo a lo interno del CB se encuentran aislados. Adicionalmente la presencia de elementos lineales como carreteras, caminos y líneas de transmisión eléctrica, alteraran la configuración del paisaje.

La distribución de la Cobertura Boscosa del CBLAT obtenida en este estudio y su verificación directa en campo, muestra que en muchas zonas no existen las áreas de protección (**Figura 14a**) o estas no cumplen con la distancia establecida en el artículo 33 de la Ley Forestal 7575 (**Figura 14b**), lo que incide en procesos de fragmentación del ecosistema. Las áreas de protección juegan un papel importante en la conexión de parches de bosque entre la parte alta y baja del CB a la vez que constituyen una matriz para la transferencia de genes entre poblaciones y subpoblaciones de plantas y animales.



Figura 14. Ausencia o deterioro de las áreas de protección de ríos y quebradas

También, se identificó zonas donde no existe el área de protección de los riachuelos (**Figura 15a**) y de serios problemas de erosión por la sobreutilización de los suelos en áreas de pendientes fuertes, lo que hace que el proceso de recuperación de la cobertura sea más lento (**Figura 15b**).



Figura 15. Ausencia de áreas de protección de los riachuelos (15a) y evidencia de fuertes procesos de erosión (15b)

Propuesta de gestión

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores y los resultados de este estudio, se propone las siguientes acciones tendientes a mejorar la cobertura y reducir la fragmentación:

1. Recurar las áreas de protección según lo establece la Ley Forestal en su artículo 33, como mecanismo para mejorar la conectividad entre los fragmentos de bosque.
2. Establecer mecanismos para aumentar la cobertura forestal en bosques de galería
3. Mejorar la conectividad entre fragmentos de bosque, fortaleciendo iniciativas que implementen linderos arbolados con especies nativas o introducidas, en sectores con menor incidencia de los vientos.
4. Concientizar a la población del Corredor Biológico mediante acciones educativas dirigidas a sectores productivos sobre la importancia de mejorar el estado de la cobertura boscosa.

Por un lado, el cumplimiento de la primer acción de mejora, la Ley Forestal N° 7575. (1996) declara las siguientes áreas de protección:

1. Las áreas que bordeen nacientes permanentes, definidas en un radio de cien metros medidos de modo horizontal.

2. Una franja de quince metros en zona rural y de diez metros en zona urbana, medidas horizontalmente a ambos lados, en las riberas de los ríos, quebradas o arroyos, si el terreno es plano, y de cincuenta metros horizontales, si el terreno es quebrado.
3. Una zona de cincuenta metros medida horizontalmente en las riberas de los lagos y embalses naturales y en los lagos o embalses artificiales construidos por el Estado y sus instituciones. Se exceptúan los lagos y embalses artificiales privados.
4. Las áreas de recarga y los acuíferos de los manantiales, cuyos límites serán determinados por los órganos competentes establecidos en el reglamento de esta ley.

Por otro, el Reglamento de la Ley Forestal, establece que los terrenos quebrados son aquellos que tienen un pendiente promedio superior al cuarenta por ciento (Decreto 25721 - MINAE, 1997).

Se realizó un escenario ideal (a cumplirse según las metas que defina el Consejo Local del Corredor Biológico). Se establecen los siguientes supuestos:

- Las propiedades del ICE ubicadas en CBLAT y aledaños al Embalse, están sujetas a proyectos de reforestación y alcanzarán el estado de Bosque a mediano plazo, a excepción de las áreas con influencia de Plantas Eólicas (aerogeneradores) que mantendrá su uso de la tierra actual.
- Se establece la línea central del curso de la red hídrica como centro, considerando que se deben identificar en campo las condiciones particulares del sitio, en cuanto al borde del cauce para establecer las áreas de protección.
- Se considera áreas de protección en terrenos quebrados en las riberas de los ríos, quebradas o arroyos, si en un buffer de 50 metros horizontales el terreno presenta una pendiente mayor al 40 %, considerando las indicaciones del punto anterior.

La construcción del escenario requirió del uso de las siguientes capas vectoriales (**Cuadro 19**).

Cuadro 19. Capas vectoriales para el diseño de propuesta de manejo del Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio

Capa	Fuente	Descripción
Uso de la tierra 2017	Fuente: elaboración propia	Contiene el uso de la tierra del año 2017, generado a partir de clasificación supervisa de imágenes del sensor OLI, Misión Landsat 8.
Red Hídrica	Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Centro Gestión Ambiental, UEN PySA. ICE.	Contiene el nombre de cada segmento fluvial, clasificada según su estado (Permanente o Intermitente), además tiene asociada la cuenca a la cual pertenece y su orden jerárquico según la metodología de Strahler.
Pendiente	Generado a partir del Modelo de Elevación Digital, con un tamaño de pixel de 20 metros, facilitado por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Centro Gestión Ambiental, UEN PySA. ICE.	Contiene las pendientes del terreno clasificado en dos clases: Clase 1 < 40 % Clase 2: > 40 %
Propiedades ICE	Centro de Producción ArCoSa, ICE.	Esta información contiene la ubicación de los Centros de Producción Eólicos, Geotérmicos e Hidroeléctricos, así como el trazado de las Líneas de Transmisión Eléctrica.

Se obtiene que las áreas de protección de las riberas de los ríos, quebradas o arroyos del Corredor Biológico corresponden a 5.7 ha en Zona Urbana, 399.47 ha en Zonas Rurales y 937.59 ha en Zonas de Pendientes mayor al 40 %. En el caso del embalse, por ser de origen artificial se determina un área de protección de 687.67 ha a partir del nivel máximo determinado en la clasificación, sin embargo, las propiedades adquiridas por el ICE para proteger esta zona ascienden a las 2,018.75 ha, posiblemente por las fluctuaciones del nivel del embalse.

Se estima que del total de áreas de protección (3,390.52 ha), un 69.20 % (23.46) se encuentran con cobertura forestal, mientras que el restante 30.80 % (1,044 ha) requieren de algún grado de intervención **(Figura 16)**.

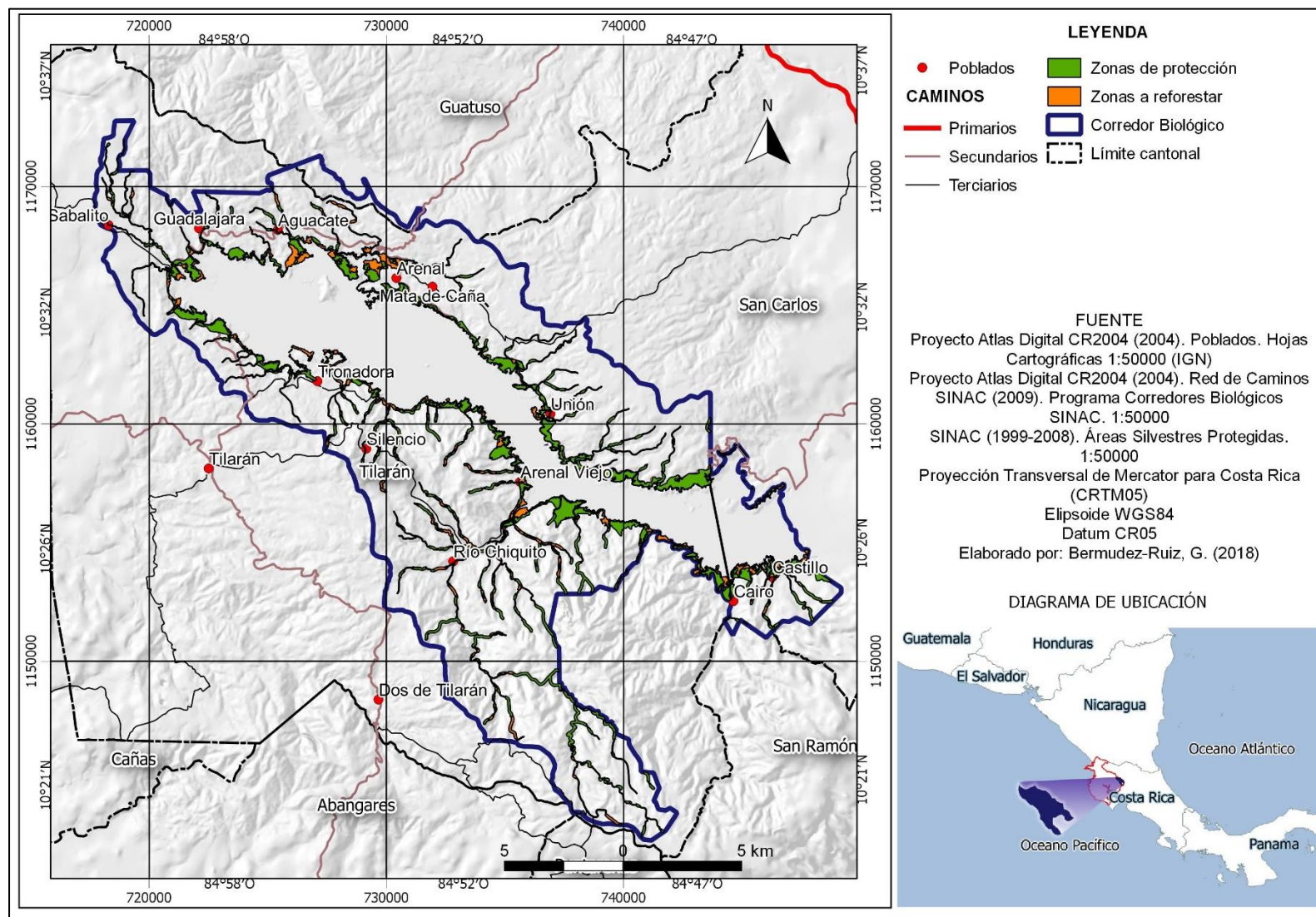


Figura 16. Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio, áreas prioritarias para reforestar en zonas de protección

De estas áreas a recuperar, 637.0 ha se ubican en las propiedades del ICE que se definieron como zonas de protección, 237.4 ha en zonas de protección ríos con pendientes fuertes, 127.0 ha en zonas de protección ubicada en áreas rurales y 5.7 ha en zonas urbanas. No obstante, dado los esfuerzos que ha realizado el ICE en materia de recuperación de las zonas de protección, se estima que estas áreas podrían ser menores puesto que no se ven reflejadas en las firmas espectrales obtenidas de la clasificación de imágenes, al presentarse áreas reforestadas en la última década, especialmente en propiedades del ICE. Según las observaciones de campo, muchas áreas son inaccesibles para reforestar, por presentar fuertes pendientes o cañones que limitan el acceso. Adicionalmente las áreas aledañas al embalse, están sujetas a fuertes procesos de erosión.

La recuperación de bosques de galería y establecimiento de linderos arbolados correspondientes a las acciones dos y tres, debe formalizarse mediante el Programa de Pago de Servicios Ambientales (PPSA), que consiste en un reconocimiento financiero por parte del Estado, a través del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), a los propietarios y poseedores de bosques y plantaciones forestales por los servicios ambientales que éstos proveen y que inciden directamente en la protección y mejoramiento del medio ambiente.

Las modalidades que más se ajustan a los objetivos del Corredor Biológico son la Protección del Recurso Hídrico, Reforestación en Áreas de Protección, Regeneración Natural en Tierras Kyoto y Regeneración Natural en Potreros, Sistemas Agroforestales, Sistemas Agroforestales con Especies Nativas y Manejo de Bosques.

CONCLUSIONES

La precisión de la clasificación de las imágenes y los valores de índice de Kappa, permiten concluir que los mapas obtenidos a través de la clasificación son fiables y presentan una fuerte concordancia con la realidad.

El uso de la tierra del CBLAT ha mostrado un dinamismo del 18.23 % (ganancias y pérdidas), especialmente entre Bosque Secundario y áreas de pasto y charral, mientras que el 81.76 % del área se ha mantenido persistente, principalmente porque un alto porcentaje del corredor, presenta coberturas estables como los Cuerpos de Agua (28 %), áreas de pastos y además que los bosques maduros son de difícil acceso en comparación con otras regiones, por la condiciones topográficas que caracterizan al corredor.

La cobertura forestal para el año 2000 ocupó un 40.21 % del área del CBLAT, y un 39.18 % para el año 2017, presentando una tendencia de cambio negativa de -0.15 %, es decir que por cada año transcurrido se pierden 45.16 ha de bosques del Corredor Biológico.

El CBLAT presenta un paisaje altamente fragmentado, con una disminución en la distribución y uniformidad de las coberturas, que generan un descenso en el factor de diversidad y riqueza, contribuyendo a la fragmentación.

Los índices a nivel de clase reflejan una recuperación de los bosques maduros, pérdida y alta fragmentación para los bosques secundarios al reducir el tamaño medio del parche, el número de parches y aumento en la desviación estándar.

Un alto porcentaje de los fragmentos de la cobertura forestal del CBLAT (93.25 %) presentan formas irregulares, por lo que son más sensibles a los efectos negativos externos causados por los usos del suelo (matriz circundante).

La cobertura Forestal del Corredor Biológico aumentó el número de fragmentos con valores de fragilidad altos, pasando de un 47.58 % en el año 2000 a un 53.33 % en el año 2017.

La recuperación de las zonas de protección del Corredor Biológico mejora el estado de fragmentación y aumentaría la conectividad entre parches.

RECOMENDACIONES

Elaborar estudios de uso de la tierra periódicamente, siguiendo la metodología de este estudio para realizar análisis comparativos con la información generada, de manera que permita realizar acciones para reducir el impacto sobre las coberturas boscosas.

Realizar un estudio de comparación de cambio de uso de la tierra usando imágenes satelitales accesibles y de mejor resolución que permita un mayor nivel de detalle en la clase que componen la cobertura, especialmente las áreas reforestadas, plantaciones y áreas de cultivo, que no fue posible determinar en este estudio.

Establecer unidades de manejo a nivel de subcuencas, mediante la operación de Consejos de Unidades Hidrológicas, según se establece en el proyecto de Ley No.17742 de Gestión Integrada del Recurso Hídrico y construir indicadores de logros que permitan a los pobladores locales tener una idea del efecto de sus actividades productivas en la fragmentación del Corredor Biológico para proponer y ejecutar medidas de mitigación y compensación.

Fomentar el Pago por Servicios Ambientales (PSA) en el Corredor Biológico para proteger la cobertura boscosa actual, e incentivar procesos de reforestación en áreas que permitan la conectividad entre fragmentos de bosques.

ANEXOS

Anexo 1. Valores de reflectancia y desviación estándar para la escena 1653 – Landsat 5

Banda	Longitud de onda	Reflectancia (μm)					
		Bosque Maduro	Bosque Secundario	Pasto- Charral	Agua	Nubes	Sombras
1	0.49	0.0373	0.0447	0.0581	0.0407	0.1896	0.0358
2	0.56	0.0398	0.0490	0.0778	0.0339	0.2086	0.0298
3	0.66	0.0324	0.0389	0.0683	0.0233	0.2109	0.0250
4	0.83	0.2267	0.2994	0.3410	0.0204	0.4279	0.0989
5	1.65	0.1131	0.1431	0.2243	0.0192	0.3309	0.0510
7	2.22	0.0523	0.0631	0.1114	0.0165	0.2508	0.0273
Desviación Estándar							
1	0.49	0.004	0.003	0.058	0.003	0.025	0.001
2	0.56	0.006	0.006	0.078	0.003	0.029	0.002
3	0.66	0.005	0.004	0.068	0.002	0.030	0.002
4	0.83	0.071	0.052	0.341	0.003	0.020	0.011
5	1.65	0.030	0.023	0.224	0.002	0.027	0.005
7	2.22	0.012	0.010	0.111	0.003	0.030	0.004

Anexo 2. Valores de reflectancia y desviación estándar para la escena 1553 – Landsat 7

Banda	Longitud de onda	Reflectancia (µm)					
		Bosque Maduro	Bosque Secundario	Pasto- Charral	Agua	Nubes	Sombras
1	0.485	0.0877	0.0983	0.1116	0.1050	0.3765	0.0934
2	0.56	0.0657	0.0763	0.1077	0.0733	0.3977	0.0646
3	0.66	0.0450	0.0527	0.0847	0.0506	0.3753	0.0440
4	0.835	0.2159	0.2841	0.3756	0.0451	0.6235	0.1223
5	1.65	0.1047	0.1371	0.2436	0.0299	0.4783	0.0641
7	2.22	0.0510	0.0617	0.1165	0.0278	0.3567	0.0367
Desviación Estándar							
1	0.485	0.0053	0.0042	0.0036	0.1050	0.0641	0.0040
2	0.56	0.0073	0.0047	0.0044	0.0733	0.0845	0.0036
3	0.66	0.0057	0.0043	0.0131	0.0506	0.0752	0.0032
4	0.835	0.0610	0.0328	0.0367	0.0451	0.1942	0.0205
5	1.65	0.0316	0.0166	0.0248	0.0299	0.1104	0.0134
7	2.22	0.0127	0.0066	0.0151	0.0279	0.0877	0.0067

Anexo 3. Valores de reflectancia y desviación estándar para la escena 1653 – Landsat 8

Banda	Longitud de onda	Reflectancia (μm)					
		Bosque Maduro	Bosque Secundario	Pasto- Charral	Agua	Nubes	Sombras
1	0.48	0.0172	0.0276	0.0388	0.0330	0.4144	0.0193
2	0.56	0.0244	0.0371	0.0652	0.0288	0.4382	0.0178
3	0.655	0.0213	0.0328	0.0646	0.0257	0.4774	0.0179
4	0.865	0.2571	0.3138	0.3616	0.0298	0.6251	0.1058
5	1.61	0.1130	0.1461	0.2412	0.0241	0.5327	0.0458
7	2.2	0.0512	0.0665	0.1245	0.0207	0.4421	0.0250
Desviación Estándar							
1	0.48	0.0024	0.0020	0.0043	0.0031	0.1261	0.0081
2	0.56	0.0044	0.0026	0.0074	0.0031	0.1261	0.0080
3	0.655	0.0031	0.0034	0.0091	0.0029	0.1390	0.0061
4	0.865	0.0507	0.0332	0.0295	0.0027	0.0960	0.0404
5	1.61	0.0214	0.0134	0.0213	0.0030	0.0969	0.0194
7	2.2	0.0082	0.0064	0.0137	0.0025	0.0981	0.0080

Anexo 4. Valores del algoritmo Jeffries-Matusita distance, para la clasificación de la imagen Landsat con respecto a las clases de referencia

Clase de comparación		Año 2000		Año 2017
		Escena 1653	Escena 1553	Escena 1653
Pasto Charral	Cuerpos de Agua	2.000	1.999	2.000
Pasto Charral	Nubes	1.999	1.969	1.996
Pasto Charral	Sombras	1.999	1.999	1.999
Pasto Charral	Bosque Maduro	1.998	1.970	1.999
Pasto Charral	Bosque Secundario	1.987	1.937	1.994
Cuerpos de Agua	Nubes	1.999	2.000	1.999
Cuerpos de Agua	Sombras	1.999	1.999	1.999
Cuerpos de Agua	Bosque Maduro	1.999	1.999	1.999
Cuerpos de Agua	Bosque Secundario	1.999	1.999	1.999
Nubes	Sombras	1.999	1.999	1.999
Nubes	Bosque Maduro	1.999	1.993	1.915
Nubes	Bosque Secundario	1.999	1.992	1.999
Sombra de Nubes	Bosque Maduro	1.825	1.769	1.915
Sombra de Nubes	Bosque Secundario	1.990	1.990	1.992
Bosque Maduro	Bosque Secundario	1.306	1.089	1.903

Anexo 5. Detalle de maya de puntos aleatorios para la validación de la clasificación de la escena
1653 – Landsat 5

id	X	Y	MC_ID	MC_info
1	741362.7273	1142740.9091	1	Bosque Maduro
2	742366.3636	1143504.5455	1	Bosque Maduro
3	739135.9091	1143495.0000	1	Bosque Maduro
4	740662.5000	1144680.0000	1	Bosque Maduro
5	739959.0000	1145010.0000	1	Bosque Maduro
6	737887.5000	1144657.5000	3	Pasto - Charral
7	738577.5000	1147367.5000	3	Pasto - Charral
8	736026.0000	1146642.0000	3	Pasto - Charral
9	736371.0811	1147334.5946	3	Pasto - Charral
10	737061.0000	1149696.0000	2	Bosque Secundario
11	735513.5294	1149320.2941	1	Bosque Maduro
12	734317.5000	1148313.7500	2	Bosque Secundario
13	732535.3846	1149295.3846	2	Bosque Secundario
14	733184.1176	1150401.1765	2	Bosque Secundario
15	734661.8182	1150292.7273	3	Pasto - Charral
16	735871.3043	1151311.7391	1	Bosque Maduro
17	737131.3043	1151602.1739	1	Bosque Maduro
18	738357.0732	1153369.0244	1	Bosque Maduro
19	740691.0000	1154241.0000	3	Pasto - Charral
20	739467.8049	1154983.9024	1	Bosque Maduro
21	738990.0000	1155708.7500	2	Bosque Secundario
22	733540.5882	1153014.7059	3	Pasto - Charral
23	735815.6250	1154540.6250	2	Bosque Secundario
24	737070.0000	1155739.2857	1	Bosque Maduro
25	736411.1538	1153570.3846	3	Pasto - Charral
26	732204.0000	1151551.5000	2	Bosque Secundario
27	731199.2308	1150929.2308	3	Pasto - Charral
28	729568.1250	1152427.5000	3	Pasto - Charral
29	729090.9375	1154415.9375	2	Bosque Secundario
30	731737.3333	1154767.3333	2	Bosque Secundario
31	730088.5714	1156452.8571	3	Pasto - Charral
32	734363.1818	1156231.3636	3	Pasto - Charral

id	X	Y	MC_ID	MC_info
33	731867.5000	1158165.0000	3	Pasto - Charral
34	729897.0000	1159214.0000	3	Pasto - Charral
35	729733.3333	1160353.3333	2	Bosque Secundario
36	730772.9794	1161763.8900	5	Cuerpos de Agua
37	731459.7261	1163886.2866	5	Cuerpos de Agua
38	733341.1256	1162151.2691	5	Cuerpos de Agua
39	735983.6426	1159365.5975	5	Cuerpos de Agua
40	736625.0086	1157592.6976	5	Cuerpos de Agua
41	737795.4249	1157502.6816	5	Cuerpos de Agua
42	742716.3077	1156003.3318	5	Cuerpos de Agua
43	744952.6685	1155882.2473	5	Cuerpos de Agua
44	744313.3333	1152896.6667	2	Bosque Secundario
45	745997.1429	1151408.5714	2	Bosque Secundario
46	748223.3333	1152145.0000	1	Bosque Maduro
47	746259.3103	1154093.7931	2	Bosque Secundario
48	747516.2500	1155828.7500	2	Bosque Secundario
49	745555.3846	1158715.3846	2	Bosque Secundario
50	742661.2048	1157466.1446	2	Bosque Secundario
51	741808.4208	1157394.8425	2	Bosque Secundario
52	742962.9639	1159306.5186	3	Pasto - Charral
53	742421.1439	1159588.6517	3	Pasto - Charral
54	740868.2234	1159303.4771	3	Pasto - Charral
55	742283.0801	1161026.7304	3	Pasto - Charral
56	741983.6842	1158618.9474	1	Bosque Maduro
57	743934.0000	1161280.2857	3	Pasto - Charral
58	737889.3750	1159020.0000	3	Pasto - Charral
59	740135.7275	1161961.5636	2	Bosque Secundario
60	738229.8101	1161046.7351	2	Bosque Secundario
61	739743.4615	1162974.2308	3	Pasto - Charral
62	742253.6511	1160365.2889	6	Nubes
63	744018.1741	1160800.1156	6	Nubes
64	741856.6895	1161420.8416	6	Nubes
65	733178.6747	1168606.0316	6	Nubes
66	732897.4215	1168936.5275	7	Sombras
67	741952.8238	1160704.8405	7	Sombras

id	X	Y	MC_ID	MC_info
68	741556.4652	1161767.7034	7	Sombras
69	736345.1676	1161957.9278	3	Pasto - Charral
70	738666.3158	1163687.3684	2	Bosque Secundario
71	738818.1576	1164421.4899	2	Bosque Secundario
72	735659.2229	1163257.1143	3	Pasto - Charral
73	735024.5704	1164232.2538	2	Bosque Secundario
74	736947.8220	1164875.9832	2	Bosque Secundario
75	733517.8374	1165514.3690	2	Bosque Secundario
76	735579.5497	1167007.4652	3	Pasto - Charral
77	734001.2665	1168056.6386	3	Pasto - Charral
78	731837.0160	1166037.0510	2	Bosque Secundario
79	732084.6138	1168226.4581	2	Bosque Secundario
80	734566.7577	1158769.7473	2	Bosque Secundario
81	734149.0422	1159310.5380	2	Bosque Secundario

Anexo 6. Detalle de maya de puntos aleatorios para la validación de la clasificación de la escena 1553 – Landsat 7

id	X	Y	MC_ID	MC_info
1	741306.6667	1142693.3333	1	Bosque Maduro
2	738846.9231	1142817.6923	3	Pasto - Charral
3	740513.4783	1144814.3478	3	Pasto - Charral
4	737890.0000	1144760.0000	1	Bosque Maduro
5	738680.0000	1147170.0000	3	Pasto - Charral
6	736382.7273	1147294.0909	3	Pasto - Charral
7	737217.8571	1149799.2857	1	Bosque Maduro
8	734350.0000	1148270.0000	1	Bosque Maduro
9	732529.2857	1149293.5714	1	Bosque Maduro
10	734517.9070	1150380.0000	6	Nubes
11	737029.6721	1151613.4426	1	Bosque Maduro
12	738375.0000	1153418.4375	1	Bosque Maduro
13	740700.0000	1154260.0000	3	Pasto - Charral
14	738892.5000	1155556.5000	2	Bosque Secundario
15	735827.0000	1154535.0000	2	Bosque Secundario
16	733470.0000	1152954.0000	3	Pasto - Charral

id	X	Y	MC_ID	MC_info
17	731302.2222	1150996.6667	3	Pasto - Charral
18	729765.0000	1152453.7500	3	Pasto - Charral
19	729063.0000	1154644.8000	3	Pasto - Charral
20	731577.6923	1154914.6154	3	Pasto - Charral
21	734361.9231	1156295.7692	3	Pasto - Charral
22	736263.9623	1156948.5283	5	Cuerpos de Agua
23	730083.7500	1156455.0000	3	Pasto - Charral
24	731925.0000	1158311.2500	3	Pasto - Charral
25	728137.3171	1157987.5610	3	Pasto - Charral
26	730013.3333	1159345.0000	2	Bosque Secundario
27	728063.5714	1160583.2143	7	Sombras
28	726053.7931	1159691.3793	3	Pasto - Charral
29	724677.6923	1161336.9231	3	Pasto - Charral
30	722650.0000	1161247.1429	3	Pasto - Charral
31	722418.7500	1163820.0000	2	Bosque Secundario
32	720248.8235	1163770.5882	3	Pasto - Charral
33	718395.0000	1165668.4615	2	Bosque Secundario
34	721209.2259	1165759.5188	5	Cuerpos de Agua
35	719109.3750	1167691.8750	2	Bosque Secundario
36	717559.1667	1169137.5000	2	Bosque Secundario
37	718975.0000	1170583.0000	2	Bosque Secundario
38	718471.5000	1173024.0000	7	Sombras
39	720856.6667	1169446.6667	2	Bosque Secundario
40	723603.4884	1169153.0233	7	Sombras
41	725851.8180	1169661.9369	6	Nubes
42	728539.5170	1169338.1950	6	Nubes
43	727086.6667	1171670.0000	7	Sombras
44	723413.6063	1165647.1127	5	Cuerpos de Agua
45	726327.1429	1164197.1429	6	Nubes
46	727554.9375	1166831.6250	5	Cuerpos de Agua
47	730518.7500	1168001.2500	2	Bosque Secundario
48	733922.6087	1168202.6087	7	Sombras
49	724959.1141	1165614.5000	5	Cuerpos de Agua
50	727140.5455	1167037.6364	6	Nubes
51	728995.1512	1163043.6997	5	Cuerpos de Agua

id	X	Y	MC_ID	MC_info
52	731396.8120	1162005.8124	5	Cuerpos de Agua
53	730386.9509	1163818.8716	5	Cuerpos de Agua
54	733713.2432	1162393.5135	5	Cuerpos de Agua
55	734010.0000	1159122.8571	3	Pasto - Charral
56	733433.6842	1165479.4737	3	Pasto - Charral
57	735897.6923	1167087.6923	2	Bosque Secundario
58	734721.1007	1164141.7922	6	Bosque Secundario
59	736952.5000	1164855.0000	3	Pasto - Charral
60	736181.5570	1161801.8077	6	Nubes
61	738170.0000	1161055.0000	2	Bosque Secundario
62	738577.0272	1163421.1322	6	Nubes
63	740427.9226	1162072.0502	6	Nubes
64	742260.0000	1161317.0455	7	Sombras
65	737826.0000	1158920.0000	3	Pasto - Charral
66	739425.0000	1157805.0000	2	Bosque Secundario
67	741594.6033	1157454.6772	6	Nubes
68	740942.3077	1159317.6923	3	Pasto - Charral
69	743166.9736	1159193.7551	6	Nubes
70	745571.4286	1158854.2857	7	Sombras
71	744330.9934	1156344.0250	5	Cuerpos de Agua
72	741874.7303	1155655.7365	5	Cuerpos de Agua
73	747360.8079	1155494.5103	6	Nubes
74	746357.6923	1153866.1538	7	Sombras
75	748036.0465	1152041.8605	6	Nubes
76	745992.8571	1151363.5714	3	Pasto - Charral
77	744320.5263	1152898.4211	2	Bosque Secundario
78	744320.5263	1152898.4211	2	Bosque Secundario
79	742325.2500	1143451.5000	1	Bosque Maduro
80	739250.6250	1143570.0000	1	Bosque Maduro
81	740034.5455	1145214.5455	1	Bosque Maduro
82	736020.7692	1146553.8462	3	Pasto - Charral
83	735489.5455	1149205.2273	1	Bosque Maduro
84	733345.2000	1150342.8000	1	Bosque Maduro
85	732275.0000	1151790.0000	1	Bosque Maduro
86	735570.0000	1150870.0000	1	Bosque Maduro

id	X	Y	MC_ID	MC_info
87	736477.5000	1153615.0000	3	Pasto - Charral
88	739630.0000	1155063.3333	2	Bosque Secundario
89	737183.6842	1155775.2632	1	Bosque Maduro
90	737540.6744	1157594.9001	5	Cuerpos de Agua
91	742800.0000	1157535.6522	2	Bosque Secundario
92	742060.3846	1158556.1538	2	Bosque Secundario
93	742718.9362	1159625.7447	7	Sombras
94	735967.0228	1159399.6653	5	Cuerpos de Agua
95	729721.6667	1160213.3333	3	Pasto - Charral
96	727082.5000	1159715.8333	3	Pasto - Charral
97	725076.5625	1159970.6250	3	Pasto - Charral
98	720319.2857	1166140.7143	2	Bosque Secundario
99	719802.0000	1167849.0000	2	Bosque Secundario
100	718447.0588	1169968.2353	3	Pasto - Charral

Anexo 7. Detalle de maya de puntos aleatorios para la validación de la clasificación de la escena 1653 – Landsat 8

id	X	Y	MC_ID	MC_info
1	742288.1818	1143732.4242	1	Bosque Maduro
2	739999.0909	1145138.1818	1	Bosque Maduro
3	735478.5000	1149198.0000	1	Bosque Maduro
4	735618.5950	1150934.1262	1	Bosque Maduro
5	737181.4286	1155781.4286	1	Bosque Maduro
6	739547.8844	1154982.6694	1	Bosque Maduro
7	733228.4211	1150504.7368	1	Bosque Maduro
8	732288.0000	1151817.0000	1	Bosque Maduro
9	744331.0345	1152943.4483	1	Bosque Maduro
10	738505.0000	1153527.8571	1	Bosque Maduro
11	741306.5854	1142861.7073	1	Bosque Maduro
12	737142.3077	1149571.5385	1	Bosque Maduro
13	737103.0000	1149789.0000	1	Bosque Maduro
14	724956.6176	1161799.6923	2	Bosque Secundario
15	723809.0462	1163111.3739	2	Bosque Secundario
16	719771.4014	1167857.7164	2	Bosque Secundario

id	X	Y	MC_ID	MC_info
17	720941.9111	1168845.0598	2	Bosque Secundario
18	718475.0000	1170045.0000	2	Bosque Secundario
19	721746.6667	1169995.0000	2	Bosque Secundario
20	742880.4000	1157562.0000	2	Bosque Secundario
21	742102.1053	1158602.3684	2	Bosque Secundario
22	731891.0526	1166054.2105	2	Bosque Secundario
23	732129.8329	1168193.5105	2	Bosque Secundario
24	727278.6735	1166139.3680	2	Bosque Secundario
25	722403.0000	1163847.0000	2	Bosque Secundario
26	719116.8750	1167695.6250	2	Bosque Secundario
27	718452.0000	1173024.0000	2	Bosque Secundario
28	729030.0000	1165680.0000	2	Bosque Secundario
29	741835.0000	1157485.0000	2	Bosque Secundario
30	743676.1420	1155368.7253	5	Cuerpos de Agua
31	744841.7084	1156152.1579	5	Cuerpos de Agua
32	737775.8165	1157484.5713	5	Cuerpos de Agua
33	737662.5000	1158487.5000	5	Cuerpos de Agua
34	735960.7381	1159461.0499	5	Cuerpos de Agua
35	730317.1698	1161940.7753	5	Cuerpos de Agua
36	730098.4128	1163726.1407	5	Cuerpos de Agua
37	726945.9971	1164300.8729	5	Cuerpos de Agua
38	724646.4321	1164291.2072	5	Cuerpos de Agua
39	723151.2914	1165226.2787	5	Cuerpos de Agua
40	723861.8235	1165862.6865	5	Cuerpos de Agua
41	728714.3539	1165639.2520	5	Cuerpos de Agua
42	736696.2051	1157595.4043	5	Cuerpos de Agua
43	736088.8042	1146641.7027	6	Nubes
44	728292.2222	1157936.6667	6	Nubes
45	725715.5066	1169832.2407	6	Nubes
46	738848.1818	1142885.4545	6	Nubes
47	727023.6000	1171656.0000	6	Nubes
48	726625.1163	1166886.9767	6	Nubes
49	726090.0000	1170915.0000	6	Nubes
50	724730.2941	1170266.4706	6	Nubes
51	737932.8947	1144679.2105	6	Nubes

id	X	Y	MC_ID	MC_info
52	739786.7647	1143053.8235	6	Nubes
53	722436.5854	1169067.8049	6	Nubes
54	723921.8750	1169909.3750	6	Nubes
55	720628.4211	1168699.7368	6	Nubes
56	719307.6923	1172850.0000	6	Nubes
57	722761.3361	1169677.1755	6	Nubes
58	726667.5518	1170548.1462	6	Nubes
59	730891.2389	1168723.7328	6	Nubes
60	731692.1572	1168310.6371	6	Nubes
61	736361.4706	1153553.8235	3	Pasto - Charral
62	728264.1177	1157744.1176	3	Pasto - Charral
63	729722.5000	1160230.0000	3	Pasto - Charral
64	727095.0000	1159645.0000	3	Pasto - Charral
65	725083.3333	1159965.5556	3	Pasto - Charral
66	720210.0000	1166160.0000	3	Pasto - Charral
67	723850.0000	1167615.0000	3	Pasto - Charral
68	734823.0000	1159161.0000	3	Pasto - Charral
69	742482.7769	1159586.5122	3	Pasto - Charral
70	743896.8750	1161279.3750	3	Pasto - Charral
71	739657.5000	1163141.2500	3	Pasto - Charral
72	735641.1224	1163432.7617	3	Pasto - Charral
73	744225.0000	1152766.6667	3	Pasto - Charral
74	731226.0000	1150932.0000	3	Pasto - Charral
75	729638.6380	1152394.2860	3	Pasto - Charral
76	729014.1567	1154530.8966	3	Pasto - Charral
77	731561.6696	1154915.7393	3	Pasto - Charral
78	734362.5000	1156228.5000	3	Pasto - Charral
79	726050.0000	1159682.0000	3	Pasto - Charral
80	724671.6667	1161316.6667	3	Pasto - Charral
81	722678.5714	1161214.2857	3	Pasto - Charral
82	720219.6000	1163822.4000	3	Pasto - Charral
83	733410.0000	1165545.0000	3	Pasto - Charral
84	734046.6667	1168066.6667	3	Pasto - Charral
85	737850.0000	1159038.4615	3	Pasto - Charral
86	742230.0000	1161340.7143	3	Pasto - Charral

id	X	Y	MC_ID	MC_info
87	740021.6667	1162060.0000	3	Pasto - Charral
88	739022.8125	1143467.8125	7	Sombras
89	723861.6567	1168936.7913	7	Sombras
90	738874.6154	1143163.8462	7	Sombras
91	724949.4828	1169798.7931	7	Sombras
92	727086.9231	1170039.2308	7	Sombras
93	731361.0000	1168273.5000	7	Sombras
94	721981.8000	1169369.4000	7	Sombras
95	720167.5000	1169059.3750	7	Sombras
96	720206.7857	1165713.2143	7	Sombras
97	734560.2439	1150048.5366	7	Sombras
98	734178.1132	1150183.5849	7	Sombras
99	737298.6487	1144135.1351	7	Sombras
100	738105.0000	1145355.0000	7	Sombras
101	734890.7368	1147330.7368	7	Sombras
102	741013.7288	1145843.8983	7	Sombras
103	742858.2000	1161596.4000	7	Sombras

REFERENCIAS

- Aguilar Arias, H., Zamora Mora, R. y Vargas Bolaños, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39–59.
- Aguilar Vega, G. (1999). *Ficha informativa de los Humedales Ramsar*. Costa Rica. 17 p.
- Alfaro García, L. (2016). *Propuesta metodológica para la creación y operación participativa de los Consejos de Unidad Hidrológica , establecidos en el proyecto de ley para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico de Costa Rica* . Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Arango, M., Branch, J. y Botero, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: “LANDSAT– ETM+.” *Facultad Nacional de Agricultura Medellín*, 58(1), 2611–2634.
- Área de Conservación Arenal (ACA). (1992). *Resumen Ejecutivo: Plan General de Uso de la Tierra*. Costa Rica: Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (ACDI), Fondo Mundial para la Naturaleza de Canadá (WWF-C).
- 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. <https://doi.org/10.5751/ES-06710-190329>
- Aviles, P., Araneda, F., Duarte, E., Szejner, M. y Vergara, L. (2015). *Mapa de Cobertura Forestal y Uso de la Tierra de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá*. Panamá.
- Beier, P. y Noss, R. F. (1998). Do Habitat Corridors Provide Connectivity? *Conservation Biology*, 12(6), 1241–1252. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1998.98036.x>
- Bennett. (1999). *Linkages in the Landscape: The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*. (1st ed.). Gland, Switzerland and Cambridge, UK: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN).
- Bermúdez Rodríguez, O. D. (2015). *Análisis del paisaje para la microcuenca del río Quebrada Honda para determinar estrategias de ordenamiento y restauración forestal*.

Universidad Nacional de Costa Rica.

- Buendía Rodríguez, E.; Terrazas Domínguez, S.; Vargas Pérez, E. (2002). Aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del oriente del valle de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 8(1), 13–19.
- Bustamante, R. y Grez, A. A. (1995). Consecuencias ecológicas de la fragmentación de los bosques nativos. *Ambiente Y Desarrollo*, 58–63. Retrieved from http://www.ieb-chile.cl/otras_publicaciones/RBustamante/Bustamante_Grez_1995_Ambient_Desarr.pdf
- Cabrera E., Vargas D. M., Galindo G. García, M.C., Ordoñez, M. F. (2011). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia, Nivel Subnacional Escala Grues y fin*. Bogotá D.C., Colombia.
- Calvo Obando, J. (2009). *Determinación de índices de fragmentación y modelamiento de la conectividad en los corredores biológicos de Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Campos Castillo, M. (2012). *Perfil Técnico Corredor Biológico Lago Arenal Tenorio*. Tilarán.
- Canet-Desanti, L. y Finegan, B. (2010). Bases de conocimiento para la gestión de corredores biológicos en Costa Rica. *Mesoamerica*, 14(6), 11–24.
- Cardona, A. M., Ardila, C. V. y Chacón de Ulloa, P. (2013). Estado de fragmentación del bosque seco de la cuenca alta del Río Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*, 13(2), 86–100. Retrieved from http://www.ecosistemassecos.org/Documentos/biota_colombiana.pdf#page=87
- Carrión, E., Vargas, E. C., Alvarez, J. M., Gallardo, J. N., St, H. y Martínez, L. (2011). *Estrategia de conservación y calidad de vida*. Turrialba, Costa Rica. Retrieved from <https://agritrop.cirad.fr/579868/3/579868.pdf>
- Castillo Romero, O. (2012). *Aplicación espectral y topológica en el procesamiento de imágenes satelitales*. Universidad Nacional de Colombia.

- CBLAT. (2014). CBLAT: ¿Quiénes Somos? Retrieved January 10, 2018, from <http://cblat.blogspot.com/p/quienes-somos.html>
- CCT - MAG. (2004). Mapa Ecológico de Costa Rica, según el sistema de clasificación de Zonas de Vida del mundo de L. R. Holdridge (Bolaños, R; Watson; V. 1993 / CCT / esc: 1 : 200 000).
- Chassot, O., Morera, C., Chávez, S., Domian, E., Morera, C. V., Bustillos, N. C. y Jiménez, L. C. (2007). *Corredores biológicos : acercamiento conceptual y experiencias en America*. Centro Científico Tropical (Costa Rica).
- Chavez, P. S. (2006). Image-Based Atmospheric Corrections - Revised and improved. *Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025–1036.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos De Teledetección Espacial*. (Ediciones RIALP. S.A, Ed.) (Segunda ed). Alcalá, Madrid. <https://doi.org/23.304-1995>
- Chuvieco Salinero, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. (S. . Ediciones RIALP, Ed.) (Tercera ed). Madrid.
- Chuvieco Salinero, E. (2008). *Teledetección ambiental la observación de la tierra desde el espacio*. Ariel. Retrieved from https://books.google.co.cr/books?id=aKsNXCVtcQC&pg=PA24&hl=es&source=gb_s_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false
- Consejo de Europa. El Convenio Europeo del Paisaje (2000). Madrid, España.
- Coronado, M. (2014). Análisis de la fragmentación en el Parque Nacional Cerro Azul Meámbar (PANACAM), 29.
- Couto, P. (2004). Análise factorial aplicada a métricas da paisagem definidas em FRAGSTATS. *Investigação Operacional*, 24, 109–137.
- Decreto 25721 - MINAE. Reglamento a La Ley Forestal (1997). La Gaceta. Diario Oficial No. 16, 23 ene. Costa Rica.
- Decreto 26395 - MINAE. Creación de Comisión de Implementación del Plan de Manejo y Desarrollo de la Cuenca del Embalse Arenal (1997). La Gaceta, Diario Oficial No. 202,

21 oct. Costa Rica.

Decreto 27388 - MINAE. Principios, Criterios e Indicadores de Manejo Forestal y Certificación (1998). La Gaceta, Diario Oficial No. 212, 2 nov. Costa Rica.

Decreto 37187 - MINAET. Creación de la Comisión de Implementación y Desarrollo de la Cuenca Arenal Tempisque (CIDECAT) y derogatoria del Decreto Ejecutivo N° 26395-MINAE del 18 de setiembre de 1997 (2012). La Gaceta, Diario Oficial No. 170. Alcance 123, 4 sep. Costa Rica.

Decreto 5706 - Asamblea Legislativa. Garantía con BID Préstamo del ICE Proyecto Hidroeléctrico Arenal (1975). Colección de Leyes y Decretos. 4:1419, 4 jun. Costa Rica.

Decreto Ejecutivo 34433 - MINAE. Reglamento a la Ley de Biodiversidad (2008). La Gaceta, Diario Oficial No. 68, 8 abr. Costa Rica.

Delgado, L., Ramos, S., Martínez, N. y García, P. (2003). Ecología de Paisajes, Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica: Nuevas Perspectivas para el Manejo de Problemas en Salud Pública, Caso Particular la Malaria en el Estado Sucre, Venezuela. *Acta Cient Estud* 2003; 1(4): 128-142.

Diccionario Enciclopédico Dominicano de Medio Ambiente. (n.d.). Término cobertura forestal. Retrieved September 26, 2017, from <http://www.diccionariomedioambiente.org/diccionariomedioambiente/es/definicionVer.asp?id=186>

Duarte, E., Emanuelli, P., Milla, F., Orellana, O. y López, S. (2015). *Sitio piloto Cantón de Puriscal: Análisis de cambios de la cobertura forestal y uso de la tierra mediante imágenes satelitales de alta resolución espacial: Años 2009-2012-2015*. Costa Rica.

Eastman, J. R. (2003). *IDRISI Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing*. Worcester, MA.

Forman, R. T. T. y Godron, M. (1986). *Landscape Ecology* (John Wiley). New York.

Fundación para el Desarrollo del Área de Conservación Arenal (FUNDACA). (2014). ¿Qué hacemos? Retrieved February 10, 2018, from <https://fundaca.wordpress.com/>

- Galván-Guevara, S., Ballut-Dajud, G. y De La Ossa-V, J. (2015). Determinación de la fragmentación del bosque seco del arroyo, *16*(2), 149–158.
- Gómez, A., Anaya, J. y Alvarez, E. (2005). Análisis de fragmentación de los ecosistemas boscosos en una región de la cordillera central de los andes colombianos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *4*(7), 13–27. Retrieved from <http://scienti.colciencias.gov.co:8084/publindex/docs/articulos/1692-3324/2291769/2306313.pdf>
- González Puente, M., Castells Pérez, M. y Baraut Riu, R. (2010). *Análisis de la cobertura de la tierra en el Área de Conservación Arenal-Tempisque de Costa Rica*. Costa Rica.
- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2017). *Informe de Seguimiento I Trimestre Plan Operativo Institucional (POI)*. Costa Rica.
- Jiménez, J. y González, E. (2001). *La Cuenca del Río Tempisque: Perspectivas para un Manejo Integrado*. San José, Costa Rica.
- Jung, M. (2016). LecoS - A python plugin for automated landscape ecology analysis. *Ecological Informatics*, *31*, 18–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.11.006>
- Kattan, G. H. (2002). Fragmentación: patrones y mecanismos de extinción de especies. *Ecología Y Conservación de Bosques Neotropicales*, *1*, 561–582.
- Ley 449 - Poder Legislativo. Ley de Creación del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) (1949). La Gaceta. Diario Oficial. 8 de abril del 1949. 1:257. Costa Rica.
- Ley No. 7575 - Asamblea Legislativa. Ley Forestal. (1996). La Gaceta. Diario Oficial. Alcance N. 72, feb. 13:1-8. Costa Rica.
- Lozano Botache, L. A., Gómez Aguilar, F. A. y Valderrama Chaves, S. (2011). Estado de fragmentación de los bosques naturales en el norte del departamento del Tolima-Colombia. *Tumbaga*, (6), 125–140.
- Matteucci, S. D. y Silva, M. (2009). *Selección de métricas de configuración espacial para la regionalización de un territorio antropizado*. (A. de G. Españoles, Ed.). Madrid, España. Retrieved from <http://www.ebrary.com>

- Mcgarigal, K. (2015). Fragstats.Help.4.2, (April), 1–182. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(12\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(12)00047-9)
- McGarigal, K. y Marks, B. J. (1994). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscapesStructure. *General Technical Report PNW-GTR-351. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Portland, OR, 97331(503), 134.* [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(94\) CE](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(94) CE)
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2013). *Manual para la interpretación de imágenes de sensores remotos de las principales coberturas y usos de la tierra de Costa Rica.* (MAG/INTA/FITTACORI/SUNII, Ed.). San José, Costa Rica.
- Moizo Marrubio, P. (2004). La percepción remota y la tecnología SIG: Una aplicación en ecología de paisaje. *Geofocus. Revista Internacional de Ciencia Y Tecnología de La Información Geográfica*, 4, 1–24.
- Mora, L. (1992). *Diagnóstico Sectorial Forestal.* Costa Rica.
- Morales-Hernández, J. C. y Carrillo-González, F. M. (2016). Cambio de cobertura vegetal en la región de Bahía de Banderas, México, 38(1), 17–29.
- Morera, C., Pintó, J. y Romero, M. (2007). Paisaje , Procesos De Fragmentación Y Redes Ecológicas : Aproximación, (June 2016), 11–32. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Morera_beita/publication/256495889_PAISAJE_PROCESOS_DE_FRAGMENTACION_Y_REDES_ECOLGICAS_APROXIMACION_CONCEPTUAL/links/0deec5231d7ebb5356000000.pdf
- Morera Beita, C. y Sandoval, L. F. (2016). Evaluación de la cobertura boscosa en Costa Rica : Un análisis a nivel de Áreas de Conservación en el año 2000. *Revista Geográfica de América Central*, 1(56), 163–181. <https://doi.org/DOI: http://dx.doi.org/10.15359/rgac.1-56.7>
- NASA. (2013). *Landsat 7 Science Data Users Handbook.* Retrieved from <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov>
- Noss, R. (1986). Nodes, networks, and MUM's: Preserving diversity at all scales.

Environmental Management, 10(3), 299–309.

- Osuna-Osuna, A. K., Díaz-Torres, J. D. J., Anda-Sánchez, J. De, Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J. y Davila-Vazquez, G. (2015). Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994-2010. *Revista Ambiente E Agua*, 10(2), 351–363.
- Patton, D. R. (1975). A Diversity Index for Quantifying Habitat “Edge.” *Wildlife Society Bulletin*, 3(4), 171.
- Pincheira-Ulbrich, J., Rau, J. y Peña-Cortés, F. (2009). Tamaño y forma de fragmentos de bosque y su relación con la riqueza de especies de árboles y arbustos Patch size and shape and their relationship with tree and shrub species richness. *Fyton*, 78, 121–128.
- Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M. y Plata Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 69(69), 33–52. <https://doi.org/ISSN 0188-4611>,
- Pinto Fusalba, J. (2001). Problemática de las conexiones biológicas en territorios densamente urbanizados. El caso del área metropolitana de Barcelona. In *Congreso de Geógrafos Españoles. XVII. 2001. Oviedo* (pp. 198–201).
- Pontius, R. G., Shusas, E. y McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Rajendaran, P. y Mani, K. (2015). Quantifying the Dynamics of Landscape Patterns in. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, 5(10), 77–87. Retrieved from <http://ddd.uab.cat/pub/dag/02121573n48/02121573n48p151.pdf>
- Ramos Bendaña, Z. S. (2004). *Estructura y composición de un paisaje boscoso fragmentado: Herramienta para el diseño de estrategias de conservación de la biodiversidad*.
- Rejas Ayuga, J. G. (2008). Tratamiento Digital Previo de las Imágenes. *Sistemas de Información Geográfica Y Teledetección*, 34.

- Rempel, R. S., Kaukinen., D. y Carr., A. P. (2012). Patch Analyst and Patch Grid. Thunder Bay, Ontario.: Ontario Ministry of Natural Resources. Centre for Northern Forest Ecosystem Research. Retrieved from <http://cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/>
- Rodríguez Pérez, D., Sánchez Carnero, N. y Domínguez Gómez, J. A. (2015). *Cuestiones de teledetección*. Madrid, España: UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Rojas, F. (2014). *Propuesta de Gestión Integrada del Recurso Hídrico para las cuencas Arenal, Tempisque y Bebedero*. Costa Rica.
- Rojas, L. y Chavarría, M. (2005). *Corredores biológicos de Costa Rica*. (Corredor Biológico Mesoamericano sección CR, Ed.). San José.
- Romero, F. (2006). Teledetección Satelital en la Vision Territorial y Sistemas De Proteccion Ambiental Urbano-Rural (1ª Parte). *Urbano*, 9(14), 77–84.
- Salvador, R., Pons, X. y Diego, F. (1996). Validación de un método de corrección radiométrica sobre diferentes áreas montañosas. *Revista de Teledetección*, 7, 3–7.
- Sánchez, E., Granados, A., Chávez, J., Villegas, I. y Mendoza, R. (2010). *Crecimiento urbano y configuración del paisaje en Ciudad Juárez, Chihuahua*. Ciudad Juárez, México. 28 p.
- Saunders, D. A., Hobbs, R. J. y Margules, C. R. (1991). Biological Consequences of Ecosystem Fragmentation - a Review. *Conservation Biology*, 5(1), 18–32. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1991.tb00384.x>
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación - SINAC. (2007). *Propuesta de ordenamiento territorial para la conservación de la biodiversidad en Costa Rica. Volumen I. Análisis de vacíos de conservación en Costa Rica*. San José, Costa Rica. 91 p.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación - SINAC. (2008). *Guía práctica para el diseño, oficialización y consolidación de corredores biológicos en Costa Rica*. San José.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación - SINAC. (2016). Corredores Biológicos. Retrieved September 12, 2016, from

<http://www.sinac.go.cr/ES/correbiolo/Paginas/default.aspx>

Sistema Nacional de Áreas de Conservación - SINAC - Programa REDD-CCAD-GIZ. (2015). *Marco conceptual y metodológico para las faes de premuestreo y muestreo* (Compilado). San José, Costa Rica.

Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) - Programa REDD-CCAD-GIZ. (2015). *Cartografía base para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica 2013-2014*. San José, Costa Rica.

Turner. (1989). *Landscape ecology: the effect of pattern on process. Annual review of ecology and systematics*. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/2097089?seq=1#page_scan_tab_contents

Turner. (1996). of tropical Species loss in fragments rain forest : a review of the evidence continuous is very. *Journal O Applied Ecology*, 33, 200–209.

United States Geological Survey (USGS). (2016). Landsat Project Description. Retrieved June 4, 2017, from <https://landsat.usgs.gov/landsat-project-description>

United States Geological Survey (USGS). (2017a). Landsat 9 | Landsat Missions. Retrieved September 11, 2017, from <https://landsat.usgs.gov/landsat-9-history>

United States Geological Survey (USGS). (2017b). Landsat Missions Timeline | Landsat Missions. Retrieved September 11, 2017, from <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>

United States Geological Survey (USGS). (2017c, June 22). What are the band designations for the Landsat satellites? Retrieved September 10, 2017, from <https://landsat.usgs.gov>

Valdés, A. (2011). Modelos de paisaje y análisis de fragmentación : de la biogeografía de islas a la aproximación de paisaje continuo. *Ecosistemas*, 20(2), 11–20.

Vargas, L. y León, A. (2012). Coordinando esfuerzos para la integración y desarrollo en las cuencas embalse Arenal y Tempisque . La labor de Cidecat, 43(1), 39–46.

Vila, J., Varga, D., Llausàs, A. y Ribas, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía.

Documents D'anàlisi Geogràfica, (48), 151–166. Retrieved from <http://ddd.uab.cat/pub/dag/02121573n48/02121573n48p151.pdf>

Villavicencio Serrano, D. (2012). *Análisis silvicultural, estudio del grado de fragmentación y propuesta de ordenamiento forestal para los bosques de la cuenca media del Río Aranjuez, Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Williams-Linera, G., Manson, R. H. y Isunza Vera, E. (2002). La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa , Veracruz , México. *Madera Y Bosques*, 8(1), 73–89.

Zerda, H. (2001). Clasificación digital de coberturas vegetales a partir de datos satelitales multiespectrales, (1), 1–6.