

Análisis del proceso de fragmentación de bosques: metodologías orientadas en el uso de sistemas de información geográfica y métricas del paisaje

Analysis of forest fragmentation process: methodologies regarding the use of geographic information systems and landscape metrics

Miguel Antonio De Luque¹, Yesica Paola Pérez¹,
Yury Angélica Rodríguez¹, César Jiménez Rodríguez²

¹Cómo citar: De Luque, M. A., Pérez, J. P., Rodríguez, Y. A., y Jiménez-Rodríguez, C., (2019). Análisis del proceso de fragmentación de bosques: metodologías orientadas en el uso de sistemas de información geográfica y métricas del paisaje. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 5(1), 32 – 42. DOI: 10.36436/24223484.193

Resumen

El presente artículo de revisión busca describir la fragmentación de bosques desde un enfoque conceptual y explorar las metodologías implementadas para su estudio a nivel nacional e internacional, principalmente, orientadas al uso de sistemas de información geográfica y diferentes métricas para la caracterización del paisaje. Para ello se realizó la revisión de artículos científicos relacionados con la fragmentación de bosques, análisis espacial y multitemporal. Mostrando el valor único y eficacia en la evaluación de las dinámicas del proceso de fragmentación, que tienen el uso de Sistemas de Información Geográfica, junto con los índices y el análisis de factores económicos, políticos y sociales dentro de un área de estudio.

Palabras clave: Fragmentación de bosques, análisis multitemporal, SIG, cobertura de la tierra, paisaje.

Abstract

The present review article seeks to describe the forests fragmentation from a conceptual approach and explore the implemented methodologies at national and international studies, mainly oriented to the use of geographic information systems and different metrics for landscape characterization. For this, the review of scientific articles related to forest fragmentation, spatial and multitemporal analysis was carried out, showing the unique value and effectiveness in the evaluation of the dynamics of the fragmentation process, which have the use of Geographic Information Systems and the economic, political and social factors analysis and indexes within a study area.

Keywords: Forests Fragmentation, multitemporal analysis, GIS, land cover, landscape.

Introducción

La fragmentación de bosques y los cambios de coberturas han pasado a ser una prioridad en los gobiernos locales para la formulación de políticas de protección de bosques y planeación del uso del territorio (1), debido a que los ecosistemas de bosques son altamente vulnerables a las actividades antrópicas, y los servicios que brindan son esenciales para satisfacer necesidades básicas (2). Estos componentes revelan la importancia del desarrollo estudios que permitan la comprensión de este proceso para conocer el comportamiento y respuesta de los ecosistemas expuestos a las presiones generadas por los procesos humanos (1), para ello se evalúan metodologías que permiten estudiar la fragmentación y el cambio de coberturas, a nivel espacial y temporal (3) como la teledetección, que se ha convertido en una herramienta esencial derivada de programas satelitales con el fin de evaluar los comportamientos y transformaciones de los ecosistemas a través del tiempo; con la elaboración de estudios como el análisis de los cambios de cobertura de la tierra a partir de fotografías aéreas y el uso de sensores remotos (4).

Por lo anterior, en el presente artículo se describe la fragmentación de bosques desde un enfoque conceptual, a partir de las etapas involucradas en el proceso de degradación de bosques, las causas, consecuencias y principalmente, las metodologías

que se han implementado a través de los años a nivel nacional e internacional para comprender la dinámica de la fragmentación y sus implicaciones dentro de la gestión del desarrollo y planeación del territorio. Para ello, se construye este documento con base en una revisión bibliográfica de diferentes artículos científicos a nivel mundial. Su estructura se basa en subtemas, los cuales parten del concepto y generalidades de la fragmentación, los métodos de teledetección empleados para el estudio del cambio de coberturas de la tierra, también se mencionan las métricas del paisaje empleadas para su parametrización y, por último, se mencionan los diferentes softwares que hacen uso de los índices para evaluar de la fragmentación.

Metodología

Para la localización de los documentos bibliográficos se emplearon varias fuentes documentales. Para esto, se realizó una búsqueda bibliográfica desde 1995 al 2019, donde se emplearon bases de datos como Openaire, Scopus, Plos One, Science Direct, Springer link, Biota Colombiana, DOAJ, SciELO y Google Académico.

Se definieron criterios de búsqueda (español e inglés) como fragmentación, bosque, SIG, multitemporal y coberturas de la tierra, de su combinación resultaron 150 textos científicos, de los cuales se seleccionaron aquellos que abordaron temas sobre: fragmentación de bosques, servicios ecosistémicos, conflictos de uso, transformaciones del paisaje, cambios de coberturas de la tierra, gestión del territorio, análisis multitemporal del proceso de fragmentación, metodologías para su parametrización y la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). De cada texto se analizó la información relacionada con el objetivo de la investigación. Luego, priorizaron aquellos artículos enfocados en la aplicación de los SIG en el estudio de la fragmentación y se descartaron aquellos que tenían un enfoque puntual en los efectos de la fragmentación sobre un ecosistema específico.

La revisión fue sistematizada, en la cual incluyeron artículos por su relevancia en el tema, lo cual resultó en 62 artículos para la revisión.

Generalidades de la fragmentación de bosques:

El proceso de la fragmentación de bosques es la principal causa de la extinción de especies a nivel mundial (5). Si bien es un proceso que ha acompañado el crecimiento y el desarrollo de la humanidad por miles de años, (5) debido a que los bosques proveen recursos indispensables para la supervivencia humana (2) y beneficios vitales en el desarrollo socioeconómico y la conservación de la biodiversidad (6); y que se ha intensificado por el aumento de la capacidad tecnológica, haciendo que el hombre haya alterado en su propio beneficio la mayor parte de la tierra emergida útil (7), también, existe una fragmentación resultante de procesos naturales, que se deriva de condiciones ambientales específicas a nivel de hidrología, topografía, clima, entre otras (8,9).

Es un proceso dinámico (6) en el que un área amplia e intacta de bosque es progresivamente subdividida en pequeños parches o fragmentos (8,10) geoméricamente alterados y aislados (2,5,6,11) inscritos en otros usos del suelo distintos (12), rodeado por matrices generalmente antrópicas (13), lo que genera la modificación de las condiciones medioambientales y el funcionamiento de los ecosistemas (14),(15), provocando elevada mortalidad de árboles y plantas juveniles (13), caída acelerada de las hojas, alteración en el almacenamiento de carbono, y en otros procesos como la abundancia de algunas especies, en la productiva, formación de detritus, movimiento de agua y nutrientes, la sucesión y la competencias entre otros (16,17). Autores han descrito el proceso de fragmentación en cuatro etapas: i) la perforación, en la cual se crea un agujero o hueco en la cobertura original; ii) la subdivisión, en la cual las áreas de coberturas de la tierra más grandes se dividen en parches más pequeños; iii) la contracción, que es la etapa en la cual se pierde la conectividad entre los parches de cobertura original; y por último, iv) la etapa de desgaste, en la cual los parches originales del paisaje disminuyen gradualmente en tamaño hasta que finalmente desaparecen (18,19). Las etapas mencionadas implican cuatro efectos importantes de los cuales se derivan las principales consecuencias de la fragmentación, que son la reducción en la cantidad de hábitat, el aumento en el número de parches o fragmentos, la disminución en el tamaño de cada parche y el incremento en el aislamiento de los parches (20).

Por otro lado, la fragmentación es un motor de cambio global muy variable en el tiempo y en el espacio (21), que se mani-

fiesta no solamente como proceso, sino como patrón dentro del espacio geográfico (22). Si el grado de aislamiento de los fragmentos es muy alto, el movimiento de organismos entre ellos puede limitarse, de tal manera que se disminuye el intercambio y la diversidad genética de las poblaciones tanto de plantas como de animales (14,23). El conocimiento de este permite cierta inferencia sobre sus probables impactos, incluso sin un conocimiento detallado de todos los procesos que podrían verse afectados, posibilita identificar y priorizar regiones y organismos para la medición directa de los impactos (24).

A nivel mundial, la fragmentación es considerada como una amenaza para los procesos que se llevan a cabo en la tierra, a nivel climático, en los ciclos biofísicos e hidrológicos, en la diversidad biológica y últimamente para los servicios ecosistémicos (6)(25), ya que conlleva un proceso de transformación del territorio que se observa en la extensión e intensificación de cultivos, desarrollo de áreas agrícolas tradicionales, silvicultura intensiva practicada dentro de los bosques subtropicales, industrias madereras y extracción minera, traducidas en las tasas más altas de cambio forestal a nivel mundial (26) y principalmente, en el aumento de superficies urbanizadas como el sellado del medio edáfico (27) que se refiere a la transformación de paisajes forestales para el desarrollo de viviendas, centros comerciales, y otras estructuras, que resulta en la degradación de coberturas de bosques e incrementa la sensibilidad de los componentes de la biosfera y la atmósfera (28). Los ecosistemas forestales alrededor del mundo son los más afectados y se estima que en las últimas décadas en los trópicos se han reportado las mayores pérdidas de área, principalmente en América del Sur y África con tasas anuales de pérdida de bosques de 0,43 % y 0,54% respectivamente (29).

Debido a esto, ha emergido como una prioridad de investigación, la comprensión de la dinámica de la fragmentación de bosques y los cambios en las coberturas de la tierra, para entender el desarrollo del pasado como base para la planeación y como guía para la conservación en un futuro(6,30). Esto ha ocasionado que el enfoque en la fragmentación tenga altas prioridades en la agenda local de los gobiernos para la formulación de políticas de protección y planeación de uso del territorio (2) de manera que las políticas dirigidas de modo adecuado pueden transformar las áreas agrícolas a bosques en áreas que formen corredores para la vida silvestres, garantizando la persistencia de especies y evitando que afecte negativamente la biodiversidad (31)(32).

Para llevar esto a cabo se requiere una sólida comprensión de la relación entre la cobertura y los patrones espaciales de los fragmentos de los bosques, cuestiones que aún siguen siendo desconocidas para diferentes ecosistemas (5), por lo tanto, es necesario desarrollar propuestas que sirvan como herramientas y que sean aplicables en diferentes escenarios (33) para ayudar a comprender muchos de los temas complejos que involucran la evaluación de la fragmentación, los cuales son necesarios(5). Para esto, los índices del paisaje basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG), junto con el análisis de las fuerzas motrices socioeconómicas y políticas, demuestran su valor único y eficacia en la evaluación de los patrones y dinámicas de la fragmentación, partiendo de la necesidad de examinar qué, dónde y hasta qué punto, los cambios en el paisaje se han producido, y además, para entender cómo y por qué ha ocurrido el cambio (34). Estos índices, junto con la teledetección, proporcionan una herramienta eficiente para poder mapear y monitorear los cambios en los patrones de la fragmentación (28), capturando la pérdida de hábitat, la perforación del hábitat y la conectividad (35) junto con la estimación cuantitativa y cualitativa de las características biofísicas de las áreas de bosque, así como el modelamiento a largo plazo del desarrollo del paisaje de bosque y los procesos que son relativamente largos a escala espacial (6,34).

Satélites disponibles:

El monitoreo de la fragmentación de bosques, tanto espacial como temporal es esencial para comprender y mantener los servicios ecosistémico (36), como la riqueza de la biodiversidad, la regulación del clima, el almacenamiento de carbono y el suministro de agua (26), para ello se emplea la recolección del conjunto de datos mediante la teledetección, la cual ofrece fundamentos y técnicas para el monitoreo y cuantificación de variaciones en la superficie (37), permite el mapeo sistemático de los ecosistemas forestales en un rango de escala espacial, incluyendo regional y global, facilita el estudio de la evolución de las coberturas de la tierra (30,35,37) y mejora la caracterización de la heterogeneidad del paisaje describiendo los patrones espaciales de unidades ecosistémicas estructurales (distribución de coberturas vegetales) (38).

Actualmente se realiza mediante sensores a bordo de satélites aerotransportados, representan un método de bajo costo y permiten evaluar grandes extensiones de terrenos o zonas remotas e inaccesibles (39), dichos sensores miden la cantidad de

radiación electromagnética que refleja la superficie de la tierra y los objetos que hay en ella, son ideales para capturar y retratar cuantitativamente las condiciones en un momento dado con el fin de conocer los impactos y el cambio del uso del suelo a través del tiempo (4,40), los satélites (Tabla 1) y sensores más empleados son:

Tabla 1. Satélites de teledetección

SATÉLITE	SENSOR	RESOLUCIÓN ESPACIAL	Nº BANDAS	RESOLUCIÓN TEMPORAL
DMC	SLIM-6	32m	3	<1 día
	SLIM-66-22	22m	3	<1 día
IKONOS	IKONOS	MS: 4m PAN: 1m	4	3 a 5 días
KOMPSAT-2	KOMPSAT-2	MS: 4m PAN 1M	4	3 días
LANDSAT-7	ETM+	MS 30m PAN 15m	8	16 días
QUICKBIRD	QUICKBIRD	MS 2,44 m PAN: 0,61m	4	2 a 4 días
RAPIDEYE	RAPIDEYE	6,5m	5	1 día
SPOT	HRG	MS 10 m PAN:2,5 ó 5m	4	2,4-3,7 días
	HRS	PAN:10m	1	26 días
WORLDVIEW-2	WORLDVIEW-2	MS: 2m PAN: 0,5m	8	1-a 3días
RAPIDEYE	RAPIDEYE	5m	5	1 a 5.5 días
SENTINEL 2	SENTINEL 2	10 m	13	10 días

Nota: PAN: Imagen pancromática MS: Imagen multiespectral
PS: Una fusión de las imágenes PAN y MS (41,42),(43)

Índices empleados:

Como se ha mencionado, perturbaciones naturales y antropogénicas alteran la composición de los ecosistemas generando fragmentación forestal, para su monitoreo se requiere información detallada de cuándo y dónde se producen cambios en los bosques (30) partiendo del uso de medidas estadísticas también llamados indicadores o índices que describen la composición del

paisaje y la configuración. La cuantificación y la comparación de los índices de fragmentación han sido muy utilizados por investigadores (10) y reconocidos como la forma más eficaz para evaluar la fragmentación (44). Estos reflejan los patrones espaciales de los ecosistemas aportando interesantes datos numéricos sobre la composición y la configuración de un hábitat (20), la proporción de cada cobertura del suelo o la superficie y la forma de los elementos. Además, los índices permiten hacer comparaciones entre distintas configuraciones paisajísticas, la misma área en distintos momentos temporales o la definición de escenarios futuros a través de medidas de área, forma o borde de los fragmentos (45,46).

Dentro de estos índices se pueden encontrar: i) El número de parches (NumP); ii) Media del tamaño del parche (MPS), iii) Media del borde del parche (MPE), iv) Coeficiente de varianza del tamaño del parche (PSCoV); v) Índice de diversidad de Simpson (SDI), vi) Índice de diversidad de Shannon (SEI) (39), vii) Porcentaje de paisaje (PLAND), viii) Índice de parche más grande (LPI), ix) Media del índice de forma (SHAPE), x) Dimensión fractal (FRAC) entre otros, (47). Estas medidas o índices abarcan un análisis más allá de solo el cambio en la cantidad de ecosistema (20) por lo tanto, es necesario analizar la funcionalidad y las relaciones que manejan cada uno de ellos, de manera que la escala de análisis corresponda al objetivo de cada estudio. Para ello, Mc Garigal y Marks definen las métricas del paisaje en cuatro niveles correspondientes i) métricas a nivel de celda ii) métricas a nivel de parche iii) métricas a nivel de clase iv) métricas a nivel de paisaje. Las primeras representan un contexto espacial local, el segundo nivel que es de parche analiza el carácter espacial de manera individual, mientras que el nivel de clase representa la distribución espacial de un conjunto de parches del mismo tipo, por lo tanto, estas métricas se interpretan comúnmente como índices de fragmentación, y por último, el nivel de paisaje representa un patrón espacial interpretándose como índices de heterogeneidad porque miden la estructura general de un área (48).

1 Disponibilidad del software Fragstats: http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/downloads/fragstats_downloads.html

2 Disponibilidad del software Patch Analyst: <http://patch-analyst.software.informer.com/5.2/>

Softwares usados para la medición de la fragmentación:

Existe una gran variedad de software desarrollado con la finalidad de cuantificar las características de la estructura del paisaje. De acuerdo con la revisión realizada se pueden destacar como los más empleados los siguientes:

Fragstats : Es un programa de análisis de patrones creado el año 1995, fue desarrollado por el Dr. Kevin McGarigal y Barbara Marks en la Universidad estatal de Oregon (45). Ofrece una amplia gama de métricas de paisaje y se ha utilizado para cuantificar la estructura del paisaje, permitiendo analizar la fragmentación, describir las características del paisaje y componentes. Estas estadísticas facilitan la comparación de paisajes y la evaluación de procesos. La ventaja de FRAGSTATS es que los cálculos se implementan de una manera totalmente integrada en un SIG y por lo tanto fácil de aplicar al mapa digital (49).

Patch Analyst : Creado en el año 1999 por Phil Elkie, Rob Rempel y Angus Carr, con financiación aportada por el Ministerio de Recursos Naturales de Ontario (Canadá). Éste se limita a calcular exclusivamente los principales índices de paisaje.

Existe una versión que trabaja en formato vectorial y otra en formato raster, funcionan como una extensión de ArcView y es de acceso libre en la red (45).

V-Late . Creado el año 2003 por un equipo del Landscape and Resource Management Research Group, de la Universidad de Salzburg (Austria), dirigido por Dirk Tiede en el marco del proyecto de investigación europeo denominado SPIN (Spatial Indicators for Nature Conservation). Trabaja en formato vectorial y se presenta como una extensión de ArcGis. En este caso, también se trata de un programa de acceso libre disponible en la red (45,50).

Ilwis . Distribuido por el International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), integra técnicas convencionales de un SIG con el procesamiento digital de imágenes y el modelamiento espacial manejando una estructura de datos raster, que permite la elaboración de mapas vectoriales por ejemplo de densidad de fragmentos y grado de fragmentación (51).

SAGA GIS . Es el Sistema Automatizado para el Análisis Geocientífico creado por el Instituto de Geografía de Göttingen en Alemania (52), mide la cantidad de celdas adyacentes a las coberturas de bosques dentro de una matriz de evaluación. Es un software multiplataforma de libre acceso en red (53).

Estudios de caso:

El uso de imágenes satelitales del programa espacial Landsat es uno de los más usados y antiguos para la detección del cambio de coberturas de la tierra, un claro ejemplo es la evaluación de fragmentación de bosque en el sur de Nueva Inglaterra donde se emplearon Imágenes del programa Landsat de los años 1973 y 1988 para clasificar las coberturas en zonas de bosques y ausencia de bosques, utilizando una serie de operaciones de delimitación a través del valor digital de los píxeles que componen las diferentes bandas, datos que fueron posteriormente incorporados a un sistema de información geográfico ARC/INFO (54).

En Alabama EE. UU evaluaron la tasa de cambio forestal y fragmentación mediante la interpretación de 163 escenas Landsat™ de 1987-2005, con el propósito de clasificar la cobertura vegetal se empleó un modelo de seguimiento de vegetación diseñado para analizar pilas de series temporales densas de imágenes Landsat clasificando las coberturas en 8 clases (55). Otro estudio que uso imágenes de satélite Landsat ETM con un nivel de exactitud de 30 m/píxel y ortofotosdigitales escala 1:20000, para determinar el nivel de fragmentación en la región de Chame-la-Cuixmala, se realizó en México, aplicado a enfermedades de las hojas en un bosque seco tropical de temporada generados por la fragmentación del hábitat, los cuales fueron clasificados en bosques continuos y remanentes forestales (56). Por otro lado, en los últimos años se realizó un análisis de los cambios temporales entre 1990-2014 de la deforestación y la fragmentación de los bosques del Himalaya en la región de Kumaon de Uttarakhand, India, para la caracterización de los patrones de fragmentación de bosques, se utilizó un Modelo de fragmentación Según el cual, los bosques pueden ser clasificadas en cinco categorías diferentes de fragmentación (57).

Por su parte en el Atlántico del Paraguay, se realizó una detección de cambios en las coberturas de la tierra basados en imágenes de satélite entre 2003 y 2013; el análisis se realizó mediante Beta V-Late 2.0, que a su vez se basó en el programa de software FRAGSTATS (50).

Li et al, 2015 proponen un nuevo método (desarrolla en ModelBuilder de ESRI © ArcGIS) para mapear y medir los procesos espacialmente explícitos de fragmentación del paisaje basados en el modelo general de Forman. Este método se aplica en Shenzhen, China, donde la cobertura forestal experimentó una pérdida dramática debido a la rápida urbanización (18).

En México se realizó un análisis de fragmentación mediante técnicas de percepción remota en el Área Prioritaria para la Conservación de Pastizales (APCP) denominada Cuchillas de la Zarca, mediante el uso de imágenes satelitales del programa Landsat TM y la obtención de métricas del paisaje de la zona. Una vez procesadas y generadas las clases de cobertura para las áreas en estudio, se importaron al software ArcGis y se generaron las métricas utilizando la extensión de análisis de fragmentación Patch Analysis, y finalmente se determinaron las áreas fragmentadas de las zonas mediante índices de evaluación paisaje (39). El uso de los índices para reconocer y evaluar los cambios de los patrones de distribución también fue usado en la Patagonia-Chile en un estudio de la pérdida y fragmentación del bosque nativo en la cuenca del río Aysén durante el siglo XX (58). Estos índices, se calcularon utilizando el software FRAGSTATS 3.3, con el fin de investigar el grado de cambio de hábitat debido a la expansión de las redes de carreteras y de las ciudades en la provincia de Yunnan, China (47).

Por otro lado, en Colombia existen actualmente múltiples metodologías y sistemas de clasificación para levantar información de las coberturas de la tierra. El proyecto "CORINE Land Cover Colombia"; es una metodología probada en países de la Unión Europea y Centroamérica, la cual permite hacer comparaciones con la información de otros países y facilita los análisis multitemporales de las coberturas del territorio. Se propuso estandarizar este sistema de clasificación, con categorías jerárquicas definidas de acuerdo con la información que pueden proporcionar las imágenes de satélite Landsat TM, conforme con las condiciones locales del territorio nacional (59). Un caso de estudio que aplica esta metodología fue usado para determinar los cambios en el uso del suelo entre 1992 y 2005 para una región de los Andes colombianos; permitiendo identificar una disminución del área total en pastos, y un aumento en cultivos (43). Igualmente en

el santuario de fauna y flora los flamencos, se hace uso de la metodología Corine Land Cover para determinar los cambios de cobertura provocados por la interrupción del equilibrio debido a las actividades humanas; reportando que un 41% ha presentado cambios considerables en este (60).

Teniendo en cuenta lo anterior, se observa que las tecnologías SIG son herramientas ampliamente usadas a nivel nacional e internacional en los estudios del paisaje a diferentes escalas, gracias a que tienen la capacidad de adaptar la información de la superficie de la tierra mediante la extracción de datos georreferenciados espacialmente de manera que se puede construir un modelo aproximado a la realidad (61) permitiendo la verificación de la dinámica de la naturaleza en el espacio y el tiempo (62).

Conclusiones

1. Moncada D. Análisis espacio-temporal del cambio en los bosques la alfarería en aguabuena , (Ráquirá, Boyacá). Rev Colomb For. 2010;13(2):275–98.
2. Liu Y, Feng Y, Zhao Z, Zhang Q, Su S. Socioeconomic drivers of forest loss and fragmentation: A comparison between different land use planning schemes and policy implications. Land use policy [Internet]. 2016;54:58–68. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.01.016>
3. Reza M. Measuring forest fragmentation in the protected area system of a rapidly developing Southeast Asian tropical region. Sci Postprint [Internet]. 2014 Sep 10 [cited 2018 Oct 5];1(1). Available from: <http://www.spp-j.com/spp/1-1/spp.2014.09A0001/>
4. Quiasua A, Corredor Z, Sánchez D. Análisis multitemporal del cambio de coberturas de la localidad ciudad Bolívar con tecnología CLASlite. Semillas Ambient. 2016;10(2):38–45.
5. Carranza M, Hoyos L, Frate L, Acosta A, Cabido M. Measuring forest fragmentation using multitemporal forest cover maps: Forest loss and spatial pattern analysis in the Gran Chaco, central Argentina. Landsc Urban Plan [Internet]. 2015;143:238–47. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.006>

3Disponibilidad del software V-late: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=69963ab422d04e649b64ac11cbadafed>

4Disponibilidad del software Ilwis: <https://www.itc.nl/ilwis/download/ilwis33/>

5Disponibilidad del software SAGA GIS: <http://www.saga-gis.org/en/index.html>

6. Sharma M, Areendran G, Raj K, Sharma A, Joshi P. Multitemporal analysis of forest fragmentation in Hindu Kush Himalaya—a case study from Khangchendzonga Biosphere Reserve, Sikkim, India. *Environ Monit Assess* [Internet]. 2016;188(10). Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-016-5577-8>
7. Santos T, Tellería L. Pérdida y fragmentación del hábitat : efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas* [Internet]. 2006;15(2):3–12. Available from: http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=423&Id_Categoria=2&tipo=portada
8. Estrada E. GIS-based ecosystem fragmentation analysis : The Riviera Maya, Mexico as a case study. 2008;1–9.
9. Milan E, Moro R. Padrões de fragmentação florestal natural no parque estadual de Vila Velha, Ponta Grossa (PR). *Rev Ambiente*. 2012;8(Especial 1):685–97.
10. Chapa D, Sosa J, Abraham A. Estudio multitemporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y Bosques* [Internet]. 2008 [cited 2017 Mar 6];14(1):37–51. Available from: <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v14n1/v14n1a4.pdf>
11. Galván, Silvia; Ballut, Gastón; De La Ossa J. Determinación de la fragmentación del bosque seco del arroyo Pechelín, Montes de María, Caribe, Colombia. *Biota Colomb*. 2015;16(2):149–57.
12. Cabezas A, Ospina R. Análisis Del Paisaje Y De Su Relación Con La Regeneración Del Roble en el municipio de Popayán , Departamento Del Cauca. *Colomb For*. 2010;13(2):189–200.
13. Montenegro L. Dinámica temporal y espacial de la fragmentación del bosque nativo en el sur de Chile. *Colomb For* [Internet]. 2001;7(14):71–84. Available from: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/article/view/3209/4699>
14. Mas J, Correa J. Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida Los Petenes, Campeche, México. *Investig Geogr* [Internet]. 2000 [cited 2017 Mar 6];43:42–59. Available from: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n43/n43a4.pdf>
15. Santos N, Etter A. Proceso de transformación de la cobertura forestal en El Valle del Magdalena Medio en el periodo de 1987-2001. *Am-biente y Desarrollo*. 2008;23(12):105–32.
16. Laurance WF, Lovejoy TE, Vasconcelos HL, Bruna EM, Didsam RK, Stouffer PC, et al. Ecosystem Decay of Amazonian Forest Fragments. 2002;16(3):605–18.
17. Zamar J, Alessandria E, Abril E. Reducción y fragmentación de bosques de la región del espinal en la cuenca Rafael García-Lozada, Córdoba. *Rev Científica Agropecu* [Internet]. 2007 [cited 2017 Mar 6];11(1):23–31. Available from: http://ns1.fca.uner.edu.ar/rca/Volumenes Anteriores/Vol Ante 11/rca_11_pdf/23_31.pdf
18. Li S, Yang B. Introducing a new method for assessing spatially explicit processes of landscape fragmentation. *Ecol Indic* [Internet]. 2015 Sep [cited 2017 Mar 13];56:116–24. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X15001557>
19. Ren X, Lv Y, Li M. Evaluating differences in forest fragmentation and restoration between western natural forests and southeastern plantation forests in the United States. *J Environ Manage* [Internet]. 2017 Mar [cited 2017 Mar 6];188:268–77. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479716309604>
20. Fahrig L. Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annu Rev Ecol Evol Syst* [Internet]. 2003;34(1):487–515. Available from: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
21. Valladares F, Flores D, Forner A, Morán T, Díaz M. Influencia de la fragmentación y el clima en procesos clave para la regeneración del encinar. *Ecosistemas* [Internet]. 2014 [cited 2017 Mar 6];23:37–47. Available from: <http://www.redalyc.org/pdf/540/54031601006.pdf>
22. Gurrutxaga M, Lozano P. Efectos de la fragmentación de hábitats y pérdida de conectividad ecológica dentro de la dinámica territorial. *Polígonos*. 2006;16:35–54.
23. Bustamante R, Simonetti J, Grez A, San Martín J. Fragmentación y dinámica de regeneración del bosque Maulino: diagnóstico actual y perspectivas futuras. 2004 [cited 2017 Mar 6]; Available from: ftp://146.83.237.34/eng/publications/pdf/Bustamante_et_al_2005_Hist Biod y Ecol Bosques Costeros.pdf

24. Riitters K, Wickham J, O'Neill R, Jones B, Smith E. Global-scale patterns of forest fragmentation. *Ecol Soc.* 2000;4(2).
25. Gomez A, Anaya J, Alvares E, Gómez A, Anaya J, Alvarez E. Análisis De Fragmentación De Los Ecosistemas Boscosos En Una Región De La Cordillera Central De Los Andes Colombianos. *Rev Ing Univ Medellín* [Internet]. 2005;4(7):13–27. Mora, A. M. G., Anaya, J. A., & Dávila, E. Á. (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.
26. Hansen M, Potapov P, Moore R, Hancher M, Turubanova A, Tyukavina D, et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* (80-). 2013;342(November):850–4.
27. Valera A, Añó C, Sánchez J. Transformación de usos agrícolas tradicionales en superficies construidas. Cambios en los usos y coberturas del suelo en el municipio de Valencia (1956-2005). *Estud Geográficos* [Internet]. 2016;72(271):681–703. Available from: <http://estudiosgeograficos.revistas.csic.es/index.php/estudiosgeograficos/article/view/358/357>
28. Fuller D. Forest fragmentation in Loudoun County, Virginia, USA evaluated with multitemporal Landsat imagery. *Landsc Ecol* [Internet]. 2001;16(Oke 1987):627–42. Available from: <http://www.springerlink.com/index/G8723X885635371W.pdf>
29. Calamari N, Vilella F, Sica Y, Mercuri P. Patch and landscape responses of bird abundance to fragmentation in agroecosystems of east-central Argentina. *Avian Conserv Ecol.* 2018;13(2).
30. Hermosilla T, Wulder M, White J, Coops N, Pickell P, Bolton D. Impact of time on interpretations of forest fragmentation: Three-decades of fragmentation dynamics over Canada. *Remote Sens Environ* [Internet]. 2019;222(December 2018):65–77. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.027>
31. Kozak J, Ziółkowska E, Vogt P, Dobosz M, Kaim D, Kolecka N, et al. Forest-cover increase does not trigger forest-fragmentation decrease: Case Study from the Polish Carpathians. *Sustainability.* 2018;10(5).
32. Duque A, Álvarez E, Rodríguez W, Lema Á. Impacto de la fragmentación en la diversidad de plantas vasculares en bosques andinos del nororiente de Colombia. *Colomb For.* 2013;16(2):115–37.
33. Echeverry M, Rodriguez J. Análisis De Un Paisaje Fragmentado Como Herramienta Para La Conservacion De La Biodiversidad En Áreas De Bosque Seco Y Subhúmedo Tropical En El Municipio De Pereira , Risaralda Colombia. *Sci Tech.* 2006;(30):405–10.
34. Tang J, Bu K, Yang J, Zhang S, Chang L. Multitemporal analysis of forest fragmentation in the upstream region of the Nenjiang River Basin, Northeast China. *Ecol Indic* [Internet]. 2012;23:597–607. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.012>
35. Pickell P, Coops N, Gergel S, Anderson D, Marshall P. Evolution of Canada's boreal forest spatial patterns as seen from space. *PLoS One.* 2016;11(7):1–20.
36. Turner M, Donato D, Romme W. Consequences of spatial heterogeneity for ecosystem services in changing forest landscapes: Priorities for future research. *Landsc Ecol.* 2013;28(6):1081–97.
37. Insaurrealde J. Estudio de la evolución de las coberturas espaciales en el suroeste de la provincia del Chaco, entre 1989 y 2010, mediante la Teledetección. *Rev Univ Geogr* [Internet]. 2012;21(1):31–57. Available from: http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652012001100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
38. Cabello J, Paruelo J. La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas.* 2008;17(3):1–3.
39. De León G, Pinedo A, Martínez J. Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en cuchillas de la Zarca, México. *Investig Geográficas* [Internet]. 2014 Jan 27 [cited 2017 Mar 6];0(84). Available from: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/36568>
40. Hermosilla T, Wulder M, White J, Coops N, Hobart G, Campbell L. Mass data processing of time series Landsat imagery: pixels to data products for forest monitoring. *Int J Digit Earth.* 2016;9(11):1035–54.
41. Drusch M, Del Bello U, Carlier S, Colin O, Fernandez V, Gascon F, et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for

- GMES Operational Services. *Remote Sens Environ.* 2012;120:25–36.
42. Labrador M, Évora J, Arbelo M. Satélites de teledetección para la gestión del territorio. 2012. 65 p.
43. Valencia G, Anaya J. The corine land cover method. 2009;90(15):39–52.
44. Reddy C, Sreelekshmi S, Jha C, Dadhwal V. National assessment of forest fragmentation in India: Landscape indices as measures of the effects of fragmentation and forest cover change. *Ecol Eng [Internet]*. 2013 Nov [cited 2017 Mar 13];60:453–64. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857413004102>
45. Subirós J, Varga D, Llausas A, Ribas A. Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). *Doc d'Anàlisi Geogràfica*. 2006;48:151–66.
46. Rudas G, Marcelo D, Armenteras D, Morales M, Delgado LC, Sarmiento A. Biodiversidad y actividad humana: relaciones en ecosistemas de bosque subandino en Colombia. *Instituto Humboldt*; 2007. 128 p.
47. Liu S, Dong Y, Deng L, Liu Q, Zhao H, Dong S. Forest fragmentation and landscape connectivity change associated with road network extension and city expansion: A case study in the Lancang River Valley. *Ecol Indic [Internet]*. 2014 Jan [cited 2017 Mar 13];36:160–8. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X1300280X>
48. McGarigal K. Fragstats help. *Dep Environ Conserv [Internet]*. 2015;(April):1–8. Available from: https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/FY2017-37_FAA_Aerospace_Forecast.pdf
49. Çakir G, Sivrikaya F, Keleş S. Forest cover change and fragmentation using Landsat data in Maçka State Forest Enterprise in Turkey. *Environ Monit Assess.* 2007;137(1–3):51–66.
50. Da Ponte E, Roch M, Leinenkugel P, Dech S, Kuenzer C. Paraguay's Atlantic Forest cover loss – Satellite-based change detection and fragmentation analysis between 2003 and 2013. *Appl Geogr [Internet]*. 2017 Feb [cited 2017 Mar 13];79:37–49. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143622816308050>
51. Lozano L, Gómez F, Valderrama S. Estado de fragmentación de los bosques naturales en el norte del departamento del Tolima-Colombia. *Tumbaga*. 2011;(6):125–40.
52. Camargo E, Vargas V, Rojas A, Pacheco C. Estimación de cobertura boscosa mediante el sistema Terra-Amazon y análisis de fragmentación en los municipios de Viotá (Cundinamarca) y Fuente de Oro (Meta), Colombia (2016). 2016;15–23.
53. López F. Análisis de Conectividad Espacial y Fragmentación de la Ecorregión Ciénaga Grande. 2017;13(3):1576–80.
54. Vogelmann JE. Assessment of Forest Fragmentation in Southern New England Using Remote Sensing and Geographic Information Systems Technology. *Conserv Biol.* 1995;9(2):439–49.
55. Li M, Huang C, Zhu Z, Shi H, Lu H, Peng S. Assessing rates of forest change and fragmentation in Alabama, USA, using the vegetation change tracker model. *For Ecol Manage [Internet]*. 2009 Mar [cited 2017 Mar 12];257(6):1480–8. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112708009109>
56. García G, Trejo I, Sánchez ME. Foliar diseases in a seasonal tropical dry forest: Impacts of habitat fragmentation. *For Ecol Manage [Internet]*. 2016 Jun [cited 2017 Mar 13];369:126–34. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112716301335>
57. Chakraborty A, Ghosh A, Sachdeva K, Joshi PK. Characterizing fragmentation trends of the Himalayan forests in the Kumaon region of Uttarakhand, India. *Ecol Inform [Internet]*. 2017 Mar [cited 2017 Mar 13];38:95–109. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1574954116300796>
58. Bizama G, Torrejón F, Aguayo M, Muñoz MD, Echeverría C, Urrutia R. Perdida y fragmentación del bosque nativo en la cuenca del río Aysen (patagonia-chile) durante el siglo xx. *Rev Geogr Norte Gd.* 2011;138(49):125–38.
59. IDEAM, IGAC, CORMAGDALENA. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Vol. 1, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional

del río Grande de la Magdalena. 2008. 200 p.

60. Corredor L, Cárdenas E, Ordóñez J. Aplicación de la metodología corine land cover en la determinación de los cambios de cobertura en el parque natural los flamencos. Cienc e Ing Neogranadina. 2011;21-2:153-67.

61. Ferreira J, Luz C. Proposta de manejo de paisagem na APA do Sana (Macaé- RJ). Bol do Obs Ambient Alberto Ribeiro Lamego. 2011;173-201.

62. Camboim G, Marques E, Thum A, Barboza E. Geoprocessamento Aplicado À Análise Ambiental: Vulnerabilidade Natural À Perda De Solo No Morro Do Osso, Porto Alegre/Rs. Geografia. 2015;39(3):465-81.