
Cuantificación y espacialización de resiliencia ecosistémica basada en análisis multitemporal.

Resiliencia en bosques alto andinos a incendios forestales en Colombia

Quantificação e espacialização de resiliência ecossistêmica baseada em análise multitemporal.
Resiliência em florestas alto-andinas a incêndios florestais na Colômbia

Quantification and spatialization of ecosystem resilience based on multitemporal analysis.
Resilience of high Andean forest to forest fires in Colombia

Rafael Rebolledo Wueffer

Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería
Cajicá, Cundinamarca, Colombia
rafael.rebolledo@unimilitar.edu.co; rebolledo.wueffer@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6631-2910>

Resumen

Resultados de una investigación que consistió en caracterizar y representar la resiliencia de un ecosistema como un tema geo-espacialmente definido, a partir de un estudio multitemporal, que sistematiza los principales indicadores de resiliencia ecosistémica a partir de la detección y análisis de cambios. Para desarrollar esta estrategia, se analizó un bosque altoandino seminatural en las áreas montañosas de la provincia de Sabana Centro, al norte de Bogotá, y al este de la ciudad de Zipaquirá, departamento de Cundinamarca, Colombia. Se analizó la resiliencia ante incendios forestales, específicamente eventos reportados y documentados entre enero y febrero del 2001. La metodología planteada implicó desarrollar un análisis multitemporal para detección de cambios y estudios de conectividad y dinámica, en observaciones del área de estudio antes y después del incendio forestal, estableciendo parámetros que permitieran construir la curva de resiliencia de dicho ecosistema ante tal evento, valorando geo-cualitativamente su desempeño.

PALABRAS CLAVE: ecosistema; bosque andino seminatural; incendio forestal; resiliencia.

Resumo

O artigo traz resultados de uma investigação que consistiu em caracterizar e representar a resiliência de um ecossistema como um tema geo-espacialmente definido, a partir de um estudo multitemporal que sistematiza os principais indicadores de resiliência ecossistêmica a partir da detecção e análise de mudanças. Para desenvolver essa estratégia, foi analisada uma floresta alto andina seminatural nas áreas montanhosas da província de Sabana Centro, ao norte de Bogotá, e ao leste da cidade de Zipaquirá, departamento de Cundinamarca, Colômbia. Analisou-se a resiliência a incêndios florestais, especificamente eventos reportados e documentados entre janeiro e fevereiro de 2001. A metodologia proposta consistiu em desenvolver uma análise multitemporal para a detecção de mudanças e estudos de conectividade e dinâmica, em observações da área de estudo antes e depois do incêndio florestal. Assim, foram estabelecidos parâmetros que permitiram a construção da curva de resiliência do ecossistema a tal evento e avaliação geoquantitativa de seu desempenho.

PALAVRAS-CHAVE: ecossistema; floresta alto andina seminatural; incêndio florestal; resiliência.

Abstract

This paper resumes results of a research initiative about characterizing, quantifying, and representing the ecosystem resilience, in terms of a geo-spatially defined issue, based on a multitemporal geomatic study oriented to change detection. These techniques allow the systematization of the main ecosystem resilience indicators. To develop this strategy, a case study of high Andean Forest will be developed in the mountainous areas of the *Sabana Centro* region, *Bogotá north*, specifically in the forests at east of *Zipaquirá*, department of *Cundinamarca, Colombia*. For this forest, an event of forest fires reported and documented at the beginning of 2001 have been analyzed. The proposed strategy consists of developing a fragmentation estimation and a multitemporal analysis of observations of the study area before and after the forest fire that occurred. Based on that analysis, conditioning parameters have been established to draw resilience curve of this ecosystem according to forest fire events; at the same time, a thematic map of resilience to forest fire is produced, based on a geo-qualitative assess.

KEY WORDS: ecosystem; Andean semi-natural forest; forest fire, resilience.

1. Introducción

Siendo un término originalmente ajeno al campo de las ciencias ambientales, la resiliencia es un concepto cada vez más adoptado para la valoración de impactos ambientales, para la determinación de la fragilidad de ecosistemas, o bien en estudios de sensibilidad ambiental y estimación de riesgos socio-naturales. La primera vez que se habló de ese tema en tal contexto fue el 2005 en el marco de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, presentada en la Conferencia Mundial sobre la Reducción de Desastres de Hyogo (Fortes, 2019). En este acuerdo se define a la resiliencia como la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse, transformarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas tras un tiempo determinado.

En tal sentido, este concepto contempla dos aspectos importantes: 'tiempo' empleado en esta recuperación y la 'calidad' de dicha recuperación, pues puede darse el caso donde el impacto sea tal que implique un cambio drástico del ecosistema intervenido tras la recuperación de condiciones de equilibrio. En estos casos no se podría hablar de resiliencia sino de transformación, pues el equilibrio perdido nunca se alcanzó. Este aspecto implica aún hoy en día, un punto de discusión para los entusiastas de la caracterización de resiliencia ecosistémica; sin embargo, estrategias de análisis de coexistencia espacial de condicionantes de resiliencia podrían contribuir a sistematizar objetivamente esta valoración. Esto, unido a la consideración de técnicas geomáticas de análisis multitemporal de imágenes de satélite, que valorarían la dimensión temporal de la resiliencia; constituyen una estrategia de análisis adecuado e idónea para caracterizar la resiliencia ecosistémica con precisión.

La técnica de análisis multitemporal de imágenes de satélite consiste en desarrollar distintas observaciones durante un periodo de tiempo determinado para identificar, interpretar y analizar cambios en la distribución geoespacial

de temas específicos en el mismo espacio geográfico, con la finalidad de detectar y cuantificar estos cambios en un lapso definido. Más allá de los fines propios de todo estudio multitemporal, este análisis se podría complementar con técnicas de fragmentación del paisaje (McGarigal y Marks, 1995) y la valoración del modo y la dinámica de cambio, conceptos desarrollados en investigaciones pasadas (Rebolledo y Albarrán, 2013). Por su parte, la técnica geomática de análisis de coexistencia espacial ha demostrado ser una herramienta eficaz al momento de modelar cualitativamente la sensibilidad ambiental (Rebolledo, 2009).

Este conjunto de técnicas integrado y aplicado a los condicionantes de resiliencia establecidos en el artículo de Holling (1973) 'Resiliencia y Estabilidad de Ecosistemas', y complementadas en el de Westman y O'Leary (1986) 'Medidas de la Resiliencia', contextualizadas en este caso a la cuantificación absoluta de cambios, podrían resultar útiles para establecer una manera objetiva de evaluar si los resultados del proceso de adaptación ecosistémica son resilientes o simplemente transformación. La conjugación e integración de las técnicas anteriormente mencionadas son base de la hipótesis planteada en este estudio, según la cual es posible precisar temporal y espacialmente el concepto de resiliencia ecosistémica con ayuda de procedimientos geomáticos de detección de cambios. En este sentido, el contenido presentado en este artículo constituye un resumen de esta investigación y refiere los aspectos y detalles procedimentales más relevantes de esta experiencia que pretende poner a la geomática y diversas técnicas de este campo, al servicio de la caracterización de resiliencia; en este caso, la resiliencia de un bosque andino seminatural ante incendios forestales.

2. Materiales y metodología

Para este estudio se implementaron dos tipos de datos: los que permitan inventariar y geolocalizar los eventos que constituyen la acción perturbadora (incendio de ene-feb 2001), y las imágenes de satélite del lote boscoso sobre el

cual se hizo el estudio desde el año 2001 hasta el año 2003.

2.1 Datos de inventario de eventos

De manera preliminar se hizo una revisión hemerográfica, que permitió ubicar el hecho (incendio forestal) el día 3/02/2001, ocurrido en las cercanías de la ciudad de Zipaquirá y activo desde los últimos días del mes de enero de ese mismo año. Posteriormente, para corroborar el hecho, se consultó el servicio FIRMS (*Fire Information for Resource Management System*) de la Nasa, el cual registra y georreferencia históricamente los focos de fuego forestal, a partir de información derivada de algoritmos de anomalías térmicas de la reflectancia percibida por el sensor MODIS de los satélites Terra y Aqua.

2.2 Imágenes para el estudio multitemporal

Se recopilaron imágenes satelitales de la época, disponibles en el geo-portal del Servicio Geológico Norteamericano (USGS, *Global Visualization Viewer –GloViS-* 2005). Para componer la ventana de observación se descargaron cinco imágenes de la misma zona, partiendo de una línea base (estadio previo incendio) y cuatro imágenes sucesivas que completan 2 años de observaciones periódicas durante la misma época. En este caso, debido a la naturaleza retrospectiva del estudio multitemporal, se utilizaron imágenes del sensor ETM+ del satélite Landsat 7, dada la ventana de observación (2001-2003).

2.3 Metodología

Teniendo en cuenta los tipos de datos utilizados en este estudio, se tomó como indicador del estado ecosistémico al índice normalizado de diferencias de vegetación (NDVI) y al índice de área quemada (NBRI) como indicador de

incendios forestales. A partir de ello, se estableció una metodología con dos macroprocesos: preprocesamiento, para la preparación de los datos, y análisis de cambio, con la cual se pretendió cuantificar y espacializar las principales características de la resiliencia de este bosque a incendios forestales. En la FIGURA 1 se ve el diagrama de flujo que ilustra el procedimiento metodológico desarrollado para este estudio.

2.3.1 Corrección atmosférica

Este proceso contempla la aplicación del algoritmo de sustracción de objeto oscuro DOS (*Dark Object Subtraction*); el DOS es una de las muchas opciones disponibles para este ajuste a las imágenes de satélite y básicamente tiene por finalidad eliminar el 'efecto bruma' producido por nubes poco densas. El algoritmo de Substracción de Objeto Oscuro es una familia de correcciones atmosféricas basadas en imagen. Este algoritmo (Chávez, 1988) explica que para los píxeles que representan objetos que están completamente en sombra o son objetos espectralmente negros, la radiancia que de ellos se recibe en el sensor es producto de la bruma (dispersión atmosférica); así, este algoritmo analiza los valores de los niveles digitales de la imagen y selecciona de ellos los más pequeños y establece a partir de allí, el efecto bruma; haciendo un ajuste lineal de todos los niveles digitales con base en dicha diferencia. Como todas las demás opciones, el DOS no es una metodología infalible porque asume un ajuste lineal e independiente para cada banda (Curcio, 1961), pero es la opción disponible en el software de procesamiento que se está usando en este caso: *Semi-Automatic Classification Plugin*, desarrollado por Luca Congedo (2016), bajo la filosofía de software libre como complemento de QGIS.

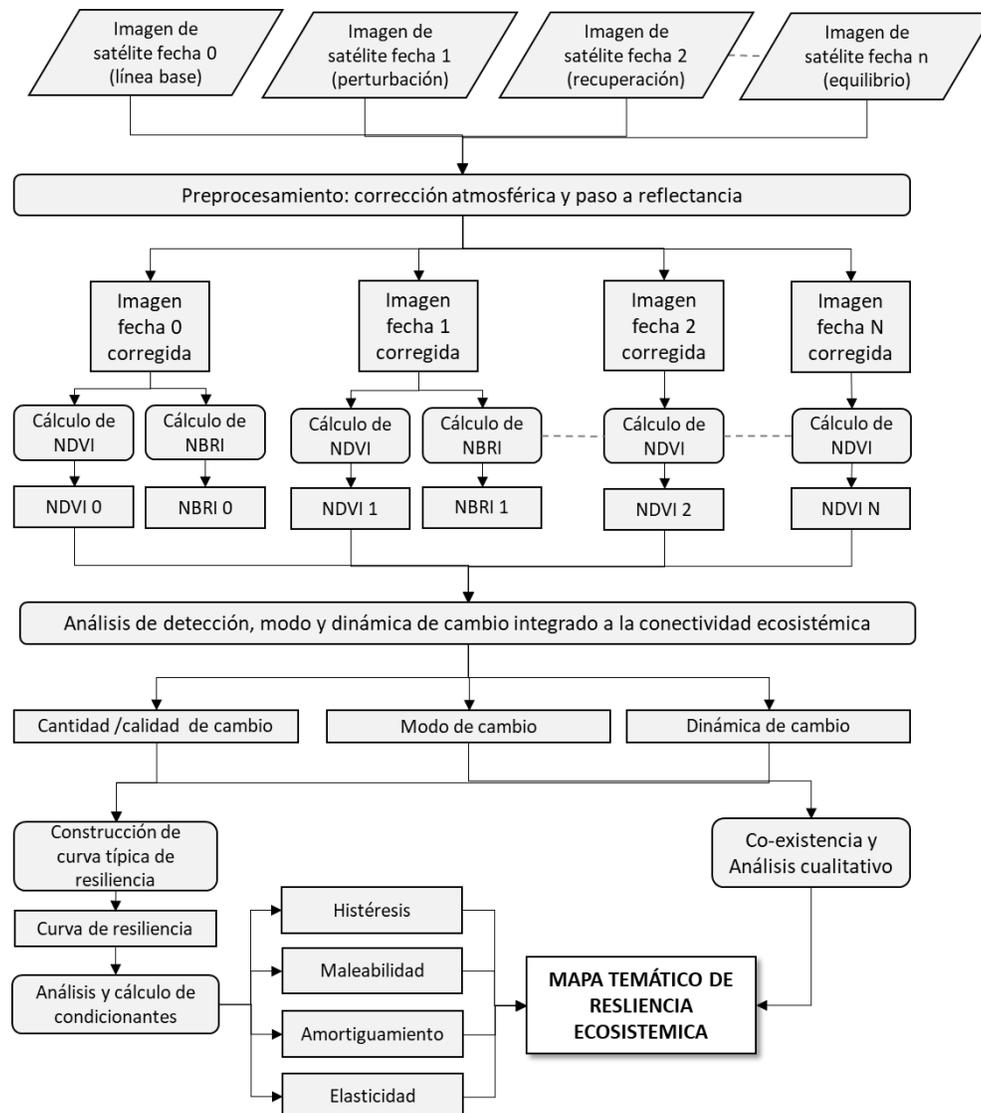


FIGURA 1. Esquema metodológico del estudio

2.3.2 Transformación de niveles digitales reflectancia

Este proceso contempla la conversión de los niveles digitales de cada banda a valores de energía reflejada; para ello, el algoritmo lee el metadato de cada imagen, parámetros de captura que permiten asociar cada respuesta en niveles digitales a valores energéticos, primero de radiancia y luego de reflectancia (Moran *et al.*, 1992). Desde el punto de vista procedimental, este proceso se ejecuta de manera automática

como parte del preprocesamiento que desarrolla *Semi-Automatic Classification Plugin*, para QGIS.

2.3.3 Cálculo de NDVI y NBRI

Tanto el NDVI como el NBRI son índices espectrales orientados a identificar de manera indexada características de vegetación densa y saludable (caso del NDVI) como áreas quemadas tras el paso de incendios forestales (Caso NBRI); esta opción tecnológica permite tanto identificación sistemática y objetiva de los

bosques y su desarrollo, como la presencia previa de incendios forestales. En términos procedimentales, estos índices se obtienen a partir de la calculadora ráster del software QGIS donde se ejecutan las ecuaciones que representan a cada uno (ver ecuaciones I y II).

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)} \quad \dots (I)$$

$$NBRI = \frac{(SWIR-NIR)}{(SWIR+NIR)} \quad \dots (II)$$

Donde:

R: Respuesta espectral del rango rojo

NIR: Respuesta espectral del rango del infrarrojo cercano

SWI R: Respuesta espectral del infrarrojo de onda corta

Este procedimiento se ejecuta para todas las imágenes que hacen parte del proceso de observación, las cuales se integraron a análisis multitemporal para detección de cambios.

2.3.4 Enmascaramiento y recorte al área de estudio

Este proceso consiste en definir el área sobre la que se desarrollará el análisis de detección de cambios, en este caso el lote boscoso que alberga a la vereda Oran, cercano al sector de Rio Frio en la cordillera ubicada al este de Zipaquirá. La identificación de este lote se hace con base a su conformación inicial (línea base) a saber: la extensión y forma que dicho lote tenía para el 21 de enero del año 2001, antes de los incendios forestales. Procedimentalmente, a partir de esta imagen se digitalizó un polígono límite de dicho lote a una escala de 1:12.500; posteriormente, se hizo un buffer de 50m para prever algún crecimiento exterior de dicho bosque. Mas adelante, se enmascararon y seccionaron las imágenes de NDVI y (NBRI para las dos primeras) de cada fecha que fue integrada al estudio multitemporal de detección de cambios, con la finalidad de agilizar los procesos de detección de cambio de manera que se refieran exclusivamente al área de estudio y a la acción de perturbación señalada.

Posteriormente, desde estos rásters seccionados se desarrolló un proceso de clasificación no supervisada que estableció rangos para diferenciar todo lo que es bosque de lo que no lo es dentro del área de estudio. Con un criterio similar, se establecieron los rangos de clasificación que corresponden al tema de áreas calcinadas. Los rangos asumidos en cada caso responden a las características del tema que representan, a saber: cualquier valor positivo implica la presencia de formas vegetales, en la medida que el índice se acerca a 1 la densidad y el área foliar de dichas formas vegetales son mayores. En la TABLA 1 se muestra el criterio asumido para la diferenciación de categorías para el caso de bosques.

TABLA 1. Criterios para categorización de índices

Rango NDVI	Categoría	Descripción
-1 < X ≤ 0	Clase 0	Suelo sin vegetación
0 < X ≤ 0.25	Clase 1	Pastizal, potrero o sabana abierta
0.25 < X ≤ 0.5	Clase 2	Sabana arbolada, o bosque poco denso
0.50 < X ≤ 0.75	Clase 3	Bosque medianamente denso
0.75 < X ≤ 1	Clase 4	Bosque denso o plantación

2.3.5 Análisis temporal de detección de cambios

Este proceso constituye el eje fundamental de esta propuesta de aprovechamiento tecnológico, pues traducido e integrado a una dimensión temporal, permitirá componer la curva de resiliencia del bosque estudiado a eventos de incendio forestal.

a) **Métricas de fragmentación:** conjunto de indicadores que caracterizan la distribución espacial de las clases de un espacio geográfico; fueron definidas por McGarigal y Marks en 1995. En este caso, se determinaron las ocho métricas principales y con base en ellas, se analizaron las cinco clases en el tema NDVI y tres en el tema

NBRI. Este procedimiento se repitió para cada instante de observación, las métricas empleadas para este estudio fueron las siguientes: Proporción de área de clase (%), Cantidad de lotes, Suma perimetral de lotes (m), Densidad perimetral (m/m^2), Densidad de lotes (lot/m^2), Tamaño de malla efectivo (Ha), Índice de cohesión entre lotes (%), Proporción de Adyacencia y Área núcleo (m^2).

b) **La cuantificación del cambio:** permite establecer de manera absoluta la pérdida o ganancia de área de bosque, producto de la interacción con el evento perturbador (incendio forestal). Ello posibilitó sistemáticamente establecer si hay degradación, recuperación o no hay cambios totales del ecosistema.

- **Degradación del bosque:** ocurre cuando la cantidad de área total de los elementos característicos del ecosistema boscoso disminuye dentro del área de estudio, entre un momento de observación y otro momento subsiguiente.
- **Recuperación del bosque:** cuando el total de los elementos característicos (áreas bosque) aumenta dentro del área de estudio entre dos instantes de observación cronológicamente consecutivos.
- **Ausencia de cambios totales:** implica la condición en la cual las cantidades de áreas cubierta por bosque permanecen constantes, independientemente de si se experimentan casos de disgregación o cambio de forma en los elementos que constituyen la unidad.

Para poder sustentar esta categorización del cambio fue necesario sistematizar un procedimiento operativo que permite evidenciarlo a partir de las categorías de cobertura que hacen parte de este estudio (sin

vegetación, pastizal, sabana arbolada, bosque medianamente denso y bosque denso). Para implementar este procedimiento se diseñó una ecuación en álgebra de mapas que facilitara evidenciar la calidad del cambio surgido entre un estado inicial y un estado final. La ecuación III muestra esa relación:

$$Cb = (10 \times Ci) + Cf. \dots(III)$$

Donde:

- Ci:** Es la condición inicial, es decir, la observación a partir de la cual se evidenciará el cambio en cada intervalo estudiado
- Cf:** Es la condición final; el estado del ecosistema al finalizar la observación parcial en cada intervalo
- Cb:** Es el ráster que refleja de manera numérica el cambio entre la condición inicial y la condición final

Este arreglo permite genera un valor numérico distinto para cada posible resultado tras la combinación de Ci y Cf. La siguiente matriz transicional refleja todas las combinaciones numéricas y su respectiva interpretación cualitativa a partir de la definición inicial de clases. La diagonal en dicha matriz (color amarillo) representa las situaciones donde no se experimentan cambios, el triángulo superior derecho indica todas las posibles situaciones de ganancia o cambio positivo (color verde); es decir, todos los casos donde el ecosistema evoluciona desde pastizales a bosques, el triángulo inferior izquierdo, por el contrario, indica todas las situaciones posibles de degradación ecosistémica (color rojo), es decir cambios negativos (FIGURA 2).



FIGURA 2. Matriz de transición

c) El modo de cambio: es una medida complementaria del análisis clásico de detección de cambios (Rebolledo y Albarrán, 2013). Básicamente consiste en desarrollar un análisis de fragmentación del paisaje, pero a lo largo del tiempo de observación. El modo de cambio enfoca en análisis desde la perspectiva estructural del tema que, dentro del paisaje, constituye la unidad ecosistémica de observación (bosque en este caso). El modo de cambio permite entonces estimar cuan íntegra permanece dicha unidad observada a través del tiempo. De acuerdo con este criterio, el modo de cambio de una unidad boscosa puede ser de tres tipos: Agregación, Disgregación y Homogéneo.

- **Agregación:** representa la reunión o agrupamiento de segmentos de la misma clase con tendencia a disminuir la cantidad total de lotes.
- **Disgregación:** por el contrario, indica la degradación, ruptura y dispersión de elementos de la misma clase, con la tendencia a aumentar la cantidad de lotes, aunque sean de menor tamaño.

- **Condición de Homogeneidad:** ocurre cuando independientemente del aumento y/o disminución del tamaño de lotes boscosos (elementos), estos permanecen íntegros en cuanto a su forma y cantidad.

En este contexto, las condiciones de agregación o disgregación se identifican a partir de cambio en las métricas de agregación. Estableciéndose para este estudio un umbral de cambio significativo de $\pm 10\%$, que consideran un paisaje fragmentado cuando tiene cambios entre 10% y 60% de hábitat natural; por debajo de ese 10%, se considera inalterable y por encima de 60%, fragmentado o relictos (Mcintyre y Hobbs, 1999). Así, se podría establecer el criterio para la valoración cualitativa del modo de cambio según lo establecido en la TABLA 2.

TABLA 2. Criterio de modo de cambio a partir de % cambio en métricas de agregación

	Aumenta hasta 10%	Disminuye hasta 10%	Aumenta entre 11 y 60%	Disminuye entre 11 y 60%	Aumenta más del 60%	Disminuye más de 60%
Densidad de lotes :	homogéneo	homogéneo	disgregación media	agregación media	disgregación alta	agregación alta
Índice de cohesión entre lotes (%):	homogéneo	homogéneo	agregación media	disgregación media	agregación alta	disgregación alta
Proporción de Adyacencia:	homogéneo	homogéneo	agregación media	disgregación media	agregación alta	disgregación alta

El criterio desarrollado acá, con base a las métricas supone la incorporación de tres distintitas condiciones para la valoración cualitativa; de allí que, dado que son independientes, existe la posibilidad de que la valoración de dichas condiciones diverja durante

una observación. En estos casos, se tomará como válida aquella métrica que más se acerque a la condición ideal. Esta condición ideal es el estado más representativo posible de cada una de las condiciones involucradas. La TABLA 3 indica esas condiciones ideales y su justificación.

TABLA 3. Valores ideales de las métricas de modo de cambio

Métrica	Valor ideal	Justificación
Densidad de lotes :	1.1 ‰	La resolución de la fuente ráster admite un máximo finito de lotes de tamaño equivalente a 1 pixel. Así, la máxima densidad de lotes 'spirarle' es la máxima cantidad de pixeles entre el área de estudio
Cohesión entre lotes (%):	100%	A ser una expresión porcentual la mayor cohesión posible es 100%
Proporción de Adyacencia:	1	Es un índice, de allí que la mayor proporción de adyacencia esperada es 1

En la práctica, esta decisión se sistematiza a partir de la comparación de los resultados con respecto a la condición ideal; así, tras la comparación se optará como determinante cualitativo aquella métrica que más se acerque a la condición ideal entre las tres.

d) **Dinámica espacial de cambio:** la dinámica espacial de cambio es un criterio de análisis que se enfoca en estudiar la forma de los elementos que constituyen la representación espacial de la

unidad territorial estudiada (en este caso Bosque) y como se 'mueven' dentro del espacio del área de estudio dentro de la ventana temporal de observación. Este concepto fue introducido para estudiar bosques amazónicos en Venezuela (Rebolledo y Albarrán, 2013). Este análisis se orienta a identificar si el cambio observado entre un momento y otro supone un cambio de forma o un desplazamiento. De acuerdo con este criterio, la dinámica espacial de cambio se

interpreta a partir de la variación entre un estado y el otro y puede ser de dos tipos:

- **Estático:** cuando los elementos de unidad boscosa estudiada permanecen en su lugar, independientemente de las condiciones y modos de crecimiento.
- **Desplazante:** cuando los elementos o lotes que componen la unidad estudiada, tras un cambio, se reorganizan de manera tal que indican una relocalización geográfica aparente dentro del espacio del área de estudio.

2.3.6 Construcción de mapas de resiliencia

Una vez establecida la cantidad, el tipo, el modo y la dinámica de cambio resulta necesario desarrollar un proceso que permita integrar los resultados de estas perspectivas de análisis en términos del significado de la resiliencia; en tal sentido, la primera tarea a desarrollar es determinar cuáles son las condiciones positivas, nulas y negativas; en términos de cuánto y cómo promueven el desarrollo de resiliencia desde cada perspectiva de análisis. La TABLA 4 resume los criterios y las condiciones asociados a cada dimensión de análisis.

TABLA 4. Criterios para la valoración del cambio en términos de resiliencia

Dimensión	Contribución	Criterio y Condiciones
Cantidad de cambio	Positivo (+1)	Aumenta la cobertura boscosa
	Nulo (0)	Permanece igual la cobertura boscosa
	Negativo (-1)	Disminuye la cobertura boscosa
Calidad o tipo de cambio	Positivo (+1)	Sin vegetación que se convierte en pastizal o en sabana arbolada (1 y 2), Sin vegetación que se convierte a bosque medianamente denso o a Bosque denso (3 y 4), Pastizal que se convierte en sabana arbolada o a bosque medianamente denso o denso (12, 13 y 14). Sabana arbolada que se convierte bosque medianamente denso o a Bosque denso (23 y 24). Bosque medio que se convierte a bosque denso (34)
	Nulo (0)	Permanece sin vegetación o permanece como pastizal o permanece como sabana o como bosque en general (0, 11, 22, 33 y 44)
	Negativo (-1)	Pastizal que pierde vegetación (10), Sabana que pierde vegetación, sabana degradada a pastizal (20 y 21), Bosque medio o denso que pierde toda su vegetación (30 y 40), Bosque medio o denso que se degrada a sabana o a pastizal (31, 32, 41 y 42) y Bosque denso que se degrada a medio (43)
Modo de cambio	Positivo (+1)	Agregación alta, agregación media
	Nulo (0)	Homogéneo
	Negativo (-1)	Disgregación alta, disgregación media
Dinámica de cambio	Positivo (+1)	Cambio estático creciente agregado, Cambio estático creciente disgregado Cambio con desplazamiento constante homogéneo, Cambio con desplazamiento creciente homogéneo
	Nulo (0)	No hay cambios
	Negativo (-1)	Cambio estático decreciente disgregado o agregado, Cambio con desplazamiento, decreciente homogéneo

Para sistematizar este proceso en términos geomáticos se necesita implementar una secuencia de operaciones de álgebra de mapas que, partiendo de la identificación de criterios positivos, nulos y negativos, genere la valoración numérica correspondiente a cada condición, para luego desarrollar la matriz tridimensional en álgebra de mapas.

3. Resultados

3.1 Expresión temática de la resiliencia

Tal como lo indica el esquema metodológico, los datos de observación para el estudio

multitemporal fueron preprocesados en donde, tras la corrección atmosférica, pasó a reflectancia y el cálculo del NDVI, los datos modificados se incorporaron a un análisis de detección, modo dinámica y conectividad. Finalmente, con el resultado de este análisis se logró, además de una estimación sistemática y precisa de la resiliencia, una representación geoespacial a modo de mapa temático para cada periodo de cambio. Esto último constituye una novedad para enriquecer la interpretación efectiva de la resiliencia del ecosistémica ante incendios forestales (FIGURA 3).

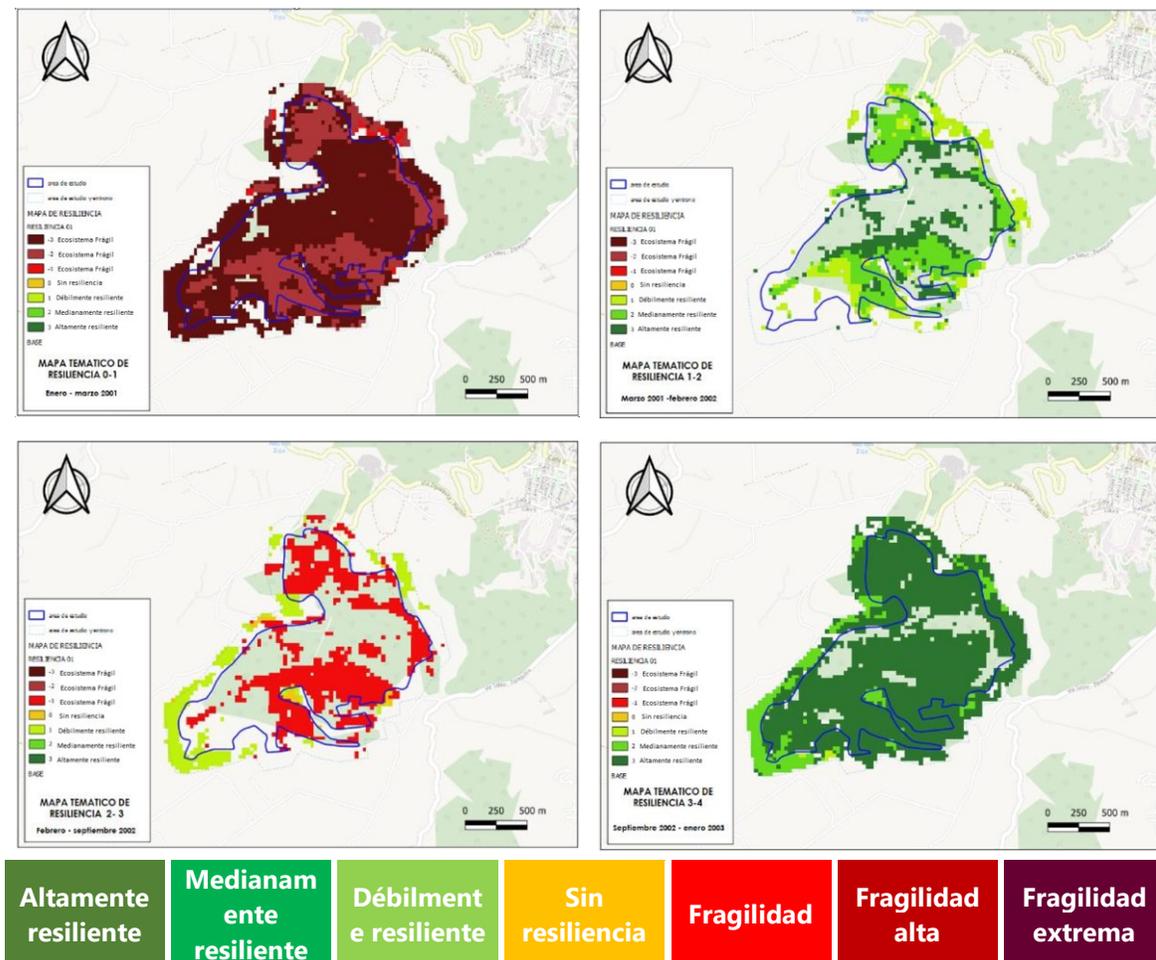


FIGURA 3. Mapas temáticos de evolución de la resiliencia durante el periodo de estudio

3.2 Curva de resiliencia

Establecidos la cantidad, el tipo, el modo y la dinámica de cambio se desarrolló un proceso integrador de estos en términos de la significación conceptual de la resiliencia. Así, se

valoraron criterios positivos, nulos y negativos para cada perspectiva de análisis, y posteriormente se integraron, en una matriz de tres dimensiones, como muestra la FIGURA 4.

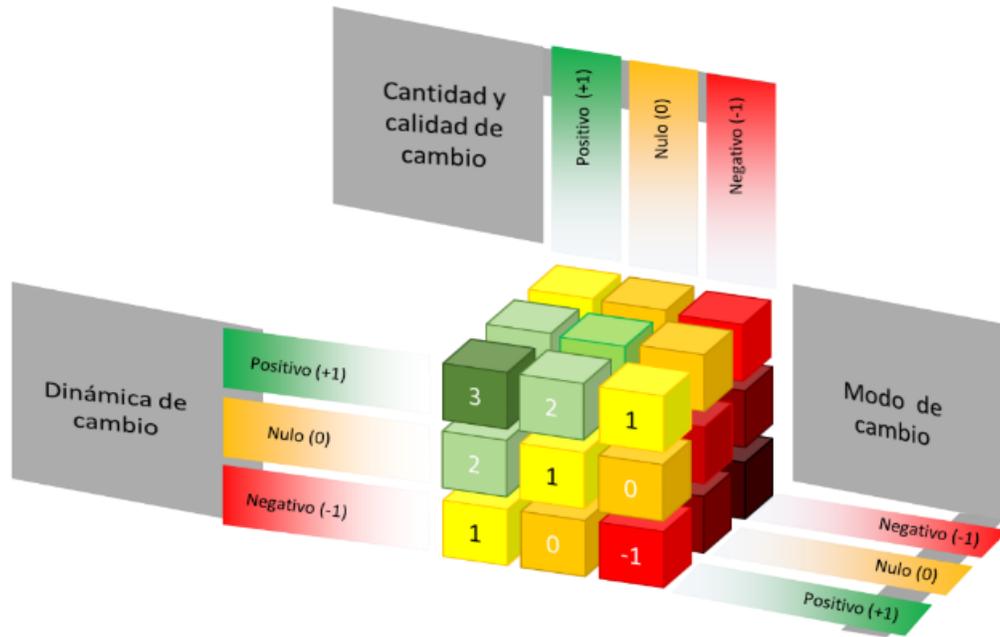


FIGURA 4. Integración matricial de valoración del cambio en términos de la resiliencia

La curva de resiliencia se construyó con base al crecimiento progresivo de las clases representativas del bosque (clase 3 bosque medianamente denso, y clase 4 bosque denso),

durante el periodo de observación (línea continua roja), tal como se muestra en la FIGURA 5. La línea azul segmentada refleja el resultado esperado en condiciones ideales

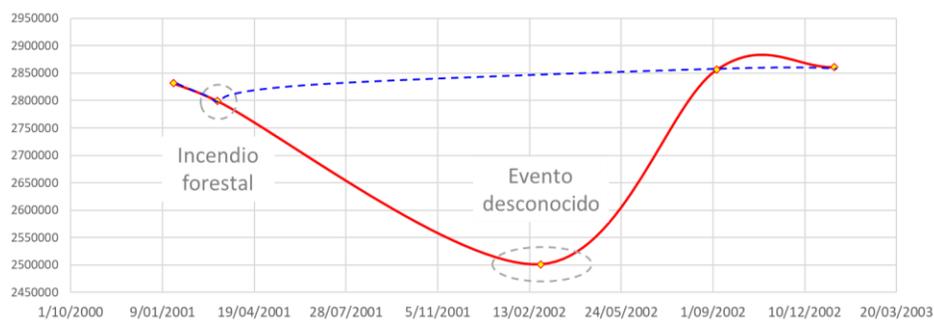


FIGURA 5. Curva de resiliencia

4. Discusión

Como se observa tanto en la figura 3 como en la figura 5, en términos geoespaciales, la progresión en el desarrollo de la resiliencia se observó un comportamiento peculiar, pues para el tercer periodo de observación se experimenta un proceso de degradación no esperado en un ecosistema en recuperación (resiliente). Esto puede deberse a la existencia de un evento impactante distinto al incendio de enero febrero del 2001 y del cual no se tiene registro documentado. Se revisó la base de datos FIRM, y no se presentaron otros incendios en ese sitio durante los años observados (2001-2003), por lo tanto esta alteración debió ser causada por otro evento de distinta naturaleza. Fuera de eso, el proceso de desarrollo de resiliencia se produce según lo esperado, con ayuda de los mapas temáticos es visible un patrón geoespacial en donde la resiliencia evoluciona de adentro hacia afuera del lote boscoso, lo que parece lógico si se tiene en cuenta el efecto de borde en el ecosistema de estudio.

5. Conclusiones

Se demostró una manera sistemática y práctica de estimar la resiliencia a partir de la aplicación de técnicas de análisis espacial para detección de cambios. En este estudio, la consideración de aspectos como el modo y la dinámica de cambio le ofrecen a las técnicas tradicionales de detección de cambios, nuevas perspectivas que profundizan las opciones de análisis multitemporal orientado sobre todo a espacialización de la resiliencia. Asimismo, la cuantificación de los cambios, entendidos desde una perspectiva cualitativa, contribuyen a la integración y precisión de la definición de resiliencia en términos de magnitud.

Los resultados experimentales demostraron un comportamiento anómalo en su tercera observación. Como lección aprendida es recomendable que, en futuras ocasiones y previo al estudio, se verifique la existencia o no, de eventos múltiples, pues resultaría complejo establecer relaciones evento-resiliencia en tales escenarios.

6. Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada, específicamente al Programa de Ingeniería Civil, por ceder el tiempo para la culminación de este estudio, como producción académica derivada de la labor docente durante el segundo semestre del año 2022.

7. Nota

Todas las figuras, diagramas, tablas, gráficos y cuadros, referidos en este artículo son de elaboración propia, diseñadas exclusivamente a los fines comunicacionales de esta publicación, por lo que no hacen referencia a fuente alguna.

8. Referencias citadas

CONGEDO, L. 2016. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>.

CHÁVEZ, P. 1988. "An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data". *Remote Sensing of Environment*, 24(3): 459-479.

CURCIO, J. A. 1961. "Evaluation of atmospheric aerosol particle size distribution from scattering measurement in the visible and Infrared". *Journal of the Optical Society of America*, 51: 548-551.

- FORTES, M. 2019. "La resiliencia ambiental y el (re)posicionamiento del derecho ante una nueva era sostenible de obligada adaptación al cambio". *Actualidad Jurídica Ambiental*, 92 (Sección Artículos Doctrinales).
- HOLLING, C. S. 1973. "Resilience and stability of ecological systems". *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4: 1-23.
- McGARIGAL, K. & B. J. MARKS. 1995. *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. Forest Service General Technical (USDA), Report PNW-351, Corvallis.
- MCINTYRE, S. & R. J. HOBBS. 1999. "A framework for conceptualizing human effects on landscapes and its relevance to management and research models". *Conservation Biology*, 13: 1.282-1.292.
- MORAN, M. S.; JACKSON, D.; SLATE, P. N. & P. M. TEILLET. 1992. "Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output". *Remote Sensing of Environment*, 41: 169-184.
- NRT VIIRS 375 m Active Fire product VJ114IMGTDL_NRT distributed from NASA FIRMS. Disponible en: <https://earthdata.nasa.gov/firms>. Disponible en: http://dx.doi.org/10.5067/FIRMS/VIIRS/VJ114IMGT_NRT.002.
- REBOLLEDO, R. 2009. Modelo de sensibilidad ambiental basado en la valoración de relaciones espaciales. En: *Teledetección, Agua y Desarrollo Sostenible, XIII Congreso de la AET*, pp. 229-232. Editores Salomón Montesinos Armada y Lara Fernández Fornos. España.
- REBOLLEDO R. y A. ALBARRÁN. 2013. "Cambios de la cobertura boscosa en Venezuela y su relación con cambios en el clima". *Acta Biológica Venezuelica*, 33(1-2): 125-144.
- US GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 2005. *Global Visualization (GloVis) Viewer*. [Reston, Va.]. Dept. of the Interior. USA.
- WESTMAN, W. & J. O'LEARY. 1986. "Measures of resilience: the response of coastal sage scrub to fire". *Vegetatio*, 65: 179-189.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Cajicá, Colombia; diciembre, 2022