ISSN 1011-484X • e-ISSN 2215-2563
Número 75(2) • Julio-diciembre 2025
Doi: http://dx.doi.org/10.15359/rgac.75-2.4
Páginas de la 97 a la 121
Recibido: 04/07/2024 • Aceptado: 11/07/24
URL: www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/

Análisis de la probabilidad antropogénica de incendios forestales en el Área de Conservación Tempisque, Costa Rica: un enfoque basado en pesos de evidencia y métricas de paisaje

Analysis of the Anthropogenic Probability of Forest Fires in the Tempisque Conservation Area, Costa Rica: An Approach Based on Weights of Evidence and Landscape Metrics

Análise da probabilidade antropogênica de incêndios florestais na área de conservação de tempisque, costa rica: uma abordagem baseada em pesos de evidência e métricas de paisagem.

Michelle Farfán[1]
Universidad de Guanajuato, México

Carolina Orozco Zamora[2]
Sistema Nacional de Conservación, Costa Rica

Camilo Alcántara[3]
Universidad de Guanajuato, México

Sergio Nicasio Arzeta[4]
Colorado State University, Estados Unidos de América

1 Michelle Farfán, Doctora en Geografía, profesora en el Depto. de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, México; e-mail: michelle.farfan@ugto.mx, https://orcid.org/0000-0002-4948-1453

2 Carolina Orozco Zamora, ingeniera Forestal, Sistema Nacional de Conservación, Subregión Cóbano, Costa Rica; e-mail: carolina.orozco@sinac.go.cr, https://orcid.org/0009-0006-9572-4686

3 Camilo Alcántara, doctor en Ciencias Biológicas, rofesor en el Depto. de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, México; e-mail: camilo.alcantara@ugto.mx, https://orcid.org/0000-0001-5820-5365

4 Sergio Nicasio Arzeta, doctor en Ciencias, investigador posdoctoral, Natural Resources Ecology Laboratory, Colorado State University, Estados Unidos de América; e-mail: sergio.nicasio@colostate.edu, https://orcid.org/0000-0002-1481-5660

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Resumen
Este estudio analiza la relación entre los incendios forestales y la fragmentación del paisaje en el Área de Conservación Tempisque (ACT) y el Corredor Biológico de Chorotega (CBCh), Costa Rica. Al utilizar datos satelitales MODIS (2000-2024) y métricas de paisaje, se observó un aumento del 62.96 % en incendios en la última década, especialmente en áreas fragmentadas con baja cobertura forestal y alta densidad de borde. El tamaño de los fragmentos de bosque, con alta probabilidad de ignición antropogénica, estimado fue de 6.26 ha. La zona norte del ACT presentó mayor probabilidad de incendios y fragmentación que la sur. Los resultados son cruciales para desarrollar estrategias de prevención y manejo de incendios, con lo cual se promueve la resiliencia comunitaria frente al cambio climático.

Palabras clave: igniciones antropogénicas; bosque tropical; fragmentación; pastizales; quema agrícola.

Abstract
This study analyzes the relationship between forest fires and landscape fragmentation in the Tempisque Conservation Area (ACT) and the Chorotega Biological Corridor (CBCh), Costa Rica. Using MODIS satellite data (2000-2024) and landscape metrics, a 62.96% increase in wildfires was observed in the last decade, especially in fragmented areas with low forest cover and high edge density. The estimated size of forest fragments with a high probability of anthropogenic ignition was 6.26 ha. The northern zone of the ACT showed a higher probability of fires and fragmentation than the southern zone. The results are crucial for developing fire prevention and management strategies, promoting community resilience to climate change.

Keywords: anthropogenic ignitions; tropical forest; fragmentation; grasslands; agricultural burning.

Resumo
Este estudo analisa a relação entre incêndios florestais e fragmentação da paisagem na Área de Conservação de Tempisque (ACT) e no Corredor Biológico de Chorotega (CBCh), Costa Rica. Usando dados do satélite MODIS (2000-2024) e métricas de paisagem, um aumento de 62,96% nos incêndios foi observado na última década, especialmente em áreas fragmentadas com baixa cobertura florestal e alta densidade de bordas. O tamanho dos fragmentos florestais, com alta probabilidade de ignição antrópica, foi estimado em 6,26 ha. A parte norte do Território da Capital Australiana era mais propensa a sofrer incêndios e fragmentação do que a parte sul. Os resultados são cruciais para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e gestão de incêndios, promovendo assim a resiliência da comunidade às mudanças climáticas.

Palavras-chave: ignições antropogênicas; floresta tropical; fragmentação; pastagens; queimadas agrícolas.

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

1 Introducción

El aumento en la frecuencia e intensidad de los incendios forestales en el mundo ha generado una creciente preocupación debido a sus impactos ecológicos, económicos y sociales (Westerling *et al*., 2006; Jones *et al*., 2022). Para abordar esta problemática, la identificación y monitoreo de áreas propensas a incendios se ha convertido en una herramienta crucial. Los avances en tecnología satelital, como los satélites Terra y Aqua de la NASA, han permitido recopilar un acervo histórico de 24 años de datos valiosos sobre incendios forestales (Justice *et al*., 2002; Wooster *et al*., 2021). El potencial de estos datos, junto con la información de otros satélites como Suomi NPP y NOAA-20, puede alimentar modelos predictivos que generan mapas de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales (Schroeder *et al*., 2014; Csiszar *et al*., 2014; Wooster *et al*., 2021).

Entre estos modelos predictivos se encuentra la generación de mapas de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales antropogénicos, los cuales pueden mejorar la prevención de incendios y la planificación de su combate (Chuvieco *et al*., 2010; González *et al*., 2023). Al mejorar la planificación, estos mapas permiten una asignación de recursos más adecuada (Finney, 2005), así como la identificación de áreas vulnerables, como las habitadas, la infraestructura crítica y los ecosistemas que requieren protección (Preisler *et al*., 2004). Adicionalmente, los mapas de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales son herramientas para la educación y generación de conciencia pública, pues sensibilizan a las comunidades sobre la importancia de las prácticas seguras del manejo de fuego y las medidas preventivas (Radeloff *et al*., 2005). Las políticas basadas en datos precisos y actualizados sobre la probabilidad de incendios son más efectivas para reducir el riesgo y gestionar los recursos de manera sostenible (Calkin *et al*., 2011).

Sin embargo, muchos países en vías de desarrollo, como Costa Rica, carecen de cartografía detallada sobre la probabilidad de incendios, a pesar de enfrentar una creciente problemática en este ámbito. En el país, desde la década de los cincuenta, las políticas socioambientales, impulsadas por los subsidios internacionales, fomentaron la expansión agrícola y ganadera, lo cual fragmentó el paisaje (Morera *et al*., 2018). Se sabe que esta fragmentación, caracterizada por la división de ecosistemas forestales en parches aislados, incrementa la probabilidad de ignición la propagación

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

del fuego debido al aumento de bordes, la baja humedad y la proximidad con áreas de manejo antrópico (Laurance y Williamson, 2001; Cochrane, 2002; Silva-Junior *et al*., 2018). Los incendios, a su vez, agravan la fragmentación, pues crean un ciclo de retroalimentación positiva que conduce a degradar continuamente el bosque (Bowman *et al*., 2009). Este ciclo se ha intensificado en las últimas décadas en zonas tropicales, incluyendo Costa Rica (Nepstad *et al*., 1999; Cochrane y Laurance, 2008; Archibald *et al*., 2013; Duran *et al*., 2023).

Comprender la relación entre las probabilidades de ocurrencia de los incendios forestales y la configuración del paisaje es fundamental en la lucha por la prevención y su combate. Explícitamente, la cartografía de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales se erige como una herramienta fundamental en la gestión integral de estos eventos, lo cual impacta de forma positiva en diversas áreas clave: prevención, vigilancia, educación y combate. La capacidad para identificar zonas de mayor riesgo permite una asignación estratégica de recursos, acciones preventivas y de vigilancia en dichas áreas. Esto permitiría, en un mediano plazo, la implementación de programas educativos y de concientización dirigidos a las comunidades locales, así como en el fortalecimiento de la vigilancia y el control de actividades potencialmente causantes de los incendios forestales (Finney, 2005; Cochrane y Laurance, 2008).

Por tanto, el presente estudio tuvo como objetivo estimar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales antropogénicos en la Península de Nicoya, actualmente Área de Conservación Tempisque considerando el Corredor Biológico de Chorotega (CBCh), utilizando el método de los pesos de evidencia. Así como también evaluar su relación con la configuración del paisaje en términos de número de fragmentos y densidad de borde, representado a través de la cobertura forestal nativa y el uso agropecuario. La cartografía resultante proporcionará información crucial para diseñar estrategias de prevención de incendios a corto y mediano plazo, así como impulsar la resiliencia comunitaria en un contexto de calentamiento global.

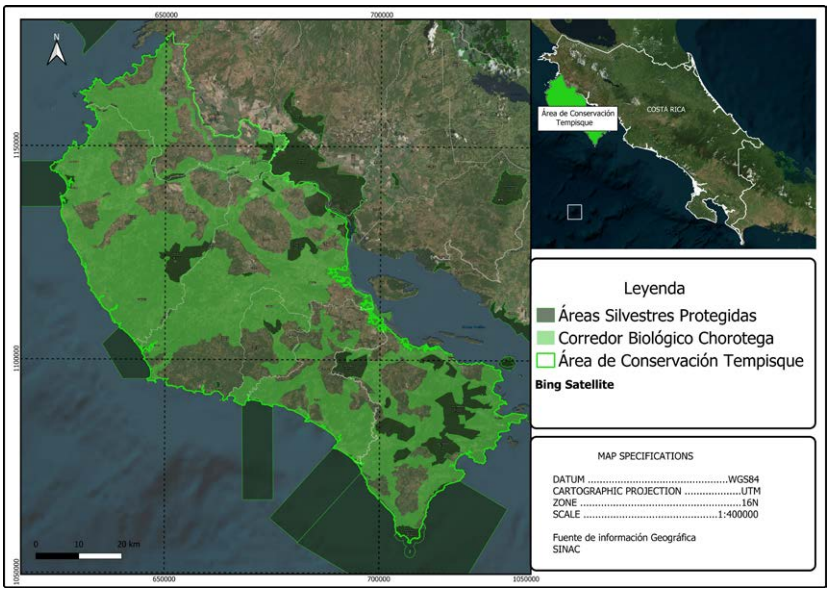
Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

La península de Nicoya, ubicada en las coordenadas 10°05 ‘46.9 “N, 85°27’ 57.1”W (Figura 1), es una zona de conservación definida como el Área de Conservación Tempisque (ACT), dentro de la ecorregión del mismo nombre en el Pacífico noroeste. Dicha área es parte del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), con una extensión de 521,048 hectáreas. En la cual existen 29 áreas silvestres protegidas que se conectan a través del CBCh. Su territorio comprende las provincias de Guanacaste y Puntarenas. Con los cantones de Santa Cruz, Nicoya, Hojancha, Nandayure y Puntarenas. En particular, en la provincia de Guanacaste, al norte de la Península de Nicoya, existe un foco de atención debido a la problemática de los incendios forestales. Los datos revelan que esta zona ha sido particularmente afectada, por lo que concentra cerca del 75 % de las tierras quemadas por incendios forestales en Costa Rica durante el período 1998-2018 (Picado y Cruz, 2021).

Figura 1. Ubicación del Área de Conservación Tempisque, en la Península de Nicoya, Costa Rica.



Fuente: Elaboración propia.

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

El ACT se encarga de preservar y proteger la cuenca media y baja del río Tempisque. Presenta dos estaciones a lo largo del año: la seca y la lluviosa. La temporada seca abarca desde diciembre hasta mediados de mayo, con una duración de seis meses en el noroeste de Guanacaste (Santa Rosa) y cinco meses en el sureste, a lo largo del río Tempisque (Gillespie *et al*., 2000; Kapelle, 2016). Las precipitaciones anuales varían entre 1.200 y 2.400 mm (Fallas *et al*., 2015). En el sur de la península, las lluvias son más copiosas y los períodos de sequía son menos severos que en el resto de la Región Norte. Según Mateo-Vega (2001), la temperatura media anual en la cuenca del río Tempisque es de 27.4 °C. Por otro lado, en la parte norte de la península se registran las temperaturas más altas, superando los 30 °C, con una media mensual de 36 °C en lugares como Santa Elena o Santa Rosa, a lo largo de la costa del Pacífico (Asch *et al*., 2000).

Gómez y Herrera (1986) describen un total de nueve tipos principales de vegetación, que incluyen manglares, áreas pantanosas, bosques estacionales caducifolios y bosques perennifolios, estos últimos se ubican principalmente en el extremo sur de la Península de Nicoya. En las áreas bajas del Pacífico Norte del ACT, se pueden observar bosques secos y otros tipos de vegetación estacional, que se extienden desde el nivel del mar hasta altitudes medias de 400 m, e incluso hasta los 700 m en algunas áreas elevadas locales. Dicha vegetación está inmersa en una matriz de pastizales, principalmente de la especie exótica *Hypharhernia rufa,* llamada localmente jaragua.

Finalmente, el único ejemplo previo de vegetación adaptada al fuego se halla en la localidad de Santa Elena. Allí se encuentra un tipo de vegetación herbácea a arbustiva, semiárida y muy distintiva, la cual se caracteriza por matorrales espinosos y árboles pequeños y dispersos (Elizondo y Jiménez, 1988). Esta vegetación ha sido, en gran parte, generada por quemas antropogénicas que han ocurrido durante al menos cuatro siglos (Kapelle, 2016).

2.2 Puntos de calor del sensor MODIS

En el presente estudio se emplearon los productos derivados del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada MOD04A1 y MYD04A1, diseñados para detectar anomalías térmicas, derivados del satélite MODIS para el periodo 2000-2024 de la NASA Earth data Cloud

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

(https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/frms/active-fredata). Estos productos han sido previamente utilizados en diversos estudios para identificar la ubicación de los incendios forestales con una resolución de 1 km (Farfán *et al*., 2021; Eskandari *et al*., 2020). Fueron seleccionados solo los puntos de calor que coincidían con los sitios de cubierta forestal y se excluyeron aquellos que estuvieran en zonas agropecuarias. Para ello, se obtuvo el mapa de vegetación y uso del suelo del año 2021 del ACT, elaborado por el SINAC, escala 1:20000.

2.3 Estimación de la probabilidad de ocurrencia de los incendios forestales

2.3.1 Variables antropogénicas como fuentes de ignición

Se integró información cartográfica relacionada con seis variables socioambientales en el ACT (Tabla 1). Estas han sido empleadas en otros estudios para estimar la probabilidad de incendios forestales en México y Brasil (Silvestrini *et al*., 2011; Farfán *et al*., 2018; Sahagún *et al*., 2022). Se utilizaron los mapas de vegetación y uso del suelo del 2012 y 2021 a escala 1:20000. Ambos fueron elaborados por el SINAC, el primero en el 2015 y el segundo en el 2021. Asimismo, el modelo digital del territorio, descargado del portal web del Sistema Nacional de Información Territorial, tiene una resolución de tamaño de píxel de 30 metros (SNIT).

Tabla 1. Variables cartográficas socioambientales empleadas en la calibración del modelo de probabilidad para el ACT, con una resolución de 30 metros.

Insumo cartográfico	Descripción	Fuente
Modelo digital de elevación (MDE)	Recorte del modelo original obtenido del sensor ASTER.	https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp (2009)
Pendiente	Inclinación del terreno calculada en grados.	Derivado del Modelo Digital de Elevación.
Distancia a vías de comunicación	Distancia euclidiana a las principales vías de comunicación.	Elaboración propia con base en el mapa de carreteras del SNIT (2016). https://www.snitcr.go.cr/
Distancia a los asentamientos humanos	Distancia euclidiana a los asentamientos humanos.	Elaboración propia con base en el mapa del SNIT (2015). https://www.snitcr.go.cr/

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Insumo cartográfico	Descripción	Fuente
Distancia al uso de suelo agropecuario	Distancia euclidiana al uso de suelo agropecuario.	Elaboración propia con base en el mapa del SINAC (2021). https://www.sinac.go.cr/ES/bimapas/Paginas/mabosq2021.aspx
Distancia al borde del bosque (2021)	Distancia euclidiana al borde del bosque.	Elaboración propia con base en el mapa del SINAC (2021). https://www.sinac.go.cr/ES/bimapas/Paginas/mabosq2021.aspx

Fuente: Elaboración propia.

Todas las variables socioambientales se trabajaron en el sistema de información geográfica QGIS versión 3.28.13 Firenze, en formato ráster con una resolución de 30 metros en proyección UTM, zona 16 norte.

2.3.2 Estimación de la probabilidad de ocurrencia de los incendios forestales

Se empleó el método de los pesos de evidencia, incorporado en la versión 7.8.0 del programa DINAMICA EGO (Soares-Filho *et al*., 2006).[5] Para ello, se tomaron en cuenta las variables socioambientales enumeradas en la tabla 1, las cuales se integraron y ajustaron durante el proceso de calibración para la construcción del modelo espacialmente explícito. También se emplearon los mapas de cubierta forestal de los años 2012 y 2021, siendo el tiempo inicial y final de calibración del modelo. Se utilizaron también los puntos de calor del año 2012 para la estimación de los pesos de evidencia. Dicho método está basado en las probabilidades condicionales y es un algoritmo bayesiano (Bonham-Carter, 1994; Soares-Filho *et al*., 2004). Se le llama probabilidad condicional a la probabilidad de que un suceso se cumpla habiéndose cumplido otro previamente. El peso positivo de evidencia, w+, asociado a la presencia de la condición considerada, se calcula según la ecuación (1):

$$w+= ln\left[\frac{P(C|D)}{P(C|\neg D)}\right]$$

5 Disponible de forma gratuita en https://csr.ufmg.br/dinamica/

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

donde $P(C|D)$ es la probabilidad de ocurrir un evento C, dado la condición de la presencia del evento D; y $P(C|\neg D)$ es la probabilidad de que ocurra un evento C, dado la condición de la ausencia del evento D. Cuando la presencia de la condición tiende a aumentar la probabilidad del evento el valor del peso w+ es positivo. Por otro lado, cuando la presencia de la condición disminuye, la probabilidad del evento tiene un valor negativo. El cálculo de la probabilidad condicional, al tomar en cuenta varias condiciones, suma los pesos de evidencia. Para esto, el supuesto de independencia condicional entre las variables es requerido, por lo que se calculó el coeficiente de correlación de Cramer entre las variables explicativas.

2.3.3 Evaluación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales

La evaluación del modelo se centró en determinar la concordancia espacial entre las predicciones de probabilidad a incendios forestales estimadas y los puntos de calor correspondientes a los incendios forestales ocurridos en el año 2022. Esta información se consideró independiente a la fase de calibración del modelo. Este proceso de evaluación se llevó a cabo mediante el análisis estadístico de la curva característica operativa del receptor (ROC), una técnica comúnmente empleada en estudios de predicción de incendios forestales (Sahagún *et al*., 2022; Farfán *et al*., 2021; Mas *et al*., 2013). Los resultados de la curva ROC, que varían entre 0.5 y 1, fueron interpretados de la siguiente manera: un valor de 0.5 corresponde al desempeño de un modelo nulo, mientras que los valores superiores a 0.5 indican una mejora en el rendimiento del modelo. Valores de la curva ROC entre 0.5 y 0.6 sugieren un modelo poco efectivo; entre 0.6 y 0.7, una capacidad de predicción baja; de 0.7 a 0.8, una capacidad de predicción aceptable; de 0.8 a 0.9, una capacidad de predicción muy buena; y de 0.9 a 1, una capacidad de predicción excelente (Mas *et al*., 2013).

2.4 Evaluación de la fragmentación del paisaje

La pérdida y fragmentación de la cobertura forestal, así como la exposición a bordes, incrementan la ocurrencia e intensidad de incendios forestales en los bosques tropicales (Armenteras *et al*., 2017; Silva-Junior *et al*., 2018; Guedes *et al*., 2020). Por esta razón, se estimaron dos métricas de composición (los porcentajes de cobertura del bosque tropical y de los

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

pastizales ganaderos) y dos métricas de configuración (densidad de borde y de parches) del paisaje a lo largo del ACT (Tabla 2). Las métricas fueron calculadas a partir de una gradilla de 7 ha, la cual representa el tamaño promedio de las fincas de manejo agropecuario en el ACT. Para expresar los resultados de dicho análisis se consideró el diseño del Corredor Biológico Peninsular dentro del ACT.

Tabla 2. Métricas de paisaje estimadas para la evaluación de la configuración del paisaje en el ACT.

Métrica	Tipo	Fórmula	Relación
Cobertura de bosque	Composición	$Pi = \sum aij/A \times (100)$ ● a_{ij}: Área (m²) del parche *j* de la cobertura *i* en el paisaje. ● A: Área total del paisaje (m²). ● Unidades: porcentaje.	Hay una relación inversa entre la cobertura de bosque y la probabilidad de ignición.
Uso agropecuario	Composición		El manejo de tierras agropecuarias en países de América Latina se relaciona con el uso del fuego para su creación o mantenimiento.
Densidad de borde	Configuración	$ED = E/A \times (10{,}000)$ ● E: Perímetro de borde en el paisaje. ● A: Área total del paisaje (m²). ● Unidades: metros/hectárea.	Existe una relación directa entre la exposición a bordes y la desecación de la vegetación arbórea, con lo cual se promueve la propagación del fuego al interior del bosque.
Densidad de parches	Configuración	$PD = ni/A \times (10{,}000) \times (100)$ ● n_i: Número de parches de la cobertura *i* en el paisaje. ● A: Área total del paisaje (m²). ● Unidades: parches/100 hectáreas.	Paisajes tropicales fragmentados favorecen la propagación del fuego a lo largo del paisaje.

Fuente: Elaboración propia.

Se analizaron las diferencias en los patrones de estructura del paisaje entre aquellos con alta y baja probabilidad de incendios. Se consideraron paisajes con alta probabilidad de incendios aquellos que tuvieran una probabilidad promedio ≥ 0.47 (valor que representa el 75 % de los valores más altos). Las diferencias se evaluaron con una prueba t de Welch para

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

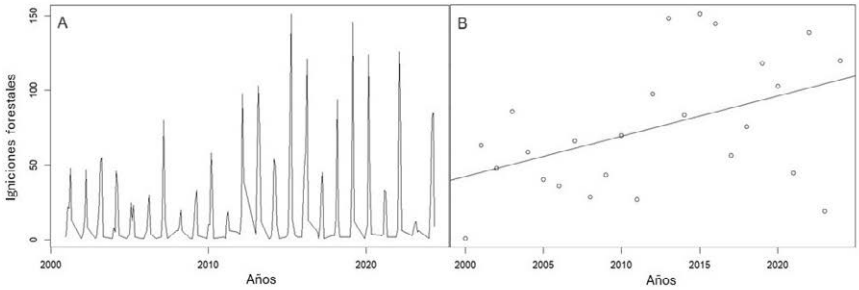
varianzas heterogéneas (Anderson y Burnham, 2002). Posteriormente, se analizó la relación lineal entre las probabilidades antropogénicas de incendios forestales y las métricas de paisaje a lo largo del ACT a través de correlaciones de Spearman.

3. Resultados

El análisis de los puntos de calor del sensor MODIS entre el 2000 y el 2024 en zonas forestales del ACT reveló un aumento del 62.96 % en el número total de igniciones durante la última década. Esta tendencia ascendente se refleja también en la regresión lineal presentada en la figura 2B. En la figura 3, se muestran las probabilidades estimadas de incendios forestales de origen antropogénico en el Área de Conservación Tempisque (ACT).

Figura 2. A) Igniciones forestales anuales para el periodo 2000-2024 registradas por sensor MODIS para el ACT. B) Regresión lineal estimada con las igniciones forestales registradas por el sensor MODIS (2000-2024) en el ACT.

Fuente: Elaboración propia.

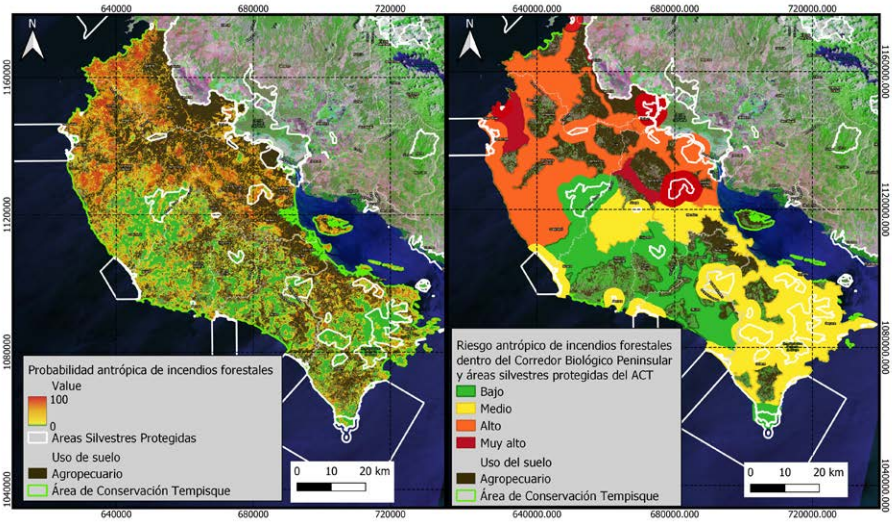


Destaca la Zona Norte, Guanacaste, con un riesgo significativamente mayor al alcanzar el 100 %, en comparación con la zona sur. Además, se presentan cuatro clases de riesgo a incendios forestales en el Corredor Biológico Chorotega (CBCh) y áreas silvestres protegidas asociadas. Siete áreas silvestres protegidas presentan un riesgo muy alto: Refugio Nacional de Vida Silvestre Iguanita, Refugio Nacional de Vida Silvestre el Conchal, Parque Nacional Barra Honda, Refugio Nacional de Vida Silvestre Hacienda El Viejo, Humedal Palustrino Corral de Piedra, Refugio de Vida Silvestre Laguna Mata Redonda, Parque Nacional Marino las Baulas de

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Guanacaste y el Parque Nacional el Diriá. En contraste, las áreas de menor riesgo son la Zona Protectora Península de Nicoya, Zona Protectora Monte Alto y Reserva Natural Absoluta Cabo Blanco.

Figura 3. A) Probabilidad antropogénica de ocurrencia a incendios forestales en el ACT. B) Clases de riesgo a incendios forestales antropogénicos en el Corredor Biológico Chorotega.

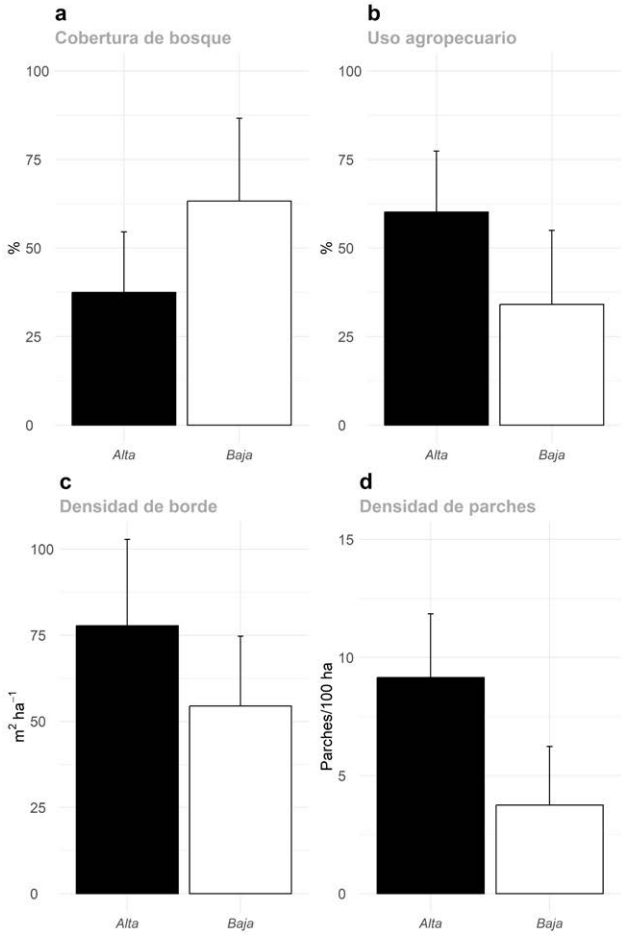


Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se identificó una relación entre la probabilidad de ocurrencia de incendios y la estructura del paisaje. Paisajes con una alta probabilidad de incendios presentaron un mayor porcentaje de uso de suelo agropecuario, así como un menor porcentaje de bosques (Figura 4). Se estimó que el tamaño del parche más pequeño con alta probabilidad de ignición antropogénica es de 6.26 hectáreas. Además, la configuración del paisaje también estuvo asociada con la probabilidad de incendios, pues los paisajes con una alta probabilidad de ignición antropogénica tuvieron mayores densidades de borde y número de fragmentos (Figura 4C y D).

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Figura 4. Comparaciones entre probabilidades altas y bajas y estructura del paisaje en términos de a) porcentaje de cobertura de bosque b) porcentaje de uso agropecuario, c) densidad de borde y d) densidad de parche (*p<0.001).

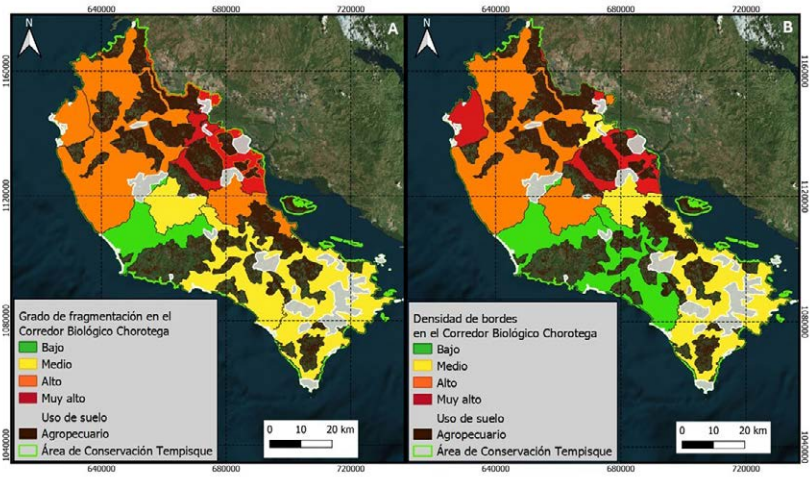


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra el grado de fragmentación y densidad de borde a lo largo del corredor biológico peninsular, siendo mayor en el norte que en el sur. Se encontró solamente una porción del CBP que conecta con las áreas silvestres protegidas Monte Alto y el Diriá, con baja fragmentación y densidad de borde en todo el ACT.

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Figura 5. A) Grado de fragmentación en el CBCh en el ACT. B) Densidad de borde en los parches que integran el CBCh en el ACT. Elaboración propia.

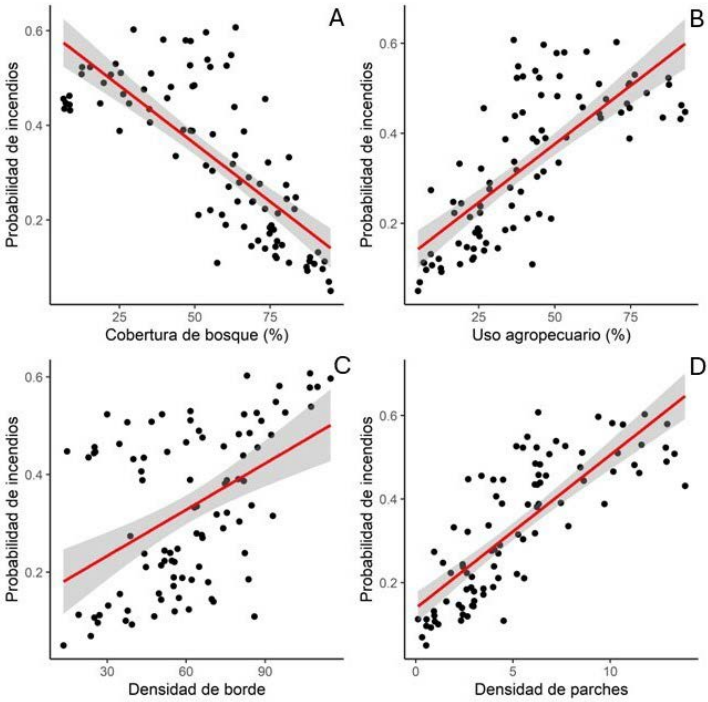


Fuente: Elaboración propia.

Los análisis de correlación mostraron una relación inversa entre la probabilidad de incendio forestal antrópico y el porcentaje de cubierta forestal, contrastando con la relación directa observada con el uso de suelo agropecuario (Figura 6 A y B). Además, se identificó una asociación positiva entre la probabilidad de incendio forestal antrópico con el grado de fragmentación del bosque, así como con la densidad de borde. Esto sugiere que un aumento en la probabilidad de incendio forestal se relaciona con un mayor grado de fragmentación y densidad de borde en el bosque (Figura 6 C y D).

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Figura 6. A. Correlación negativa entre la probabilidad antropogénica de incendios forestales y el porcentaje de cubierta forestal. B. Correlación positiva entre la probabilidad antropogénica de incendios forestales y el porcentaje de uso del suelo agropecuario. C y D. Correlaciones positivas entre la probabilidad antrópica de incendios forestales con la densidad de borde y la densidad de fragmentos



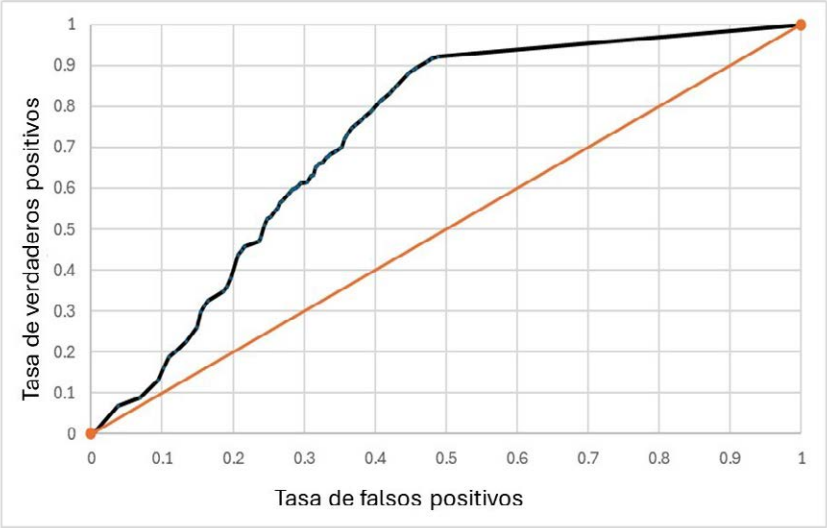
Fuente: Elaboración propia.

Evaluación del modelo de probabilidad antropogénica de incendios forestales

Con la prueba estadística de la curva ROC se obtuvo un valor de área bajo la curva (AUC) de 0.72, lo cual indica una concordancia del 72 % entre las probabilidades más altas predichas por el modelo y los incendios ocurridos en el año 2022 (Figura 7).

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Figura 7. Curva ROC obtenida al comparar el mapa de probabilidad de ocurrencia a incendios forestales con los incendios ocurridos en el año 2022.



Fuente: Elaboración propia

4. Discusión

El territorio del Área de Conservación Tempisque (ACT) en Costa Rica, ubicado en la región Chorotega y Puntarenas, destaca por su creciente ocurrencia de incendios forestales. En la última década, se ha registrado un incremento de más del 50 % en el número de incendios forestales. Está tendencia coincide con la observada en otros ecosistemas tropicales como el Amazonas, así como en regiones el oeste de Estados Unidos y el sureste de Australia (Jones *et al*., 2022).

Esta problemática no solo representa una amenaza directa para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de la región, sino también la regulación del ciclo hidrológico, la protección del suelo y la captura de carbono (Turner, 2010). Además, la creciente incidencia de incendios forestales plantea desafíos importantes para gestionar la prevención y el control del fuego, tanto en el CBCh como en el interior de las 29 áreas silvestres protegidas.

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Las probabilidades antropogénicas de ocurrencia de los incendios forestales más altas se distribuyeron en la zona norte del ACT, en donde el riesgo a incendios para el CBCh es alto. Janzsen (1986) documentó, para esta región de Guanacaste, cómo la conversión de bosques secos caducifolios en pastizales fue un proceso que incrementó la ocurrencia de incendios forestales para dicha zona. Esta transformación del paisaje, con la introducción de especies altamente inflamables como el pasto jaragua (*Hyparrhenia rufa*) para el ganado y la presencia de *Typha dominguensis* en el humedal de Palo Verde, han creado las condiciones para que el fuego se propague durante la época seca del año (Rojas-Chavez *et al*., 2015). Si bien las probabilidades antropogénicas de ocurrencia de incendios forestales son menores en la zona sur del ACT, región de Puntarenas, esta presenta condiciones antropogénicas de uso de fuego como la quema de los pastizales para el ganado y un nivel medio de fragmentación del bosque que requieren impulsar una gestión integrada del manejo del fuego. Esta estrategia debe priorizar acciones de paisaje que integren fragmentos de bosque de al menos seis hectáreas con alta densidad de borde, al enfocarse en la regeneración natural y la eliminación de pastizales, especialmente en sitios del Corredor Biológico de Chorotega (CBCh). Además, es crucial promover prácticas agrícolas y ganaderas sostenibles que no dependan de la quema del bosque. Otra propuesta importante se relaciona con los planes de manejo del fuego para las áreas silvestres protegidas con estrategias para el manejo de combustibles, la construcción de brechas corta fuego y la sensibilización de la población frente a esta problemática (Pérez-Salicrub *et al*., 2020).

Los resultados evidencian una clara relación entre la fragmentación del paisaje y el incremento en la probabilidad de incendios forestales dentro del ACT. Estos hallazgos corroboran la hipótesis de que la alteración de la estructura del paisaje, derivada de las prácticas de uso del suelo, facilita la propagación del fuego hacia los fragmentos de bosque remanentes. La fragmentación y la consecuente exposición a bordes aumentan la desecación del bosque, lo cual provoca condiciones propicias para la propagación del fuego en su interior (Laurance, 2004). Estudios previos han estimado que el fuego puede propagarse hasta 2.5 km en bosques con bordes expuestos (Cochrane, 2002), lo que subraya la importancia de considerar la estructura del paisaje en las estrategias de prevención de los incendios forestales.

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

De acuerdo con Morera-Beita *et al*. (2018, 2021), entre el 2000 y 2015, el 80 % de los corredores biológicos de Costa Rica aumentaron en la fragmentación del paisaje. Se encontraron coincidencias en el patrón observado para la zona norte del CBCh entre la fragmentación evaluada para el año 2015 y el grado de fragmentación estimada en el 2021.

A menos de que se modifiquen las prácticas actuales de uso de la tierra y el manejo del fuego en el ACT, los incendios forestales podrían transformar vastas extensiones de bosque tropical tanto en el CBCh como al interior de las áreas silvestres protegidas en ecosistemas degradados. Este fenómeno, conocido como "sabanización", ya está ocurriendo en la Amazonía y representa una amenaza significativa para la biodiversidad, el almacenamiento de carbono y la regulación del clima (Driscoll *et al*., 2021). Finalmente, además de las actividades agropecuarias ya desarrolladas en el ACT, el desarrollo de nuevos sitios turísticos como marinas y otros proyectos inmobiliarios podrían eventualmente propiciar escenarios de riesgo más complejos a incendios forestales como son lo de interfaz urbano-forestal.

5. Conclusión

En la última década, los incendios forestales en el Área de Conservación Tempisque (ACT) han aumentado en la última década, más del 50 %, según datos del sensor MODIS. El modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios antrópicos revela un riesgo del 100 % en la Zona Norte, lo cual pone en riesgo la efectividad para la conservación del CBCh y las áreas silvestres protegidas de la región. Aunque la Zona Sur presenta una menor probabilidad de ignición antropogénica, y un menor riesgo a incendios forestales, la quema de pastizales para ganado y la fragmentación del bosque requieren una gestión integrada del fuego para evitar un escenario similar al de la Zona Norte.

El análisis integrado de la cartografía de probabilidad de incendios antrópicos y la configuración del paisaje en el ACT revela una estrecha relación entre ambos factores en la ocurrencia de incendios forestales, siendo los fragmentos de bosque de 6 hectáreas con un 70 % de probabilidad de ignición antropogénica los más vulnerables a los incendios forestales. Se sabe que el fuego interactúa con la fragmentación a través del efecto de borde del bosque, desecándolo y favoreciendo su propagación. En particular, en los bosques tropicales cuando el fuego y la fragmentación se influyen

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

mutuamente, es posible que se produzcan ciclos de retroalimentación que pueden llevar a la conversión del bosque en pastizales (Driscoll *et al*., 2021).

Esta información constituye una herramienta fundamental para la gestión del manejo de fuego en el ACT, pues permite diseñar planes específicos para cada corredor biológico y área silvestre protegida, con lo cual se priorizan acciones en zonas de alto riesgo para el CBCh. Estos planes deben incluir estrategias como el manejo de combustibles, la creación de brechas cortafuego y la sensibilización de la población sobre la prevención de incendios. Finalmente, la cartografía aquí presentada es un pilar fundamental para la construcción de una gestión efectiva del fuego para el ACT y el CBCh que contribuya a mitigar el cambio climático al prevenir la liberación de grandes cantidades de carbono almacenado en los bosques tropicales. Futuras investigaciones explorarán la sinergia entre el aumento de la temperatura, las sequías y las igniciones antropogénicas. Los resultados aquí presentados son cruciales para la planificación territorial de las estrategias que fomenten la prevención y el combate de incendios forestales, así como la resiliencia frente al cambio climático en el ACT y el CBCh.

Referencias

Anderson, D. R., & Burnham, K. P. (2002). Avoiding pitfalls when using information-theoretic methods. The Journal of wildlife management, 912-918.

ASTER WEB. (2009). Global Digital Elevation Map Announcemenm. https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp.

Archibald, S., Lehmann, C. E., Gómez-Dans, J. L. y Bradstock, R. A. (2013). Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(16), 6442-6447. https://doi.org/10.1073/pnas.1211466110

Armenteras, D., González, T. M., Retana, J. y Morales, M. (2017). Understanding deforestation in montane and lowland forests of the Colombian Andes. *Regional Environmental Change,* 17(3), 633-646. DOI:10.1007/s10113-010-0200-y

Asch, C., Oconitrillo, G. yRojas, J. L. (2000). *Delimitación cartográfica y otras consideraciones sobre las zonas afectadas por inundaciones en la cuenca baja del río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica.* San José, Costa Rica: Instituto Geográfico Nacional, Departamento de Geografía.

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS*. Oxford, UK: Pergamon Press. https://www.sciencedirect.com/book/9780080418674/geographic-informationsystems-for-geoscientists

Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., ... y Pyne, S. J. (2009). Fire in the Earth system. *Science*, 324(5926), 481-484 DOI: 10.1126/science.1163886

Calkin, D. E., Cohen, J. D., Finney, M. A. y Thompson, M. P. (2011). How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(15), 11842-11846. https://doi.org/10.1073/pnas.1315088111

Cochrane, M. A. (2002). Synergistic Interactions between Habitat Fragmentation and Fire in Evergreen Tropical Forests. *Conservation Biology*, 15(6), 1515-1521. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13076

Cochrane, M. A. y Laurance, W. F. (2008). Synergisms among Fire, Land Use, and Climate Change in the Amazon. *AMBIO: A Journal of the Human Environment,* 37(7), 522-527. https://doi.org/10.1579/0044-7447-37.7.522

Csiszar, I., Schroeder, W., Giglio, L., Ellicott, E., Vadrevu, K. P., Justice, C. O., & Wind, B. (2014). Active fires from the Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite: Product status and first evaluation results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*(2), 803-816.

Driscoll, D. A., Armenteras, D., Bennett, A. F., Brotons, L., Clarke, M. F., Doherty, T. S., ... y Wevill, T. (2021). How fire interacts with habitat loss and fragmentation. *Biological Reviews*, 96(3), 976-998. DOI: 10.1111/brv.12687

Durán, L.; Villalobos, R.; Ruiz, N.; Carrea, F. (eds.). (2023). Gobernanza del fuego: Experiencias desde las plataformas de gobernanza de la Red Latinoamericana de Bosques Modelo. (en línea). Serie restauración, Turrialba, Costa Rica, CATIE. No. 10, 134 p.

Chuvieco, E. *et al*. (2010). Global characterization of fire activity: Toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology*, 16(3), 786-803. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01585.x

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Elizondo, L. H. y Jiménez, Q. (1988). La sabana arbolada "El Escobio," Liberia, Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 36, 175-185. https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/23684

Eskandari, S., Miesel, J. R. y Pourghasemi, H. R. (2020). The temporal and spatial relationships between climatic parameters and fre occurrence in northeastern Iran. *Ecological Indicators*, 118, 106720. https://doi.org/10.1016/j. ecolind.2020.106720

Fallas, J. (2015). *Ecorregiones y ecosistemas de Costa Rica: un enfoque ecosistémico.* Sistema Nacional de Áreas de Conservación. https://www.sinac.go.cr/ES/tramitesconsultas/Ecorregiones%20y%20Ecosistemas/Mapa%20de%20Ecorregiones%20y%20Ecosistemas%20de%20Costa%20Rica%20con%20una%20visi%C3%B3n%20ecosist%C3%A9mica%202015.pdf

Farfán Gutiérrez, M., Pérez-Salicrup, D. R., Flamenco-Sandoval, A., Nicasio-Arzeta, S., Mas, J. F. y Ramírez Ramírez, I. (2018). Modeling anthropic factors as drivers of wildfire occurrence at the Monarch Butterfly Biosphere. *Madera y bosques*, 24(3). https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431591

Farfán, M., Domínguez, C., Espinoza, A., Jaramillo, A., Alcántara, C., Maldonado, V.,... y Flamenco, A. (2021). Forest fire probability under ENSO conditions in a semi-arid region: a case study in Guanajuato. *Environmental monitoring and assessment*, 193(10), 684. DOI:10.1007/s10661-021-09494-0

Finney, M. A. (2005). The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management*, 211(1-2), 97-108. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.010

Gillespie, T. W., Grijalva, A. Farris, C. N. (2000). Diversity, composition, and structure of tropical dry forests in Central America. *Plant Ecology*, 147(1), 37-47. DOI:10.1023/A:1009848525399

González Gutiérrez, I., Farfán Gutiérrez, M., Morales Manilla, L. M., Pérez Salicrup, D. R., Garza Saldaña, J. J. y Medina Puente, A. (2023). Índices y modelos para la predicción de la ocurrencia de incendios forestales: una revisión para México. *Revista Geográfica de América Central*, (71), 193-220. http://dx.doi.org/10.15359/rgac.71-2.7

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Gómez, L. D. y Herrera, W. (1986). *Vegetación y clima de Costa Rica.* San José, Costa Rica: EUNED. https://tropicalstudies.org/rbt/attachments/volumes/vol38-1/19_Resena_libros.pdf

Guedes, B. J., Massi, K. G., Evers, C. y Nielsen-Pincus, M. (2020). Vulnerability of small forest patches to fire in the Paraiba do Sul River Valley, southeast Brazil: Implications for restoration of the Atlantic Forest biome. *Forest Ecology and Management*, 465, 118095. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118095

Janzen, D. H. (1986). *Parque Nacional Guanacaste, restauración ecológica y cultural en el trópico*. Universidad de Pennsylvania Philadelphia. http://copa.acguanacaste.ac.cr:8080/bitstream/handle/11606/452/ParqueNacionalGuanacaste1986.pdf?se quence=1

Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., ... y Le Quéré, C. (2022). Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics*, 60(3), e2020RG000726. https://doi.org/10.1029/2020RG000726

Justice, C. O. *et al*. (2002). *An overview of MODIS Land data processing and product status. Remote Sensing of Environment*. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00084-6

Kappelle, M. (Ed.). (2016). *Costa Rican Ecosystems*. University of Chicago Press. https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/C/bo20691894.html.

Laurance W. F. (2004). Forest-climate interactions in fragmented tropical landscapes. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B359. 345-352. http://doi.org/10.1098/rstb.2003.1430

Laurance, W. F. y Williamson, G. B. (2001). Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. *Conservation biology,* 15(6), 1529-1535. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2001.01093.x

Mas, J. F., Soares, B., Gilmore, R. G., Farfán, M. y Rodrigues, H. (2013). A suite of tools for ROC analysis of spatial models. *International Journal of Geo-Information*, 2(3), 869-887. doi: https://doi.org/10.3390/ijgi2030869

Mateo-Vega, J. (2001). Características generales de la cuenca del Río Tempisque. En J. A. Jiménez Ramón y E. González Jiménez (eds.), *La Cuenca del Río Tempisque: Perspectivas para un Manejo Integrado* (pp. 120-135).. San José, Costa Rica: Organization for Tropical Studies (OTS).

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Morera-Beita, C. y Sandoval-Murillo, L. (2018). Fragmentación y conectividad de la cobertura natural a nivel cantonal en Costa Rica durante los años 2000 y 2015. *Revista Geográfica de América Central*, 4(61E), 37-61. https://doi.org/10.15359/rgac.61-4.2

Morera-Beita, C., Sandoval-Murillo, L. F. y Alfaro-Alvarado, L. D. (2021). Evaluación de corredores biológicos en Costa Rica: estructura de paisaje y procesos de conectividad-fragmentación. *Revista Geográfica de América Central*, (66), 106-132. http://dx.doi.org/10.15359/rgac.66-1.5

Nepstad, D. C., Verssimo, A., Alencar, A., Nobre, C., Lima, E., Lefebvre, P., Schlesinger, P., Potter, C., Moutinho, P., Mendoza, E., Cochrane, M. y Brooks, V. (1999). Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, 398, 505-508. doi: https://doi.org/10.1038/19066

Pérez-Salicrup, D. R., Garduño-Mendoza, E., Martínez-Torres, H. L. y Del Río Pesado, G. (2020). Plan Integral del Manejo del Fuego en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca: acción e investigación participativa y adaptable. fmcn, conanp, Alternare, A. C., iies – unam. 71 pp. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://usfsmex.org/img/pdf/programas/mariposa_monarca.pdf

Picado Umaña, W. y Cruz Chaves, C. (2021). La Historia del Fuego como Historia Aplicada. *HALAC-Historia Ambiental, Latinoamericana y Caribeña*, *11*(2), 173-213. https://doi.org/10.32991/2237-2717.2021v11i2.p173-213

Preisler, H. K., Brillinger, D. R., Burgan, R. E. y Benoit, J. W. (2004). Probability-based models for estimating wildfire risk. *International Journal of Wildland Fire*, 13(2), 133-142. https://doi.org/10.1071/WF02061

Radeloff, V. C., Hammer, R. B. y Stewart, S. I. (2005). Rural and suburban sprawl in the U.S. Midwest from 1940 to 2000 and its relation to forest fragmentation. *Conservation Biology*, 19(3), 793-805. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00387.x

Rojas-Chaves, P. A., Vílchez-Alvarado, B., Moya-Roque, R. y Sasa-Marín, M. (2015). Combustibles forestales superficiales y riesgo de incendio en dos estadios de sucesión secundaria y bosques primarios en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12(29), 29-45. https://doi.org/10.18845/rfmk.v12i29.2253

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Sahagún Sánchez, F., Méndez-García, A., Huerta-Martinez, F. y Espinoza-Guzmán, M. (2022). Spatial Modeling of Fire Occurrence Probability in a Protected Area in Western Mexico. *Forestist*, 72. https://doi.org/10.5152/forestist.2021.21008

Silvestrini, R. A., Soares-Filho, B. S., Nepstad, D., Coe, M., Rodrigues, H. y Assunção, R. (2011). Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. *Ecological Applications*, 21(5), 1573-1590. DOI: 10.1890/10-0827.1

SINAC (2021). Mapa de tipos de bosques y otras tierras de Costa Rica (2021). https://www.sinac.go.cr/ES/bimapas/Paginas/mabosq2021.aspx.

Silva-Junior, C. H., Aragão, L. E., Fonseca, M. G., Almeida, C. T., Vedovato, L. B. y Anderson, L. O. (2018). Deforestation-induced fragmentation increases forest fire occurrence in central Brazilian Amazonia. *Forests*, 9(6), 305. DOI:10.3390/f9060305

Sistema Nacional de Información Territorial- SNIT. (2015). https://www.snitcr.go.cr/

Sistema Nacional de Información Territorial- SNIT. (2016). Mapa de Carreteras. https://www.snitcr.go.cr/

Soares-Filho, B., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G., Vera, M. C., Rivero, S., Solórzano, L. y Voll, E. (2004). Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: The Santarem-Cuiabá Corridor. *Global Change Biology* , 10(5), 745-764. doi: https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00769.x

Soares-Filho, B. S., Nepstad, D., Curran, L. M., Coutinho, G., Garcia, R., Azebedo, C., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P. y Schlesinger, P. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440, 520-523. doi: https://doi.org/10.1038/nature04389

Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., & Csiszar, I. A. (2014). The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, *143*, 85-96, https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008

Turner, M. G. (2010). Disturbance and landscape dynamics in a changing world. *Ecology*, 91(10), 2833-2849. https://doi.org/10.1890/10-0097.1

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R. y Swetnam, T. W. (2006). Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science*, 313(5789), 940-943. DOI: 10.1126/science.1128834

Wooster, M. J., Roberts, G. J., Giglio, L., Roy, D. P., Freeborn, P. H., Boschetti, L., ... y San-Miguel-Ayanz, J. (2021). Satellite remote sensing of active fires: History and current status, applications and future requirements. *Remote Sensing of Environment*, 267, 112694. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112694

Atribución-NoComercial-Compartirigual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)