

Determinación de los efectos ambientales causados por eventos hidrometeorológicos extremos que inciden en el manejo del fuego en sitios del Área de Conservación Guanacaste (ACG), Guanacaste, Costa Rica

Determination of the environmental effects caused by extreme hydrometeorological events that affect fire management in sites of the Guanacaste Conservation Area (ACG), Guanacaste, Costa Rica

Laura Pérez-Bertozzi¹, Mauricio Vega-Araya², Julio Díaz-Orias³, Didi Guadamuz-Eras⁴

[Recibido: 6 de junio 2023, Aceptado: 23 de octubre 2023, Corregido: 13 de noviembre 2023, Publicado: 30 de noviembre 2023]

Resumen

[Introducción]: Los altos niveles de degradación ambiental que causan los incendios forestales y su relación con el cambio climático generan grandes preocupaciones en el nivel mundial. En Costa Rica, eventos hidrometeorológicos, catalogados como extremos, por su nivel de impacto, como el huracán Otto en 2016 y tormenta tropical Nate en 2017, parecieran haber provocado un cambio en la vegetación y, por consecuencia, en el combustible forestal. **[Objetivo]:** Por tal razón, se analizó la afectación en el aporte de combustible vegetal causado por los eventos hidrometeorológicos extremos, durante el período comprendido entre 1997 y el año 2020, en los sitios Platanares, El Avión y Junquillal, del Área de Conservación Guanacaste (ACG), al noroeste del país. **[Metodología]:** En el estudio se utilizaron datos de ocho índices de vegetación, seleccionados por su representatividad en el crecimiento del bosque, así como verificaciones de campo y recopilación de información proveniente de funcionarios y voluntarios del ACG, para determinar el efecto de los eventos extremos en las características del combustible vegetal y su relación con el manejo del fuego y la adaptación al cambio climático. **[Resultados]:** Los resultados obtenidos indican que la vegetación de los sitios investigados se encuentra en estado de regeneración natural, pero que se halla expuesta a la influencia, cada vez más recurrente, del fenómeno ENOS en sus diferentes fases (Neutral, La Niña, El Niño), así como a eventos hidrometeorológicos extremos (como el huracán Otto, o la tormenta tropical Nate) **[Conclusiones]:** que podrían estar favoreciendo no la cantidad, pero sí la intensidad de los incendios forestales.

Palabras clave: Combustible vegetal; incendios forestales; índices de vegetación

1 Consultora independiente, Heredia, Costa Rica. lperezbertozzi@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-2046-7575>

2 Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR), Universidad Nacional; Heredia, Costa Rica. mauricio.vega.araya@una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0003-3377-6924>

3 Consultor independiente, Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. jdiaztrue@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-3096-1726>

4 Área de Conservación Guanacaste, Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), La Cruz, Guanacaste, Costa Rica. dguadamuz@acguanacaste.ac.cr; <https://orcid.org/0009-0006-2086-3817>



Abstract

[Introduction]: The high levels of environmental degradation caused by forest fires and their relationship with climate change generate great concern worldwide. In Costa Rica, hydrometeorological events classified as extreme due to their level of impact, such as Hurricane Otto in 2016 and Tropical Storm Nate in 2017, seem to have caused a change in the vegetation and consequently with forest fuel. **[Objective]:** For this reason, the impact on the supply of vegetable fuel caused by extreme hydrometeorological events was analyzed, during the period 1997 to 2020, in the *Platanares, El Aviión* and *Junquillal* sites, of the Guanacaste Conservation Area (ACG) in the northwest of the country. **[Methodology]:** In the study, data from eight vegetation indices were used, selected for their representativeness of forest growth, as well as field verifications and collection of information to official personnel and ACG volunteers, to determine the effect of extreme events in the characteristics of vegetable fuel and its relationship with fire management and adaptation to climate change. **[Results]:** The results obtained indicate that the vegetation of the investigated sites is in a state of natural regeneration but is exposed to the increasingly recurrent influence of the ENSO phenomenon in its different phases (Neutral, La Niña, El Niño), as well as to Extreme hydrometeorological events (such as Hurricane Otto, or Tropical Storm Nate) **[Conclusions]:** that could be favoring not the quantity, but the intensity of forest fires.

Keywords: Forest fires; vegetation indices; vegetable fuel.

1. Introducción

Los incendios forestales son uno de los factores que contribuyen al impacto del cambio climático y se prevé que aumente el riesgo de su incidencia por la combinación del aumento de temperaturas y la disminución de precipitaciones (Zanetti et al., 2017). Muchos escenarios contemplan efectos e impactos importantes, que afectarían directamente el bienestar humano y ecológico, superando la capacidad de adaptación, ya que los bosques tropicales son ahora más susceptibles a tensiones que antes representaban una amenaza menor y esto se une a la sinergia entre la degradación y la fragmentación del bosque (IPCC, 2015).

En la región centroamericana los procesos de degradación y destrucción de la biodiversidad, debidos principalmente al cambio del uso del suelo, podrían intensificarse con el cambio climático y los altos niveles de vulnerabilidad de la región (CEPAL, 2015). Por su parte, los incendios forestales son contribuyentes a los grandes efectos del calentamiento global, ya que se estima que estos aportan alrededor de la quinta parte de las emisiones globales de CO₂ (Yerena et al., 2013), debido a que la combustión de biomasa genera la emisión de gases, incluyendo gases de efecto invernadero en diferentes proporciones, que pueden producir impactos sobre los ecosistemas, la salud y la seguridad de las poblaciones locales y distantes (Balde y Vega, 2019).

El Pacífico Norte de Costa Rica es una de las regiones más afectadas por los incendios forestales, junto con el Pacífico Central y el Pacífico Sur, que constituyen la zona donde se concentra la mayor incidencia y número de hectáreas afectadas (CONIFOR, 2014) y que, además, puede verse agravada ante un panorama de posibles incendios de baja frecuencia, pero de alta intensidad (Halofsky et al., 2020). Esta posibilidad requiere abordajes más consecuentes con el funcionamiento, estructura y composición de los ecosistemas, como factores determinantes para mantener su equilibrio (Sanchún



et al., 2016), pasando de un enfoque convencional de supresión, a un enfoque del fuego como un factor ecológico que debe ser manejado en relación con sus diferentes componentes y con la manera en que el fuego perturba y modela los ecosistemas (Morfin-Ríos et al., 2012).

Dentro del Área de Conservación Guanacaste (ACG), al noroeste de Costa Rica, los incendios forestales son una problemática que afecta principalmente el ecosistema de Bosque Tropical Seco (BTS) (Vargas y Campos, 2018), ya que presenta una estación seca muy marcada, que lo vuelve especialmente vulnerable al repercutir, de manera negativa, en su composición florística (Santiago, 2015). A pesar de los esfuerzos realizados en los programas de manejo del fuego, dos grandes eventos hidrometeorológicos ocurridos en los últimos años en el país: el huracán Otto (2016) y la tormenta tropical Nate (2017), parecieran haber provocado un cambio en la vegetación, en específico con la mortalidad de árboles que permanecen en pie o caídos, lo cual genera más combustible y posibilita una mayor propagación del fuego, por medio de focos secundarios (Díaz, J., comunicación personal, 25 de marzo, 2020).

Estos posibles nuevos comportamientos del fuego requieren una constante actualización de los modelos de proyecciones y estudios para determinar la respuesta de los ecosistemas a múltiples perturbaciones y estresores (Halofsky et al., 2020). Las tecnologías satelitales de tele-detección han sido ampliamente utilizadas como herramienta para monitoreo de la afectación de incendios y recuperación de comunidades vegetales, mediante el método de diferencia entre bandas espectrales o Índices de Vegetación (IV), que permiten correlacionar parámetros biofísicos de la vegetación, siendo el Índice “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI, siglas en inglés), uno de los más comúnmente utilizados para estudios espacio-temporales del comportamiento de la vegetación (Halofsky et al., 2020).

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la afectación en el aporte de combustible vegetal causada por los eventos hidrometeorológicos extremos (tanto sequías como tormentas y huracanes), durante el periodo 1997 al 2020, en los sitios Platanares, El Avión y Junquillal, que hacen parte de las Áreas Silvestres Protegidas (ASP) del ACG, mediante la identificación del estado actual del combustible vegetal en los tres sitios de investigación mencionados y la determinación del comportamiento del fuego y su relación con eventos hidrometeorológicos extremos, a través del análisis de Índices de Vegetación y la aplicación de una encuesta de percepción al personal funcionario y voluntario de ACG, relacionado con la atención de los incendios forestales. Los resultados de la investigación son un insumo para el fortalecimiento de los planes de manejo del fuego del Área de Conservación Guanacaste.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el Área de Conservación Guanacaste (ACG), en los cantones de La Cruz y Liberia de la provincia de Guanacaste, Costa Rica, específicamente en los sitios



Platanares y El Avión del Parque Nacional Santa Rosa y el Refugio de Vida Silvestre Bahía Junquillal (RVSBJ). En la **Figura 1** se puede apreciar la ubicación de los tres sitios de estudio dentro del Área de Conservación Guanacaste:

Sitios de investigación en el Área de Conservación Guanacaste (ACG)

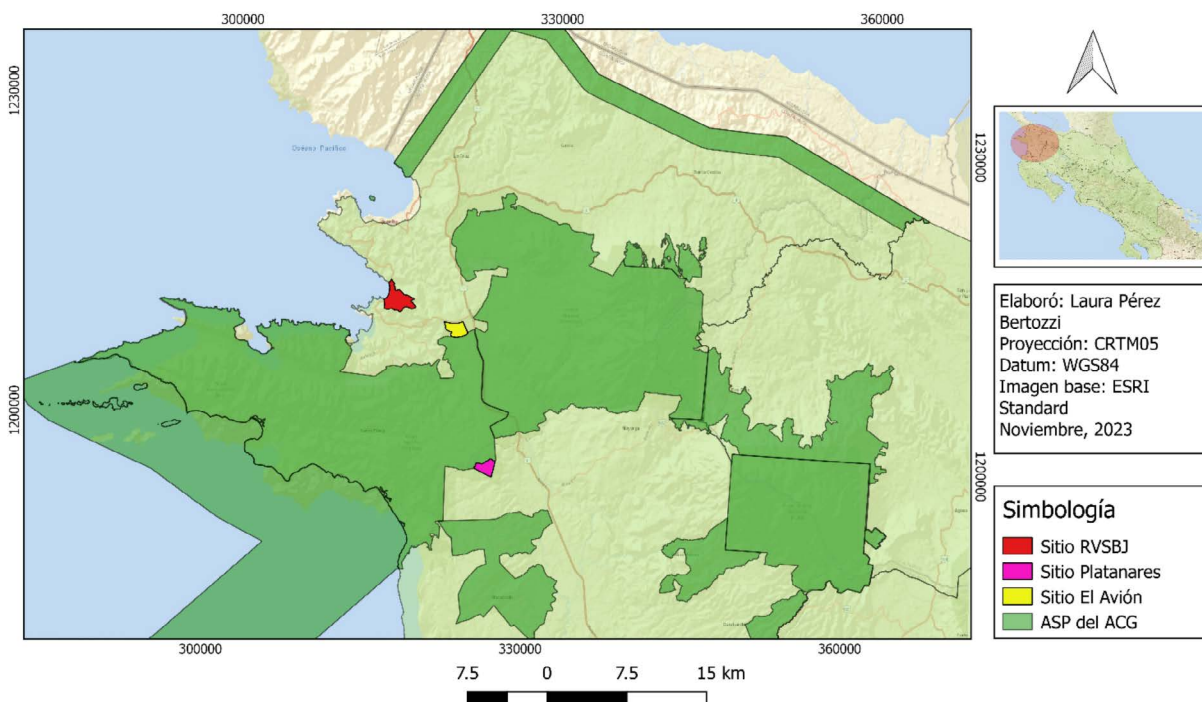


Figura 1. Mapa de los sitios de investigación en el ACG.

Figure 1. Map of research sites in the ACG.

2.2. Recopilación de datos de campo para la identificación del estado actual del combustible vegetal

Se seleccionaron 50 puntos al azar sobre los mapas de los tres sitios de investigación, utilizando la aplicación de puntos aleatorios del *software* libre QGIS, versión 2.18.7. Los puntos georreferenciados se introdujeron en un dispositivo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés), para acceder a ellos. Al llegar a cada punto de muestreo, se establecieron parcelas circulares con un radio de 12.60 metros, formando parcelas de 500 m². En caso de parcelas con pendientes mayores a 10 %, se aplicó la corrección de pendiente mediante una fórmula (**Ecuación 1**) (Corral-Rivas *et al.*, 2009) y el uso de un clinómetro de aplicación telefónica, esto, con el fin de mantener el área total de 500 m² en la totalidad de las parcelas.



$$\frac{\text{Distancia medida en el terreno}}{\sqrt{1+(\text{pendiente}(\%)/100)^2}} \quad (\text{E. 1})$$

Dentro de cada parcela, debidamente establecida, se inventarió cada árbol en pie con un diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 5 cm y lianas con un DAP ≥ 2.5 centímetros. Además, del DAP medido con cinta diamétrica, a cada espécimen se le calculó la altura, según estimación visual y se determinó su condición de espécimen vivo o muerto, igualmente según apreciación visual. En caso de árboles caídos, solamente se estimó la altura, no se tomaron datos diamétricos. Cada dato fue anotado en formularios de campo en donde se colocó un consecutivo para diferenciar las parcelas, así como fecha, hora, ubicación geográfica y datos específicos o sobresalientes.

Se establecieron 48 parcelas de muestreo, entre los tres sitios de investigación. Dos puntos preestablecidos del RVSBJ no fueron inventariados en el estudio por limitaciones de tiempo y por el difícil acceso.

2.3. Análisis de los Índices de Vegetación

Se seleccionaron para el estudio ocho (8) índices de vegetación. El índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, siglas en inglés), que es altamente utilizado por su cálculo sencillo, índice NDMI (Normalized Difference Moisture Index, siglas en inglés), el EVI (*Enhanced Vegetation Index*, siglas en inglés), utilizado usualmente como complemento de NDVI, el índice NBR (*Normalized Burn Ratio*, siglas en inglés), aplicado para la estimación de áreas afectadas por incendios, el TCB (*Tasseled Cap Brightness*, siglas en inglés), TCG (*Tasseled Cap Greenness*, siglas en inglés), TCW (*Tasseled Cap Wetness*, siglas en inglés) y el índice TCA (*Tasseled Cap Angle*, siglas en inglés).

Luego de la selección de los IV, se accedió a las imágenes multiespectrales a través de las bases de datos de la plataforma de acceso libre “Google Earth Engine” (GEE), que almacena las imágenes de sensores satelitales en catálogos de datos geoespaciales disponibles públicamente (Gorelick et al., 2017). A través del GEE se tradujo la información en la interfaz API (“Application Program Interface”, siglas en inglés), por medio del lenguaje “JavaScript”, utilizando la aplicación “LandTrendr Time Series”, para obtener los datos de cada índice de vegetación y generar series de tiempo por cada píxel (de 30 x 30 metros) y por cada IV (Kennedy et al., 2018). Los píxeles corresponden a las coordenadas de las parcelas de muestreo obtenidas durante el trabajo de campo.

Posteriormente, los datos obtenidos en “LandTrendr Time Series” por cada píxel, se procesaron en el programa estadístico de uso libre R (“R Development Core Team”), con el cual se generaron las series de tiempo integradas (gráficos), compuestas para el periodo 1985-2021. Para cada índice de vegetación y por cada sitio de investigación se generó una serie original y otra ajustada “fitted”; es decir, por cada uno de los ocho (8) índices de vegetación seleccionados se generaron dos (2) series de tiempo, para cada uno de los sitios de investigación, generando un total de 48 series de tiempo, de las cuales 24 son originales y 24 ajustadas (16 series por cada sitio de investigación).



En general, se utilizaron los productos de multiespectral de Landsat con una resolución espacial de 30 metros. El tipo de producto es T1_SR en la herramienta de *LandTrend*, donde T1_SR es una abreviatura de “Reflectancia de superficie de nivel 1”, indicando esto que los datos de esta colección fueron procesados para representar la reflectancia de la superficie. Los datos de reflectancia de la superficie como los T1_SR, tienen un preprocesamiento que incluye corrección radiométrica, corrección atmosférica y, finalmente, la conversión a valores de reflectancia. Todo esto está disponible en la plataforma *LandTrend* que se optimizó, a su vez, dentro de la plataforma de *Google Earth Engine*, la cual compone las series de tiempo de los sensores de Landsat 5, 7, y 8 para este estudio.

Para fines de esta investigación se consideraron las series de tiempo de 1997 a 2020, correspondiendo con los registros de incendios forestales del Programa de Manejo Integral del Fuego del ACG. El 2021 no se consideró debido a que los datos estaban incompletos al momento del análisis.

2.4. Encuesta de percepción a personal del ACG sobre estado del combustible y comportamiento de los incendios forestales

Se aplicó una encuesta de percepción a funcionarios y voluntarios del Programa de Manejo Integral del Fuego (PMF) y otros Programas del ACG, para obtener opiniones y perspectivas sobre el estado del combustible en los sitios investigados y el comportamiento de los incendios forestales en relación con eventos hidrometeorológicos extremos.

Para preparar las preguntas del cuestionario se analizaron los datos sobre estadísticas y características de incendios forestales ocurridos durante el periodo 1997-2020, (registros del ACG que datan de 1997), en los sitios Platanares, El Avión y Junquillal del ACG y su correlación con eventos extremos. Con la información recopilada de estas fuentes secundarias, se preparó una encuesta de seis (6) preguntas de selección que se validó con personal del ACG y fue aplicada a través de un formulario en la plataforma *Microsoft forms*.

2.5. Análisis de los datos

Los datos obtenidos en las parcelas se sistematizaron para determinar cantidad de registros, promedio de alturas estimadas, promedio de DAP de árboles y lianas, porcentaje de árboles vivos, cantidad de árboles caídos y realizar cálculos de biomasa.

Se aplicó la **Ecuación 2** (Fonseca-González et al., 2016) para estimar biomasa para el fuste y el árbol completo en bosque seco:

$$B_{total} = \exp(-1.53009 + 2.17632 * \ln(Dap)) \quad (E. 2)$$

Donde:

Btotal: biomasa del árbol completo en kg

DAP: diámetro normal a 1.30 m sobre el nivel del suelo en cm

ln: logaritmo natural

Exp: exponencial



La información de los índices de vegetación generada en las 48 series de tiempo, desde las bases de datos de GEE y con su procesamiento en *LandTrendr Time Series* más el Programa R, fue analizada según sus variaciones (disminución o aumento). Estas variaciones u oscilaciones de las series de tiempo se compararon con la afectación de eventos hidrometeorológicos extremos en los sitios de investigación. Para realizar esta comparación, se tomaron datos de diferentes fuentes científicas: Brenes y Bonilla (2012), IMN (2021), CNE (2015, 2017, 2018, 2021), CEPAL (1999) y PMF (2020).

Con los datos de estas fuentes se establecieron los períodos en los cuales el país se vio afectado por eventos hidrometeorológicos y se relacionó con el porcentaje de las parcelas de investigación y las hectáreas, dentro de los sitios de estudio, que fueron afectadas por incendios forestales durante el período 1997-2020 (**Cuadro 1**).

Seguidamente, se creó una matriz para cada sitio de investigación, al colocar los datos de las tendencias de los IV originales y ajustados y su relación con eventos hidrometeorológicos, fenómeno ENOS, los porcentajes de parcelas de investigación y hectáreas afectadas por incendios forestales en el período 1997-2020.

Por último, se analizó el Plan de Prevención, Protección y Control del ACG, actualizado a 2019 (ACG, 2019), específicamente el apartado de la Estrategia 1: Manejo integral del fuego en el Patrimonio Natural del Estado (PNE), Objetivo estratégico 1: Promover un manejo integral del fuego en el ASP, para fortalecer las acciones de manejo del fuego con los resultados de la investigación.

3. Resultados

3.1. Recopilación de datos de campo para la identificación del estado actual del combustible vegetal

Del trabajo de campo en las 48 parcelas de estudio, se obtuvo un total de 1968 muestras de árboles con diámetros iguales o mayores a 5 centímetros y 132 lianas con diámetros iguales o mayores a 2.5 centímetros.

El 86.33 % de los especímenes de árboles encontrados se encuentran vivos y en buen estado y el 98 % de las lianas se encuentra en esa misma condición. El sitio con mayor porcentaje de árboles vivos es El Avión, que es también el sitio con el promedio de DAP más bajo (10.47 cm).

Para el total de las parcelas de investigación el promedio de DAP de los árboles es de 13.09 centímetros, promedio de altura de 6.79 metros y promedio de biomasa de 2 103.84 kg/ha. Se contabilizaron 105 árboles caídos (57 en el RVSBJ, 34 en Platanares y 14 en El Avión), además de los 269 árboles muertos en pie (13.67 % de las muestras de árboles). El sitio RVSBJ es el que cuenta con mayor cantidad de árboles muertos y también lo es proporcionalmente, ya que tiene un promedio de 7.91 árboles muertos por parcela, seguido de Platanares con un promedio de 3.81 árboles muertos por parcela y el Avión de último, con 2.76 árboles muertos por parcela.

El sitio de investigación Platanares es el que cuenta con los promedios más elevados en DAP, altura y biomasa; es decir, es el sitio con vegetación más abundante y de mayor desarrollo y El Avión es el que cuenta con los promedios más bajos.



3.2. Análisis de los índices de vegetación

Las 48 series de tiempo se presentan en gráficos que permiten analizar fácilmente las oscilaciones de las curvas y relacionar este comportamiento con los eventos ocurridos en un determinado periodo de tiempo. En la **Figura 2**, a continuación, se puede apreciar, a modo de ejemplo o muestra de las 48 series obtenidas, el índice de vegetación NDMI, tanto para las curvas originales como para las ajustadas, en los tres sitios de investigación:

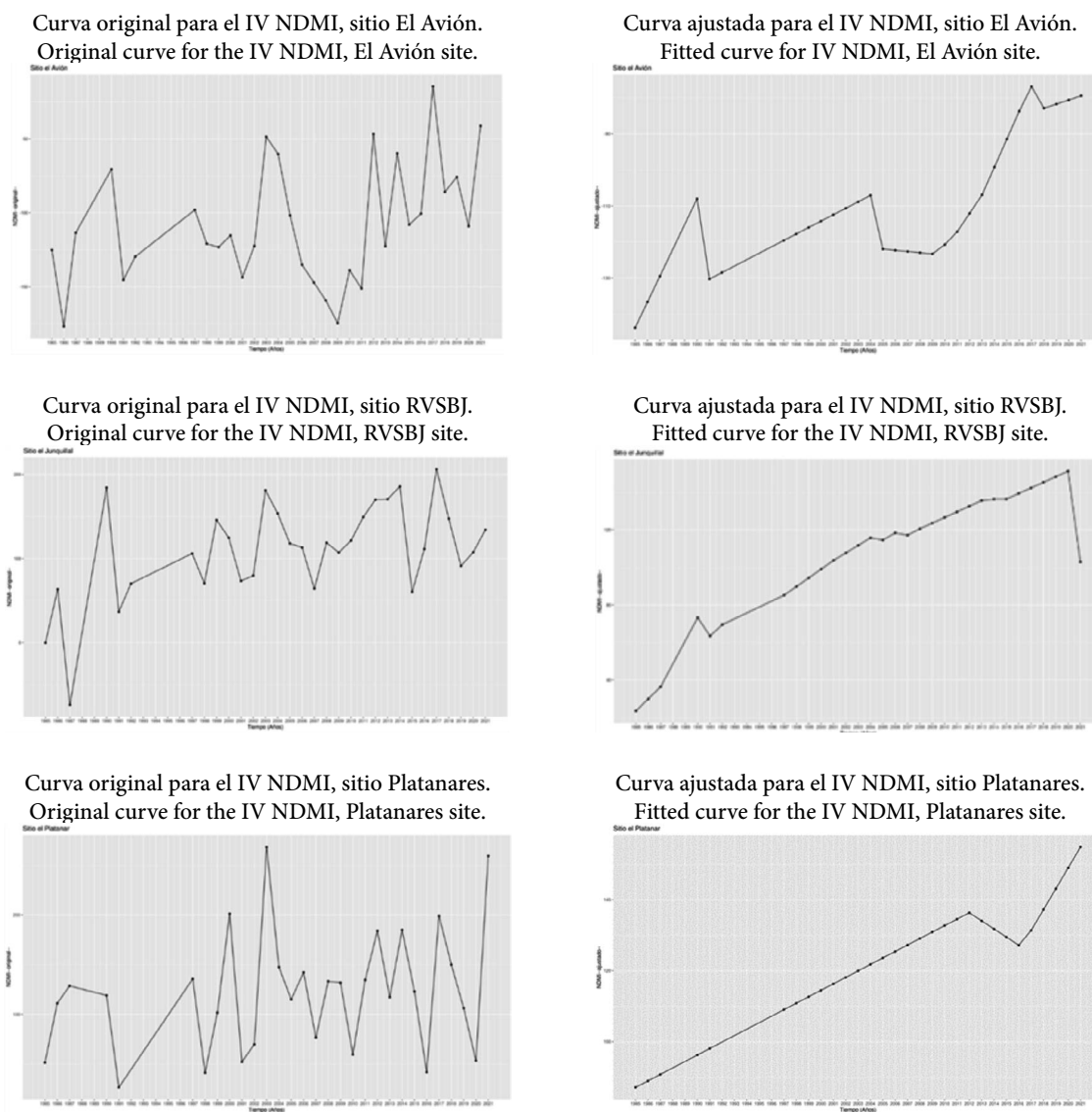


Figura 2. Comportamiento del índice de vegetación NDMI original y ajustado para los tres sitios de investigación.
Figure 2. Behavior of the original and adjusted NDMI vegetation index for the three research sites.



De los datos recopilados de diferentes fuentes científicas, sobre la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos en el país, las fases del fenómeno ENOS y su relación con el porcentaje de puntos de investigación y hectáreas afectadas por incendios forestales en los 3 sitios de investigación (datos del Programa Integral de Manejo del Fuego del ACG), se generó el **Cuadro 1**. Lo anterior para facilitar el análisis de la relación de los eventos hidrometeorológicos extremos con las variaciones de los IV y los incendios forestales dentro de las zonas de estudio.

Cuadro 1. Relación de eventos hidrometeorológicos extremos, fenómeno ENOS con incendios forestales en los sitios de investigación, durante el periodo 1997-2020.

Table 1. List of extreme hydrometeorological events, ENSO phenomenon with forest fires in the research sites, during the period 1997-2020.

Influencia fenómeno ENOS				Porcentaje de puntos investigados afectados por incendios forestales y hectáreas afectadas en cada sitio de investigación								
				Eventos extremos			Sitios de investigación					
							El Avión		Junquillal		Platanares	
Año	Inicio	Mediados	Finales	% Puntos afectados	Ha afectadas	% Puntos afectados	Ha afectadas	% Puntos afectados	Ha afectadas			
1997	Niño				0 %	0	0 %	1.3	18 %	25.5		
1998	Niña			Huracán Mitch	0 %	0	0 %	1	0 %	0		
1999	Neutro				0 %	0	0 %	0	0 %	0		
2000	Neutro				23 %	73.8	4 %	26.2	0 %	0		
2001	Neutro				69 %	277.1	0 %	1	45 %	110.5		
2002	Niño				31 %	145.5	0 %	14.5	9 %	16		
2003	Niño				54 %	206.7	0 %	0	0 %	0		
2004	Neutro				8 %	151.9	0 %	0	0 %	0		
2005	Niña				77 %	348	0 %	18.9	0 %	0		
2006	Niño				8 %	299.9	0 %	0	0 %	0		
2007	Niña	Intensidad de lluvias por Niña	Niña más intenso		69 %	220	0 %	0	0 %	0		
2008	Niña-intenso	Niña se debilita	Neutro	Tormenta tropical Alma	15 %	50.5	0 %	0	0 %	0		
2009	Niña más débil	Neutro/Transición Niño	Niño		15 %	168.3	0 %	0	0 %	0		
2010	Niño-intenso	Transición Neutro	Niña	Tormenta tropical Tomas	23 %	144	0 %	10.9	0 %	0		
2011	Niña-muy intenso	Neutro	Niña-moderado		31 %	151.1	4 %	26.7	0 %	0		
2012	Niña se disipa	Neutro/Transición Niño	Neutro		0 %	0	4 %	27.1	9 %	34.7		
2013	Neutro				15 %	31.5	0%	1.6	64 %	377		



Influencia fenómeno ENOS				Porcentaje de puntos investigados afectados por incendios forestales y hectáreas afectadas en cada sitio de investigación						
				El Avi3n		Junquillal		Platanares		
Año	Inicio	Mediados	Finales	Eventos extremos	% Puntos afectados	Ha afectadas	% Puntos afecta-dos	Ha afectadas	% Puntos afectados	Ha afectadas
2014	Transici3n Niño	Niño	Niño intenso	Sequía Decreto Ejecutivo N.º 38642-MP-MAG	15 %	21.4	4 %	19.3	0 %	12.5
2015	Transici3n	Neutro	Niño	Hurac3n Otto Decreto ejecutivo N.º 40027	0 %	0	0 %	0	0 %	0
2016	Niño baja intensidad	Neutro/ Transici3n Niña	Niña	Tormenta tropical Nate Decreto Ejecutivo N.º 40677	0 %	6.99	0 %	0	9 %	3.73
2017	Neutro	Neutro	Niña		3 %	115.81	0 %	0	0 %	0
2018	Niña	Neutro	Niño		23 %	33.99	0 %	0	0 %	0
2019	Niño	Niño Modoki (menos dr3stico)	Neutro		0 %	5.48	86 %	339.97	0 %	0
2020	Neutro	Transici3n Niña	Niña	Hurac3n Eta Decreto Ejecutivo N.º 42705-MP	0 %	0.21	0 %	0	0 %	0

Según el análisis del **Cuadro 1** y de los resultados de las series de tiempo, se determinó que para el sitio El Avi3n, los IV tanto de curvas originales como ajustadas, presentaron una tendencia al aumento, con presencia constante de incendios forestales a lo largo del periodo de estudio, pero en porcentajes bajos. En las curvas originales los porcentajes de incendios se ven reducidos a cero en periodos de tiempo con presencia del fenómeno ENOS en su fase neutra.

Para el sitio de investigación RVSBJ, se apreció la tendencia al aumento de la mayoría de los IV (excepto el IV TCB), tanto en las curvas originales, como en las curvas ajustadas, el porcentaje de incendios forestales y hectáreas afectadas presenta un comportamiento principalmente bajo a nulo, con variaciones en las curvas originales que se relacionan con la intermitencia de las fases Niño y Niña del fenómeno ENOS.

Para el sitio de investigación Platanares también se presentó una tendencia al aumento en los IV analizados, tanto en las curvas originales como las ajustadas con porcentajes bajos de incendios forestales.



3.3. Encuesta de percepción a personal del ACG sobre estado del combustible y comportamiento de los incendios forestales

Treinta y siete (37) personas participaron de la encuesta de percepción. Según las respuestas, el 65 % considera que ha aumentado la vegetación o la restauración natural del bosque, 84 % considera que los periodos de sequía y de lluvias se vuelven más intensos como resultado de los fenómenos de El Niño y La Niña, 67.5 % considera que eventos hidrometeorológicos, como el huracán Otto o la tormenta tropical Nate, aumentan el combustible vegetal y, por consecuencia, la intensidad de los incendios forestales en la época seca. El 87 % de los encuestados piensa que los incendios forestales se han vuelto más difíciles de controlar o más agresivos, considerando el incendio en el RVSBJ, de marzo 2019 (339.97 ha afectadas), como el de mayor complejidad y difícil control en los últimos 10 años.

4. Discusión

Los datos de campo indican que las zonas de estudio presentan un desarrollo favorable de la regeneración natural del bosque, lo que corresponde, según sus rangos de biomasa a bosque secundario intermedio y tardío, para el sitio El Avión y bosque secundario tardío y primario para el RVSBJ y Platanares. Estos rangos y clasificaciones de sucesión del bosque se basan en el estudio de Ulate (2011), que analiza la biomasa aérea de la cobertura forestal en Costa Rica, según zonas de vida y tipo de bosque (Ulate, 2011). Así mismo, los resultados del análisis de los Índices de Vegetación NDVI (Diferencia Normalizada), NDMI (Normalizada de Humedad), EVI (Mejorado), TCG (Verdor de la Vegetación), TCW (Humedad de la Vegetación) y TCA (Ángulo de la vegetación), indican que la biomasa vegetal en los sitios de investigación tiene una tendencia al crecimiento, dada la regeneración natural y al proceso de sucesión.

Entre los sitios de investigación, El Avión es el más afectado por incendios, en el periodo 1997 a 2020 (PMF, 2020) y presenta los menores promedios de altura estimada, DAP y cantidad de biomasa (kg/ha), respecto a los otros sitios. Estas condiciones del sitio El Avión con vegetación más joven, mayor presencia de pastos y arbustos y mayor recurrencia de incendios forestales, concuerdan con el antecedente en Guanacaste, de un uso del suelo dedicado a la ganadería y con un marcado dominio de especies exóticas de pastos como jaragua (*Hyparrhenia rufa* Nees) (Picado y Cruz, 2014).

En cuanto a los sitios Platanares y RVSBJ, estos presentan una baja afectación de incendios forestales, a excepción de los años 2001 y 2013 para Platanares (110.5 y 377 hectáreas afectadas respectivamente) y 2019 en el RVSBJ con 339.97 hectáreas afectadas (64 % del área terrestre protegida) (PMF, 2020). Para estos dos sitios, el patrón de incendios forestales con tendencia a bajos porcentajes de áreas afectadas puede deberse a que los bosques naturales y plantados tienen una categoría de susceptibilidad bruta a incendios baja, a diferencia de pastos y rastrojos que tienen categorías muy alta y moderada (Jiménez et al., 2016). Sin embargo, en caso de tormentas o eventos que provoquen mortalidad o daños en la vegetación, este tipo de combustibles



de mayor dimensión pueden acumularse o convertirse en focos secundarios (árboles muertos en pie), que dispersan chispas o pavesas fácilmente, con ayuda del viento. Esta situación, unida a las características del terreno, fue clave en la propagación del incendio en el RVSBJ en el 2019.

Por otro lado, la susceptibilidad de la vegetación a los incendios está relacionada con factores climáticos como la precipitación y la temperatura, que inciden, de manera directa, en las variaciones fisiológicas y fenológicas en su estado, generando fluctuaciones en la probabilidad de sufrir daños y resistencia a los incendios (Jiménez et al., 2016). En los bosques secos del ACG, cuando la vegetación se encuentra sana, la afectación de los incendios forestales ocurre principalmente en el nivel del sotobosque y no suele afectar el dosel; sin embargo, cuando diferentes eventos han afectado la vegetación, sobre todo de manera consecutiva (sequías, tormentas, huracanes), se pueden favorecer condiciones para que el comportamiento de los incendios forestales sea más agresivo y se afecte una mayor cantidad de hectáreas en un mismo incendio. Esta susceptibilidad de la vegetación y el comportamiento de los combustibles, podrían explicar los incendios del 2001, 2013 y 2019 en Platanares y RVSBJ que presentaron condiciones que podrían denominarse diferentes a la tendencia, para ambos sitios.

A su vez, esto se relaciona con los índices de vegetación, en cuanto a que las variaciones en la mayoría de ellos se observan para las diferentes fases del fenómeno ENOS, de lo que podría inferirse que el mayor efecto para el bosque y el combustible forestal es su alta recurrencia y las variaciones entre condiciones más secas a más lluviosas con periodos más breves de transición. Según fue estudiado por Florentín (2020), en Paraguay, durante el periodo 2001-2019, existen evidencias cuantitativas razonables para indicar que las anomalías en las temperaturas generadas, durante la fase fría del ENOS (Niña), aumentan la probabilidad de ocurrencia de los incendios forestales.

En El Avión, aunque es el sitio de investigación con estados de regeneración menos avanzados y mayor afectación de incendios forestales, el índice NBR, de calcinación normalizado, ampliamente utilizado para la verificación de zonas afectadas por fuego, no refleja ningún efecto del fuego en los datos del índice; es decir, no es concordante con la ocurrencia o no, de incendios forestales, aunque sí muestra variaciones, según afectación del fenómeno El Niño. Es posible que el crecimiento de la vegetación en la época de lluvias impide apreciar los datos generados por este índice en época seca, ya que para este estudio la información de los IV se determinó en periodos anuales.

Por su parte, el índice TCB (brillo relacionado al suelo), que tiene tendencia a disminuir, presenta aumentos cuando se ve afectado por El Niño o La Niña. Esto podría sugerir la hipótesis de que las lluvias y vientos ocurridos durante las fases La Niña del ENOS y eventos extremos como el huracán Otto, en 2016 y la tormenta tropical Nate, en 2017, podrían causar derribo de ramas y árboles debilitados por anteriores periodos secos causados por las fases El Niño, aumentando la cantidad y la acumulación de combustible para futuros incendios forestales.

Un estudio de González et al., (2011) en la zona central de Chile, analizó que inviernos y primaveras más lluviosos en años Niño promoverían la acumulación de combustible, lo que genera condiciones para la ignición y propagación de incendios forestales, no en la temporada



inmediata de incendio, sino en la temporada siguiente. También Elvira et al. (2011) hace referencia a diversos estudios que muestran una relación entre la incidencia de fuegos severos y los ciclos de alta precipitación, en los que se acumula biomasa (combustibles) y ciclos de sequía extrema, en los que se presentan condiciones para la propagación del fuego.

En el ACG, desde el año 2008 se ha evidenciado una alta mortalidad de individuos de roble encino (*Quercus oleoides*) que permanecen en pie y representan un aumento del combustible forestal, de manera poco común, antes de este fenómeno de mortalidad. En presencia de fuego, estos especímenes muertos de roble encino arden y con la acción del viento generan focos secundarios de incendios forestales, aumentando el riesgo para los combatientes forestales. Aunque la causa de la mortalidad masiva de individuos de roble encino no está clara, parece relacionarse con la exposición a eventos hidrometeorológicos extremos. Esta hipótesis necesita confirmación por medio de estudios específicos; sin embargo, lo que es verificable en campo es la gran mortalidad de muchos individuos, aumentando así la vulnerabilidad y, por ende, el riesgo de incendios forestales en el ACG.

Por tanto, a pesar de que, según los resultados, el bosque seco del ACG presenta condiciones de regeneración natural, donde muchos pastizales se han transformado en bosques, la conjugación de diferentes factores como la secuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, reducción de los recursos destinados a la prevención y el control de los incendios forestales, entre otros, parece que aumentan la intensidad de los incendios forestales en todas las dimensiones.

5. Conclusiones

Aunque, según los resultados de este estudio, la vegetación en los sitios de investigación, presenta una tendencia a la regeneración y crecimiento, los periodos de sequía y de lluvias se vuelven más intensos como resultado de los fenómenos de El Niño y La Niña, lo que puede influir en la susceptibilidad de la vegetación a los incendios forestales, sobre todo, cuando se presentan patrones de sucesión de eventos que pueden favorecer condiciones para comportamientos más severos de incendios forestales. Ante tal situación, la comparación de los datos obtenidos de los Índices de Vegetación, con el histórico de los eventos hidrometeorológicos, contribuye a identificar las condiciones previas a un incendio forestal que puede tornarse de difícil control. No obstante, si bien, la aplicación de IV como elemento para un análisis retrospectivo o puntual de la condición de la vegetación es muy útil, se considera que los índices TCG, TCW y TCA no aportan información adicional a la obtenida por NDVI, NDMI y EVI, ya que los datos que arrojan son similares.

Por lo tanto, se recomienda la implementación de monitoreos de los combustibles vegetales en las zonas de mayor amenaza de incendios forestales, sirviéndose del análisis de Índices de Vegetación que arrojen información complementaria, el seguimiento de eventos hidrometeorológicos y revisiones de campo, para sustentar las decisiones de manejo de combustibles o acciones de preparación, en general, para reducir el riesgo ocasionado por los incendios forestales, en condiciones que se vuelven cada vez más impredecibles.



6. Agradecimientos

Los autores agradecen a los funcionarios del Programa de Manejo del Fuego del Área de Conservación Guanacaste, por el apoyo en esta investigación. También se le agradece a las personas anónimas que revisaron la versión final de documento y la enriquecieron con oportunos comentarios.

7. Conflictos de interés

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

8. Referencias

- ACG [Área de Conservación Guanacaste]. (2019). *Actualización del Plan de Prevención, Protección y Control del Área de Conservación Guanacaste*. Guanacaste, Costa Rica: SINAC.
- Balde, B., & Vega, C. (2019). Estimación de emisiones de GEI y sus trayectorias en grandes incendios forestales en Cataluña, España. *Cataluña, España. Madera y Bosques* vol. 25, N°2. <https://myb.ojs.incol.mx/index.php/myb/article/view/e2521764/1956>
- Brenes, A. & Bonilla, A. (2012). *La Niña 2010-2012. Estudio de caso Costa Rica*. UNISDR. <https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2013/en/bgdocs/Brenes%20and%20Bonilla,%202012.pdf>
- CEPAL [Comisión Económica para América Latina y el Caribe]. (1999). *Centroamérica: evaluación de los daños ocasionados por el Huracán Mitch, 1998. Sus implicaciones para el desarrollo económico y social y el medio ambiente*. Santiago, Chile: CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25373>
- CEPAL [Comisión Económica para América Latina y el Caribe]. (2015). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible*, Santiago, Chile: CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37310-la-economia-cambio-climatico-america-latina-caribe-paradojas-desafios-desarrollo>
- CNE [Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias]. (2015). *Plan General de la Emergencia por Sequía. Según Decreto Ejecutivo N.º 38642-MP-MAG*, publicado en La Gaceta N.º 195, del viernes 10 de octubre del 2014. CNE. <https://cne.go.cr/recuperacion/declaratoria/planes/Plan%20General%20de%20la%20Emergencia%2038642.pdf>



- CNE [Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias]. (2017). *Plan general de la emergencia ante la situación provocada por el paso del huracán Otto por territorio costarricense. Decreto de emergencia N.º 40027*. CNE. <https://www.cne.go.cr/recuperacion/declaratoria/planes/Plan%20General%20de%20la%20Emergencia%2040027.pdf>
- CNE [Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias]. (2018). *Plan general de la emergencia ante la situación provocada por la Tormenta Tropical Nate. Decreto de emergencia N.º 40677*. CNE. <https://www.cne.go.cr/recuperacion/declaratoria/planes/Plan%20General%20de%20la%20Emergencia%2040677.pdf>
- CNE [Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias]. (2021). *Plan General de la Emergencia. Situación provocada por los efectos del Huracán ETA Decreto Ejecutivo de Emergencia N° 42705-MP*. CNE. <https://www.cne.go.cr/recuperacion/declaratoria/planes/Plan%20General%20de%20la%20Emergencia%20Huracan%20Eta%2042705.pdf>
- CONIFOR [Comisión Nacional sobre Incendios Forestales]. (2014). *Estrategia Nacional de Manejo Integral del Fuego en Costa Rica 2012-2021*. CONIFOR, SINAC. <https://www.sinac.go.cr/ES/particiudygober/Documents/Estrategia%20Nacional%20Manejo%20del%20Fuego.pdf>
- Corral-Rivas, J., Vargas Larreta, B., Wehenkel, C., Aguirre Calderón, O., Álvarez González, J., y Rojo Alboreca, A. (2009). *Guía para el Establecimiento de Sitios de Investigación Forestal y de Suelos en Bosques del Estado de Durango*. Durango, México. Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Díaz, J. (2020). *Incendio del año 2019 en RVSBJ*. Comunicación personal el 25 de marzo, 2020. https://www.researchgate.net/publication/305640430_Guia_para_el_establecimiento_de_sitios_de_investigacion_forestal_y_de_suelos_en_bosques_del_Estado_de_Durango
- Elvira, J., Fueyo, L. & Gutiérrez, D. (2011). *Estrategia y Lineamientos de Manejo de Fuego en Áreas Naturales Protegidas*. Tlalpan, México D. F. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <https://simec.conanp.gob.mx/Publicaciones2020/Publicaciones%20CONANP/Parte%202/Estrategias%20Planes%20y%20Programas/2011%20Estrategia%20y%20Lineamientos%20de%20Fuego%20en%20ANP.pdf>
- Florentín, P. (2020). *Análisis de la ocurrencia de incendios forestales y su relación con el fenómeno climático de El Niño – Oscilación Sur (ENOS) en el Paraguay 2001-2019* (Tesis. Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Asunción, Paraguay). <https://repositorio.conacyt.gov.py/bitstream/handle/20.500.14066/3530/Maestr%c3%ada-BNAC09-72.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fonseca-González, W., Alice-Guier, F., Rojas-Vargas, M., Villalobos-Chacón, R., Porrás-Quirós, J. y Spínola-Parallada, M. (2016). *Construcción de Funciones Alométricas para Costa Rica en el Contexto del Proyecto de Protección Ambiental a través de la Protección de los Bosques de*



Centro América. (Informe final). Costa Rica. Universidad Nacional de Costa Rica. <http://copa.acguanacaste.ac.cr:8080/bitstream/handle/11606/694/Construcci%20de%20Funciones%20Alom%20a%20tricas%20para%20CR%20en%20el%20Contexto%20del%20Proyecto%20de%20Protecci%20Ambienta%20a%20trav%20de%20la%20Protecci%20de%20los%20Bosques%20de%20Centro%20Am%20rica%20%28Informe%20final%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

González, M., Lara, A., Urrutia, R., Bosnich, J. (2011). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile. *Revista Bosque*, N.º 32, pp. 215-219. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300002>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202 (1), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Halofsky, J., Peterson, D. & Harvey, B. (2020). Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA. *Association Fire Ecology*, pp 1-26. <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0062-8>

IMN [Instituto Meteorológico Nacional]. *Boletín ENOS*. (2021). [Online]. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/boletin-enos>. [febrero, 2021].

IPCC [Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático]. (2015). *Cambio Climático 2014. Mitigación del cambio climático. Resumen para responsables de políticas y resumen técnico*. OMM-PNUMA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es-1.pdf

Jiménez, A., Urrego, L. & Toro, L. (2016). Evaluación del comportamiento de incendios de la vegetación en el norte de Antioquia (Colombia): Análisis del paisaje. *Colombia Forestal*, Vol. 19, N.º 2, pp. 37-55. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.2.a03>

Kennedy, R., Yang, Z., Gorelick, N., Braaten, J., Cavalcante, L., Cohen, W., & Healey, S. (2018). *Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine*. Remote Sensing. <https://doi.org/10.3390/rs10050691>

Morfin-Ríos, J., Jardel E., Alvarado E. & Michel-Fuentes, J. (2012). *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*. *Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara*. https://queimadas.dgi.inpe.br/~rqueimadas/material3os/Evaluac_cuantific_de_combustibles_Forestales.pdf

Picado, W. & Cruz, C. (2014). El bosque seco en llamas. Estructura agraria y ecología política del fuego en Costa Rica. *Revista de Historia* N.º 70, julio-diciembre 2014, pp. 109-142.



- PMF [Programa Integral de Manejo del Fuego del Área de Conservación Guanacaste]. (2020). *Datos de perímetros y áreas afectadas por incendios forestales en el ACG, desde 1997 a 2020*. ACG, PMF.
- Sanchún, A. Botero, R., Morera, A., Obando, G., Russo, R., Scholz, C. & Spinola, M. (2016). *Restauración funcional del paisaje rural: manual de técnicas*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). <https://huelladelfuturo.cr/sites/default/files/2020-07/Restauracion-funcional-paisaje-rural.pdf>
- Santiago, R. (2015). *Influencia de los incendios forestales a nivel de vegetación en el sector de Platanares en el Parque Nacional de Santa Rosa, Área de Conservación de Guanacaste*. (Tesis. Universidad Nacional de Costa Rica). Heredia, Costa Rica. https://www.researchgate.net/publication/284180004_Influencia_de_los_incendios_forestales_a_nivel_de_vegetacion_en_el_sector_de_Platanares_en_el_Parque_Nacional_de_Santa_Rosa_Area_de_Conservacion_de_Guanacaste
- Ulate, C. (2011). *Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica*. (Tesis. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago). Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3005/Informe_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vargas, D., & Campos, C. (2018). Modelo de vulnerabilidad ante incendios forestales para el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED* Vol. 10(2), diciembre, pp. 435-446. <https://doi.org/10.22458/urj.v10i2.2173>
- Yerena, J., Jiménez, J., Alanís, E., Aguirre, O., González, M. & Treviño, E. (2013). Emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de incendios forestales de 2000-2011 en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. *CIENCIA UANL*, año 16, N°. 62, pp. 68-75. <http://eprints.uanl.mx/3754/1/9ArticuloParqueNacionalCumbres.pdf>
- Zanetti, E., Gómez, J., Mostacedo, S., Reyes, O. (2017). *Cambio climático y políticas públicas forestales en América Latina*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, Chile. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40922/S1601346_es.pdf?sequence=4&isAllowed=y

