

Preprint



Pertenencia institucional

Resumen

Correspondencia

Palabras clave:

ORCID

Abstract

Key words:

ANÁLISIS DE FOCOS DE CALOR PARA EL DEPARTAMENTO DEL TOLIMA (COLOMBIA). UNA APROXIMACIÓN EMPLEANDO MODIS

ANALYSIS OF ACTIVE FIRES FOR DEPARTMENT OF TOLIMA (COLOMBIA). AN APPROACH USING MODIS

Mauricio Alejandro Perea-Ardila ^{a1*}, Julian Leal-Villamil ^{b2} Swanni T. Alvarado ^{c3}

Highlights.

El aumento de incendios por cambio climático reduce la resiliencia de los ecosistemas.

Los sensores remotos como MODIS permiten monitorear incendios de cobertura vegetal.

Los focos de calor en Tolima son más intensos entre agosto y septiembre.

Las altas concentraciones de focos se localizan en la zona centro y norte del Tolima.

La distribución espacial indica un patrón agrupado de focos en temporadas secas.

Resumen

Los incendios forestales en Colombia son cada vez más catastróficos. Pocos de estudios en la región Andina dificultan la comprensión de sus causas y efectos a largo plazo. Este estudio en el departamento del Tolima analizó focos de calor del sensor MODIS entre 2001 y 2022 y su relación con variables como la precipitación mensual, las coberturas vegetales y la elevación del terreno. Se empleó los sistemas de información geográfica y se analizaron las variables en el área de estudio por medio de la correlación espacial y el geoprocésamiento. Se encontraron 7334 focos de calor, con patrones bimodales, siendo agosto y septiembre los meses de mayor registro. La precipitación mensual mostró baja correlación con la presencia de focos de calor, y las áreas afectadas incluyeron bosques y coberturas no forestales por debajo de los 1000 m de altura. Los resultados aportan a la comprensión de los incendios a nivel departamental.

Palabras clave: correlación espacial, fuego, geoprocésamiento, incendios forestales, sensores remotos, sistema de información geográfica.

Abstract

Forest fires in Colombia are increasingly catastrophic. The lack of studies in the Andean region makes it difficult to understand their causes and long-term effects. This study in the department of Tolima analyzed active fires from the MODIS sensor between 2001 and 2022 and their relationship with variables such as monthly precipitation, vegetation cover, and terrain elevation. Geographic Information Systems were used and the variables in the study area were analyzed by spatial correlation and geoprocessing. A total of 7334 active fires were found, with bimodal patterns, August and September being the months with the

¹ Universidad Federal de Ceará. Fortaleza, Brasil. mauricio.perea@alu.ufc.br correspondencia*
<https://orcid.org/0000-0003-4561-0251>

² Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. jlealv@ut.edu.co <https://orcid.org/0000-0002-5100-2693>

³ Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, Colombia. stalvarador@unal.edu.co <https://orcid.org/0000-0002-6416-0076>

highest number of records. Monthly precipitation showed a low correlation with the presence of active fire, and the affected areas included forests and non-forest cover below 1000 m of altitude. The results contribute to the understanding of fires at the departmental level.

Keywords: spatial correlation, fire, geoprocessing, forest fires, remote sensing, geographic information system, remote sensing, geographic information system.

INTRODUCCIÓN

El fuego ha estado presente en el planeta por millones de años y en la actualidad se considera como un factor que condiciona la evolución y la vida en la tierra (Scott, 2000). El fuego puede ser el resultado de acciones naturales o antrópicas, que pueden considerarse como catástrofes cuando los ecosistemas que no evolucionaron con este disturbio y las vidas humanas son afectadas (Bowman *et al.*, 2020). Tradicionalmente, el fuego ha sido utilizado para la adecuación de terrenos en actividades agropecuarias (usualmente denominadas como quemas controladas). Sin embargo, cuando estas quemas (por diversos factores) se propagan sin control y sin límites establecidos en zonas con algún tipo de vegetación terrestre son catalogadas automáticamente como incendios de cobertura vegetal (Parra-Lara *et al.*, 2011).

A nivel internacional, el aumento de los incendios de cobertura vegetal, vinculados al cambio del uso del suelo y a la influencia del cambio climático, han repercutido negativamente en los ecosistemas, afectando en gran medida su capacidad de resiliencia y disminuyendo la oferta de servicios ecosistémicos (Andela *et al.*, 2017). Asimismo, es importante resaltar que la compleja interacción entre los diversos factores socio-ecológicos de una región puede ocasionar variaciones en el régimen y la severidad de los incendios de la vegetación, lo cual, sumado a la falta de datos históricos de estos eventos, resulta en serias dificultades para poder proyectar los futuros impactos de los incendios sobre los ecosistemas (Bowman *et al.*, 2020; Moritz *et al.*, 2014).

Actualmente, los sensores remotos brindan la posibilidad de monitorear los incendios de la cobertura vegetal en diferentes escalas espaciales y temporales (Armenteras *et al.*, 2009). Los focos de calor pueden ser utilizados para identificar anomalías las de temperatura en la superficie terrestre y así indagar sobre

la existencia de un posible incendio (Di Bella *et al.*, 2008). Actualmente, el Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) provee datos de focos de calor históricos de libre acceso, a través del Sistema de Información sobre Incendios para la Gestión de Recursos (FIRMS, por sus siglas en inglés) (Coskuner, 2022).

Bajo el anterior contexto, varios estudios han utilizado los focos de calor derivados de sensores remotos para describir el compartimiento del fuego. Así, por ejemplo, Da Cunha-Neto *et al.* (2021) analizaron la dinámica espacial y temporal de focos de calor provenientes del sistema MODIS y su relación con la precipitación en el estado de Maranhão (Brasil), reportando relaciones entre la estacionalidad de la precipitación y la concentración de incendios. Dos Santos *et al.* (2021) determinaron el comportamiento espacial y temporal de los focos de calor entre 1999 y 2020 usando diferentes productos de sensores remotos, (entre ellos MODIS) para Brasil, encontrando grandes concentraciones de focos en el centro-norte del país y relaciones con la ocurrencia del fenómeno del Niño, la deforestación y la expansión agrícopecuaria. En Argentina, Sanchez *et al.* (2023) mediante uso de sensores remotos, realizaron la caracterización de los incendios forestales en la provincia de la Pampa entre los años 2001 – 2017; reportaron un total 667 500 ha/año afectadas por incendios y un aumento anual en la superficie total quemada, pudiendo este estudio contribuir al conocimiento del fuego en esta región. En México, Simental & Pompa (2016) utilizaron la geoestadística con el fin de conocer y entender los patrones de distribución espacial de los focos de calor y variables ambientales en el estado de Durango, encontrando una tendencia no aleatoria de los incendios en el territorio.

Colombia es un país con diversos ecosistemas naturales que son vulnerables a presentar incendios (Bolaño-díaz *et al.*, 2022). Estos incendios en su mayoría (>90%) son por causas antrópicas, tales como: por asuntos intencionales, por descuido, negligencia, accidentes o atentados terroristas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT], 2002). En Colombia, para el año 2018 (fenómeno del Niño) se reportó un área total de 106 056 ha afectadas por incendios de cobertura vegetal, siendo la región Andina la que presentó el mayor número de eventos (Instituto de Hidrología, Meteorología y

Estudios Ambientales [IDEAM, 2019]. Además, oficialmente se reconoce que existen limitaciones logísticas para el registro eficiente de estadísticas sobre los eventos de incendios en el país, lo que repercute en la cantidad y calidad de los datos suministrados por fuentes oficiales (Bolaño-díaz *et al.*, 2022). Es por ello, que la investigación y generación de información referente a los eventos de incendios y a su afectación a las coberturas vegetales es un tema prioritario a nivel nacional para la gestión del riesgo y los recursos naturales (Armenteras *et al.*, 2018; Parra-Lara *et al.*, 2011).

En Colombia se reportan pocos estudios que relacionen el uso de los sensores remotos para la caracterización de los fenómenos de incendios. Uno de ellos es el realizado por Armenteras *et al.* (2009) quienes demostraron la utilidad de los focos de calor estimados por el MODIS para determinar los patrones del fuego entre los años 2000 y 2009 para toda Colombia, relacionado los incendios de las coberturas vegetales, la superficie afectada de cada departamento, en algunos territorios de importancia ambiental y cultural del país. De manera similar, Bolaño-díaz *et al.* (2022) utilizaron los focos de calor derivados de MODIS para determinar la distribución espacio-temporal de los incendios en cinco regiones naturales de Colombia, en el periodo comprendido entre los años 2000 a 2020, encontrando relación de los eventos de incendios con las temporadas de menor precipitación e identificando dos regiones naturales como las de mayor concentración y afectación en área por incendios (Andina y Orinoquía). Los resultados obtenidos en el campo de los sensores remotos y caracterización de eventos de incendios son fundamentales para el monitoreo de las coberturas vegetales y de vital apoyo para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales, el manejo de los recursos naturales (Armenteras *et al.*, 2009).

El departamento del Tolima se caracteriza por su producción agropecuaria, (pastos, cultivos de arroz, cultivos transitorios y permanentes) siendo una de las principales actividades económicas que sustenta la región. A su vez, estas actividades utilizan técnicas agropecuarias tradicionales (como la quema) para la producción agroindustrial (Corporación Autónoma Regional del Tolima [Cortolima], 2014). Asimismo, el Tolima alberga un gran número de ecosistemas estratégicos de especial interés para la conservación como son las zonas de páramo en transición hasta el Bosque Seco Tropical (bs-T), también cuenta con zonas de

humedales, múltiples especies de flora y fauna reportadas como en peligro de extinción o con medidas de conservación (Reyes & Ramírez, 2022). En Colombia, entre los años 2017-2018 se presentó una afectación de 6213 ha de coberturas vegetales a causa de incendios en el Tolima, siendo el quinto departamento con mayor número de áreas afectadas a nivel nacional (IDEAM, 2019).

A pesar de los datos reportados, no se logran evidenciar estudios a nivel departamental que permitan dar respuesta suficiente a preguntas como las siguientes: ¿Cómo han ocurrido espacial y temporalmente los incendios en el departamento?, ¿Existen patrones de estacionalidad climática asociados a la existencia de focos de calor en la región?, ¿Existen alguna influencia espacial del dato espacial en la ocurrencia de eventos? y ¿Cuáles son las coberturas vegetales más afectadas por los incendios en el Tolima?.

Para dar respuestas a estas interrogantes, esta investigación tiene por objetivo analizar los focos de calor ocurridos en el departamento del Tolima durante los años 2001 a 2022. Para esto se pretende determinar las estadísticas descriptivas de los patrones de focos de calor a nivel del departamento, establecer su relación con la precipitación, determinar la afectación de los focos de calor sobre las coberturas vegetales y si existe un patrón con el gradiente altitudinal. Con los resultados de este estudio se pretende proveer información eficaz para la comunidad científica y las autoridades ambientales para el manejo integrado del fuego en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El departamento del Tolima es uno de los 32 departamentos que conforman la división política de Colombia, cuenta con 47 municipios y 6 provincias administrativas (Figura 1). Se encuentra localizado en el centro de la región Andina entre las cordilleras central y occidental sobre el Valle del río Magdalena,

entre las coordenadas geográficas 5° 19' 1.06" y 2° 52' 13.78" de latitud Norte y los 74° 28' 30.85" y 76° 6' 30.69" de longitud Oeste. Posee una extensión aproximada de 24 139.05 km².

Climatológicamente, el departamento presenta un régimen de precipitación bimodal con dos épocas de menor precipitación (junio a agosto y diciembre a febrero) y temperaturas que son mayores a 28°C sobre el valle del río Magdalena y menores a 8°C sobre en las zonas altas de la cordillera central (IDEAM, 2015).

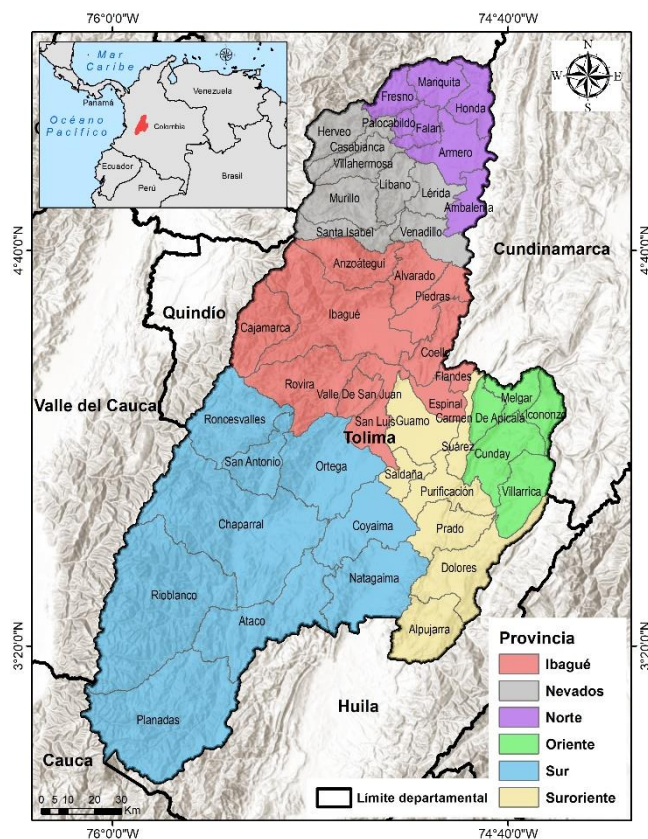


Figura 1. Localización del área de estudio. Provincias del departamento del Tolima.

Figure 1. Location of the study area. Provinces of the department of Tolima

Fuente: Autores.

La región abarca un gran número de zonas de vida, las cuales van desde el bs-T sobre el Valle del río Magdalena hasta Bosques Pluviales Premontanos (bp – PM) y zonas de páramos en las montañas (Cortolima, 2014). De acuerdo con sus atributos ambientales, el Tolima posee una gran biodiversidad, presencia de ecosistemas estratégicos y de zonas hidrográficas (Reyes & Ramírez, 2022). Asimismo, el

Tolima se destaca por ser un departamento esencialmente agropecuario, se caracteriza por la producción de arroz, sorgo y café principalmente (Cortolima, 2014).

Análisis de focos de calor

Se accedió a los datos de focos de calor entre el periodo comprendido de enero de 2001 y diciembre de 2022 recopilados en la colección MODIS 6.1 Terra+Aqua (resolución espacial de 1 Km y resolución temporal diaria) de la base de datos mundial de focos de calor que se encuentran disponibles gratuitamente para descarga (FIRMS, 2022). Con el objeto de disminuir las falsas alarmas y aumentar los casos de detección real de fuegos activos, se trabajó con los focos de calor que presentaron una clasificación de confiabilidad (nominal y alta, $\geq 30\%$) según los rangos recomendados por Giglio *et al.* (2020). Empleando el programa ArcGIS 10.8 (ESRI, 2018), se ajustaron los datos de focos conforme la información cartográfica de límites del departamento Tolima que fue accedida en la web de Colombia en mapas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2020).

Se ejecutaron los respectivos geoprocесamientos para establecer la dinámica de la frecuencia mensual y anual de incendios en el área de estudio y se determinaron las estadísticas descriptivas (N° focos, promedio, sd, %) de los focos de calor obtenidos. Asimismo, se agruparon los eventos de focos de calor acumulados según las provincias administrativas, mientras que, la representación visual de la distribución espacial inter-anual de los focos de calor se realizó a través del algoritmo de densidad Kernel en Km² y tamaño de pixel de 30 metros.

Análisis de la precipitación

Para ello se descargó de la base de datos históricos de precipitación promedio mensual inter-anual de WorldClim (versión 2.1) de 1 Km de resolución espacial (Fick & Hijmans, 2017). Se realizó el corte a la extensión del departamento, por medio de geoprocесamiento se extrajo el valor de la precipitación para

cada foco calor por mes. Los datos de precipitación fueron correlacionados con los focos de calor a través de la prueba de Pearson con el fin de determinar si existe una dependencia lineal entre las lluvias y los focos de calor (ecuación 1 y 2) este valor varía entre -1 y 1 donde los valores cercanos a 1 están fuertemente correlacionados. Asimismo, se realizaron los gráficos de dispersión para cada mes entre el número de focos y la cantidad de precipitación registrada y se determinó el coeficiente de determinación R^2 .

$$\text{Correlación} = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y} \quad (1)$$

Donde S_{xy} es la covarianza de X e Y.

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2)$$

Donde s_x y s_y son la desviación típica de X e Y respectivamente.

Para determinar la existencia de autocorrelación espacial entre los focos de calor y la precipitación promedio mensual acontecida mes a mes, se implementó el Índice de Moran (I_m) (ecuación 3) (Zhou & Lin, 2008). Este índice permite evaluar si existe algún patrón de distribución espacial como pueden ser de tipo agrupado, disperso o de modo aleatorio (De Corso Sicilia *et al.*, 2017). Se parte de la hipótesis nula donde se establece que el atributo que se analiza está distribuido en forma aleatoria. Para su cálculo, se determinaron los valores de precipitación promedio mensual multianual para cada foco de calor y se determinaron las matrices de pesos espaciales. Todos los cálculos fueron realizados usando el software RStudio (R Development Core Team, 2023) utilizando la librería denominada "Spatial Dependence" (spdep) (Bivand *et al.*, 2013; Pebesma & Bivand, 2023; Zhou & Lin, 2008)

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{s \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (3)$$

Donde n es el número de observaciones, w_{ij} es la matriz de pesos espaciales (calculada en función a la distancia); s es la suma de todos los elementos de la matriz de pesos w . z_i y z_j son valores estandarizados de la variable analizada en filas (i) y columnas (j).

Análisis de las coberturas vegetales

Se utilizó la información de coberturas vegetales colección 1.0 del proyecto Mapbiomas Colombia del año 2001-2022 (MapBiomas, 2024). Provee datos históricos de coberturas vegetales anualmente (precisión \approx 98%). Solamente se tuvo interés en analizar las coberturas vegetales que coincidieran con la cobertura de bosques, mosaicos/pastos y cobertura no forestal. En la tabla 1 se describe alguna de los criterios que conforman las coberturas objeto de estudio.

Tabla 1. Descripción de las coberturas vegetales afectadas por focos de calor.

Table 1. Description of vegetation cover affected by active fires

Cobertura	Características
Bosques	Zonas naturales compuestas por una agrupación de plantas, mayormente árboles o arbustos, junto con la presencia ocasional de palmas, que constituyen un dosel tupido y constante con alturas superiores a 5 metros.
Mosaicos/pastos	La vegetación predominante consiste principalmente en cultivos temporales, una combinación de pastizales y algunos cultivos permanentes, caracterizados por patrones espaciales complejos. La representación individual se ve complicada debido a su subdivisión en tamaños reducidos o, en ocasiones, por su ubicación en pendientes.
No forestal	En la zona de los Andes, la vegetación se distingue por su desarrollo natural de sucesiones ecológicas, con un crecimiento que se presenta en forma de arbustos y herbazales, con alturas que no superan los 5 metros.

Fuente: Tomado de (Mapbiomas, 2023).

La información estuvo disponible en formato raster a 30 m de resolución espacial, estos datos fueron convertidos a formato vectorial y a través de geoprocésamiento se realizó el cruce entre las coberturas vegetales y los focos de calor, con el objetivo de reconocer que coberturas tienen los mayores registros de focos de calor (%). Asimismo, se incorporó la capa de municipios donde se determinó la localización de la cobertura más afectada y la ubicación en el municipio, a través de la densidad Kernel en Km^2 y un tamaño de pixel de 30 metros.

Análisis de la elevación

Se utilizó un Modelo Digital del Terreno SRTM con una resolución de 90 m provisto por del Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) (Jarvis et al., 2008). En este paso se extrajo la altura de cada foco de calor relacionado con las coberturas vegetales del paso anterior. Se realizó un histograma donde se relacionó la frecuencia de los focos de calor y la altura para cada cobertura analizada. Asimismo, la altura se clasificó en siete intervalos (de 200 a 500, de 501 a 1000, de 1001 a 1500, de 1501 a 2000, de 2001 a 2500, de 2500 a 3000 y mayor a 3000) para una mejor representación visual de las clases de altura en histograma.

RESULTADOS

Análisis de focos de calor

El Tolima registró entre el 2001-2022 un total de 7334 focos de calor y un promedio de 334 (sd 108) en el periodo analizado (Figura 2A). Se observó que el mayor número de focos de calor acontecieron en los años 2003 y 2015 con el 7.81 y el 7.15% de registros respectivamente. Particularmente el año 2022 registró solamente 184 focos de calor correspondiente al 2.50% de total. Asimismo, se determinó que la tendencia lineal reflejó una disminución de focos para el final del periodo analizado.

Por otro lado, la primera temporada de focos de calor se presenta entre los meses de enero a marzo siendo abril el de mayor precipitación con un promedio de 230.2 mm, mientras que la segunda temporada de focos de calor (y de mayor intensidad) ocurre entre julio y octubre, siendo octubre el de mayor precipitación con un promedio de 264.8 mm, (Figura 2B). En la primera temporada, el mes de febrero presentó la mayor cantidad de focos de calor 11.5% (37±25), mientras que, en la segunda temporada, septiembre es el mes que corresponde a la transición entre los meses secos y los meses de lluvia, fue el mes con la mayor cantidad de eventos detectados 26.56% (89±47).

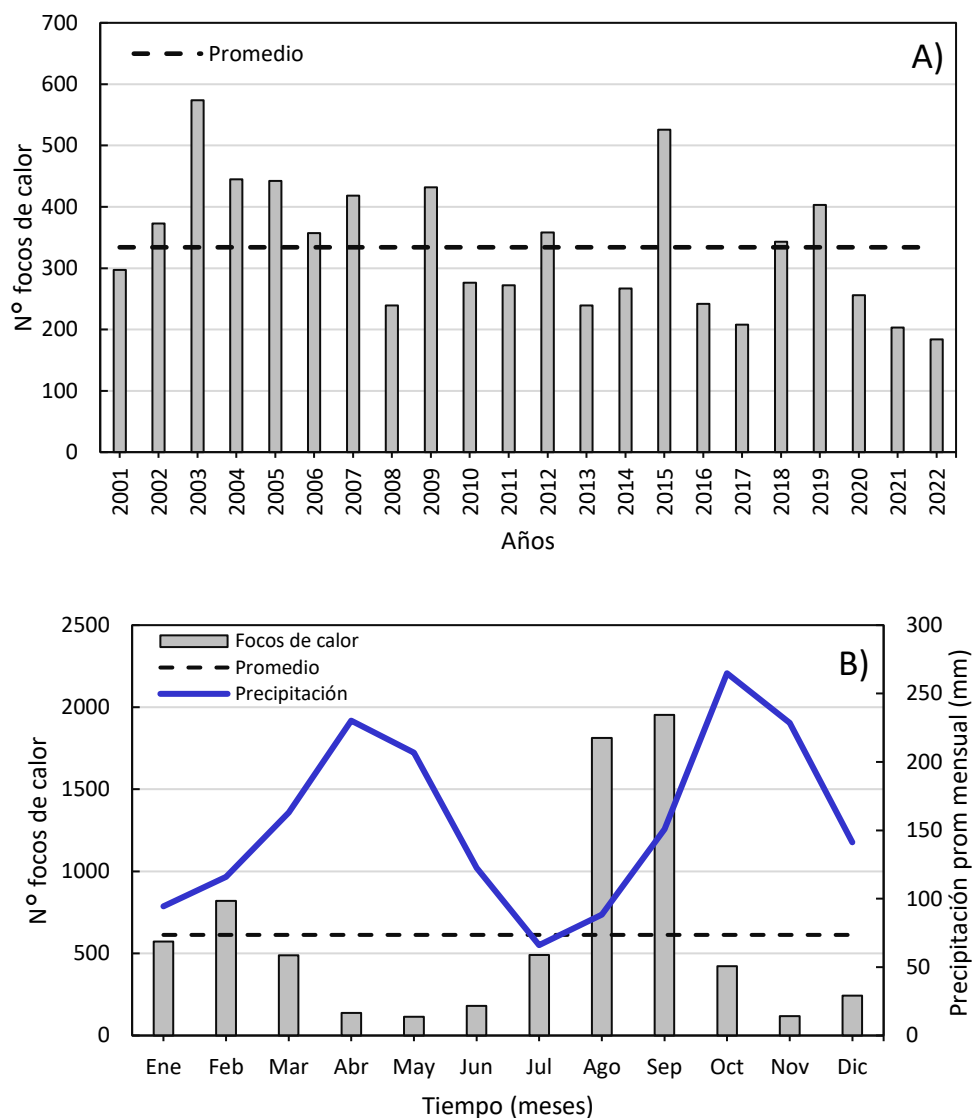


Figura 2. Distribución temporal y estacionalidad mensual de focos de calor periodo 2001-2022.
Figure 2. Temporal distribution and monthly seasonality of hot spots, period 2001-2022.
 Fuente: Autores.

A nivel espacial, para la temporalidad de análisis (2001 - 2022), los focos de calor se presentaron usualmente a lo largo de todo el departamento del Tolima, con especial énfasis en las zonas cercanas al valle del río Magdalena (Figura 3). Cabe resaltar que entre los años 2001 al 2012 la distribución de los focos presentó un patrón similar de distribución en su mayoría sobre la zona centro y nororiente del Tolima. El año 2015 y 2019 los focos de calor se concentraron sobre la parte central. En el periodo analizado se obtuvo una densidad máxima de hasta 3.91 focos/Km².

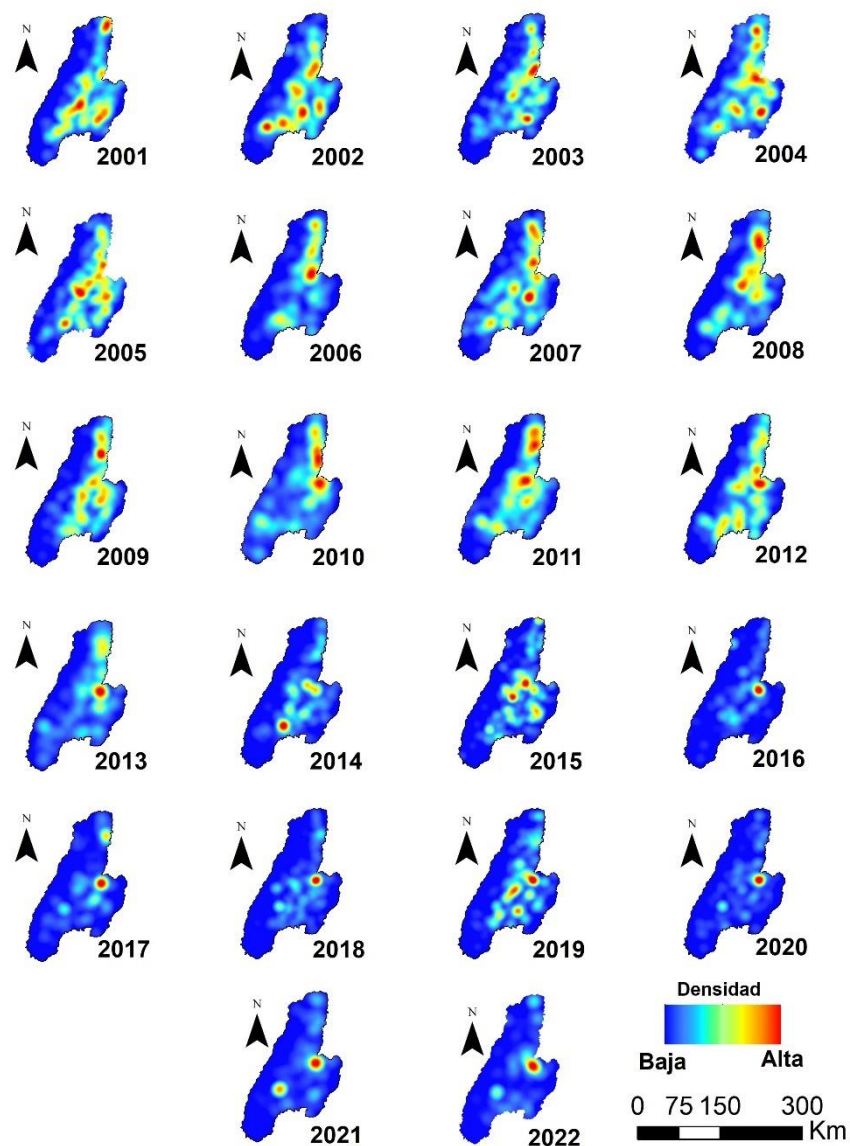


Figura 3. Distribución espacial de los focos de calor para el departamento del Tolima.

Figure 3. Spatial distribution of active fires for the department of Tolima.

Fuente: Autores.

La provincia sur se destacó por poseer el 33.91% del total de los focos de calor (Tabla 2). Municipios como Chaparral, Ortega, Natagaima y Ataco (24%) poseen los registros más representativos. Asimismo, la provincia de Ibagué representó el 27.75%, siendo los municipios de Espinal, Ibagué, San Luis y Rovira (15.42%) los más representativos. Estas dos provincias acumularon el 61.66% del total de los focos registrados en el periodo de estudio.

Tabla 2. Distribución porcentual de focos de calor a nivel provincial periodo 2021-2022.

Table 2. Percentage distribution of active fires at the provincial level period 2021-2022

Provincia	N° focos	%
Ibagué	2035	27.75
Nevados	546	7.44
Norte	746	10.17
Oriente	320	4.36
Sur	2.487	33.91
Suroriente	1200	16.36
Total general	7334	100

Fuente: Autores.

Análisis de la precipitación

Se observó que la magnitud de la precipitación promedio mensual no mostró una correlación fuerte con el número de eventos de focos de calor presentados (Anexo 1). Particularmente el mes de junio obtuvo un $R^2 = < 0.001$ demostrando que la relación lineal muy baja. Al incluir el factor espacial en el análisis de la relación entre precipitación promedio mensual y el número de focos de calor presentados, los resultados del índice de Moran (Im) mostraron suficiente evidencia estadística para sugerir que estas variables poseen una correlación espacial positiva (Tabla 3). Lo anterior plantea la posibilidad que los eventos de focos de calor se presenten de manera agrupada en el espacio. Entre los resultados, se destaca que las mayores magnitudes del Im fueron obtenidas en los meses de junio, abril y septiembre respectivamente, mientras que la más bajas se obtienen en marzo y mayo respectivamente. Esto sugiere que existe un patrón de agrupamiento espacial en la ocurrencia de focos de calor observados y que es poco probable que su posición sea totalmente aleatoria en el departamento.

Tabla 3. Índice de Moran (Im) obtenidos mensualmente para los focos de calor entre los años 2021 a 2022.

Table 3. Moran index (Im) obtained monthly for the active fires from 2021 to 2022.

Mes	Indice de Moran (Im)	Z-score	P-Value
Enero	0.81	106.2	< 0.001
Febrero	0.76	99.46	< 0.001
Marzo	0.72	91.03	< 0.001
Abril	0.88	114.7	< 0.001
Mayo	0.77	100.9	< 0.001

Junio	0.92	120.4	< 0.001
Julio	0.87	113.8	< 0.001
Agosto	0.8	104.53	< 0.001
Septiembre	0.82	107	< 0.001
Octubre	0.8	104.4	< 0.001
Noviembre	0.74	95.7	< 0.001
Diciembre	0.75	97.99	< 0.001

Fuente: Autores.

Análisis de las coberturas vegetales

Los focos de calor que coincidieron con las coberturas objeto de estudio fueron 6922 (94.38% del total de focos). Los bosques acumularon 1112 (16.06%) focos de calor, donde su distribución se caracterizó por presentar dos zonas de mayor densidad de focos, una en la parte central donde involucró los municipios (Ortega, Rovira, Valle del San Juan y San Luis) y una sobre la zona oriental que involucró 7 municipios (Melgar, Carmen de Apicalá, Suarez, Cunday, Purificación y Prado) (Figura 5A).

Asimismo, las áreas con coberturas de mosaicos/pastos acumularon 5192 (75%) focos de calor. Las mayores densidades se localizaron en la zona central involucrado 6 municipios (Espinal, Saldaña, Flandes, Coello y Valle del San Juan), y se identificó otra zona hacia la zona norte que involucró 4 municipios (Venadillo, Ambalema, Lérida y Fresno) (Figura 5B).

Particularmente en las áreas referentes a otra formación natural no forestal se presentaron 618 (8.92%) focos de calor. Presentó una alta densidad sobre la parte sur que involucró municipios (Natagaima, Ataco y Chaparral) (Figura 5C).

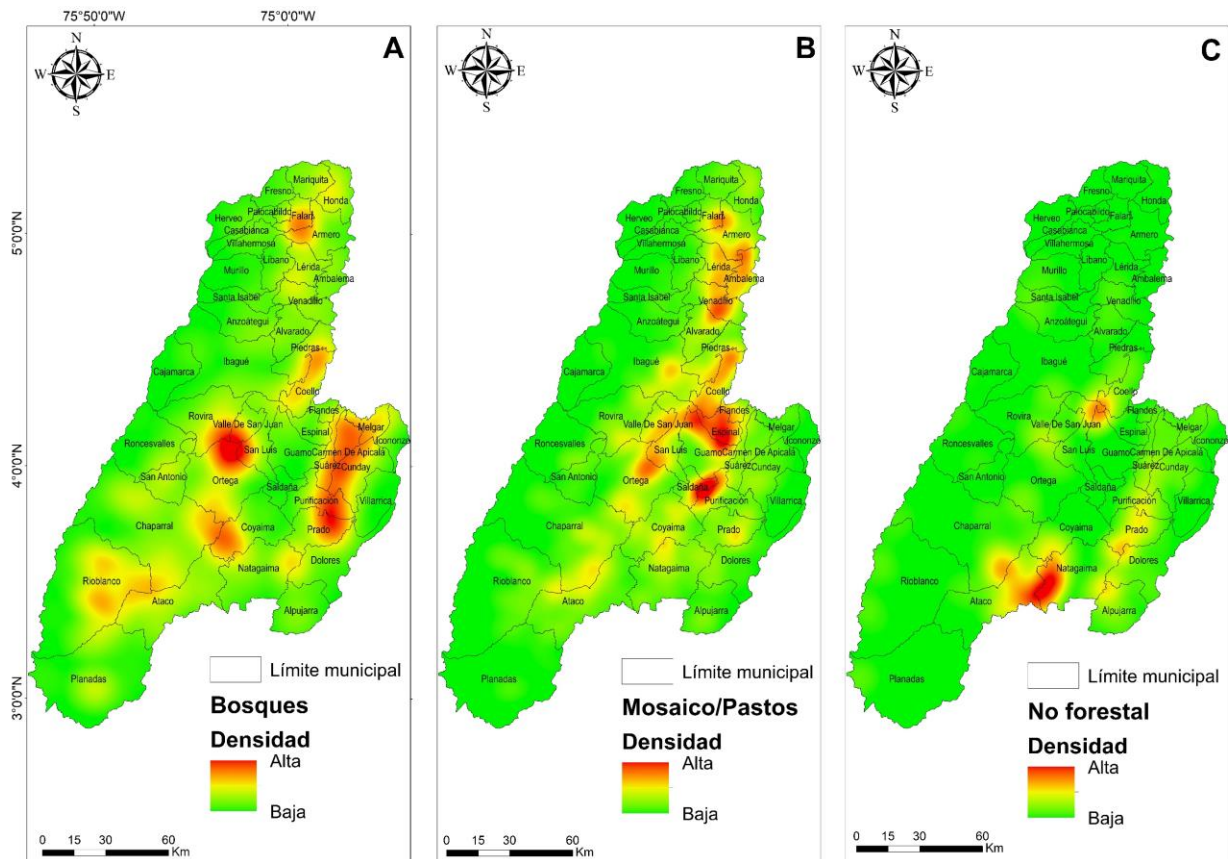


Figura 5. Densidad de focos de calor que afectan coberturas vegetales en el periodo 2001-2022.

Figure 5. Density of active fires affecting vegetation cover in the period 2001-2022

Fuente: Autores.

Análisis de la elevación

En el periodo analizado, los bosques presentaron focos de calor en elevaciones que van de los 228 a los 3741 (1002.6 ± 657.2) m de altura. La mayor frecuencia de focos para esta cobertura se presentó entre el rango de los 501-1000 m de altura (Figura 7A). Asimismo, los mosaicos/pastos registraron focos de calor entre los 201 y 4077 (645.47 ± 457.97) m de altura (Figura 7B). La mayor frecuencia se registró en el rango de entre los 201 y 500 m de altura. Particularmente, la cobertura no forestal registró focos de calor en alturas de 201 y 4056 (1071.04 ± 760.89 m) (Figura 7C). Esta cobertura presento la mayor frecuencia de focos entre los rangos 501-1000 m de altura.

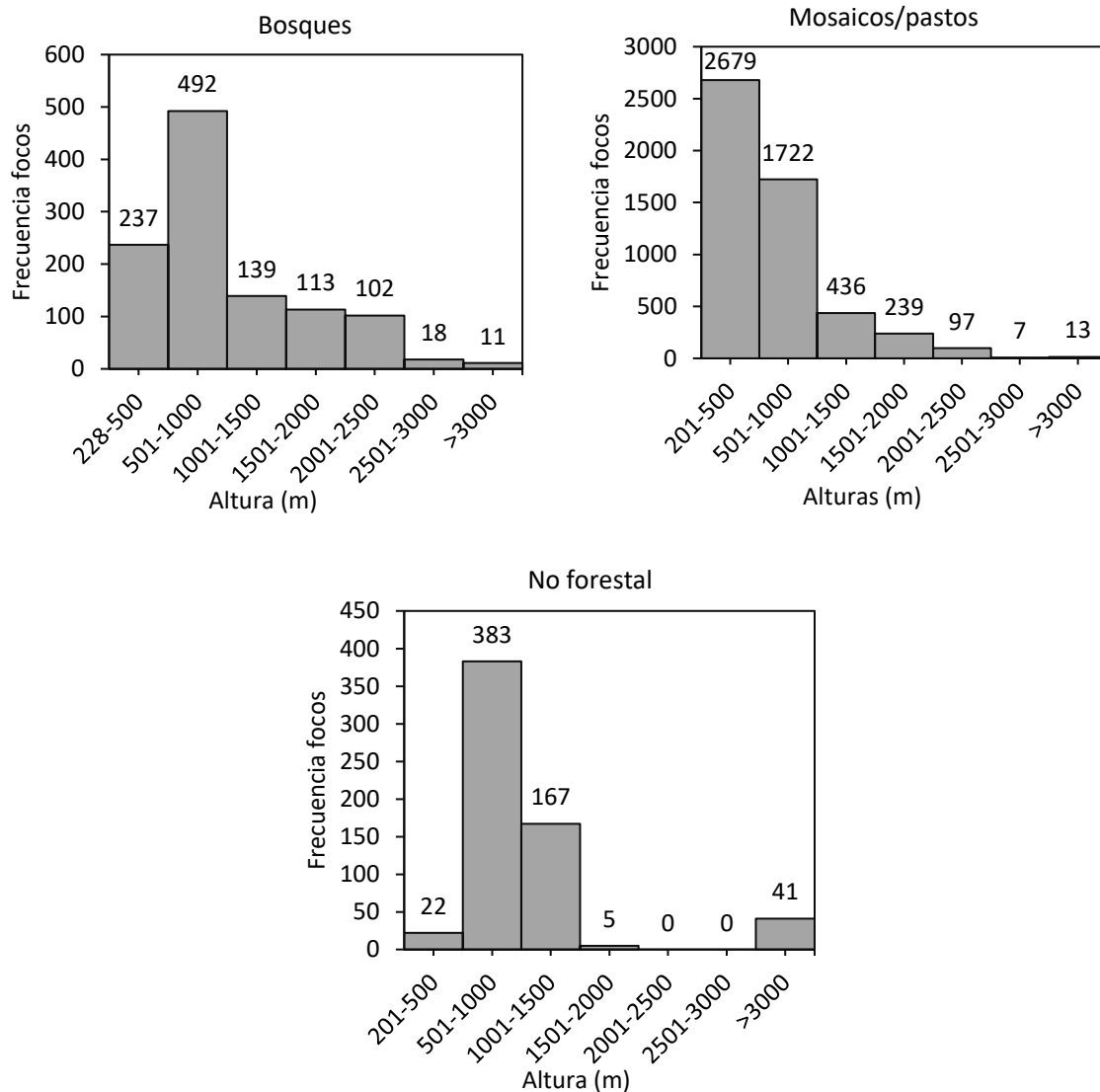


Figura 7. Elevación promedio de coberturas vegetales afectadas por focos de calor, periodo 2001-2022.

Figure 7. Average elevation of vegetation cover affected by active fires, period 2001-2022.

Fuente: Autores.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio representan una primera aproximación al análisis de focos de calor usando sensores remotos en el departamento del Tolima. En el año 2003 el Tolima registró 574 focos de calor, este año coincidió con un evento del fenómeno de niño catalogado como moderado/fuerte (Armenteras, 2022; Bejarano-salcedo *et al.*, 2020). Asimismo, el año 2015 se registraron 526 focos y también se presentó fenómeno del niño, llegando a su mayor intensidad a finales de ese año (IDEAM, 2016), lo que pudo incidir en el aumento de los focos de calor. Sin embargo, la tendencia de los focos de calor para el

Tolima se mantuvo a la baja al final del periodo analizado. Estudios como el de Armenteras (2022) demostraron que las áreas quemadas en Colombia tendieron a disminuir para la segunda década del siglo XXI, trayendo consigo un cambio en algunas características en el régimen de incendios en el país.

Por otro lado, la estacionalidad de los focos de calor demostró que el segundo periodo es el de mayor intensidad y coincide con la época de menos lluvias en la región Andina (Amaya & Armeteras, 2012; Bolaño-díaz *et al.*, 2022). Los mayores registros de focos de calor para el Tolima, se registraron en los meses de agosto y septiembre, lo que coincidió con lo reportado por el estudio de Díaz-Timoté (2019). Nuestros resultados también sugieren que hay un desfase en la ocurrencia de focos de calor con respecto a la reducción de lluvias en los dos periodos secos del año. De esta manera, se observa el aumento de focos de calor dos meses después del inicio del periodo seco (precipitación promedio mensual <150 mm). Indicando que la biomasa requiere de un periodo prolongado de uno o dos meses a partir del inicio del periodo seco para estar lo suficientemente seca para favorecer el proceso de ignición. Este efecto de la precipitación acumulada está relacionado con las dinámicas del fuego limitado por la acumulación de combustible (*fuel-build up effect*) o por la humedad del combustible (*fuel moisture effect*), como ha sido demostrado para otros ecosistemas (Archibald *et al.*, 2010; Alvarado *et al.*, 2020).

Este estudio, también determinó históricamente altas concentraciones de focos de calor sobre la zona centro y norte del departamento. Se encontraron dos provincias y ocho municipios con las mayores concentraciones de focos de calor. El estudio realizado por Díaz-Timoté (2019) mencionó que los municipios de Ortega y Coello son los de mayores registros de focos de calor, lo que coincide con los municipios reportados en este estudio. Cabe resaltar que la vocación económica del Tolima es agropecuaria y que estas zonas albergan los principales sistemas productivos tradicionales (Cortolima, 2014). Cifras más recientes sobre incendios forestales en el Tolima demuestran una afectación de 121 700 ha en un periodo comprendido desde el año 2000 y 2021, datos que son importantes en términos de gestión del fuego en el Tolima (Meza & Armenteras, 2023).

Con los resultados de las bajas correlaciones entre la variable de precipitación y los focos de calor, se puede argumentar que a pesar que algunos estudios demuestran la relación entre el fuego y las condiciones climáticas secas, la presencia y la propagación de focos de calor podría estar también influenciada por las actividades humanas presentes en la región (Armenteras-Pascual *et al.*, 2011). Por ejemplo Díaz-Timoté (2019) en su estudio en el bs-T de la región Andina, señaló una fuerte relación significativa entre variables climáticas y eventos como el fenómeno del Niño. Sin embargo, no encontró relaciones significativas entre los incendios y precipitación mensual, no descartó que la alta presencia de los focos de calor se deba también en gran medida a las dinámicas socioeconómicas locales. Las actividades humanas tienen una influencia de manera directa en los patrones de incendios al cambiar la frecuencia y la aparición de ellos, esto tiene un impacto indirecto al modificar el clima y los combustibles disponibles (Archibald, 2016).

Las pruebas de correlación espacial realizadas sugieren que existen un patrón de posicionamiento espacial agrupado de los eventos de focos de calor especialmente en temporadas de baja precipitación (Im entre 0.92 y 0.82). Esto sugiere que la falta de lluvias juega un papel crucial en el inicio de incendios en las áreas vegetales del departamento. Los valores del Im reportados tanto en época de altas y bajas son positivos y cercanos a +1, indicando que los focos de calor tienden a tener patrones de agrupamiento en el área de estudio.

Desafortunadamente, en este estudio solo realizaron análisis de dependencia espacial a partir de la precipitación promedio mensual multianual, por lo cual se requieren mayores análisis empleando otras variables asociadas al fenómeno para tener una mejor comprensión sobre la distribución espacial del fenómeno, por ejemplo, con el análisis de precipitación acumulada en los meses secos. Sumado a lo anterior, la realización de modelos espaciales puede ser una alternativa para demostrar la influencia espacial de los diversos factores para la presencia de focos de calor en el departamento del Tolima.

Cabe resaltar que la evidencia de correlación espacial de los focos de calor obtenida en este estudio es similar a la presentada en estudios como el de Simental & Pompa (2016) y Pérez-Verdín *et al.* (2013) quienes a partir de técnicas geoestadísticas encontraron patrones de distribución agrupada para incendios presentados en el estado de Durango en México. Lo anterior abre una ventana de oportunidad para que nuevas investigaciones sean orientadas a generar modelos geoestadísticos del fuego para comprender de mejor manera el comportamiento espacial los incendios a partir de variables independientes del medio (biofísicas y socioeconómicas).

Las coberturas vegetales de bosques, mosaicos/pastos y no forestal fueron las más afectadas en el Tolima y coinciden con los reportes de afectación de coberturas vegetales por fuego en el país (Armenteras-Pascual *et al.*, 2011; Armenteras *et al.*, 2009). Sin embargo, nuestro estudio detalla las ubicaciones geográficas de las coberturas afectadas, siendo un punto de partida para la identificación de zonas vulnerables a incendios en el Tolima. Por otro lado, la cobertura no forestal que incluye formaciones vegetales de sucesión ecológica (desarrollo arbustivo y herbáceo) con alturas menores a 5 metros está clasificada como vegetación muy susceptible por su condición pirogénica y siendo una de las coberturas naturales afectada por los incendios en Colombia (Armenteras *et al.*, 2020; IDEAM, 2011).

Esta condición aumenta el riesgo de ser afectadas por quemas para fines agropecuarios y aumentar los impactos ambientales por la emisión de gases de efecto invernadero (Parra-Lara *et al.*, 2011). Las coberturas vegetales más afectadas por los incendios, se localizan alrededor de los 1000 m de altura, coincidiendo con la zona de vida de los bs-T (Amaya & Armeteras, 2012; Armenteras *et al.*, 2018). Estas zonas están en constante presión debido a actividades antrópicas que amenazan su biodiversidad e integridad ecológica (Amaya & Armeteras, 2012; González *et al.*, 2018). Esto resultados permiten indagar sobre la presión que poseen estas coberturas por acción del fuego, ya que serían en gran medida las zonas de expansión de frontera agropecuaria en el bosque seco, ampliando la degradación y la susceptibilidad del ecosistema (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2020). Por otro lado, hubo presencia de focos de calor sobre las coberturas no forestales en alturas superiores a los 3000 m, que correspondieron a zonas de

páramos, lo que podría ser fruto del aumento de incendios en épocas de sequías y por el efecto del cambio climático en ecosistemas estratégicos de alta montaña (Amaya & Armerteras, 2012). Sin embargo, la ecología del fuego de estos ecosistemas debe ser estudiada a detalle, ya que existe incertidumbre en la relación fuego-páramo (sensible o influenciado) y en la vulnerabilidad de este ecosistema de alta montaña (Ramsay, 2014).

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demostraron que es posible llevar a cabo un análisis de focos de calor en el departamento del Tolima con datos derivados de MODIS. Presentando una cifra histórica de 7334 focos de calor registrados en 21 años y la identificación de las provincias y municipios más afectados por acción del fuego. Por otro lado, se determinó la baja correlación entre los focos de calor y la precipitación promedio mensual. A partir del índice de Moran's se pudo identificar el patrón de agrupación (no aleatorio) entre las variables. Se destaca la importancia de considerar a futuro estudios geoestadísticos que permitan ampliar la comprensión de los patrones de fuego según su posición geográfica. Se observó que el año 2003 y 2015 presentaron los mayores registros de focos de calor coincidiendo con eventos climáticos de el Niño, sugiriendo una posible correlación entre condiciones climáticas extremas (sequías) y la intensidad de los incendios en la región. Se observó una disminución en la cantidad de focos de calor al final del periodo, lo que señalaría una tendencia a la disminución de áreas quemadas en el Tolima.

Asimismo, este estudio proporciona una visión detallada de las coberturas vegetales más afectadas por focos de calor en el departamento del Tolima. Las áreas críticas, como bosques, mosaicos/pastos y coberturas no forestales, fueron identificadas y mapeadas, sirviendo como un punto de partida para la identificación de zonas vulnerables a incendios en la región. Seguido a esto, se identificó en gran medida la concentración de focos de calor alrededor de los 1000 m de altura en el bs-T lo que revela una presión constante debido a actividades antrópicas en la expansión de la frontera agropecuaria en el bs-T que contribuye a la degradación amenazando la biodiversidad y la integridad ecológica.

Además, la presencia de focos de calor en altitudes superiores a los 3000 m podría ser atribuible a la expansión de la frontera agropecuaria, señalando presiones significativas en épocas de sequías y evidenciando los impactos del cambio climático en ecosistemas estratégicos de alta montaña. Estos resultados subrayan la necesidad de implementar estrategias de gestión del fuego focalizadas y medidas de conservación en áreas vulnerables para preservar la biodiversidad y garantizar la resiliencia de estos ecosistemas por acción del fuego.

AGRADECIMIENTOS

Los autores proporcionan un agradecimiento al Sistema FIRMS de NASA, por la disponibilidad de los datos históricos de focos de calor. Asimismo, el autor principal agradece a la Fundación Cearense de Apoyo al Desarrollo Científico y Tecnológico (FUNCAP), por la beca concedida en el marco del programa de doctorado en Geografía de la Universidad Federal de Ceará en Fortaleza, Brasil y la convocatoria de la Primera Edición del Programa de Movilidad Internacional 001/2022 del GCUB.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez y los resultados del presente documento.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

MAPA: desarrolló la metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, redacción; JLV: desarrolló la metodología, conceptualización, redacción; STA: desarrolló la metodología, conceptualización, redacción. Todos los autores contribuyeron a la discusión y aprobaron la versión final del documento.

REFERENCIAS

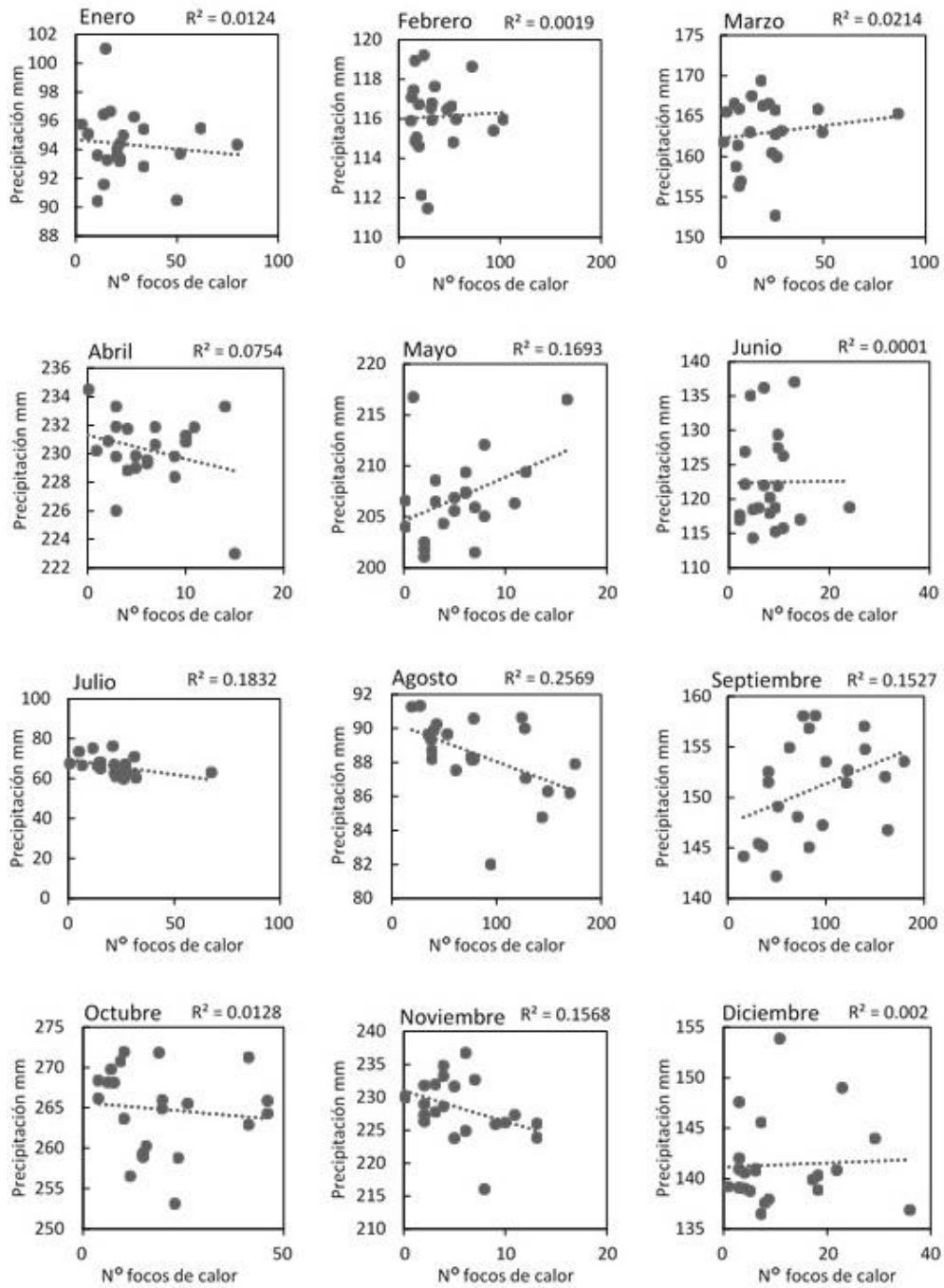
Alvarado, S. T., Andela, N., Silva, T. S. F., & Archibald, S. (2020). Thresholds of fire response to moisture and fuel load differ between tropical savannas and grasslands across continents. *Global Ecology and Biogeography*, 29(2), 331-344. <https://doi.org/10.1111/geb.13034>

- Amaya, D., & Armeteras, D.** (2012). Incidencia de incendios sobre la vegetación de Cundinamarca y Bogotá D.C. (Colombia), entre 2001 y 2010. *Acta Biologica*, 17(1), 143-158.
- Archibald, S., Scholes, R. J., Roy, D. P., Roberts, G., & Boschetti, L.** (2010). Southern African fire regimes as revealed by remote sensing. *International Journal of Wildland Fire*, 19(7), 861-878.
- Archibald, S.** (2016). Managing the human component of fire regimes: lessons from Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1696), 1-10. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0346>
- Armenteras-Pascual, D., Retana-Alumbreros, J., Molowny-Horas, R., Roman-Cuesta, R. M., Gonzalez-Alonso, F., & Morales-Rivas, M.** (2011). Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3), 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.11.002>
- Armenteras, D.** (2022). Cambios en los patrones espaciales de área quemada en Colombia, ¿qué ha pasado en las dos primeras décadas del siglo XXI? *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 1-13. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1514>
- Armenteras, D., González-Alonso, F., & Aguilera, C. F.** (2009). Distribución geográfica y temporal de incendios en Colombia utilizando datos de anomalías térmicas. *Caldasia*, 31(2), 303-318.
- Armenteras, D., González, T. M., Vargas, J. O., Meza Elizalde, M. C., & Oliveras, I.** (2020). Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica: avances en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú. *Caldasia*, 42(1), 1-16. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v42n1.77353>
- Armenteras, D., González, T., Meza, M., Ramírez-Delgado, J. P., Cabrera, E., Galindo, G., & Yepes, A.** (2018). *Causas de degradación forestal en Colombia: Una primera aproximación*. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Programa ONU-REDD.
- Bejarano-salcedo, V., Caicedo-garcía, E., Lizarazo-bonilla, N. F., Julio-román, J. M., & Cárdenas-Cárdenas, J. A.** (2020). Hechos estilizados de la relación entre El Niño, La Niña y la inflación en Colombia. *Borradores de Economía*, (1105), 1-28. <https://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/9811>
- Bivand, R. S., Pebesma, E., & Gómez-Rubio, V.** (2013). *Applied Spatial Data Analysis with R*. Springer.
- Bolaño-díaz, S., Camargo-Caicedo, Y., Soro, T., N'Dri, A. B., & Bolaño-Ortiz, T.** (2022). Spatio-temporal characterization of fire using MODIS data (2000-2020) in Colombia. *Fire*, 5, 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fire5050134>
- Bowman, D. M. J. S., Kolden, C. A., Abatzoglou, J. T., Johnston, F. H., van der Werf, G. R., & Flannigan, M.** (2020). Vegetation fires in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(10), 500-515. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0085-3>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima, (Cortolima).** (2014). *Atlas ambiental del Tolima*. Corporación Autónoma Regional del Tolima. <https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/atlas/>
- Coskuner, K. A.** (2022). Assessing the performance of MODIS and VIIRS active fire products in the monitoring of wildfires: a case study in Turkey. *IForest*, 15, 85-94. <https://doi.org/10.3832/ifor3754-015>
- De Corso Sicilia, G. B., Pinilla Rivera, M., & Gallego Navarro, J.** (2017). Métodos gráficos de análisis exploratorio de datos espaciales con variables espacialmente distribuidas. *Cuadernos*

- Di Bella, C. M., Posse, G., Beget, M. E., Fischer, M. A., Mari, & N., Veron, S.** (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas*, 17(3), 39-52.
- Díaz-Timoté, J. J.** (2019). *Descripción del régimen de incendios del Bosque seco tropical de la cuenca alta del Río Magdalena y su relación con la variación climática*. (Tesis de maestría). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/23232/Descripcion%20regimen%20incendios%20bs-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ESRI.** (2018). ArcGIS Versión 10.8.1. Redlands: Environmental Systems Research Institute. Recuperado de: <https://desktop.arcgis.com/es/>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J.** (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Giglio, L., Schroeder, W., Hall, J. V., Justice, C. O.** (2020). *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision C*. National Aeronautics and Space Administration (NASA). http://maps.geog.umd.edu/products/MODIS_Fire_Users_Guide_2.3.pdf
- González-M, R., Garcia, H., Isaacs, P., Cuadros, H., López-Camacho, R., Rodriguez, N., Pérez, K., Mijares, F., Castano-Naranjo, A., Jurado, R., Idárraga-Piedrahíta, A., Rojas, A., Vergara, H., & Pizano, C.** (2018). Disentangling the environmental heterogeneity, floristic distinctiveness and current threats of tropical dry forests in Colombia. *Environmental Research Letters*, 13, 1-13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaad74>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).** (2011). *Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000 / ajustado*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).** (2015). Atlas interactivo de Colombia. Instituto de Hidrología. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/tolima_texto.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).** (2016). *Boletín informativo sobre el monitoreo de los Fenómenos de variabilidad climática "El Niño" y "La Niña". Boletín número 93*. http://www.ideam.gov.co/documents/21021/93551515/04_IFN_ABR_16_2016.pdf/a176340c-debd-455b-930a-10f19bd66fe0?version=1.0
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).** (2019). *Informe del estado del ambiente y los recursos naturales renovables, 2017-2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).** (2020). *Colombia en Mapas*. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- Jarvis, A., Reuter, H., Nelson, A., & Guevara, E.** (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. CGIAR-CSI SRTM 90m Database. <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Mapbiomas** (2023). Descripción de la leyenda - MapBiomas Colombia colección 1.0. MapBiomas Colombia. <https://colombia.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/3/2023/11/DESCRIPCION-DE-LA-LEYENDA-MAPBIOMAS-COLOMBIA-COLECCION-1-7.pdf>

- MapBiomias (2024).** *MapBiomias Colombia*. <https://colombia.mapbiomas.org/>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT).** (2002). *Plan nacional de prevención, control de incendios forestales y restauración de áreas afectadas*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <https://cardique.gov.co/gestion/Plan%20Nacional%20Prevencion%20Incendios%20Forestales.pdf>
- Meza, M. C., & Armenteras, D.** (2023). *La paradoja del fuego: del contexto internacional al caso de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Moritz, M. A., Batllori, E., Bradstock, R. A., Gill, A. M., Handmer, J., Hessburg, P. F., Leonard, J., McCaffrey, S., Odion, D. C., Schoennagel, T., & Syphard, A. D.** (2014). Learning to coexist with wildfire. *Nature*, 515, 58-66. <https://doi.org/10.1038/nature13946>
- Fire Information for Resource Management System, FIRMS.** (2022). Fire Information for Resource Management System. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>
- Parra-Lara, Á. del C., Bernal-Toro, F. H., Armenteras-Pascual, D., González-Alonso, F., Morales-Rivas, M., Pabón-Caicedo, & J. D. Páramo-Rocha, G. E.** (2011). *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia Tomo I*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Pebesma, E., & Bivand, R.** (2023). *Spatial Data Science*. Chapman and Hall/CRC.
- Pérez-Verdín, G., Márquez-Linares, M. A., Cortés-Ortiz, A., & Salmerón-Macías, M.** (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 37-58. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192339>
- Ramsay, P. M.** (2014). Giant rosette plant morphology as an indicator of recent fire history in Andean páramo grasslands. *Ecological Indicators*, 45, 37-44.
- Reyes, J. E., Ramírez, J. C.** (2022). *Vínculos urbano-rurales en el departamento de Tolima (Colombia). Serie Estudios y Perspectivas N° 48*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://www.cepal.org/sites/default/files/document/files/vinculostolima.pdf>
- R Development Core Team.** (2008). R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. **Recuperado de:** <http://www.rstudio.com/>
- Scott, A. C.** (2000). The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164, 281-329. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00192-9)
- Vargas-Sanabria, D., & Campos-Vargas, C.** (2020). Comparación multitemporal de áreas quemadas en un bosque seco tropical utilizando el índice de área quemada (IAQ). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(41), 29-36. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v17i41.5280>
- Simental, A. J., & Pompa, M.** (2016). Incendios forestales: autocorrelación espacial de topografía y temporalidad. *Ciencia UANL*, 19(77), 41-45.
- Zhou, X., & Lin, H.** (2008). Moran's I. En Shekhar, S., Xiong, H. (eds) *Encyclopedia of GIS*. (Pp. 725-725). Springer.

ANEXOS



Anexo 1. Correlación entre la precipitación promedio mensual y los focos de calor periodo 2021-2022.