



DOI: [10.29298/rmcf.v15i84.1406](https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1406)

Artículo de investigación

Incendios en Michoacán a partir de series *MODIS* (2015-2022) y su relación con el clima

Fires in *Michoacán* State from *MODIS* series (2015- 2022) and their relation with climate

María Luisa España Boquera^{1*}, Omar Champo Jiménez¹, María Dolores Uribe Salas¹

Fecha de recepción/Reception date: 13 de julio de 2023
Fecha de aceptación/Acceptance date: 22 de marzo del 2024

¹Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

*Autora para correspondencia; correo-e: maria.uribe@umich.mx

*Corresponding author; e-mail: maria.uribe@umich.mx

Resumen

Los incendios afectan a más superficies naturales que cualquier otro factor de disturbio en el Planeta. Resultan de la coincidencia de combustible, condiciones ambientales secas y una fuente de ignición. En el estado de Michoacán existen las condiciones propicias para la ocurrencia anual de numerosas conflagraciones. La teledetección ofrece información global, consistente y objetiva sobre los incendios, con la generación de series de áreas quemadas, como MCD64A1 de 500m, generada con datos *MODIS*. El objetivo de este trabajo fue analizar esta serie para conocer los incendios ocurridos en la entidad entre 2015 y 2022, considerando las coberturas afectadas (Serie VII de INEGI), la precipitación y la temperatura. Se contabilizaron al año, en promedio 3 340.87 píxeles con incendios; 2021, durante la pandemia de Covid-19, fue el año con el mayor número de registros (5 269 píxeles) y 2022 con menos (2 398). Los incendios se concentraron en mayo (1551.00 píxeles en promedio) y abril (958.38 píxeles); el máximo número de incendios se detectó en abril de 2021 (2 347 píxeles), seguido de mayo de 2020 (2 094 píxeles). La mayoría de los eventos se asocian a quemas agrícolas (48.41%) en terrenos de riego, en primavera e invierno; los incendios forestales afectan sobre todo a bosques templados y a la vegetación secundaria asociada (32.85%); en zonas de bosque tropical caducifolio (17.14%), los incendios ocurren, en su mayoría, en vegetación secundaria. En los años con un inicio temprano de la temporada de lluvias (2015 y 2018) se acumularon menos incendios.

Palabras clave: Bosque templado, bosque tropical caducifolio, precipitación, quemas agrícolas, series de tiempo, temperatura.

Abstract

Fires affect more natural surfaces than any other disturbance factor on the planet. They result from the interaction of fuel, dry environmental conditions, and an ignition source. In the state of *Michoacán* conditions are conducive for the annual occurrence of numerous fires. Remote sensing offers global, consistent and objective information on fires, with the generation of series of burned areas, such as the 500m MCD64A1 generated from MODIS data. The objective of this work was to analyze this series to know the fires that occurred in the entity between 2015 and 2022, considering vegetation covers affected (INEGI Series VII)

precipitation and temperature. An average of 3 340.87 pixels with fires were recorded annually; 2021, during confinement due to the Covid-19 pandemic, was the year with the most fires (5 269 pixels) and 2022 with the fewest (2 398). The fires are concentrated in the driest and hottest months, mainly May (1551.00 pixels on average) and April (958.38 pixels); the highest number was recorded in April 2021 (2 347 pixels), and the second month with the most detections was May 2020 (2 094 pixels). Most events are associated with agricultural burning (48.41%), mainly in irrigated land, in spring and winter. Forest fires significantly affect temperate forests and associated secondary vegetation (32.85%); in tropical deciduous forest areas (17.14%), fires occur mostly in secondary vegetation. In years with an early onset of rains (2015 and 2018), fewer fires accumulated.

Key words: Temperate forest, tropical deciduous forest, precipitation, agricultural burning, time series, temperature.

Introducción

Anualmente, la superficie de cobertura natural quemada en todo el mundo es de 3 a 5 millones de kilómetros cuadrados (Jones *et al.*, 2022). El impacto de los incendios sobre la vida silvestre y los ecosistemas puede ser profundo y tener implicaciones en la biodiversidad, el desarrollo de las comunidades vegetales, el almacenamiento de carbono (Justice *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2022), la erosión del suelo y los ciclos hidrológicos (Chuvieco *et al.*, 2019). Más de 90 % de los incendios en la mayoría de los biomas tienen origen antrópico (Chuvieco *et al.*, 2019; Neger *et al.*, 2022a), con el fin de cambiar el uso del suelo o por la gestión de la tierra, para realizar prácticas agrícolas, por accidente o negligencia (Jones *et al.*, 2022). Los incendios afectan al clima y a la calidad del aire, por lo que se han identificado como Variables Climáticas Esenciales (ECV) por el Sistema Global de Observación del Clima (GCOS, *Global Climate Observing System*) (Justice *et al.*, 2006).

El cambio climático está incrementando la incidencia de incendios (Jones *et al.*, 2022) y se espera que los efectos del fuego aumenten en el futuro, si bien sus consecuencias variarán regionalmente, en función de los cambios en los modelos de precipitación (Chuvieco *et al.*, 2019).

El fuego es el resultado de la ocurrencia simultánea de tres factores: (I) fuente de ignición, humana o natural, (II) reserva de combustible, y (III) condiciones ambientales (precipitación, temperatura, viento, humedad del aire y del suelo) secas (Jones *et al.*, 2022; Neger *et al.*, 2022a); lo anterior se conoce como el triángulo del fuego (Jardel *et al.*, 2014).

El clima condiciona doblemente el potencial de incendios, ya que determina la acumulación de biomasa, como resultado de los procesos ecosistémicos de productividad primaria y descomposición; por otra parte, la estacionalidad de la lluvia y la sequía definen el estado de humedad de los combustibles y su disponibilidad para mantener la propagación del fuego (Jardel *et al.*, 2014). Un déficit de humedad prolongado durante los meses que preceden la temporada de incendios puede reducir las reservas de humedad del suelo y hacer que la vegetación sea menos resiliente a condiciones propicias para el inicio del fuego (Jones *et al.*, 2022). Esto es así, en particular, en áreas de mucha producción de vegetación, donde la actividad del fuego se asocia con las altas temperaturas y periodos secos (Chuvieco *et al.*, 2019; Neger *et al.*, 2022a); son regiones con disponibilidad intermedia (o alternada) de humedad, suficientemente productivas para acumular biomasa, pero con sequías tan frecuentes como para desecar de manera intermitente la vegetación disponible (Jardel *et al.*, 2014; Jones *et al.*, 2022).

Tal es el caso de los bosques de pinos o encinos de climas templados húmedos, pero con una estación seca larga (Jardel *et al.*, 2014); así como de, sabanas y bosques tropicales caducifolios (Chuvieco *et al.*, 2019), principalmente en América del Sur, Sudeste Asiático y África Subsahariana, donde a los incendios naturales hay que sumar las prácticas de deforestación y manejo (Justice *et al.*, 2006).

En México, gran parte del territorio se ubica en las zonas tropical y subtropical y las características fisiográficas, el clima y los tipos de vegetación son propicios para la

ocurrencia de incendios. De acuerdo con la Comisión Nacional Forestal (Conafor), en el periodo 2015-2022 se quemaron cerca de 500 000 hectáreas forestales en todo el país (sin contabilizar las quemadas agrícolas), con un promedio cercano a los 7 000 incendios anuales. El estado de Michoacán, con importantes superficies de bosques templados y tropicales caducifolios, todos los años experimenta numerosos incendios y contribuye con cerca de 10 % a las estadísticas nacionales (Conafor, 2024). Estos datos, que provienen directamente de registros de campo, se han utilizado para la realización de algunos trabajos cartográficos (Pompa-García *et al.*, 2018); sin embargo, existen deficiencias en el sistema de captura de la Conafor, por lo que no son confiables en todos los casos (González-Gutiérrez *et al.*, 2020).

Ese problema es común en muchos inventarios nacionales o regionales, que tienden a incluir solo algunos tipos de incendios, lo que da lugar a bases de datos incompletas y fragmentadas (Chuvienco *et al.*, 2019; Jones *et al.*, 2022), por lo que deberían utilizarse en combinación con otras fuentes (Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2017); además, a menudo las localizaciones de las zonas quemadas se realizan *a posteriori* y de manera aproximada, lo cual genera errores en la georreferenciación (González-Gutiérrez *et al.*, 2020).

En las últimas décadas, uno de los avances más importantes en el estudio de los incendios ha sido el desarrollo de productos satelitales de detección de incendios y áreas quemadas, que han permitido construir un panorama global de la actividad del fuego (Szpakowski y Jensen, 2019; Jones *et al.*, 2022). Si bien, las series tienen menor resolución espacial, su análisis es más sencillo que la estimación de áreas quemadas a partir de imágenes satelitales como *Landsat* o *Sentinel-2*, que se utilizan para la validación de las series (Giglio *et al.*, 2020), así como para el estudio de casos particulares y el análisis preciso de la superficie afectada, el nivel de afectación y la recuperación posterior (Llorens *et al.*, 2021).

Entre las series globales disponibles destaca el producto MCD64A1, construido por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) a partir de datos del

sensor *MODIS* (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de los satélites Terra y Aqua (Giglio *et al.*, 2018); serie mensual que corresponde a la colección 6, última versión del algoritmo con la que se ha recalculado el archivo completo de datos a partir del año 2000 (Giglio *et al.*, 2020). Las detecciones del sensor *MODIS* se basan en la identificación de anomalías térmicas, lo que permite la detección de incendios activos, así como la estimación de la potencia emitida por el fuego y el área quemada (Giglio *et al.*, 2021).

La serie MCD64A1 ha probado ser más precisa para la identificación de incendios y áreas quemadas en el estado de Michoacán, en comparación con otros productos disponibles, como la serie PROBA-V 300 m de *Copernicus* (Champo *et al.*, 2023). También, existen series de datos satelitales globales de variables climáticas, como las proporcionadas por el *Global Land Data Assimilation System (GLDAS)* de la *NASA*, que contribuyen a la comprensión del problema de los incendios y sus implicaciones (Rui y Beaudoin, 2022).

El interés por el uso de datos de teledetección para el estudio de los incendios se ha incrementado en México durante los últimos años, como lo muestra el creciente número de publicaciones sobre el tema (Neger *et al.*, 2022b). A partir de la serie de áreas quemadas MCD45A1, anterior a la MCD64A1, se evaluaron los incendios forestales de gran magnitud ocurridos en México entre 2000 y 2014; en este periodo se identificaron 389 454 ha quemadas en Michoacán, lo que corresponde a un promedio de 25 963.6 ha año⁻¹ (Manzo, 2016). Otros estudios utilizan datos *MODIS* para explorar la relación entre los incendios y el clima con un enfoque de predicción (González *et al.*, 2023) o causalidad (Villar-Hernández *et al.*, 2022); Pompa-García *et al.* (2018) utilizaron el Índice de Aridez y obtuvieron como resultado que en la zona norte del país prevalecen las causas naturales, mientras que en el centro y sur (donde se localiza Michoacán), la alta densidad de población y las actividades agrícolas explican la mayoría de los incendios.

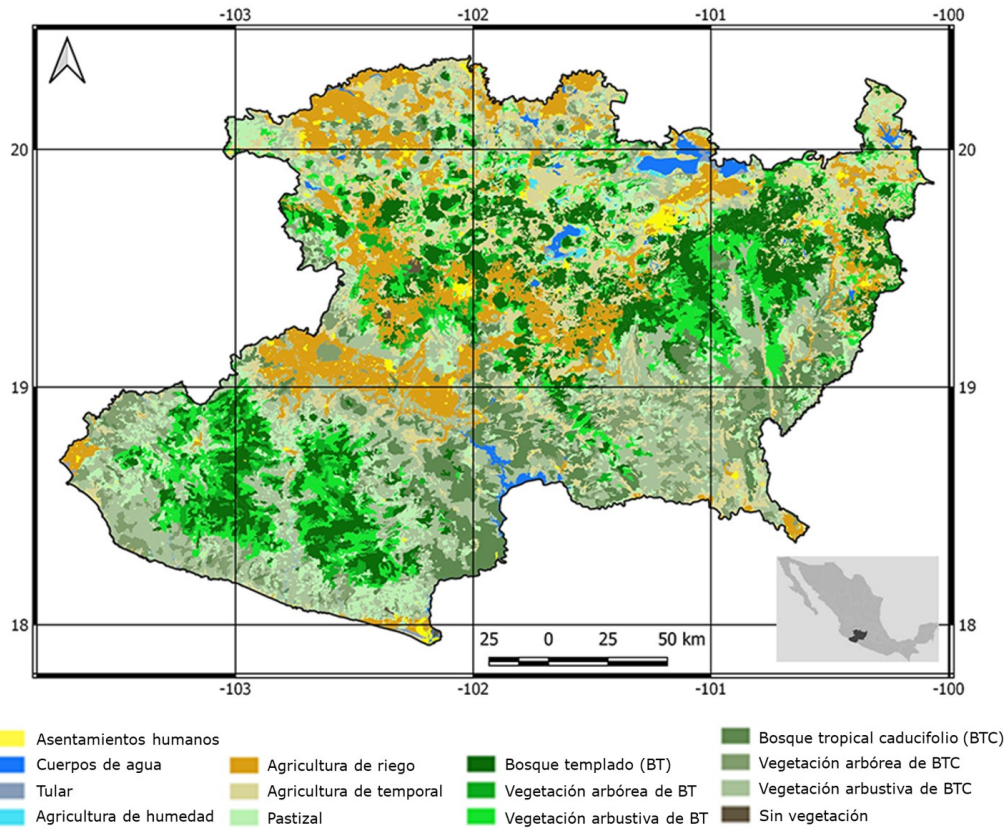
El objetivo de este trabajo fue analizar la ocurrencia de incendios en el estado de Michoacán, para el periodo entre 2015 y 2022, a partir de la serie MCD64A1 mediante el uso de diferentes coberturas y las variables climáticas temperatura media y precipitación. Se parte de la hipótesis de que los incendios en Michoacán tienen mayoritariamente causas humanas.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde al estado de Michoacán, ubicado en el centro occidente de México, entre los 18° y 21° N y los 100° y 104° O. El territorio es atravesado de oriente a poniente por dos estructuras montañosas: el Eje Volcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur. Los climas predominantes son: Aw tropical lluvioso con lluvias en verano, BS seco estepario y Cw templado con lluvias en verano. El intervalo altitudinal es de 0 m a cerca de 4 000 m. Coexisten diferentes tipos de bosque templado (pino, encino, oyamel y mesófilo), con la vegetación asociada secundaria arbórea y arbustiva; también se desarrolla el bosque tropical caducifolio y su vegetación secundaria arbórea y arbustiva; la agricultura es tanto de riego, como de temporal, con zonas de agricultura de humedad; además hay pastizales y matorrales; el resto de coberturas (tulares, manglares y vegetación hidrófila), junto con asentamientos humanos, zonas sin vegetación y cuerpos de agua son poco susceptibles de presentar incendios (Durán y Sevilla, 2003;

Rzedowski, 2006). En la Figura 1 se muestra el mapa de coberturas vegetales e el estado de Michoacán.



Fuente: Inegi, 2019.

Figura 1. Mapa de coberturas de Michoacán, derivado a partir del mapa de uso de suelo y vegetación Serie VII de Inegi.

Datos

Se descargó la serie de fechas de incendios (*day of burn*) MCD64A1 de *MODIS*, enero de 2015 a octubre de 2022, de la página oficial de la Universidad de *Maryland* (Giglio *et al.*, 2021), en versión reproyectada mensual, en formato *GeoTIFF*, con resolución de 500 m. La fecha de detección se codifica como día juliano (1 a 366).

Por otra parte, se descargaron los datos *GLDAS* globales de temperatura media de superficie (*AvgSurfT_inst: Average Surface skin temperature*, se pasó de grados Kelvin a centígrados) y precipitación (*Rainf_f_tavg: Total precipitation rate*, expresada en cantidad de agua por metro cuadrado y por segundo, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$, lo que equivale a mm s^{-1}), para el periodo 2015 a 2022 de la página de la *NASA* <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Los valores son mensuales, con resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

Métodos

Cada pixel con fecha de incendio (*day of burn* diferente de 0) se contó como una detección; únicamente se consideró un evento por pixel al mes. No es posible convertir directamente los pixeles a superficie siniestrada, ya que esta podría corresponder al total del pixel (25 ha) o solo a una parte del mismo (la superficie se proporciona en la serie *burn area* de MCD64A1).

Se contabilizó el número de pixeles identificados con incendios por mes y año en cada tipo de cobertura: agricultura (en sus modalidades de riego y de temporal, incluyendo pastizales), bosque templado y bosque tropical caducifolio (con sus respectivas vegetaciones secundarias arbóreas y arbustivas), para lo cual se superpuso el mapa de

coberturas obtenido a partir del mapa de uso de suelo y vegetación Serie VII de Inegi. Se obtuvieron las estadísticas correspondientes por fecha y cobertura.

El promedio y la desviación estándar de la precipitación y la temperatura media se calcularon por mes y año para el estado de Michoacán, así como para las zonas de bosque templado, bosque tropical caducifolio y agricultura; en este caso, no se consideraron de forma separada los tipos de agricultura ni las vegetaciones secundarias, dada la baja resolución espacial de los datos de clima (aproximadamente 27.7 km) con respecto a los de incendios (500 m).

Se utilizaron los programas *Snap* 8.0 (*ESA*) (Snap, 2024) para la obtención de las estadísticas de detecciones de incendios y datos de clima por cobertura vegetal, y *QGIS* 3.22 (QGIS, 2024) para la construcción de los mapas.

Resultados

Las temperaturas y las precipitaciones por mes y año se muestran en la Figura 2. La temperatura media en el periodo 2015-2022 en Michoacán fue de 22.66 °C; 2015, 2018, 2019 y 2020 estuvieron por encima del promedio y 2016, 2017, 2021 y 2022 por abajo. Las temperaturas aumentaron anualmente de enero a mayo (este último fue el mes más cálido, con promedios de hasta 29 °C) y disminuyeron, paulatinamente, hasta diciembre (incluso menores a 19 °C). Las precipitaciones ocurrieron entre junio y octubre, dentro de la temporada de lluvias.

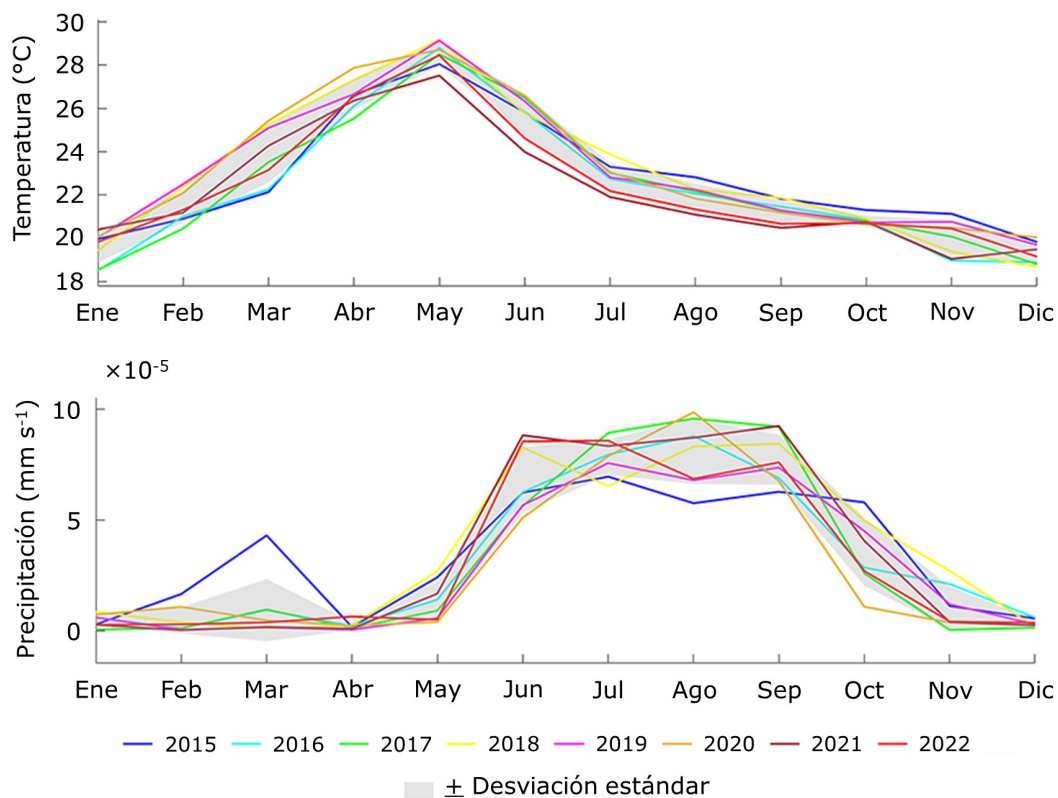


Figura 2. Temperatura media y precipitación en Michoacán por mes y año desde 2015 hasta 2022 (datos *GLDAS*).

El mapa de la Figura 3 muestra las detecciones de incendios en el estado de Michoacán cada año entre 2015 y 2022. Se contabilizaron 26 727 pixeles en total con detección de incendios (3 340.87 detecciones anuales en promedio); 2021 fue el año con el mayor número (5 269) y 2022 el año con el menor (2 398).

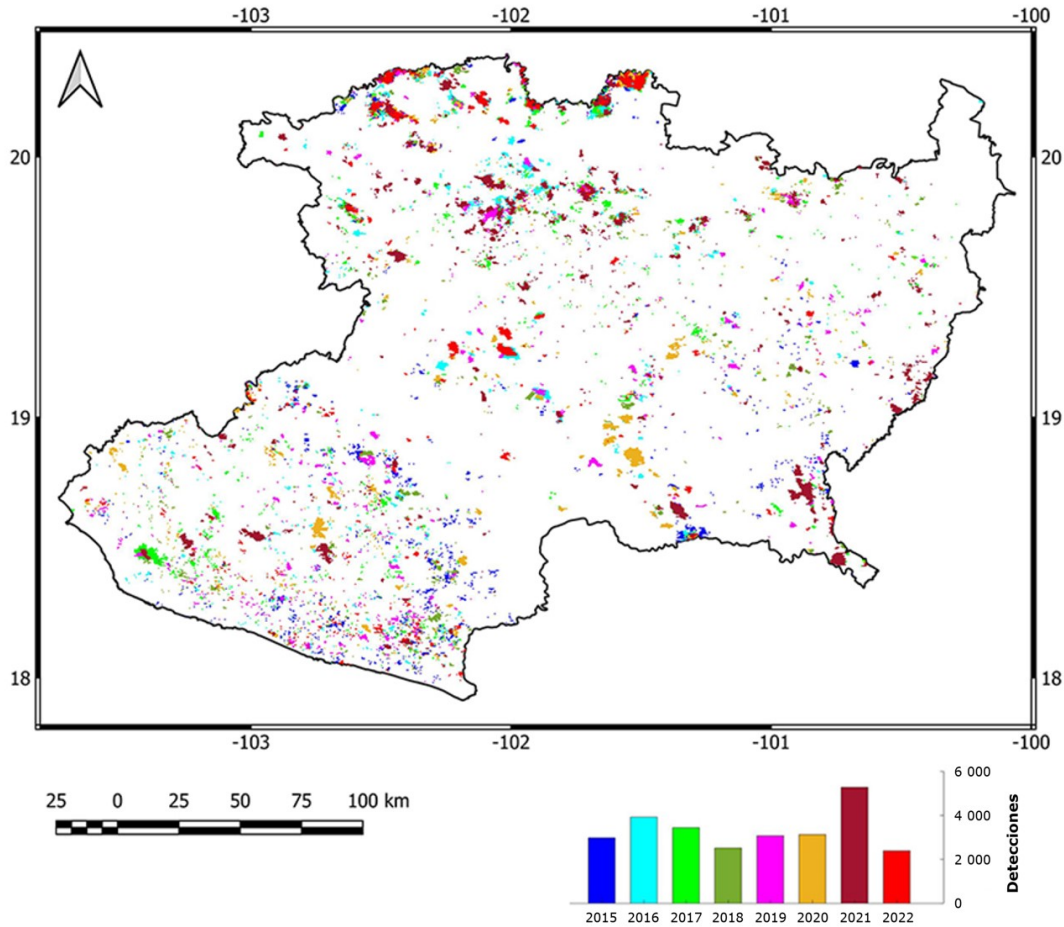


Figura 3. Mapa de detecciones de incendios en Michoacán de 2015 a 2022 (datos MCD64A1).

A lo largo del año, los incendios se concentraron en los meses más secos y calurosos, principalmente en mayo, con un promedio de 1 551.00 detecciones, y abril con 958.38; el máximo registro correspondió al mes de abril de 2021, con 2 347, seguido por mayo de 2020, con 2 094. En la estación lluviosa, los incendios son escasos o incluso inexistentes (Figura 4).

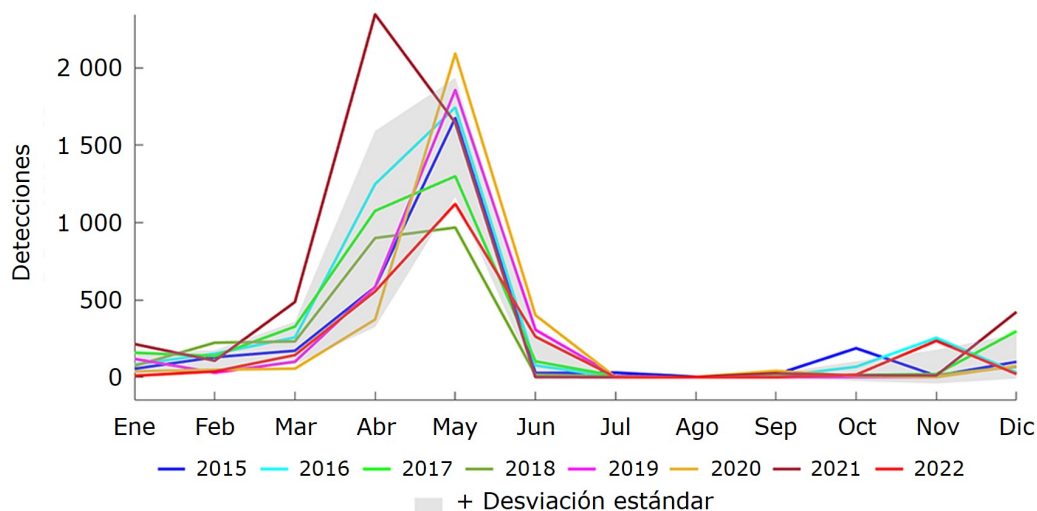


Figura 4. Detecciones de incendios en Michoacán por mes y año (datos MCD64A1).

Las quemas agrícolas representaron 48.41 % de las detecciones. En su mayoría fueron quemas en agricultura de riego (31.36 %) en dos temporadas: la más importante en primavera (mayo, con eventos en abril) y otra en invierno (noviembre y diciembre); también hubo quemas de pastizales (8.72 %) en primavera (abril y mayo) y algunas a inicios del verano (junio); en agricultura de temporal (8.33 %), se efectuaron de enero a mayo.

Los incendios forestales (32.85 %) afectaron, principalmente, a bosques templados (19.18 %) y a la vegetación secundaria arbustiva (8.72 %) y arbórea (4.96 %) de esta asociación; se produjeron desde marzo hasta junio, en particular abril y mayo. En zonas de bosque tropical caducifolio (17.14 %), los incendios ocurrieron en abril y mayo, fueron más numerosos en las zonas de vegetación secundaria arbórea (5.02 %) y arbustiva (9.65 %), donde se prolongaron hasta junio; lo anterior en comparación con el bosque tropical caducifolio propiamente (2.48 %) (Figura 5). Esta tendencia general presentó algunas variaciones para cada cobertura en los años estudiados (Figura 6).

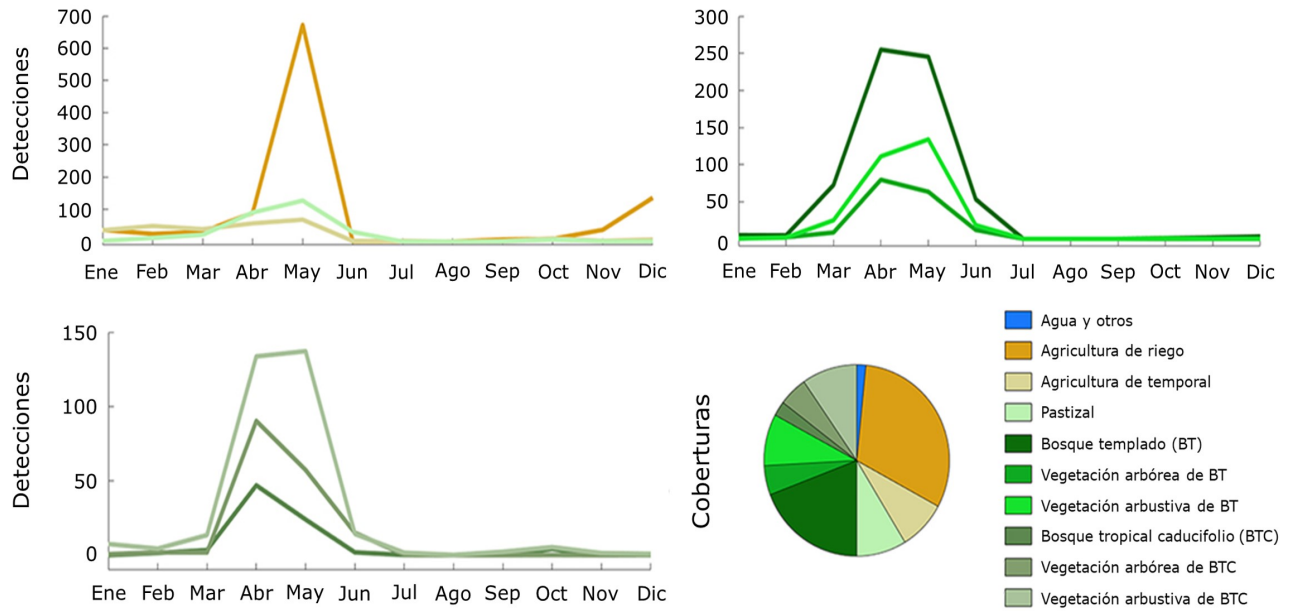


Figura 5. Variación mensual del promedio de detecciones de incendios en las principales coberturas vegetales de Michoacán y su distribución por cobertura en el periodo 2015 a 2022 (datos MCD64A1).

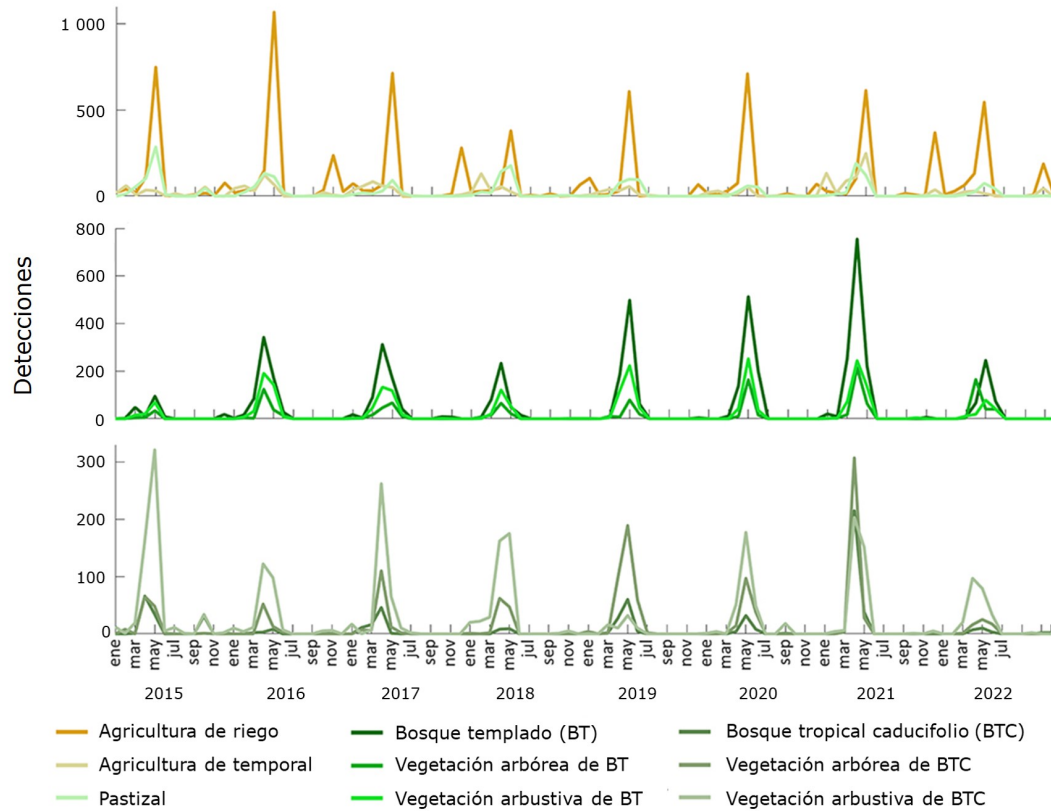


Figura 6. Detecciones de incendios en las principales coberturas vegetales por mes y año en Michoacán entre 2015 y 2022 (datos MCD64A1).

En la Figura 7, se muestra la variación por mes y año de las variables climáticas analizadas correspondientes a las coberturas vegetales agricultura, bosque templado y bosque tropical caducifolio, con sus respectivas vegetaciones secundarias. La agricultura y el bosque templado se ubican en zonas climáticas similares, con promedios anuales en el periodo de 21.17 °C y 19.92 °C, respectivamente; mientras que en el bosque tropical caducifolio, las temperaturas son más elevadas, con un promedio general de 25.64 °C. Las precipitaciones son similares en todo el territorio, con pequeñas diferencias entre coberturas en los máximos de los meses más lluviosos.

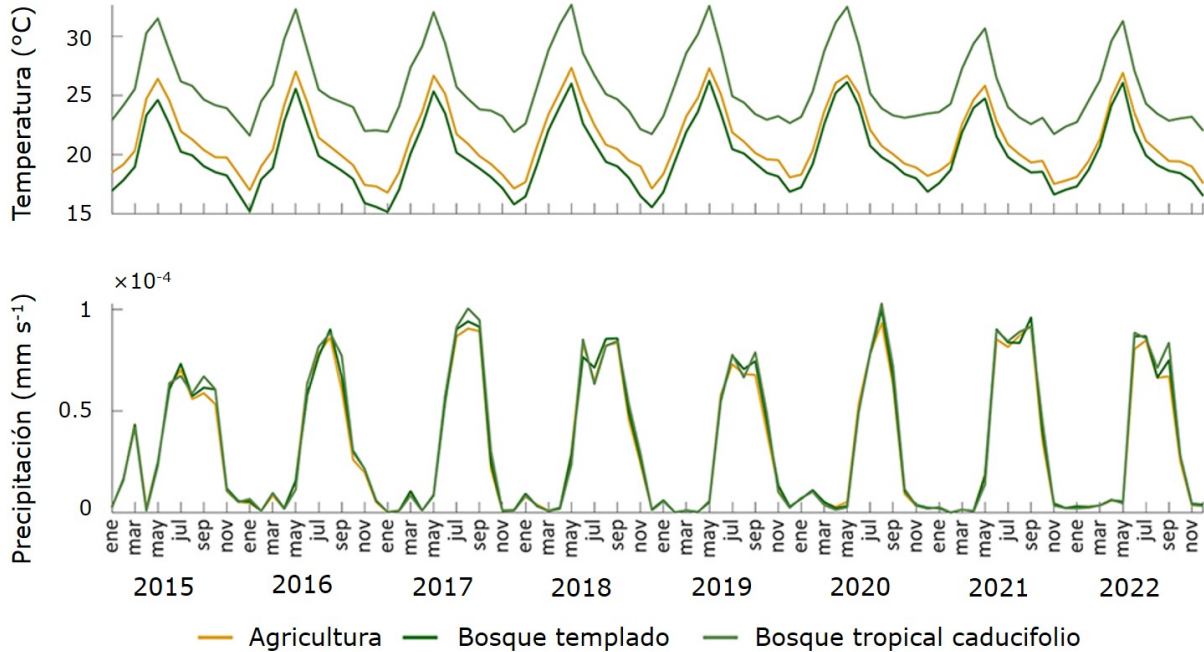


Figura 7. Temperatura media y precipitación por mes y año desde 2015 hasta 2022 para las principales coberturas vegetales (datos *GLDAS*).

Análisis por año

El año 2015 inició frío y lluvioso; las temperaturas fueron relativamente bajas hasta junio, en particular en marzo y mayo; sin embargo, a partir de julio fueron más altas que en los otros años estudiados, con un otoño suave. Hubo lluvias excepcionalmente fuertes en marzo, y también mayo fue un mes más lluvioso de lo normal, lo que dio inicio a una temporada de lluvias más larga, aunque menos intensa, que se prolongó hasta octubre. Estas condiciones climáticas ayudaron a limitar el número de incendios en los bosques. Los principales eventos

correspondieron a quemas en agricultura de riego en los municipios José Sixto Verduzco, Angamacutiro, Vista Hermosa, Briseñas, Pajacuarán, Venustiano Carranza, Tepalcatepec, Huetamo, Tuzantla y Coeneo. Hubo incendios en el bosque tropical caducifolio, algunos en octubre, en Apatzingán, Arteaga y Lázaro Cárdenas.

En 2016, las temperaturas fueron frías en general (en comparación con los años estudiados), en particular en noviembre que fue, además, un mes relativamente lluvioso. La temporada de incendios comenzó en abril y terminó en junio. Es el año en que se realizaron más quemas en agricultura de riego, que en invierno se adelantaron a noviembre, concretamente en los municipios: José Sixto Verduzco, Angamacutiro, Vista Hermosa, Pajacuarán y Cotija. Se detectaron incendios forestales importantes en Tocumbo, Purépero, Cherán, Chilchota, Zacapu, Tlazasalca, Penjamillo, Nuevo Urecho y Gabriel Zamora.

En 2017, las temperaturas fueron similares a los años previos, si bien marzo y noviembre fueron menos fríos. Las lluvias empezaron en junio y fueron intensas desde julio a septiembre, con un noviembre seco. Los primeros incendios ocurrieron en abril, y en mayo fueron menos numerosos que los otros años, excepto 2018 y 2022. Se detectaron quemas en agricultura de riego en José Sixto Verduzco, Angamacutiro y Ecuandureo; incendios en el bosque tropical caducifolio en Aquila y San Lucas; e incendios en el bosque templado en Huetamo, Madero y Coeneo.

El año 2018, fue más caluroso que los anteriores, en particular de enero a abril, y en julio. Después de unos meses de marzo y abril particularmente secos, la temporada de lluvias inició en mayo y fue la más prolongada de las analizadas, ya que se extendió hasta noviembre; el mes de junio fue muy lluvioso; en contraste, en julio llovió menos que los otros años. Tras algunos eventos en febrero (quemas en agricultura de temporal e incendios en vegetación secundaria de bosque tropical caducifolio), hubo incendios en abril y mayo en todas las coberturas vegetales; sin embargo, fue el mes de mayo con menos conflagraciones entre los años estudiados y ya no hubo más el resto del año; en general, resultó ser el año con menos eventos

en el periodo, salvo 2022. Se incendiaron zonas de bosque tropical caducifolio en Aquila y Arteaga; se detectaron quemas en agricultura de temporal en Zacapu, además de incendios forestales de bosque templado en Cherán, Zacapu, Tiquicheo, Zinapécuaro, Coeneo y Turicato.

En la primera mitad de 2019, las temperaturas fueron relativamente altas y las lluvias iniciaron en junio, y si bien no fueron abundantes, se prolongaron hasta noviembre. Los incendios comenzaron en abril, y fueron menos numerosos en este mes que los años anteriores, aumentaron en mayo y continuaron en junio. Se hicieron quemas en agricultura de riego en José Sixto Verduzco, Vista Hermosa, Ecuandureo e Ixtlán; se produjeron más incendios forestales que en los años previos, específicamente en Chilchota, Madero, Huetamo, Nuevo Urecho y Apatzingán.

Como en los dos años anteriores, en 2020 las temperaturas fueron altas desde enero hasta junio, en abril y junio en particular; este último mes fue el menos lluvioso del periodo analizado, y lo mismo se puede decir de octubre; en contraste, febrero fue lluvioso y agosto el más lluvioso de toda la serie. Los incendios iniciaron en abril, pero fueron menos numerosos que los otros años; al contrario, mayo y junio alcanzaron el máximo de incendios del periodo. Se detectaron quemas en agricultura de riego en José Sixto Verduzco, Vista Hermosa, Pajacuarán e Ixtlán; e incendios forestales en Aguililla, Turicato y Tacámbaro.

El año 2021 fue muy seco hasta abril; después de algunas precipitaciones en mayo, la temporada de lluvias se verificó con un mes de junio muy lluvioso; las precipitaciones continuaron fuertes hasta septiembre y terminaron en octubre. Las temperaturas fueron moderadas hasta abril, y de mayo hasta noviembre se registraron las más bajas de los años estudiados. Este año ocurrió el mayor número total de incendios del periodo analizado. En particular, en el mes de marzo hubo más conflagraciones que los otros años, en abril se rompió el récord de incendios; también hubo eventos en mayo, pero cesaron a partir de junio hasta diciembre,

cuando se practicaron quemas agrícolas en José Sixto Verduzco, Vista Hermosa, Pajacuarán, Ixtlán y Zamora. Fue el año con mayor número de incendios en bosques templados y tropicales caducifolios, así como en vegetación secundaria arbustiva/arbórea de bosque tropical caducifolio. En concreto, hubo incendios importantes en Coalcomán, Tumbiscatío, Huetamo, Morelia, Coeneo, Zacapu, Cherán, Paracho, Chilchota, Purépero, Ziracuaretiro, San Lucas y Huetamo. Lo anterior pudo deberse, más que a las temperaturas o precipitaciones, al confinamiento por la pandemia de Covid-19 (MacCarthy *et al.*, 2023), que propició la impunidad y dificultó las labores de vigilancia y extinción (Chávez-Ortiz y Morón-Cruz, 2023).

En 2022, las temperaturas fueron moderadas hasta mayo; sin embargo, a partir de junio se mantuvieron relativamente bajas, similares a las de 2021. Las primeras precipitaciones se registraron en junio, que fue un mes bastante lluvioso, al igual que julio; agosto y septiembre fueron menos lluviosos que otros años. En contraste con 2021, 2022 fue el año con menos incendios en el lapso estudiado. En particular, hubo menos incendios en bosques templados y tropicales caducifolios, así como en vegetación secundaria arbustiva/arbórea del bosque tropical caducifolio. Se detectaron quemas en agricultura de riego en José Sixto Verduzco, Vista Hermosa, Ixtlán y Pajacuarán; incendios forestales en bosques templados de Uruapan, Gabriel Zamora, Tancítaro y Tzintzuntzan.

Discusión

En el estado de Michoacán, la temporada de incendios corresponde a la estación seca, en primavera, cuando las temperaturas son elevadas y aún no comienza la

temporada de lluvias. Esto es así de manera natural en las zonas subtropicales, donde anualmente se presentan las condiciones propicias para la ocurrencia de este tipo de eventos: déficit de precipitaciones, anomalías térmicas positivas y vegetación estresada hidrológicamente (Galván y Magaña, 2020). La frecuencia de incendios se relaciona con la estacionalidad de la lluvia y la sequía, y específicamente, con la duración del periodo con déficit de humedad, en el cual existe combustible disponible y condiciones para la propagación del fuego (Jardel *et al.*, 2014). Sin embargo, por sí mismas esas condiciones no son suficientes para explicar el gran número de detecciones en el estado: un promedio de 3 340.87 al año. Se evidencia la participación de un factor humano como la causa de ignición directa (Neger *et al.*, 2022a), asociado a las prácticas de manejo agrícola o forestal, o a la intención de realizar un cambio de uso de suelo (Chuvieco *et al.*, 2019).

Las diferencias observadas en la temperatura media, y en particular los cambios en los patrones de precipitación (Neger *et al.*, 2022a), solo explican de manera parcial la variabilidad interanual de los incendios. No se observa, por ejemplo, ninguna anomalía negativa de ENOS (el fenómeno de El Niño), como las de los años 2003, 2005 y 2011 que se relacionan con megaincendios ocurridos en diferentes partes del país (Neger *et al.*, 2022a). La única anomalía climática destacable en el periodo estudiado fue la lluvia atípica del mes de marzo de 2015, que pudo limitar el número de incendios en bosques. Otro factor que explica la menor incidencia de incendios en 2015, así como en 2018, es el inicio temprano (marzo-abril) de la temporada de lluvias; no obstante, se trata de un argumento en sentido negativo: no explica la ocurrencia de más incendios los años con condiciones propicias, sino su limitación cuando estas no lo fueron; es decir, como empezó a llover, los agricultores tuvieron que dejar de quemar.

Con base en los datos analizados, 48 % de los eventos detectados en Michoacán entre 2015 y 2022 correspondieron a quemas agrícolas. En el país se estima que las

actividades agrícolas inducen al menos 40 % de los incendios debido a la práctica tradicional de tala y quema (Galván y Magaña, 2020). En particular, la mayoría de los incendios que ocurren en el centro y sur de México tienen causas antropogénicas, relacionadas, principalmente, con las actividades agrícolas y factores socioeconómicos que se concentran en las áreas con mayor densidad poblacional (Pompa-García *et al.*, 2018).

Asimismo, los resultados muestran que las quemas en agricultura de temporal inician en enero y en la agricultura de riego en diciembre, lo que confirma que la estacionalidad de las quemas en las zonas agrícolas tiene un inicio más temprano que la temporada de incendios de primavera; ello coincide con el arranque del ciclo agrícola de secano (Pompa-García *et al.*, 2018; Galván y Magaña, 2020). En Michoacán, la mayoría de las quemas asociadas a la agricultura se producen en el norte del estado, en la depresión del Lerma-Santiago, en la frontera con los estados de Jalisco y Guanajuato, donde el fuego se utiliza como una “herramienta campesina” para eliminar malezas, favorecer el rebrote del pasto para el ganado, limpiar la parcela de esquilmos agrícolas o matar plagas (Farfán *et al.*, 2020).

En cuanto a los bosques, la vulnerabilidad a condiciones climáticas anormalmente secas y cálidas, en especial en periodos de sequía depende de factores como la proximidad de la agricultura y otras actividades humanas, o de la accesibilidad a los ecosistemas forestales (Galván y Magaña, 2020). A menudo, las talas intencionales con fines agrícolas resultan en incendios forestales, hasta cierto punto accidentales; sin embargo, es evidente que la mayoría de los incendios forestales en Michoacán en los últimos años han sido intencionales, con el fin de cambiar el uso de la tierra y expandir las áreas para la producción de cultivos, como el aguacate (Bravo-Espinosa *et al.*, 2014; Galván y Magaña, 2020; Olivares, 2020).

El bosque tropical caducifolio, que ocupa muchas zonas naturales de Michoacán, es un tipo de vegetación de gran vulnerabilidad, ya que durante la estación seca de marzo a mayo tiende a ser altamente inflamable (Galván y Magaña, 2020). Los

datos analizados muestran que los incendios detectados en esta cobertura corresponden, en esencia, a vegetación secundaria, lo que indica que hay recurrencia en zonas perturbadas.

Conclusiones

Con el fin de conocer la incidencia de los incendios en el estado de Michoacán y su relación con el clima, se analizó la serie MCD65A1 de *MODIS*, junto con las series de temperatura y precipitación *GLDAS* correspondientes al periodo 2015 a 2022, mediante la Serie VII de Inegi para distinguir los tipos de cobertura vegetal afectados. En general, las condiciones climáticas no permiten explicar el elevado número de incendios, con un promedio anual de 3 340.87 detecciones, si bien un inicio temprano de la temporada de lluvias coincide con los años que acumulan menos siniestros (2015 y 2018). En 2021 se tiene el máximo número de detecciones, con 5 269, sobre todo en abril, lo que pudo propiciarse por un ambiente particularmente seco que coincidió, ese año en particular, con el confinamiento por la pandemia de Covid-19; de manera contrastante, el mínimo se registra en 2022, con 2 398.

Resulta evidente la participación de un factor humano, en particular por la utilización del fuego para prácticas agrícolas, principalmente de agricultura de riego, que representan casi la mitad de las detecciones, sobre todo, en la depresión del Lerma-Santiago, al norte del estado.

Las detecciones en bosques templados suponen un tercio del total y afectan más a los bosques que a la vegetación secundaria; en zonas de bosque tropical caducifolio,

los incendios ocurren en vegetación secundaria, lo que indica la reincidencia de las perturbaciones.

Las series de tiempo derivadas de datos satelitales, junto con datos de clima y tipos de coberturas, permiten realizar un seguimiento global y objetivo de los incendios, y lograr una comprensión del panorama general de este problema; por otra parte, las imágenes satelitales de alta resolución contribuyen a analizar con mayor detalle los casos particulares.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribución por autor

María Luisa España Boquera: análisis e interpretación de los datos y redacción del manuscrito; Omar Champo Jiménez: descarga y procesamiento de datos y construcción de gráficos; María Dolores Uribe Salas: interpretación de los resultados y revisión del manuscrito.

Referencias

- Bravo-Espinosa, M., M. E. Mendoza, T. Carlón A., L. Medina, J. T. Sáenz-Reyes and R. Páez. 2014. Effects of converting forest to avocado orchards on topsoil properties in the Trans-Mexican volcanic system, Mexico. *Land Degradation & Development* 25(5):452-467. Doi: 10.1002/ldr.2163.
- Champo J., O., M. D. Uribe S. y M. L. España B. 2023. Validación comparativa de detección de áreas quemadas PROBA-V/MODIS/Sentinel-2 en Michoacán, México (2015-2020). *Investigaciones Geográficas* 112:e60774. Doi: 10.14350/rig.60774.
- Chávez-Ortiz, P. y J. A. Morón-Cruz. 2023. Efectos de la pandemia por COVID-19 en la contaminación ambiental. *In: Oyama, K. y F. García-Oliva (Coords.). La década COVID en México: los desafíos de la pandemia desde las ciencias sociales y las humanidades. Tomo 14: Ecología, medio ambiente y sustentabilidad. Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, Cd. Mx., México. pp. 343-365. https://decadacovid.humanidades.unam.mx/wp-content/uploads/DCM_tomo-14_ecolog-medio-ambiente-sustentabilidad.pdf. (6 de diciembre de 2023).*
- Chuvieco, E., F. Mouillot, G. R. van der Werf, J. San Miguel, ... and L. Giglio. 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment* 225:45-64. Doi: 10.1016/j.rse.2019.02.013.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2024. Historial de incendios forestales. https://monitor_incendios.cnf.gob.mx/incendios-graficos-animados-barra. (12 de mayo de 2024).
- Durán C., V. y F. Sevilla P. (Coords.). 2003. Atlas geográfico del Estado de Michoacán. Secretaría de Educación del Estado de Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y EDDISSA. Morelia, Mich., México. 308 p.
- Farfán G., M., A. Flamenco S., C. R. Rodríguez P., L. Rodrigues de Sousa S., I. González G. y Y. Gao. 2020. Cartografía de la probabilidad de ocurrencia a incendios

forestales para el estado de Guanajuato: Una aproximación antrópica de sus fuentes de ignición. *Acta Universitaria* 30:1-15. Doi: 10.15174/au.2020.2953.

Galván, L. and V. Magaña. 2020. Forest fires in Mexico: An approach to estimate fire probabilities. *International Journal of Wildland Fire* 29(9):753-763. Doi: 10.1071/WF19057.

Giglio, L., L. Boschetti, D. P. Roy, M. L. Humber and C. O. Justice. 2018. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment* 217:72-85. Doi: 10.1016/j.rse.2018.08.005.

Giglio, L., L. Boschetti, D. Roy, A. A. Hoffmann, M. Humber and J. V. Hall. 2020. Collection 6 MODIS Burned area product user's guide. Version 1.3. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Washington, D. C., United States of America. 34 p. https://lpdaac.usgs.gov/documents/875/MCD64_User_Guide_V6.pdf. (6 de diciembre de 2023).

Giglio, L., W. Schroeder, J. V. Hall and C. O. Justice. 2021. MODIS Collection 6 and Collection 6.1 Active fire product user's guide. Version 1.0. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Washington, D. C., United States of America. 64 p. https://modis-fire.umd.edu/files/MODIS_C6_C6.1_Fire_User_Guide_1.0.pdf. (27 de marzo de 2023).

González G., I., M. Farfán G., L. M. Morales M., D. R. Pérez S., J. J. Garza S. y A. Medina P. 2023. Índices y modelos para la predicción de la ocurrencia de incendios forestales: una revisión para México. *Revista Geográfica de América Central* 2(71):193-219. Doi: 10.15359/rgac.71-2.7.

González-Gutiérrez, I., J. F. Mas-Causel, L. M. Morales-Manilla and K. A. Ocegüera-Salazar. 2020. Thematic accuracy of hotspots and wildfires in Michoacán, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 26(1):17-35. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2019.01.011.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2019. Carta de uso de suelo y vegetación de México, Serie VII, Escala 1:250 000. Inegi. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>. (12 de mayo de 2024).
- Jardel P., E. J., D. Pérez S., E. Alvarado y J. E. Morfín R. 2014. Principios y criterios para el manejo del fuego en ecosistemas forestales: guía de campo. Comisión Nacional Forestal (Conafor). Zapopan, Jal., México. 59 p. https://www.researchgate.net/publication/288827174_Principios_y_criterios_para_el_manejo_del_fuego_en_ecosistemas_forestales. (6 de diciembre de 2023).
- Jones, M. W., J. T. Abatzoglou, S. Veraverbeke, N. Andela, ... and C. Le Quéré. 2022. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics* 60(3):e2020RG000726. Doi: 10.1029/2020RG000726.
- Justice, C., L. Giglio, L. Boschetti, D. Roy, ... and Y. Kaufman. 2006. Algorithm technical background document. MODIS fire products. National Aeronautics and Space Administration. Washington, D. C., United States of America. 34 p. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf. (10 de junio de 2023).
- Llorens, R., J. A. Sobrino, C. Fernández, J. M. Fernández-Alonso and J. A. Vega. 2021. A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data. Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 95:102243. Doi: 10.1016/j.jag.2020.102243.
- MacCarthy, J., J. Richter, S. Tyukavina, M. Weisse and N. Harris. 2023. *The Latest Data Confirms: Forest Fires Are Getting Worse*. <https://www.wri.org/insights/global-trends-forest-fires>. (6 de diciembre de 2023).
- Manzo D., L. de L. 2016. Incendios forestales de gran relevancia: algoritmos y sensor MODIS para su detección y monitoreo. *In: Moncada M., O. y Á. López L. (Coords.). Geografía de México. Una reflexión espacial contemporánea*. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, Cd. Mx., Mexico. pp.

- 334-349. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/105>. (12 de mayo de 2024).
- Neger, C., J. F. León-Cruz, L. Galicia S. y L. de L. Manzo-Delgado. 2022a. Dinámica espaciotemporal, causas y efectos de los megaincendios forestales en México. *Madera y Bosques* 28(2):1-21. Doi: 10.21829/myb.2022.2822453.
- Neger, C., L. de L. Manzo D. y L. Galicia S. 2022b. La investigación geográfica de los incendios forestales en México: una perspectiva bibliométrica y territorial. *Investigaciones Geográficas* 108:e60488. Doi: 10.14350/rig.60488.
- Olivares M., L. D. 2020. Regímenes de incendios y sus efectos en suelos forestales de la franja aguacatera. Tesis de Maestría en Ecología Integrativa. Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México. 142 p.
- Pompa-García, M., J. J. Camarero, D. A. Rodríguez-Trejo and D. J. Vega-Nieva. 2018. Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science* 28(1):25-37. Doi: 10.1007/s11769-017-0928-0.
- Quantum Geographical Information System (QGIS). 2024. QGIS 3.22. Santa Cruz, CA, United States of America. QGIS. <https://www.qgis.org/en/site/forusers/download.html>. (12 de mayo de 2024).
- Rui, H. and H. Beaudoin. 2022. README Document for NASA GLDAS Version 2 Data Products. NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt, MD, United States of America. 34 p. https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GLDAS/GLDAS_NOAH025_M.2.1/doc/README_GLDAS2.pdf. (4 de diciembre de 2023).
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Tlalpan, D. F., México. 504 p.
- Sentinel Application Platform (Snap). 2024. Copernicus Data Space Ecosystem (Snap v. 8.0). Paris, Par., France. European Space Agency. <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>. (12 de mayo de 2024).

Szpakowski, D. M. and J. L. R. Jensen. 2019. A review of the applications of remote sensing in fire ecology. *Remote Sensing* 11(22):2638. Doi: 10.3390/rs11222638.

Villar-Hernández, B. de J., S. Pérez-Elizalde, D. A. Rodríguez-Trejo and P. Pérez-Rodríguez. 2022. Spatio-temporal analysis of wildfires occurrence in the Mexican State of *Oaxaca*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13(74):120-144. Doi: 10.29298/rmcf.v13i74.1274.

Zúñiga-Vásquez, J. M., D. Cisneros-González, M. Pompa-García, D. A. Rodríguez-Trejo and G. Pérez-Verdín. 2017. Spatial modeling of forest fires in Mexico: an integration of two data sources. *Bosque* 38(3):563-574. Doi: 10.4067/S0717-92002017000300014.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 [Atribución-No Comercial \(CC BY-NC 4.0 Internacional\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.