

## Validación comparativa de detección de áreas quemadas PROBA-V/MODIS/Sentinel-2 en Michoacán, México (2015-2020)

### *Comparative validation of PROBA-V/MODIS/Sentinel-2 burn area detection in Michoacan, Mexico (2015-2020)*

Omar Champo Jiménez,\* María Dolores Uribe Salas y María Luisa España Boquera\*\*\*

Recibido: 1/08/2023. Aceptado: 8/09/2023. Publicado: 22/11/2023.

**Resumen.** Los incendios constituyen una gran preocupación medioambiental por sus efectos potencialmente negativos en los ecosistemas, el suelo y la atmósfera, y como consecuencia del cambio climático han están aumentando en todo el planeta. Los reportes de campo son el dato más cercano sobre incendios activos y áreas quemadas, sin embargo, a veces no son confiables o suficientes, por lo que es útil contar con series globales generadas a partir de información satelital. Entre los productos satelitales de áreas quemadas disponibles destacan la serie PROBA-V de 300 m de Copernicus (2014-2020), basada en el cálculo de índices que detectan cambios importantes en la vegetación, y la colección MCD64A1 de 500m de la NASA, derivada de datos MODIS, que parten de la detección de puntos de calor.

El objetivo de este trabajo fue comparar estos productos en el estado de Michoacán, México, donde se encuentran bosque templado y tropical seco (o selva baja caducifolia), además de agricultura y otras coberturas; el periodo estudiado va de 2015 a 2020.

Para cada serie se contabilizan los píxeles con reporte de área quemada por mes y año para cada cobertura, y se analizan las coincidencias. Como referencia independiente y de mayor resolución que las series comparadas, se utilizan

imágenes Sentinel-2 para ilustrar algunos casos, donde se calcula el índice dNBR para valorar el nivel de afectación.

En el periodo estudiado, el número de detecciones de PROBA-V es del orden de dieciséis veces mayor que el de MODIS (308699 contra 19061). PROBA-V identifica áreas quemadas de diciembre a mayo, y MODIS en abril y mayo, lo que se corresponde mejor a la realidad de la zona estudiada. En la serie PROBA-V, el 56.65% de las detecciones corresponden a bosque tropical seco, el 27.25% a agricultura y el 13.57% a bosque templado; MODIS detecta el 50.02% en zonas agrícolas, el 31.31% en bosque templado y únicamente el 17.31% en bosque tropical seco. Entre el 37.90% (2015) y el 78.72% (2020) de las áreas quemadas detectadas por MODIS lo son también por PROBA-V, pero menos del 5% de las localizadas por PROBA-V son detectadas por MODIS. En bosque tropical seco, la coincidencia no llega al 2% ningún año, lo que indica una importante sobre-detección por parte de PROBA-V en este bioma. Los seis ejemplos de áreas quemadas detectadas que se visualizan en imágenes Sentinel-2, considerando el caso desde enero hasta junio, evidencian que en las zonas de transición entre bosque templado y seco ocurren normalmente en abril o mayo, o hasta junio en el caso de zonas cercanas a plantaciones de

\* Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posta Veterinaria, km 9.5 carretera Morelia-Zinapécuaro, 58880, Tarímbaro, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7719-5331>. Email: [omar.champo@umich.mx](mailto:omar.champo@umich.mx)

\*\* Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posta Veterinaria, km 9.5 carretera Morelia-Zinapécuaro, 58880, Tarímbaro, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4788-0290>. Email: [maria.uribe@umich.mx](mailto:maria.uribe@umich.mx)

\*\*\* Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posta Veterinaria, km 9.5 carretera Morelia-Zinapécuaro, 58880, Tarímbaro, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6255-2802>. Email: [boquera@umich.mx](mailto:boquera@umich.mx) (autora de correspondencia).

aguacate; por otra parte, las quemas agrícolas se dan en diferentes momentos del año. En general se constata un mayor acierto de MODIS que de PROBA-V en la zona estudiada; el índice dNBR identifica correctamente zonas de afectación alta, pero sobredetecta áreas quemadas con baja afectación.

Las series áreas quemadas permiten realizar un monitoreo, general y sistemático de los incendios ocurridos en un territorio; los datos de archivo permiten realizar estudios históricos. La exactitud de cada serie depende de los datos y algoritmos utilizados para generarla, además de las características de la zona de estudio. Las series de áreas quemadas basadas en anomalías térmicas, como la colección MCD64A1 de MODIS, resultan más precisas que las que identifican cambios en la vegetación, como PROBA-V, en particular cuando en la zona se encuentran biomas caducifolios. Es necesario, sin embargo, eliminar falsas detecciones debidas a la presencia de superficies altamente reflectivas, como nubes o cuerpos de agua. Por otra parte, si se busca estudiar los incendios forestales, es necesaria la superposición de mapas de uso de suelo.

La información aportada por las series no incluye incendios pequeños, en comparación con el tamaño de pixel. Si se requiere el estudio detallado de los incendios en zonas pequeñas, puede complementarse la información de las series con datos de campo e imágenes satelitales de alta resolución, por ejemplo, para evaluar el impacto del fuego o dar seguimiento al proceso de recuperación; resulta necesario, en este caso, clasificar previamente la imagen, para identificar las zonas quemadas.

Si bien los satélites MODIS y PROBA-V están llegando al final de su vida útil, ya existen otros tomando el relevo, tanto por parte de la NASA, como de la ESA, por lo que la disponibilidad de series de áreas quemadas, junto con otras de variables biofísicas y climáticas, está garantizada, con datos cada vez de mayor calidad y de periodos más largos.

**Palabras clave:** bosque templado, bosque tropical seco, Copernicus, dNBR, series temporales.

**Abstract.** Fires are a major environmental concern due to their potentially adverse effects on ecosystems, soil, and the atmosphere. Fires are increasing worldwide as a result of climate change. Field reports are the closest data on active fires and burned areas; however, they are not always reliable or sufficient, so global series generated from satellite information are useful. Satellite products available for burned areas include the 300m Copernicus PROBA-V series (2014–2020), which calculates indices that detect significant vegetation changes, and NASA's MCD64A1 500m MODIS collection, based on the detection of heat spots. This study aimed to compare these products in the state of Michoacán, Mexico, where temperate and tropical dry forests (or low deciduous forests) are located, as well as cropland and other vegetation types; the study period covered from 2015 to 2020.

For each series, the pixels with a burned-area report were quantified by month and year for each vegetation cover, and

matches were analyzed. To illustrate some cases, Sentinel-2 images were used as an independent baseline with a higher resolution than the compared series, and the dNBR index was calculated to assess the impact level.

During the study period, the number of PROBA-V detections was 16 times greater than that of MODIS (308699 versus 19061). PROBA-V identified burned areas from December to May, while MODIS did so in April and May, which better matched the actual conditions in the study area. In the PROBA-V series, 56.65 % of the detections corresponded to tropical dry forest, 27.25 % to agriculture, and 13.57 % to temperate forest; in MODIS, 50.02 % of the area was cropland, 31.31 % temperate forest, and only 17.31 % tropical dry forest. Between 37.90 % (2015) and 78.72 % (2020) of the burned areas noted by MODIS were also detected by PROBA-V, but MODIS detected less than 5 % of the areas identified by PROBA-V. In the tropical dry forest, the correlation between both systems was below 2 % in any year, indicating a significant over-detection by PROBA-V in this type of vegetation. The six burned areas visualized in Sentinel-2 images from January to June show that they usually occur in April or May in the transition zone between temperate and dry forests or until June in areas near avocado plantations. On the other hand, cropland fires occur at different times of the year. MODIS was generally more accurate than PROBA-V in the study area; the dNBR index correctly identified high-impact burned areas but over-detected low-impact areas.

The burned-area series facilitates general and systematic monitoring of fires in a territory, while archival data are suitable for historical studies. The accuracy of each series depends on the data and algorithms used to generate it, as well as on the characteristics of the study area. Burned-area series based on thermal anomalies, such as the MCD64A1 collection of MODIS, are more accurate than those identifying changes in vegetation, such as PROBA-V, particularly when deciduous vegetation is found in the area. However, false detections from highly reflective surfaces, such as clouds or water bodies, should be eliminated. Additionally, to study forest fires, it is necessary to overlay land-use maps.

The information provided by the series does not include fires that are small relative to the pixel size. If a detailed study of fires in small areas is required, the information in the series can be supplemented with field data and high-resolution satellite imagery, for example, to assess the impact of fire or to monitor the recovery process. In this case, the image needs to be classified beforehand to identify the burned areas.

Although the MODIS and PROBA-V satellites are approaching the end of their useful life, others are already taking over, both by NASA and ESA, so the availability of time series for burned area and other biophysical and climatic variables is warranted, recording increasingly higher-quality data over longer periods.

**Keywords:** temperate forest, tropical dry forest, Copernicus, dNBR, time series

## INTRODUCCIÓN

Los incendios constituyen una gran preocupación medioambiental por sus efectos potencialmente negativos en los ecosistemas, el suelo y la atmósfera. Como consecuencia del cambio climático, los incendios están aumentando en todo el planeta (Jones *et al.*, 2020). por lo que han sido identificados como variables climáticas esenciales (ECV) por el Sistema Global de Observación del Clima (GCOS) (Chuvieco *et al.*, 2019). La generación de reportes de incendios en campo, por parte de organismos oficiales, a nivel nacional o regional, resulta muy útil para establecer estadísticas de incidencia, superficie afectada y ubicación espacial; en muchos lugares esta es la fuente más utilizada para la generación de índices y modelos preventivos, así como para la asignación de recursos (González-Gutiérrez *et al.*, 2020). Sin embargo, el monitoreo terrestre o la validación de la información sobre incendios activos es un desafío, debido a factores como la inaccesibilidad, el alto costo y el riesgo en términos de seguridad; la dificultad es aún mayor en zonas grandes, remotas o subdesarrolladas, donde los recursos son limitados (Sofan *et al.*, 2022). Por otra parte, además del dato puntual de campo, es necesario contar con material cartográfico que muestre la ubicación espacial y temporal del fuego, permita identificar los sitios más perturbados y dar seguimiento a los procesos de recuperación, así como evaluar los impactos ambientales, sociales y económicos (Manzo-Delgado, 2016).

En este sentido, los satélites de teledetección constituyen una herramienta muy útil para monitorear los incendios de manera global, objetiva y sistemática, a través de la generación de productos globales sobre superficies quemadas. Los primeros productos se generaron a finales de los años 1990 por la ESA (European Space Agency) con datos satelitales SPOT-VEGETATION (VGT) de 1 km de resolución, iniciando con Global Burn Area (GBA2000) para el año 2000, y continuando con L3JRC (Tansey y Wolfs, 2017; Chuvieco *et al.*, 2019). que completó una serie de 15 años (2001-2015). En mayo 2013, ante el final de la vida útil de VGT (marzo 1998-mayo 2014). y a la espera del inicio de la misión Sentinel-3 (A en 2016 y B

en 2018). el programa europeo Copernicus lanzó el satélite PROBA-V con un sensor similar a VGT (Wolters *et al.*, 2018) y adaptó la metodología de la primera versión para ser utilizada con los nuevos datos (Tansey y Arellano, 2016; Tansey y Wolfs, 2017). Se dio así continuidad a la colección de 1 km, para después iniciar una colección de 300 m (2014-2020) (Smets *et al.*, 2017). Actualmente se trabaja en la generación de una nueva serie (versión 3). también de 300 m, a partir de datos Sentinel-3 (Wolfs y Tansey, 2020; Padilla, 2021; Franquesa *et al.*, 2021; Wooster y Xu, 2022).

Por su parte, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) produce desde 2008 colecciones de 500 m (MCD45A1 y la nueva versión MCD64A1) con datos del sensor MODIS de los satélites Terra y Aqua (Giglio *et al.*, 2006; Giglio *et al.*, 2018). Las colecciones MODIS inician en el año 2000 y tienen como antecedente la experiencia adquirida con los sistemas NOAA-AVHRR y GOES (Chuvieco *et al.*, 2019). A diferencia de PROBA-V, que carece de bandas térmicas y cuyo algoritmo se basa en los cambios en el infrarrojo (NIR y SWIR) (Tansey y Wolfs, 2017). el sensor MODIS es capaz de identificar anomalías térmicas y estimar la potencia emitida por el fuego y el área quemada, lo que permite la detección de incendios activos a 1 km de resolución (Giglio *et al.*, 2021; Padilla, 2021). Esta información, junto con datos MERIS, es utilizada también en el producto Fire\_CCI de la ESA (Chuvieco *et al.*, 2016; Chuvieco *et al.*, 2019). Además, NASA cuenta con el sensor VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*). embarcado en el satélite Suomi NPP, cuya operación inició en 2012, que tiene la capacidad para adquirir datos ambientales, incluyendo nubes y temperatura de superficie, que contribuirá a dar continuidad a los datos MODIS (Neger y Manzo-Delgado, 2021) adquiridos por Terra, cuya vida útil terminará en la década de 2020 (Wooster y Xu, 2022). Por su parte, también los datos Sentinel-3 darán continuidad a los MODIS, pues permiten el cálculo preciso de la temperatura de superficie y la potencia radiactiva del fuego (Polehampton *et al.*, 2023).

El producto MCD64A1 de MODIS ha sido validado con imágenes Landsat de la NASA con

30 m de resolución (Giglio *et al.*, 2020). La serie PROBA-V 300 m se ha validado con imágenes Landsat (Tansey y Wolfs, 2017) y por comparación con los productos de MODIS, PROBA-V 1 km y SPOT-VGT; se validó por primera vez en 2016, para los años 2014 y 2015 (Tansey y Arellano, 2016). en 2018 para el periodo 2017-2018 (Tansey *et al.*, 2019) y en 2020 para 2019 (Tansey *et al.*, 2020). En general, se observó que el producto de 300 m presenta una mayor precisión que el de 1 km y es más cercano a MODIS, con un número similar de áreas quemadas detectadas totales (Tansey y Arellano, 2016). Estos resultados confirmaron la calidad de la serie PROBA-V 300 m y la pertinencia de su construcción, hasta la disponibilidad de la versión 3 (Tansey *et al.*, 2019). con la advertencia de la presencia de errores de omisión y comisión en diferentes regiones (Tansey *et al.*, 2020). Posteriormente, tras varias validaciones, se concluyó que la precisión de la versión 1 es claramente menor que la de otros productos de la ESA y la NASA (Padilla, 2021).

A nivel nacional o regional, ha habido iniciativas de análisis de áreas quemadas con imágenes satelitales de alta resolución. Se trata de un método más laborioso que la utilización de series, por lo que no resulta óptimo para realizar un monitoreo permanente de regiones grandes; sin embargo, además de detectar áreas quemadas pequeñas (tiene mayor resolución espacial que las series). permite valorar el nivel de afectación, a partir del cálculo de índices como el dNBR (Chuvieco *et al.*, 2019; Sobrino *et al.*, 2019; Llorens *et al.*, 2021). Este índice se basa en la diferencia entre las bandas espectrales NIR y SWIR, y sus cambios en el tiempo, mismo principio de los algoritmos de PROBA-V (Tansey y Wolfs, 2017) y de la primera versión de MODIS (Justice *et al.*, 2006).

El objetivo del presente trabajo es comparar los productos de áreas quemadas de MODIS (MCD64A1) y PROBA-V 300 m, correspondientes al periodo 2015-2020, en el estado de Michoacán, México, donde se producen incendios todos los años por deforestaciones y otras actividades humanas. Con el fin de contar con una referencia independiente y de mayor resolución que las series comparadas, se utilizan imágenes Sentinel-2 para

ilustrar algunos casos, para los que se calcula la afectación con el índice dNBR.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio

El estado de Michoacán, en el centro occidente de México, entre las latitudes 18° y 21° N y longitudes 102° y 99° W, se encuentra en zona subtropical y su clima está caracterizado por dos estaciones anuales: lluvias, que inician en junio y llegan hasta octubre, y secas, de octubre a mayo del año siguiente. Las elevaciones van de 0 m a cerca de 4000 m. En el estado coexisten diferentes tipos de bosque templado y bosque tropical seco (o selva baja caducifolia). con agricultura y otras coberturas, como tulares, asentamientos humanos, zonas sin vegetación y cuerpos de agua (Durán y Sevilla, 2003; Rzedowski, 2006). La Figura 1 muestra una versión simplificada del mapa oficial de usos de suelo y vegetación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) de México (Serie VII) (<https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>)

### Datos

Se analizaron los siguientes productos:

Serie PROBA-V de áreas quemadas (*Burned Area*). a 300 m, de enero 2015 a junio 2020, cada 10 días, descargada de la página <https://land.copernicus.eu/global/products/ba>. Los píxeles detectados como quemados valen 1.

Serie MODIS del día de quema (*Burn day*). de 2015 a 2020, de la colección MCD64A1, descargada de la página oficial de la Universidad de Maryland (Giglio *et al.*, 2020) en versión reproyectada mensual, en *GeoTIFF* a 500 m y en formato vectorial (*shape*). región 4. La fecha de quema se codifica como día juliano (1 a 366).

Imágenes Sentinel-2 de 2019 y 2020, una al mes desde enero hasta junio, correspondientes a las zonas tomadas como ejemplo señaladas en la figura 1, descargadas de la página del programa Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu>).

Los análisis se realizaron con los programas SNAP (*Sentinel Application Platform*) de la ESA

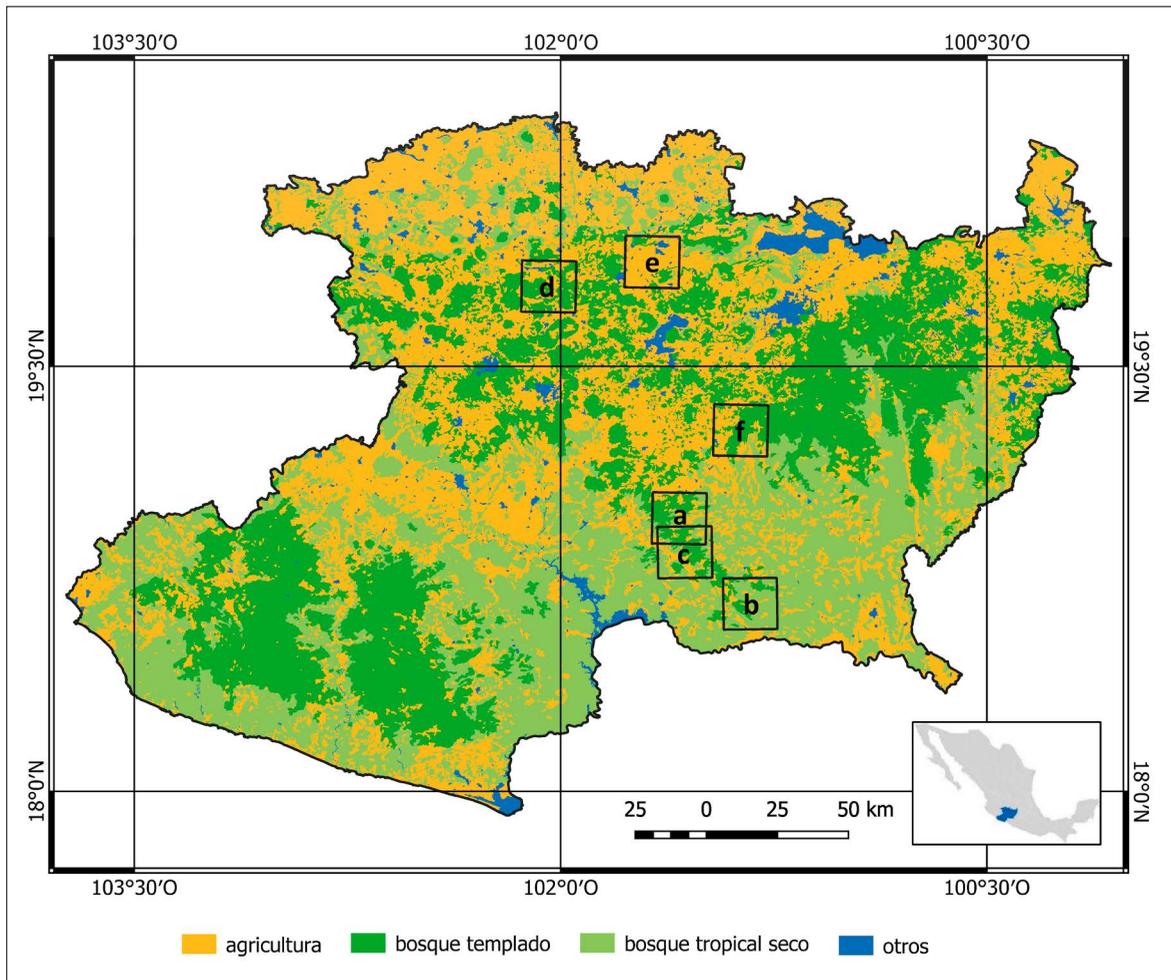


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio: estado de Michoacán, México. Mapa de coberturas a partir de la Serie VII de INEGI. Posición de los casos ejemplo mostrados en las Figuras 5 y 6.

(<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>) y QGIS (<https://qgis.org>).

## Metodología

### *Eventos por mes y año y por cobertura*

A partir de la serie MCD64A1 de MODIS en *GeoTiff*, se identificaron los píxeles de áreas quemadas de cada mes, independientemente de la fecha.

En la serie PROBA-V 300 m se identificaron los píxeles con al menos una detección de área quemada, en cualquiera de las tres fechas de cada mes. Para las dos series se contaron los píxeles con reporte de área quemada, por mes y año.

Se contaron los píxeles de áreas quemadas anuales por cobertura.

### *Coincidencias*

A la serie PROBA-V (ráster, 300 m), se le superpuso la serie MODIS en formato vectorial (shape). Se identificaron los píxeles PROBA-V que coincidían con los polígonos MODIS, por mes, año y cobertura.

Se calcularon los porcentajes de píxeles identificados como áreas quemadas en la serie MODIS que también habían sido detectados por PROBA-V y viceversa, los píxeles de áreas quemadas de

PROBA-V también identificados por MODIS, por mes, año y cobertura.

#### *Casos ejemplo con Sentinel-2*

De las imágenes Sentinel-2 descargadas (una al mes de enero a junio). se recortaron seis zonas de 2000 x 2000 píxeles (400 km<sup>2</sup>) en las que se aprecia claramente que se produjo un incendio. Se calculó el cambio del índice NBR (diferencia normalizada entre las bandas espectrales NIR y SWIR). entre febrero y mayo (dNBR) (Chuvieco *et al.*, 2019; Sobrino *et al.*, 2019) y se clasificó en niveles de afectación por el fuego según el estándar del USGS (United States Geological Survey): baja [0.1, 0.27]; moderada-baja [0.27, 0.44]; moderada-alta [0.44, 0.66]; alta [0.66, 1.33] (Sobrino *et al.*, 2019).

Tanto al dNBR como a las áreas quemadas PROBA-V de cada zona (acumulado anual). se les superpuso el vector de áreas quemadas de MODIS (acumulado anual).

## RESULTADOS

### DetECCIÓN

La Figura 2 muestra los mapas de las áreas quemadas identificadas en Michoacán en las series MODIS MCD64A1 y PROBA-V 300 m, acumuladas en el total del periodo considerado (2015-2020). Se observa que la serie PROBA-V identifica áreas quemadas en prácticamente toda la zona norte y centro del estado, mientras que en la serie MODIS las detecciones son puntuales.

La Figura 3a presenta las detecciones totales por año, para cada serie. En el periodo estudiado, la serie PROBA-V detecta un total de 308 699 píxeles de áreas quemadas y la serie MODIS, 19061, siendo el año 2016 el de mayor número de eventos en ambos casos, con 72 184 y 3915, respectivamente. El número de detecciones de PROBA-V es del orden de dieciséis veces superior al de MODIS. Esta disparidad no se explica por la diferencia de resoluciones espaciales (Tansey *et al.*, 2020). que, por otra parte, son en ambos casos insuficientes para la detección de áreas quemadas pequeñas (Chuvieco *et al.*, 2019).

La Figura 3b muestra el promedio de áreas quemadas por mes. PROBA-V reporta un gran número de estas todos los meses de diciembre a mayo, prácticamente ninguno en la época de lluvias, de julio a octubre, y muy pocos en los meses de junio, cuando inician las lluvias, y noviembre; en contraste, MODIS concentra las detecciones en abril y mayo, los meses más secos y calurosos del año. Este comportamiento es similar al reportado para América Central en las validaciones comparativas de PROBA-V contra MODIS (Tansey *et al.*, 2020). Tansey y Arellano (2016) señalan que la temporada de incendios en México ocurre durante los primeros meses del año y que las detecciones de PROBA-V (en ambas resoluciones, 1 km y 300 m) exceden a las de MODIS en el periodo seco de invierno; en Tansey *et al.* (2019) se confirman los meses de marzo y abril como la estación seca en la que se producen los incendios en México, lo que demostraría el mejor desempeño de PROBA-V frente a MODIS. La realidad, al menos en Michoacán, se ajusta más a los datos MODIS, ya que el mes con más incendios es tradicionalmente mayo, no marzo (Galván y Magaña, 2020; Manzo-Delgado, 2016).

Por tipo de cobertura (Figura 3c). en la serie PROBA-V, más de la mitad de las detecciones (56.65%) corresponden a bosque tropical seco, algo más de un cuarto (27.25%) a agricultura y solo el 13.57% a bosque templado; por su parte, MODIS detecta la mitad de las áreas quemadas (50.02%) en zonas agrícolas, casi un tercio (31.31%) en bosque templado y únicamente el 17.31% en bosque tropical seco.

### COINCIDENCIAS

La Figura 4 ilustra la comparación de las detecciones de la serie MODIS con respecto a PROBA-V, dándose la menor coincidencia en 2015, donde únicamente el 37.90% de las áreas quemadas detectadas por MODIS lo son también por PROBA-V; las mayores coincidencias se dan en 2016 con 77.44% y 2020 con 78.72%. El porcentaje de áreas quemadas detectadas por PROBA-V, que también son detectadas por MODIS, es mucho menor, pues no alcanza el 5% ni en el mejor de los casos, en 2018.

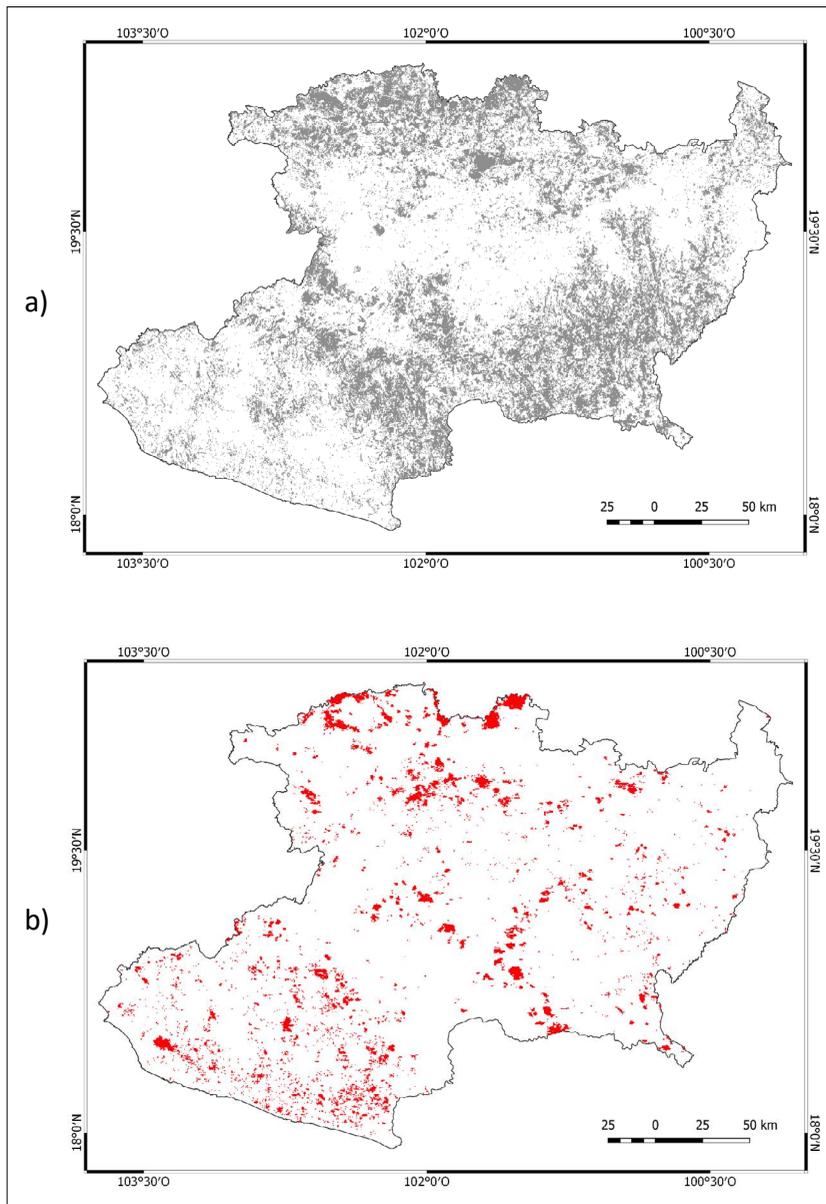


Figura 2. Áreas quemadas en el estado de Michoacán, México, en el periodo 2015-2020, reportadas en la serie PROBA-V 300m y la colección MCD64A1 de MODIS.

El análisis por coberturas muestra una gran coincidencia de las detecciones de MODIS con PROBA-V, que alcanza el 89.54% en agricultura (2016), y 82.81% en bosque templado y 85.31% en bosque tropical seco (2020). Sin embargo, solo el 10% de las áreas quemadas detectadas por PROBA-V coinciden con detecciones de MODIS, esto en agricultura y bosque templado. Es importante señalar la muy baja coincidencia de las detecciones

en bosque tropical seco, que no alcanza el 2% ningún año, lo que evidencia una sobredetección por parte de PROBA-V en este bioma.

### Casos ejemplo en imágenes Sentinel-2

Las Figuras 5 y 6 muestran ejemplos de algunas áreas quemadas detectadas (cuya ubicación se da en el mapa de la Figura 1), tal como aparecen en imágenes Sentinel-2 de enero a junio, visualizadas

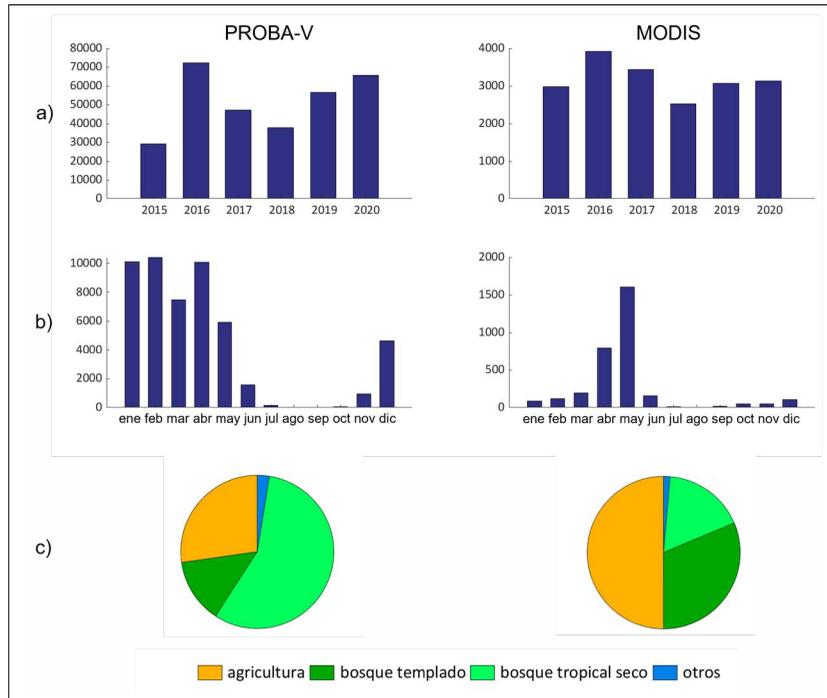


Figura 3. Áreas quemadas por año (a), mes (b) y cobertura (c) reportadas en las series PROBA-V 300 m y la colección MCD64A1 de MODIS, en Michoacán, México, en el periodo 2015-2020.

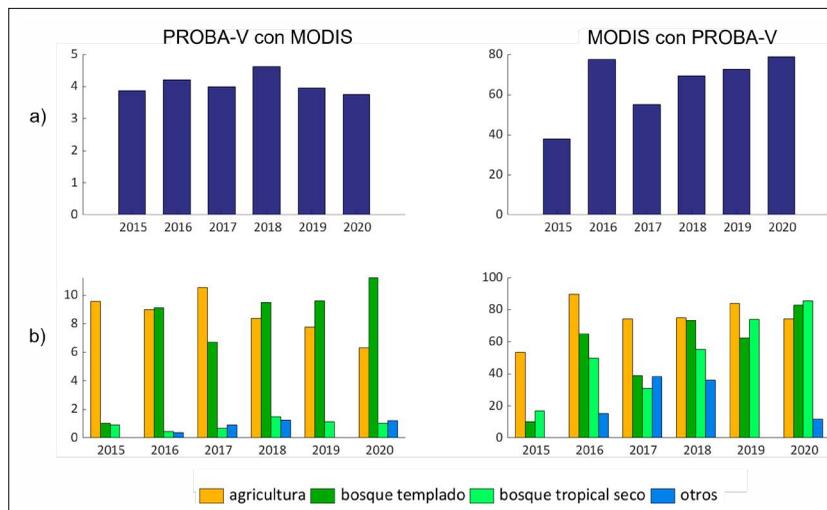


Figura 4. Coincidencia (en %) entre las áreas quemadas detectadas en la serie PROBA-V 300 m y en la colección MCD64A1 de MODIS, en el estado de Michoacán, México, en el periodo 2015-2020, por año (a) y cobertura (b).

en falso color infrarrojo. En la Figura 5, ejemplos a, b y c, se observan zonas de transición entre bosque templado y tropical seco, donde ocurrieron incendios. En el mes de enero hay vegetación verde (en rojo), que va desapareciendo en febrero y marzo; en abril la vegetación verde es escasa, reducida a zonas riparias y cumbres de montañas. En abril (Figura

5, ejemplo a) o mayo aparecen manchas negras, que corresponden a las cicatrices de los incendios; en junio, con el inicio de las lluvias, comienzan a desvanecerse (Figura 5, ejemplo b). El dNBR, calculado entre febrero y mayo, identifica en las zonas quemadas algunos puntos altamente afectados; sin embargo, este índice detecta otras zonas donde

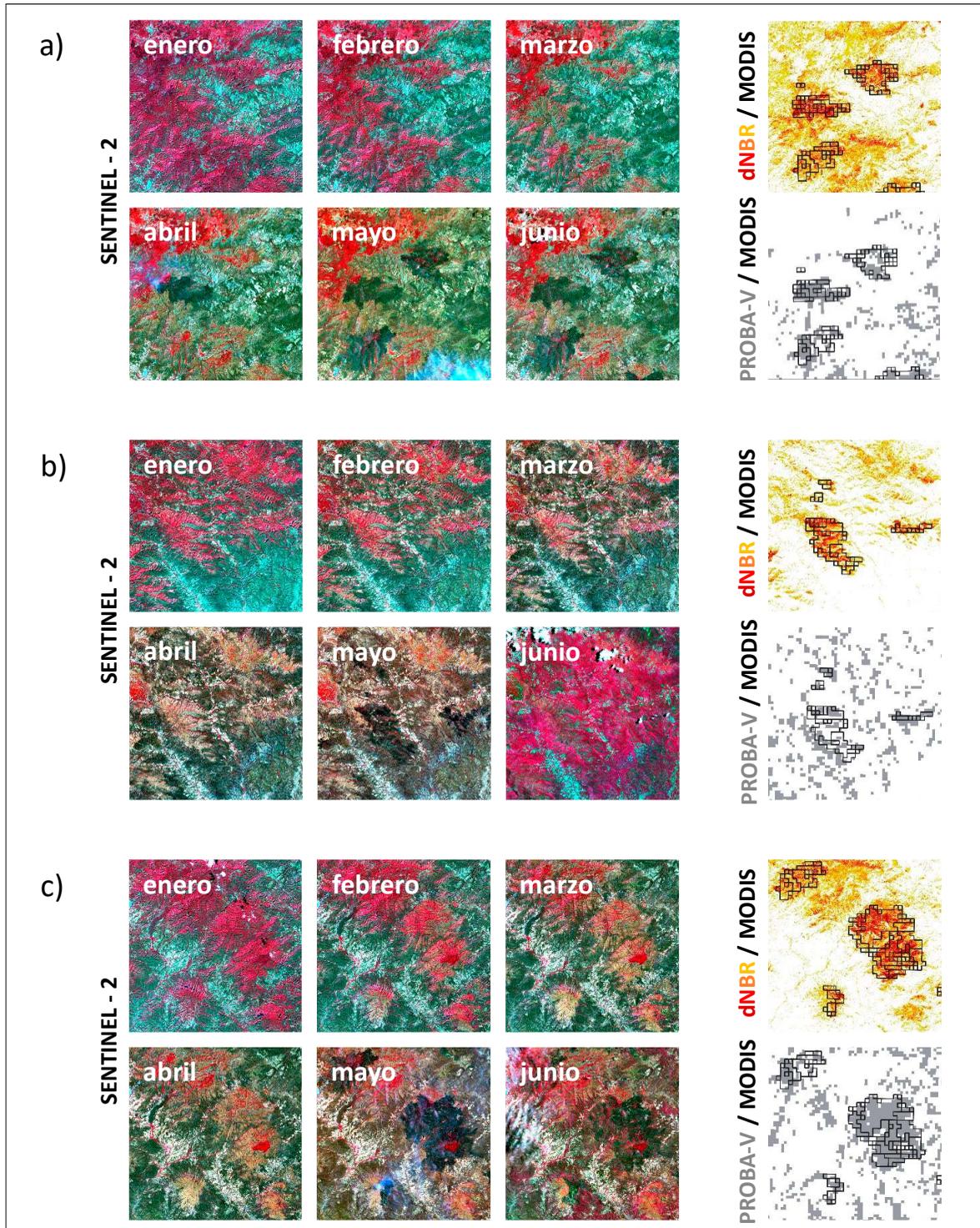


Figura 5. Ejemplos de áreas quemadas en bosque tropical seco a templado (ubicación en figura 1), en imágenes Sentinel-2 en falso color infrarrojo. Índice dNBR entre febrero y mayo; áreas quemadas en las series PROBA-V 300 m y MCD64A1 de MODIS del mismo año.

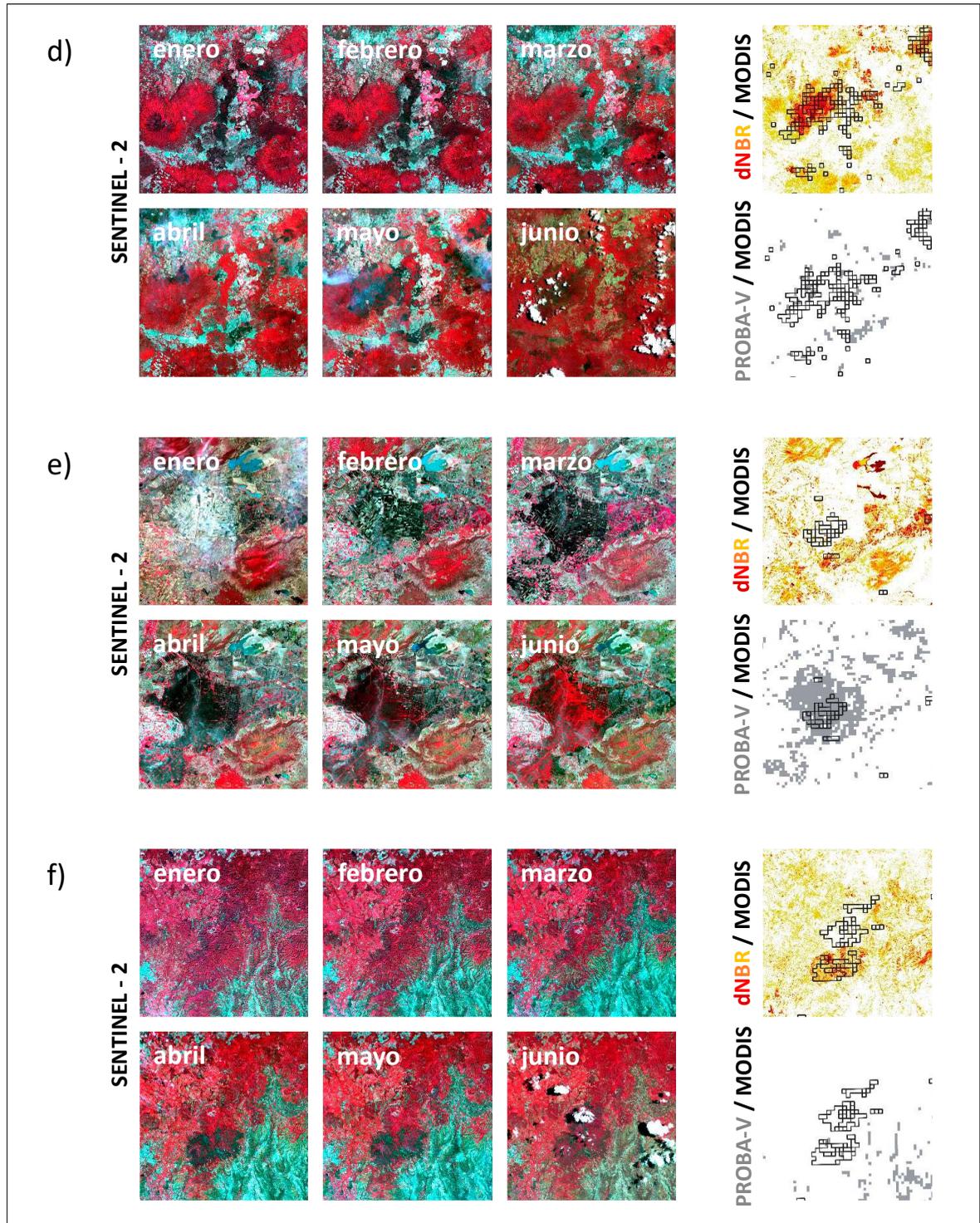


Figura 6. Ejemplos de áreas quemadas en bosque templado y agricultura (ubicación en figura 1), en imágenes Sentinel-2 en falso color infrarrojo. Índice dNBR entre febrero y mayo; áreas quemadas en las series PROBA-V 300 m y MCD64A1 de MODIS del mismo año.

las imágenes Sentinel-2 no evidencian quemas. Lo mismo ocurre con la detección de PROBA-V, que además de las zonas quemadas, señala otras que no lo están. Por su parte, MODIS identifica acertadamente las zonas quemadas.

La Figura 6, ejemplo d, muestra como ejemplo una zona de bosque templado que se mantiene verde todo el año, con una zona central de encino y matorrales, que parece ya quemada en enero y febrero y se recupera a partir de marzo. En los bosques, los incendios inician en abril y se extienden considerablemente en mayo. Se observan nubes de humo y cenizas incandescentes. El dNBR califica con afectación alta los principales incendios; sin embargo, identifica con afectación baja zonas no quemadas y no detecta las áreas quemadas en la parte central, por estar quemadas en febrero y verdes en mayo. MODIS detecta con bastante aproximación todas las áreas quemadas, mientras que los aciertos de PROBA-V son casuales.

La Figura 6, ejemplo e, muestra quemas agrícolas. En este caso, el dNBR no identifica bien la zona, por no existir diferencias entre febrero y mayo; MODIS la identifica parcialmente, mientras que la identificación de PROBA-V parece la más acertada. Finalmente, la Figura 6, ejemplo f, ejemplifica un incendio en una zona forestal aledaña a plantaciones de aguacate (principal cultivo en Michoacán). fácilmente identificables en falso color por el tono rojo más claro que el de los bosques. La zona quemada es evidente en la imagen de abril y se amplía hacia el norte en junio, lo que se aprecia debajo de la nube presente en la imagen de este mes. El dNBR detecta como altamente afectadas las zonas quemadas en abril (presentes en mayo). además de zonas no quemadas que califica como de baja afectación; no detecta la zona de junio, porque el índice se calculó entre mayo y febrero. MODIS sí detecta las zonas quemadas, mientras que la detección de PROBA-V es prácticamente nula.

## DISCUSIÓN

La detección automática de áreas quemadas no es una tarea sencilla. De las diferentes iniciativas existentes, ninguna cumple con el objetivo de

calidad de *Global Climate Observing System for Burned Area* (Padilla y Ramo, 2022). Los resultados varían dependiendo del bioma y la zona de estudio (Tansey *et al.*, 2020).

Algunos satélites tienen la capacidad de detectar incendios activos, porque estos emiten más radiación en forma de calor (infrarrojo térmico) que el ambiente circundante (Neger y Manzo-Delgado, 2021); si la diferencia supera ciertos umbrales, establecidos dentro de un algoritmo, se registra como una anomalía térmica (González-Gutiérrez *et al.*, 2020) o punto de calor. Es el caso de MODIS, con cuyos datos se generan los productos MDC64A1 y Fire\_CCI; también era la base de la versión 2 de PROBA-V (Padilla y Tansey, 2018). que no llegó a implementarse (Padilla, 2021). La identificación de puntos de calor, que se realiza usualmente en la noche, puede llevar a errores por la presencia de superficies altamente reflectivas, como nubes y cuerpos de agua, que se confunden con el fuego (Neger y Manzo-Delgado, 2021). Cuando los puntos calientes se detectan tanto en el día como en la noche, como en Sentinel-3, resulta necesario aplicar una máscara para el reflejo del sol y los bordes de las nubes; no se enmascaran, sin embargo, todas las zonas oceánicas, porque también interesa la detección de llamas de gas en alta mar (Polehampton *et al.*, 2023). El tamaño del incendio es otra limitante, por la baja resolución espacial de los datos; se considera que el uso de los puntos de calor, de acuerdo con las tasas de detección, son ideales para áreas quemadas que superen las 50 ha (González-Gutiérrez *et al.*, 2020). Resulta difícil, además, distinguir entre la generación de incendios forestales y las quemas en pastizales y cultivos (González-Gutiérrez *et al.*, 2020). así como en zonas urbanas, vías de transporte, vertederos de basura, etc., para lo cual es necesario superponer mapas detallados de coberturas.

Algunos satélites, como PROBA-V, no cuentan con la tecnología necesaria para detectar puntos de calor y basan la identificación de los incendios en los cambios que han provocado en la vegetación (Manzo-Delgado, 2016). Si bien esta metodología puede dar buenos resultados en algunos casos, no es una apuesta segura. Los índices basados en la detección de cambios en el NIR, o en la relación

NIR-SWIR, pueden fácilmente caer en errores de detección, principalmente en coberturas caducifolias, con cambios estacionales naturalmente abruptos. Resulta necesario realizar primero una selección de píxeles de zonas quemadas, como en el caso de las validaciones de los productos MODIS y PROBA-V con imágenes Landsat, donde se realiza primero una clasificación supervisada para identificar las zonas afectadas (Chuvienco *et al.*, 2019).

En el presente estudio, entre las series de tiempo de áreas quemadas actualmente disponibles, se compararon la colección PROBA-V 300 m y MD-C64A1 de MODIS, para el estado de Michoacán, en el periodo 2015-2020. Se trata de un ejercicio más local que los realizados a nivel continental (Tansey *et al.*, 2020) o nacional (Tansey y Arellano, 2016; Tansey *et al.*, 2019). Se encontró una relación de 16/1 en el número de áreas quemadas detectadas por PROBA-V y MODIS, concentrándose las diferencias en los bosques tropicales secos. Algunos ejemplos de incendios, al visualizarse en imágenes Sentinel-2, evidencian un mayor acierto de MODIS que de PROBA-V; también resulta más acertada la serie MODIS que el dNBR calculado (sin realizar una clasificación previa) a partir de las imágenes. Esto confirma la mayor confiabilidad de las series basadas en la identificación de incendios activos, como paso previo a la caracterización de las áreas quemadas, sobre aquellas basadas únicamente en los cambios sufridos por la vegetación, identificados a partir del cálculo de índices.

## RECOMENDACIONES

Las series de tiempo derivadas de datos satelitales constituyen, sin duda, una herramienta geográfica potente y novedosa, de gran valor para el análisis del territorio y del ambiente, pues permiten una visión global y objetiva de diferentes aspectos y su evolución en tiempos recientes. En el caso de los incendios, las series de áreas quemadas permiten realizar un monitoreo general y sistemático de los incendios ocurridos en un territorio, que puede ser útil para guiar y complementar los datos de campo y el análisis de imágenes satelitales. El apoyo en imágenes de alta resolución es importante para el

estudio detallado de zonas pequeñas, así como para evaluar el impacto del fuego y dar seguimiento al proceso de recuperación; resulta necesario, en este caso, clasificar la imagen para identificar las zonas quemadas, como paso previo a la evaluación de la afectación. Las series también pueden ser la base de estudios retrospectivos sobre la evolución del fenómeno de los incendios, en relación, por ejemplo, con el cambio climático, la deforestación o la expansión de la frontera agrícola o urbana.

Es importante, sin embargo, considerar que la exactitud y la pertinencia de cada serie depende de los datos y algoritmos utilizados para generarla, así como de las características de la zona de estudio. Entre las diferentes series de áreas quemadas disponibles, la recomendación es utilizar aquellas basadas en anomalías térmicas, en particular cuando en la zona se encuentran biomas caducifolios, con cambios estacionales drásticos. En todo caso, considerando que los satélites no identifican la cobertura quemada, es necesaria la superposición de mapas de uso de suelo, para distinguir los incendios forestales de las quemadas agrícolas o los puntos de calor urbanos.

Los satélites MODIS están llegando al final de su vida útil y, de hecho, ya se ha observado una disminución en la detección de puntos de calor (Neger y Manzo-Delgado, 2021); algo similar ocurre con PROBA-V, cuya vida útil se debía prolongar hasta 2019 (Wolters *et al.*, 2018). Los datos VIIRS de Suomi NPP están tomando el relevo por parte de la NASA, así como los de Sentinel-3, por la ESA. Si bien, por el momento, la generación de una serie de áreas quemadas con datos Sentinel-3 sigue en fase de demostración (Padilla y Ramo, 2022), podemos confiar en la permanente disponibilidad de series de áreas quemadas, además de otras variables biofísicas y climáticas, que permitirán la realización de estudios ambientales, con datos cada vez de mayor calidad y de periodos más largos.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## REFERENCIAS

- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanase, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I., Heil, A., Hawbaker, T. J. y Giglio L. (2019). Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225, 45-64. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>
- Chuvieco, E., Yue, C., Heil, A., Mouillot, F., Alonso-Canas, I., Padilla, M., Pereira, J. M., Oom, D. y Tansey, A. (2016). A new global burned area product for climate assessment of fire impacts. *Global Ecology and Biogeography*, 25, 619-629. DOI: <http://doi.org/10.1111/geb.12440>
- Durán, C. V. y Sevilla, P. F. (2003). *Atlas geográfico del estado de Michoacán*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, El Colegio de Michoacán, Secretaría de Educación en el estado de Michoacán. EDDISSA.
- Franquesa, M., Pettinari, M. L., Lizundia-Loiola, J. y Chuvieco, E. (2021). Product quality assurance document. CDR and ICDR Sentinel-3 fire burned area. Copernicus Climate Change Service. Recuperado de [http://datastore.copernicus-climate.eu/documents/satellite-fire-burned-area/D2.2.15-v1.1\\_PQAD\\_CDR-ICDR\\_BA\\_SENTINEL3\\_v1.0\\_PRODUCTS\\_v1.4.1.pdf](http://datastore.copernicus-climate.eu/documents/satellite-fire-burned-area/D2.2.15-v1.1_PQAD_CDR-ICDR_BA_SENTINEL3_v1.0_PRODUCTS_v1.4.1.pdf)
- Galván, L. y Magaña, V. (2020). Forest fires in Mexico: an approach to estimate fire probabilities. *International Journal of Wildland Fire*, 29, 753-763. DOI: <http://doi.org/10.1071/WF19057>
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D.P., Hoffmann, A. A., Humber, M. y Hall, J. V. (2020). Collection 6 MODIS Burned area product user's guide. Version 1.3. Recuperado de [https://lpdaac.usgs.gov/documents/875/MCD64\\_User\\_Guide\\_V6.pdf](https://lpdaac.usgs.gov/documents/875/MCD64_User_Guide_V6.pdf)
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Humber, M. y Justice, C. O. (2018). The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of the Environment*, 217, 72-85. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>
- Giglio, L., Schroeder, W., Hall, J. V. y Justice, C. O. (2021). MODIS Collection 6 and Collection 6.1 Active Fire Product User's Guide. Version 1.0. Recuperado de [https://modis-fire.umd.edu/files/MODIS\\_C6\\_C6.1\\_Fire\\_User\\_Guide\\_1.0.pdf](https://modis-fire.umd.edu/files/MODIS_C6_C6.1_Fire_User_Guide_1.0.pdf)
- Giglio, L., van der Werf, G.R., Randerson, J. T., Collatz, G. J. y Kasibhatla, P. (2006). Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 957-974. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-6-957-2006>
- González-Gutiérrez, I., Mas-Causel, J. F., Morales-Manilla, L. M. y Ocegüera-Salazar, K. A. (2020). Thematic accuracy of hotspots and wildfires in Michoacán, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 17-35. [https://revistas.chapingo.mx/forestale/last\\_issues/?section=articles&subsec=issues&numero=279&articulo=2638](https://revistas.chapingo.mx/forestale/last_issues/?section=articles&subsec=issues&numero=279&articulo=2638)
- Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., Smith, A. J. P., Burton, C., Betts, R. A., van der Werf, G. R., Sitch, S., Canadell, J. G., Santín, C., Kolden, C., Doerr, S. H. y Le Quéré, C. (2020). Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics*, 60, 1-76. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>
- Justice, C., Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D., Csizsar, I., Morisette, J. y Kaufman, Y. (2006). Algorithm technical background document. MODIS fire products. Recuperado de [https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod14.pdf](https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf)
- Manzo-Delgado, L. L. (2016). Incendios forestales de gran relevancia: algoritmos y sensor MODIS para su detección y monitoreo. En O. Mocada, A. López (Eds.), *Geografía de México* (pp. 334-349). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Neger, C. y Manzo-Delgado, L. L. (2021). La evaluación de la gestión del riesgo de los incendios forestales en áreas naturales protegidas tropicales: el caso de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas (México). *Cuadernos Geográficos*, 60(3): 95-128. DOI: <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i3.16236>
- Padilla, M. (2021). Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy", "CGLOPS-1". Algorithm theoretical basis document. Burned area and seasonality. Collection 300m, Version 3. Recuperado de [https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1\\_ATBD\\_BA300m-V3\\_I1.10.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_ATBD_BA300m-V3_I1.10.pdf)
- Padilla, M. y Ramo, R. (2022). Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy", "CGLOPS-1". Quality assessment report. Burned Area. Version 1 and version 3. Recuperado de [https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1\\_QAR\\_S3-BA300m-V1-V3\\_I1.10.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_QAR_S3-BA300m-V1-V3_I1.10.pdf)
- Padilla, M. y Tansey, K. (2018). An improved burned area algorithm designed for PROBA-V by the Copernicus Global Land Service. *Geophysical Research Abstracts*, 20, EGU2018-6417. In EGU General Assembly Conference Abstracts. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-6417.pdf>
- Polehampton, E., Cox, C., Smith, D., Ghent, D., Wooster, M., Xu, W., Bruniquel, J., Henocq, C. y Dransfeld, S. (2023). *Copernicus Sentinel-3 SLSTR Land User Handbook*. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/documents/247904/4598082/Sentinel-3-SLSTR-Land-Handbook.pdf>

- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Limusa.
- Smets, B., Tansey, K., Wolfs, D., y Jacobs, T. (2017). Copernicus Global Land Operations “Vegetation and Energy”, “CGLOPS-1”. Product user manual. Collection 300m, Version 1. Recuperado de [https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1\\_PUM\\_BA300m-V1\\_I1.40.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_PUM_BA300m-V1_I1.40.pdf)
- Sobrino, J. A., Llorens, R., Fernández, C., Fernández-Alonso, J. M. y Vega, J. A. (2019). Relationship between soil burn severity in forest fires measured in situ and through spectral indices of remote detection. *Forests*, 10(5). 457. DOI: <http://doi.org/10.3390/f10050457>
- Sofan, P., Yulianto, F. y Sakti, A. D. (2022). Characteristics of False-Positive Active Fires for Biomass Burning Monitoring in Indonesia from VIIRS Data and Local Geo-Features. *International Journal of Geo-Information*, 11(12), 601. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi11120601>
- Tansey, K. y Arellano, P. (2016). Gio Global Land Component – Lot I, “Operation of the Global Land Component”. Quality assessment report. Burned area and seasonality. Collection 300m, Version 1. Recuperado de [https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/GIOGL1\\_QAR\\_BA300m-V1\\_I2.00.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/GIOGL1_QAR_BA300m-V1_I2.00.pdf)
- Tansey, K., Razul, A. y Ibrahim, S. (2019). Copernicus Global Land Operations “Vegetation and Energy”, “CGLOPS-1”. Scientific quality evaluation. Burned area. Collection 300m for 2017 and 2018, Version 1. Recuperado de [https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1\\_SQE2017-2018\\_BA300m-V1\\_I1.10.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_SQE2017-2018_BA300m-V1_I1.10.pdf)
- Tansey, K., Razul, A. y Ibrahim, S. (2020). Copernicus Global Land Operations “Vegetation and Energy”, “CGLOPS-1”. Scientific quality evaluation. Burned area. Collection 300m for 2019, Version 1. Recuperado de [https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1\\_SQE2019\\_BA300m-V1\\_I1.00.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_SQE2019_BA300m-V1_I1.00.pdf)
- Tansey, K. y Wolfs, D. (2017). Copernicus Global Land Operations “Vegetation and Energy”, “CGLOPS-1”. Algorithm theoretical basis document. Burned area and seasonality. Collection 300m, Version 1. Recuperado de [https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1\\_ATBD\\_BA300m-V1\\_I1.20.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_ATBD_BA300m-V1_I1.20.pdf)
- Wolfs, D. y Tansey, K. (2020). Copernicus Global Land Operations “Vegetation and Energy”, “CGLOPS-1”. Product user manual. Burned area and seasonality from Sentinel-3. Collection 300m, Version 1. Recuperado de [https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1\\_PUM\\_S3-BA300m-V1\\_I1.00\\_1.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_PUM_S3-BA300m-V1_I1.00_1.pdf)
- Wolters, E., Dierckx, W., Iordache, M. D. y Swinnen E. (2018). PROBA-V Products User Manual v3.01. Recuperado de [https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/products\\_user\\_manual.pdf/1fadd6f9-0c5a-b75a-ed23-18c082d8fb7b](https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/products_user_manual.pdf/1fadd6f9-0c5a-b75a-ed23-18c082d8fb7b)
- Wooster, M. J., y Xu, W. (2022). Sentinel-3 SLSTR level 2 active fire detection and FRP product algorithm. King’s College London, University of London. Sentinel-3 L2 products and algorithm definition. Recuperado de [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/4781373/S3-L2-SD-03-T04-KCL-ATBD\\_FIREPRODUCT%20-%20v5.1%20\(15-Feb-2022\).pdf/b85c77c1-ebec-8941-615b-e2c9814d0dbc](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/4781373/S3-L2-SD-03-T04-KCL-ATBD_FIREPRODUCT%20-%20v5.1%20(15-Feb-2022).pdf/b85c77c1-ebec-8941-615b-e2c9814d0dbc)