
Análisis cartográfico de los incendios

ocurridos en la vertiente sur
del Parque Nacional Henri Pittier,
Venezuela, entre 1990 y 2020

Cartographic and meteorological analysis of the fires that occurred
at the southern slope of the Henri Pittier National Park,
Venezuela, between 1990 and 2020

Miguel Ilianovich Silva Borges¹

Antonio José Chadd Badra²

Juan Carlos Rey³

Naghely María Mendoza Díaz¹

¹ Universidad Central de Venezuela, Departamento / Instituto de Ingeniería Agrícola
Maracay, Venezuela

² Universidad Yacambú, Facultad de Ciencias Jurídicas y Políticas. Barquisimeto, Venezuela

³ Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Maracay, Venezuela.
climamiguel48@gmail.com; academicoabg@gmail.com; jcrey67@gmail.com; naghely.mendoza@gmail.com

Silva: <https://orcid.org/0000-0003-0300-8393>

Chadd: <https://orcid.org/0000-0002-4753-3133>

Rey: <https://orcid.org/0000-0001-7271-3606>

Mendoza: <https://orcid.org/0000-0003-1973-5114>

Resumen

Los incendios forestales representan una de las mayores amenazas a la biodiversidad de los ecosistemas, por lo que su control, con base en diferentes herramientas, es fundamental para lograr una vigilancia eficiente y garantizar la sostenibilidad ambiental para el futuro. En este estudio se cartografiaron los incendios ocurridos en la vertiente de sur del Parque Nacional Henri Pittier a partir de la clasificación supervisada de 9 imágenes satelitales mediante vectores de soporte entre 1990 y 2020. Se complementó la cartografía con datos del proyecto FIRMS, con relación al número de incendios ocurridos en la vertiente. Los resultados de los indicadores de validación demostraron una buena eficiencia del clasificador. Las áreas cartografiadas oscilaron entre 1,63 km² para 2015 hasta 39,22 km² en 2020. En este último año se registraron 287 incendios en contraste con 2017, que sólo registró uno. Se constató el año 2020 como el de mayor incidencia de incendios, asociado posiblemente a condiciones extremadamente secas y altas temperaturas. Se discute adicionalmente el papel antrópico en estos eventos.

PALABRAS CLAVE: incendios, ambiental, forestal, imágenes, biodiversidad.

Abstract

Forest fire represent one of the greatest threats to the biodiversity of ecosystems, so their control based on different tools is essential to achieve efficient surveillance and guarantee environmental sustainability for the future. In this study, the fires that occurred on the southern slope of the Henri Pittier National Park were mapped from the supervised classification of 9 satellite images using support vector machine between 1990 and 2020. The cartography of the fires was complemented by the FIRMS project data, in relation to the number of fires that occurred on the slope. The results of the Kappa index and overall precision demonstrated excellent classifier efficiency. Mapped fire areas ranged from 1.63 km² in 2015 to 39.22 km² in 2020. This last year registered 287 fires in contrast to 2017, which only registered one. The year 2020 was found to be the year with the highest incidence of fires, possibly associated with extremely dry conditions and high temperatures. The anthropic role in these events is further discussed.

KEYWORDS: fires, environmental, forestry, images, biodiversity.

1. Introducción

Los incendios son los fenómenos más devastadores de la naturaleza, capaces de modificar la dinámica ambiental, ya que juegan un papel determinante de la estructura del paisaje y, a su vez, en las propiedades edáficas del suelo, en el aumento del riesgo de erosión e inclusive en la composición de las especies (FAO, 2007). Por tanto, los incendios representan una amenaza para los sistemas naturales y, al mismo tiempo, para las sociedades humanas que alteran estos sistemas. Con el aumento demográfico y la destrucción del ambiente para el desarrollo de ciudades y campos agrícolas, el ser humano ha intervenido en la ocurrencia de fenómenos naturales (Reynosa, 2016) y ha quedado expuesto a los efectos de los incendios, cada vez más devastadores, que han cobrado miles de vidas (Kizer, 2020). Adicionalmente, el cambio climático de origen antropogénico ha exacerbado la temperatura del aire, con la consecuente generación de incendios forestales (Bush, 2020), los cuales tenderán a ser más numerosos a medida que se intensifique el cambio climático (IPCC, 2014). En este contexto, se ha pronosticado para el año 2030 la reducción a la mitad de la superficie ocupada por bosques a nivel mundial, debido a incendios y a la tala de bosques tropicales lluviosos (Kuhrt *et al.*, 2001).

Queda en evidencia la importancia que reviste llevar a cabo estudios sobre los efectos y los impactos que han generado los incendios, en aras de plantear las medidas estratégicas y de planificación para enfrentar esta problemática. Para ello, la teledetección brinda herramientas que permiten realizar diferentes análisis de los efectos causados por estos eventos (Chuvienco y Cocero, 2004), gracias a la capacidad de los sensores a bordo de los satélites de captar grandes extensiones de superficie terrestre mediante la toma de imágenes, así como registrar el componente

electromagnético reflejado, imprescindible para discriminar la señal de una superficie presuntamente quemada.

Para lograr esto se han desarrollado diferentes enfoques en el análisis y evaluación de áreas quemadas a partir de imágenes satelitales, de las cuales cabría resaltar: la estimación de índices multispectrales (Peña, 2018), análisis de mezcla espectral de imágenes hiper espectrales (Tane *et al.*, 2018), técnicas de clasificación de imágenes (Meng *et al.*, 2018) y fotointerpretación visual a través de combinación de bandas (Navazo *et al.*, 2016). Es importante mencionar que cada metodología tiene su utilidad y aplicación, demostrando que la teledetección ofrece múltiples alternativas para la caracterización de superficies afectadas por incendios.

Por su parte, en Venezuela se ha establecido un sistema de parques nacionales, cuyo fin es la preservación de su patrimonio natural. Una de las áreas protegidas más conocidas y afectadas por incendios es el Parque Nacional Henri Pittier. Este parque es una de las reservas naturales más importantes del país, con una riqueza biótica incomparable, que ha sufrido los embates de incendios recurrentes, principalmente en su vertiente sur. Cada año, con la disminución de los bosques, se generan alteraciones térmicas y aumentos de temperatura, lo cual puede facilitar la erosión, debido a las áreas afectadas por los incendios ocurridos durante la época seca (Abarca y Quiroz, 2005). No obstante, y a pesar de la importancia que representa este fenómeno para el parque, no se ha evaluado la magnitud ni la extensión espacial de los daños generados por estos eventos. Una valoración de las áreas afectadas por los incendios acaecidos en esta vertiente permitirá comprobar si las áreas susceptibles a estos se han visto afectadas, así como formular las estrategias de adaptación y protección del parque frente a esta problemática ambiental.

Por lo expuesto, el objetivo de este estudio fue cartografiar las áreas afectadas por incendios en la vertiente sur del Parque Nacional Henri Pittier para el periodo 1990 al 2020, a través de la interpretación de imágenes mediante combinación de bandas para resaltar la huella de incendio, y la posterior clasificación de estas imágenes, y así estimar la extensión de las áreas afectadas. Adicionalmente, estos resultados se complementaron con los datos de registros de incendios generados por el proyecto Datos del Sistema de Información sobre Incendios para Gestión de Recursos (FIRMS por sus siglas en inglés) de la NASA.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio está comprendida por la vertiente sur del Parque Nacional Henri Pittier, específicamente la parte correspondiente a los municipios Girardot y Mario Briceño Iragorry del estado Aragua de la República Bolivariana de Venezuela. Este parque se localiza astronómicamente entre 10° 14'25" y 10° 32'40" de latitud Norte y 67° 24'36" y 67° 52'54" de longitud Oeste (FIGURA 1). Se ubica geográficamente en la sección occidental del tramo central de la cordillera de la Costa. Limita al norte con el litoral caribe y al sur con las bajas vertientes que caen a la depresión del lago de Valencia, en los alrededores de las ciudades Turmero y Maracay del estado Aragua, y el municipio San Joaquín del estado Carabobo. La extensión total del parque es de 1.078 km² aproximadamente. La parte de la vertiente sur escogida para el estudio abarca un área de 106.78 km². La fisiografía de esta vertiente la componen laderas empinadas con filas agudas entremezcladas en dirección norte-sur que inician hacia el eje orográfico mayor de la cordillera de la Costa y descienden hacia la depresión del lago de Valencia, con una red hidrográfica que drena hacia la cuenca del lago (Muñoz *et al.*, 2006).

Con relación al clima, la altitud y la disposición del sistema montañoso definen sus temperaturas y lluvias. En la vertiente sur predomina el tipo climático mesotérmico húmedo con temperaturas medias anuales que oscilan entre 20 °C a 25 °C y con promedios anuales de lluvias que van desde 897 a 1.695 mm/año; por otro lado, las lluvias son unimodales con el pico lluvioso entre julio-agosto. La vegetación es altamente densa hacia la parte más alta de la vertiente consistente en bosques deciduos y semideciduos, mientras que hacia zonas medias y bajas está integrada principalmente por gramíneas y matorrales (Muñoz *et al.*, 2006).

2.2 Procesamiento de imágenes de satélite

Se emplearon las imágenes captadas por el instrumento TM a bordo del satélite Landsat 5, ETM + del Landsat 7 y por los instrumentos OLI y TIRS del Landsat 8, pertenecientes a la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estas imágenes fueron descargadas a través del portal: <https://landlook.usgs.gov/landlook/viewer.html>.

Para comparar los cambios en la extensión espacial de los incendios en diferentes momentos, se eligió la mayor cantidad de imágenes tomadas en la zona de estudio con la menor cantidad de nubes posibles, desde el inicio de las misiones de los satélites.

Por otra parte, debido a la marcada estacionalidad, la relación secuencial de los periodos seco y húmedo, se eligieron imágenes que fueron tomadas al final del periodo seco, donde la baja disponibilidad hídrica, causa el punto de marchitez permanente de la vegetación gramíniforme y es más probable la aparición de incendios. Por lo tanto, se utilizaron imágenes tomadas entre marzo y abril. Los incendios se identificaron de acuerdo al año de cada imagen. En la TABLA 1 se muestran los datos de las imágenes que cumplieron los requisitos anteriormente expuestos.

FIGURA 1. Detalle de la vertiente sur del Parque Nacional Henri Pittier, a través de una imagen en color natural tomada por el sensor OLI/TIRS del Landsat 8, correspondiente al 11 de abril de 2020

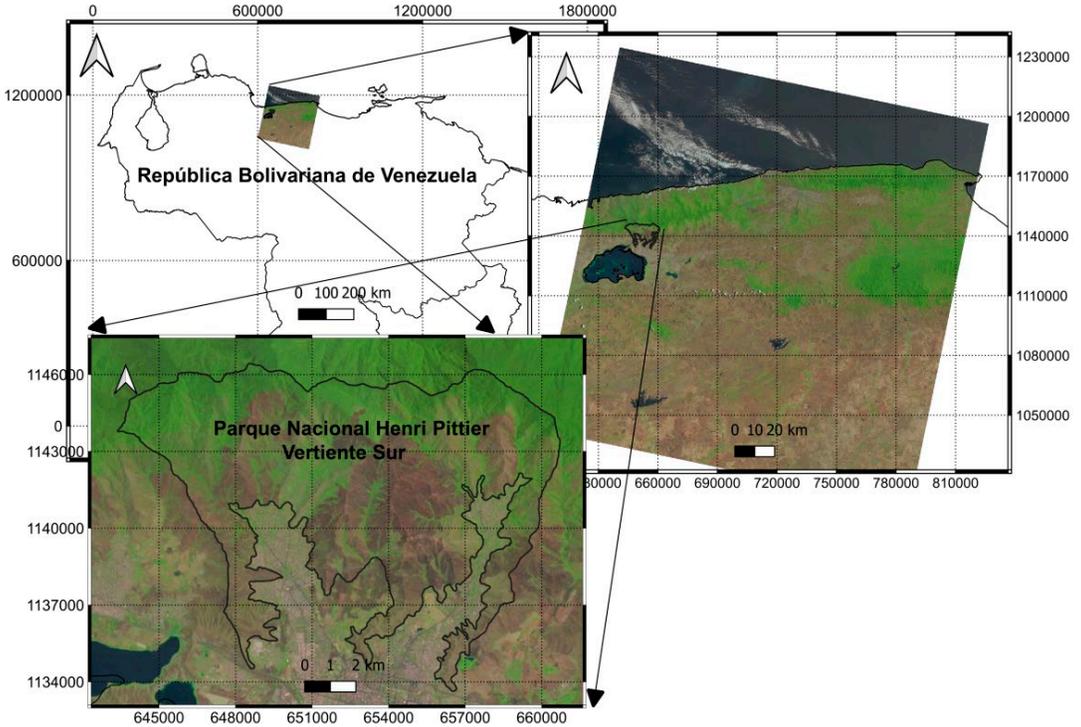


TABLA 1. Características de las imágenes seleccionadas para el estudio

Incendios	Satélite	Sensor	Fechas de las imágenes
1990	Landsat 5	TM	09 de abril, 1990
1998			14 de marzo, 1998
2003	Landsat 7	ETM +	20 de marzo, 2003
2014	Landsat 8	OLI/TIRS	10 de marzo, 2014
2015			30 de abril, 2015
2017			18 de marzo, 2017
2018			21 de marzo, 2018
2019			24 de marzo, 2019
2020			11 de abril, 2020

Las imágenes del sensor TM del Landsat 5 presentan 7 bandas con una resolución espacial de 30 metros. Mientras que el sensor EMT+ registra 8 bandas con una resolución espacial de 30 metros

y una pancromática de 15 metros. Ambos sensores tienen una resolución radiométrica de 8 bits y una resolución temporal de 16 días. Por su parte, las imágenes de los sensores OLI y TIRS del Landsat 8,

presentan 11 bandas con una resolución espacial de 30 metros, a excepción de la pancromática de 15 metros, una resolución radiométrica de 12 bits y una resolución temporal de 16 días (LANDSAT SPPA Team, 2015). Todos los sensores de los satélites Landsat registran la banda térmica a más de 100 m de resolución (banda 6 en TM y EMT + y bandas 10 y 11 en TIRS), pero son remuestreadas a 30 m.

Por otro lado, el *path* y el *row* de las imágenes fueron 004 y 053 respectivamente. Estas imágenes se re proyectaron al sistema de referencia SIRGAS-REGVEN, debido a que es el Datum oficial de la República Bolivariana de Venezuela. Las imágenes fueron descargadas en el nivel de procesamiento L1TP, en el cual ya cuentan con precisión geométrica y geodésica (LANDSAT SPPA Team, 2015).

Las imágenes fueron corregidas atmosféricamente mediante el método de sustracción de objeto oscuro o DOS1 (Chavez, 1996) configurado en el *plugin* de clasificación semiautomática del gestor de sistemas de información geográfica QGIS versión 2.1.4 *Essen*. Por otra parte, debido a la presencia de relieve irregular, la imágenes se corrigieron topográficamente por el método de corrección *Minnaert* con pendiente (Law y Nichol, 2004), mediante el sistema de análisis geocientífico SAGA versión 7.6.2, con el apoyo de un modelo digital de superficie ALOS World 3D, con una resolución de 30 metros (AW3D30) versión 3.1, descargado de <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.

2.3 Clasificación de coberturas

La clasificación de las coberturas se realizó con el objetivo de delimitar del área afectada por los incendios. Para esto, se decidió aplicar una clasificación de las coberturas presentes en la vertiente mediante la interpretación visual a partir de la combinación de las bandas de las imágenes. Esto, con la finalidad de generar el mejor contraste y

resalte de área de interés a través de la generación de una imagen en falso color. Posteriormente, se llevó a cabo una clasificación supervisada basada en píxeles (Khatami *et al.*, 2016), a partir de muestras tomadas de las imágenes. Se utilizó esta metodología por considerarla sencilla y eficiente en la clasificación de imágenes donde no es posible tomar muestras físicas de la zona de estudio, debido a recursos reducidos y/o por tratarse de clasificaciones de eventos ocurridos en imágenes antiguas, ya recuperados, como las huellas de los incendios.

En este sentido y gracias a la heterogeneidad de los píxeles de las imágenes, se plantearon las clases: vegetación fotosintéticamente activa (FA), vegetación en punto de marchitez permanente (PMP) y huella de incendio (HI). Esta clasificación se estableció debido a que en el área de estudio confluyen, tanto vegetación sana como vegetación a punto de marchitez permanente, en virtud de las condiciones naturales propias de la superficie analizada para la fecha de captación de las imágenes. Así entonces, en el caso de PMP, la vegetación carece totalmente de material fotosintético, lo cual genera cambios en sus reflectancias, pudiendo asemejarse a las del material quemado por el incendio forestal. Sin embargo, se constató que las reflectancias del área quemada son menores en el espectro visible y mayor en el térmico que la vegetación en PMP tal como se puede apreciar en la FIGURA 2, y los píxeles de las clases planteadas pudieron diferenciarse claramente en las imágenes (FIGURA 3).

La clasificación de coberturas se realizó mediante el algoritmo de aprendizaje automatizado conocido como vectores de soporte (SVM por sus siglas en inglés), (Mountrakis *et al.*, 2011). Para realizar la clasificación se vectorizaron polígonos de entrenamiento en imágenes coloreadas en falso color, en la cual se utilizó la banda termal, el infrarrojo cercano y rojo, mediante la cual se pudo lograr un adecuado contraste entre las clases

FIGURA 2. Reflectancias de las diferentes clases planteadas para la investigación de acuerdo a cada número de banda.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

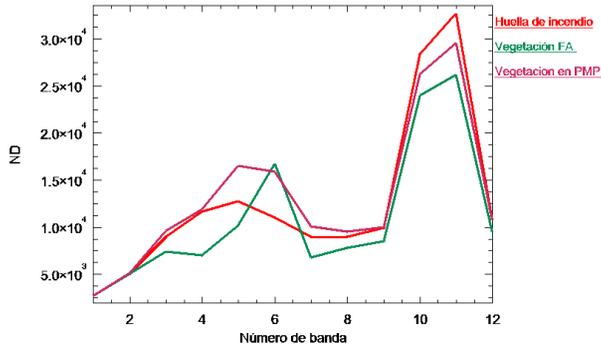
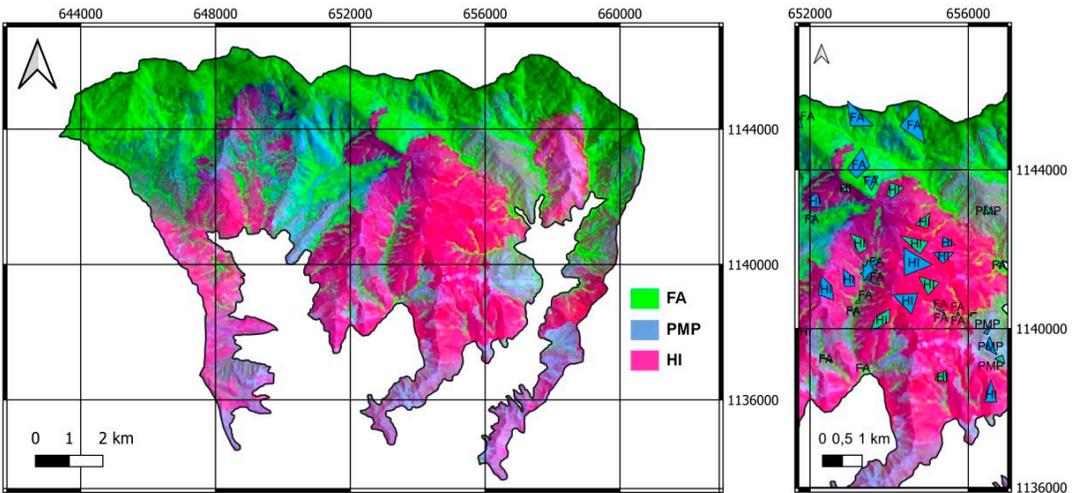


FIGURA 3. Imagen en falso color donde se resaltan las tres clases planteadas para las clasificaciones de las imágenes (A) y detalle de los polígonos de entrenamiento en azul y de validación en verde (B) de acuerdo a cada clase: (FA: vegetación fotosintéticamente activa; PMP: punto de marchitez permanente; HI: huella de incendio).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



y resaltar la huella del incendio (FIGURA 3). El falso color se logró con la banda 10 para el rojo, 5 para el verde y 4 para el azul en las imágenes OLI/TIRS y la banda 6 para el rojo, 4 para el verde y 3 para el azul en las imágenes TM y ETM+.

La eficiencia del clasificador fue verificada mediante polígonos de validación que fueron vectorizados a partir de las mismas imágenes en falso color, en áreas donde no se vectorizaron los

polígonos de entrenamiento. En la TABLA 2 se encuentra la cantidad de polígonos de entrenamiento y de validación para todas las imágenes, así como la cantidad de píxeles para cada polígono. Para esta validación se aplicaron matrices de confusión y el índice de kappa. La FIGURA 3 muestra los colores resultantes de la combinación para una imagen del 11 de abril de 2020 (A), así como los polígonos de entrenamiento en azul y de validación en verde (B).

TABLA 2. Número de polígonos y píxeles por cada clase (FA; vegetación fotosintéticamente activa; PMP: punto de marchitez permanente; HI: huella de incendio).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Imagen	Clase	Entrenamiento		Validación	
		No. de Polígonos	No. de píxeles	No. de Polígonos	No. de píxeles
1990	FA	14	1082	10	520
	PMP	11	527	11	382
	HI	19	1243	13	1054
1998	FA	9	2581	7	1174
	PMP	9	1036	14	856
	HI	8	729	9	655
2003	FA	19	1886	14	1714
	PMP	8	386	9	429
	HI	12	2917	10	1446
2014	FA	12	1348	9	2602
	PMP	21	777	8	987
	HI	14	1975	9	267
2015	FA	11	2300	15	1578
	PMP	12	636	9	895
	HI	12	678	10	243
2017	FA	8	2244	8	1371
	PMP	9	846	11	884
	HI	3	326	5	161
2018	FA	8	5113	9	4004
	PMP	13	810	8	451
	HI	7	1250	7	1020
2019	FA	9	2954	8	1518
	PMP	10	1015	10	983
	HI	9	1138	7	666
2020	FA	21	2488	11	1616
	PMP	8	289	7	150
	HI	12	1449	10	896

2.4 Datos del FIRMS

Se complementó la cartografía de los incendios con los datos del sistema de información sobre incendios para gestión de recursos (FIRMS por sus siglas en inglés), (Davies, 2008), el cual proporciona el número de incendios registrados por el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) a bordo de los satélites Aqua y Terra, y el conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles (VIIRS) a bordo de S-NPP y NOAA 20. Los registros del FIRMS se encuentran disponibles en <https://firms.modaps>.

eosdis.nasa.gov/. Estos registros abarcan desde 2012 hasta el 2020.

3. Resultados

3.1 Clasificación de imágenes y áreas de huellas de incendios

Al observar los resultados de las clasificaciones de las coberturas que se encuentran en la **TABLA 3**, se puede detallar que los valores resultantes del clasificador referente a la precisión global y al índice de kappa demuestran la eficiencia del

TABLA 3. Resultados del índice de Kappa y precisión global para cada imagen clasificada.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	1990	1998	2003	2014	2015	2017	2018	2019	2020
Coefficiente de Kappa	0.996	0.94	0.91	0.98	0.996	0.93	0.96	0.97	0.992
Precisión global	0.99	0.95	0.92	0.96	0.998	0.94	0.94	0.94	0.996

aprendizaje automatizado. En este caso, la máquina de soporte de vectores, al generar valores por encima de 0.9, garantiza una clasificación excelente de las coberturas planteadas del área de estudio para cada imagen, y una mayor confiabilidad de los polígonos de las huellas de incendios extraídos y cartografiados.

Con relación al área estimada y a las proporciones afectadas por los incendios, la **FIGURA 4** ilustra el espacio afectado en las imágenes analizadas, donde se comprobó en todos los años la presencia de huellas de incendios. Los valores oscilaron entre 1.63 km² en el año 2015 hasta 39.22 km² en 2020, siendo este último año, el que presentó la mayor extensión de área afectada en la vertiente de todos los años estudiados, equivalente al 36.73%

del área total. El año 2003 también registró una importante área afectada, equivalente a 35.61 km², representando esto el 33.35% de la vertiente. En contraste, los años menos afectados fueron el 2015 y 2017, con huellas de incendios en el año 2015 de 1,63 km² y una proporción de 1,53%, mientras que en el 2017 se afectaron 2.21 km² de la vertiente con una proporción de 2.07 %.

La estimación del área de las huellas de incendios estuvo en concordancia con los resultados del número de incendios registrados por el FIRMS (**FIGURA 5**). De acuerdo a esta fuente, entre 2012 y 2020 se registraron 726 incendios en la vertiente. El año 2020 no solamente presentó la mayor extensión de áreas quemadas, también registró la mayor cantidad de incendios, con una

FIGURA 4. Área en km² (A) y proporción (B) de la vertiente sur del Parque Nacional Henri Pittier afectada por incendios para cada imagen analizada.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

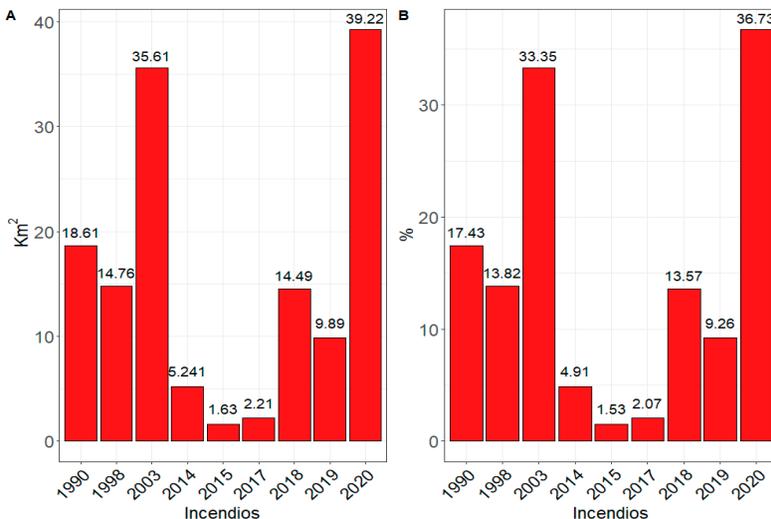
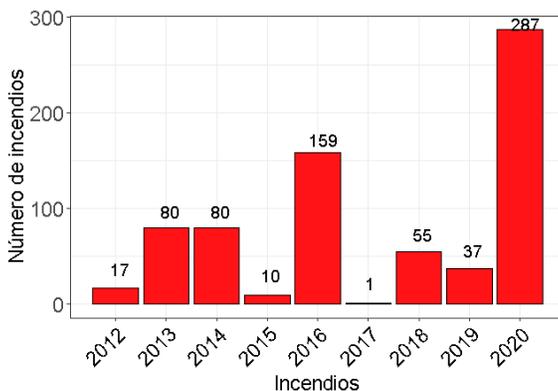


FIGURA 5. Número total de incendios registrados por el FIRMS en la vertiente por cada año analizado.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

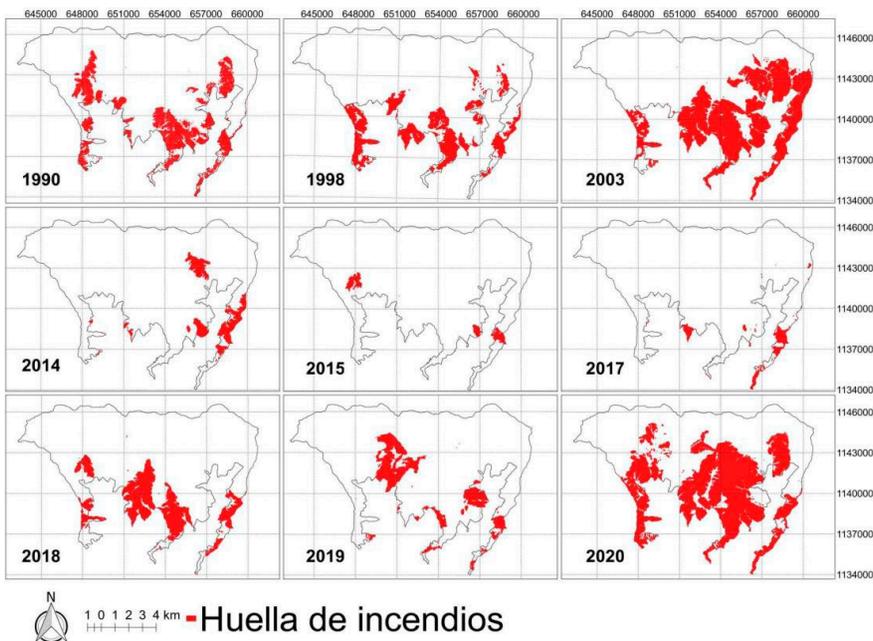


medida de 287. Por detrás de este año, el 2016 registró 159. Por otro lado, y tal como se visualizó en el área afectada, los años 2015 y 2017 también presentaron el menor número de estos eventos, con registros de 10 incendios para el año 2015 y 1 solo en el año 2017.

En relación a la extensión espacial de las áreas afectadas por incendios, la FIGURA 6 ilustra la variación de la distribución de los mismos. Se pudo constatar que no hay un patrón común en la extensión y localización de los incendios; sin embargo, la mayor área afectada se ubica al sur de

FIGURA 6. Representación espacial de las huellas de incendios ocurridos en la vertiente sur del Parque Nacional Henri Pittier por cada imagen utilizada en la investigación.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



la vertiente en la mayoría de las imágenes, exceptuando los años 2003 y 2020, donde gran parte de la zona más al norte también resultó afectada. En las imágenes se aprecia que siempre las HI están bordeando el límite sur de la vertiente, donde la zona de estudio limita con la ciudad. Esto puede ser un indicativo de la acción humana sobre los incendios.

4. Discusión

Los resultados conseguidos en la clasificación de las imágenes se consideran satisfactorios con base en los criterios de decisión referentes a los índices de kappa y precisión global (Rujoiu-Mare y Bogdan-Andrei, 2016), así como en la adecuada diferenciación de las clases separadas por píxeles, que fueron propuestas para el estudio, a pesar de la simplicidad de la metodología utilizada. La efectividad de los vectores de soporte se ha demostrado en otras investigaciones donde se han empleado como clasificador de imágenes multiespectrales (Foody y Mathur, 2004) e hiperespectrales (Tarabalka *et al.*, 2009), especialmente cuando la disponibilidad de muestras de entrenamiento es limitada (Ghoggali *et al.*, 2009).

La delimitación de la huella de incendio a partir de la clasificación de las imágenes permitió comprobar que el espacio afectado coincide principalmente con el área de riesgo alto y crítico de propagación de incendios estimada por Abarca y Quiroz (2005) en la vertiente. Las zonas con mayor espacio afectado se localizaron hacia el este y centro-sur. En el este, las áreas comprometidas fueron el Calvario, Los Naranjos, La Pedrera y Cambural. Hacia el centro-sur, las áreas afectadas se localizaron en el cerro del hotel Maracay, Pozo el Diablo, Capobianco y terrenos de la UCV Maracay. En menor medida, hacia el oeste de la vertiente, las zonas afectadas fueron Mata Seca y parte de El Limón.

La incidencia de incendios hacia estos sectores puede estar relacionada a la mayor intervención humana no planificada sobre el parque y un precario manejo de los servicios públicos. Varias de estas zonas fueron el producto de invasiones donde el funcionamiento de los servicios de recogida de desechos urbanos es ineficiente, por lo que estos son eliminados de forma rudimentaria mediante su incineración al aire libre, convirtiéndose en un factor de riesgo. Aunado a esto, la deforestación para plantaciones en el parque se ha vuelto un problema frecuente (Muñoz *et al.*, 2006; León *et al.*, 2011), no obstante, no se tienen registros oficiales de incendios acaecidos en el parque asociados a estos factores.

Por otro lado, en los años con mayor extensión de incendios, 2003 y 2020, las huellas alcanzaron zonas con riesgos de propagación bajo y moderado (Abarca y Quiroz, 2005), donde las condiciones ambientales permanecen más húmedas, gracias a las cercanías de la selva nublada; sin embargo, es posible que la acumulación de menores montos de lluvia en comparación con otros años, y en combinación con otros factores meteorológicos, como la velocidad del viento, pudieron haber desencadenado condiciones anormalmente secas y facilitar la propagación de los incendios hacia esas áreas, tal como señalan Aragão *et al.* (2008) y Bowman (2017) para condiciones ambientales tropicales similares.

La influencia de las condiciones secas ha demostrado ser determinante en la aparición de incendios, así como la contraparte en la disminución de la ocurrencia de incendios de las condiciones más húmedas (Cerano-Paredes *et al.*, 2016).

Adicionalmente, la temperatura ha podido haber influido moderadamente en la aparición de incendios en el área de estudio, siendo esto un resultado común que se ha encontrado en otras investigaciones en la aparición de incendios forestales (Daibes *et al.*, 2017), con un marcado

aumento en años recientes, atribuido posiblemente al cambio climático (IPCC, 2014; Bush, 2020), y que ha influido en el aumento de los incendios en el parque y otras zonas de la cordillera de la costa (Naveda, 2015). El principal ejemplo ha sido el año 2020; de acuerdo a la OMM (2020), este año se consideró como el año más cálido hasta la fecha desde que comenzaron los registros y donde se produjeron incendios sin precedentes en Australia y Brasil.

Los resultados hallados ilustran la importancia de determinar los umbrales de vigilancia meteorológica de los incendios en la vertiente, pudiendo esto ser objetivo de otras líneas de investigación. En efecto, este estudio se ha basado en un manejo de herramientas y tratamiento de datos bajo estándares confiables, por ende, guarda una relación lógica entre los resultados obtenidos y los fenómenos que desencadenan, en este caso, los incendios forestales de gran magnitud. De manera que, vendría a significar un método de primer orden que implica una menor inversión de recursos para enfrentar esta problemática perjudicial para el ambiente y la población.

Bajo estos términos, estos resultados reflejan la importancia de asumir medidas preventivas y adaptativas, contendientes en el diseño de planes de vigilancia, cortafuegos y educación ambiental, ante los efectos de los incendios en la vertiente, sobre todo, frente al nivel de intervención antropogénica que ha sufrido el parque, que asciende a un 28,23 % (León *et al.*, 2011), lo que le atribuye a los incendios un grado de extrema importancia, no solamente para la protección y preservación de la biodiversidad, sino también, para paliar los efectos sociales y económicos que generan sobre las poblaciones que hacen vida en él y en sus adyacencias. En este sentido, el factor humano también puede considerarse como copartícipe en la aparición de los incendios; sin embargo, la ausencia y/o disponibilidad de los registros de

incendios atribuidos a la acción humana en la vertiente limitan establecer conexiones y apoyar en el estudio de estos eventos.

5. Conclusiones

De acuerdo a los resultados conseguidos en el estudio, la técnica de vectores de soporte generó clasificaciones eficientes que permitieron la adecuada delimitación y cuantificación del espacio afectado por las huellas de los incendios. Esta estimación generó áreas contrastantes entre las imágenes que estuvieron en concordancia con los datos proporcionados por el proyecto FIRMS.

Es posible que la mayor extensión de los incendios en algunos años esté relacionada a condiciones climáticas adversas producto del cambio climático, pero la acción antrópica no puede excluirse como factor incidental en la aparición de los incendios en la vertiente a pesar de la falta de información al respecto.

Por lo tanto, es imperiosa la creación de medidas de vigilancia y protección ambiental, especialmente en la estimación de umbrales de vigilancia meteorológica en el parque, apoyada por las medidas físicas de salvaguarda ambiental que, a su vez, se pueden desarrollar asentadas en las cartografías de las huellas de incendios elaboradas en esta investigación, entre otras herramientas.

Para finalizar, una característica fundamental de este estudio lo representa la limitante en cuanto al acceso a las áreas recónditas del Parque Nacional Henri Pittier, el cual comprende amplitudes que son humanamente imposibles de abarcar sin un equipo de desplazamiento adecuado. De esta manera, se presenta un método eficaz y confiable, estrictamente informático, como una herramienta que conjuga un cúmulo de información pertinente.

6. Referencias citadas

- ABARCA, O. I. y J. G. QUIROZ. 2005. "Modelado cartográfico de riesgo de incendios en el Parque6 Nacional Henri Pittier. Estudio de caso: Vertiente sur, área colindante con la ciudad de Maracay". *Agronomía Tropical*, 55:35-62.
- ARAGÃO, L.; MALHI, Y.; BARBIER N.; LIMA A.; SHIMABUKURO Y.; ANDERSON L. & S. SAATCHI. 2008. "Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia". *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 363: 1.779-1.785.
- BOWMAN, D. 2017. "When will the jungle burn?". *Nature Climate Change*, 7(6): 390-391.
- BUSH, M. B. 2020. "New and repeating tipping points: The interplay of fire, climate change, and deforestation in neotropical ecosystems". *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 105: 393-404.
- CERANO-PAREDES, J.; VILLANUEVA-DÍAZ, J.; VÁZQUEZ-SELEM, L.; CERVANTES-MARTÍNEZ, R.; ESQUIVEL-ARRIAGA, G.; GUERRA-DE LA CRUZ, V. & P. Z. FULÉ. 2016. "Régimen histórico de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* al norte del estado de Puebla, México". *Bosque*, 37(2): 389-399.
- CHAVEZ, P. 1996. "Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9): 1.025-1.036.
- CHUVIECO, E. y D. COCERO. 2004. "Combinación del NDVI y temperatura de superficie para la estimación del contenido de humedad de los combustibles en la valoración del peligro de incendios forestales". *Revista de la Asociación Española de teledetección*, 21: 41-46.
- DAIBES, L. F.; ZUPO, T.; SILVEIRA, F.A.O. & A. FIDELIS. 2017. "A field perspective on effects of fire and temperature fluctuation on Cerrado legume seeds". *Seed Science Research*, 27(2): 74-83.
- DAVIES, D.; ILAVAJHALA, S.; WONG, M.; & C. JUSTICE. 2008. "Fire information for resource management system: Archiving and distributing MODIS active fire data". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1): 72-79.
- FAO. 2007. *Fire management - global assessment 2006. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*. FAO Forestry Paper 151. Rome, Italy.
- FOODY, G. M. & A. MATHUR. 2004. "A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(6): 1.335-1.343.
- GHOOGALI, N.; MELGANI, F. & Y. BAZI. 2009. "A multiobjective genetic SVM approach for classification problems with limited training samples". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(6): 1.707-1.718.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer]. Geneva, Switzerland.
- KEYSER, A. & A. L. WESTERLING. 2017. "Climate drives inter-annual variability in probability of high severity fire occurrence in the western United States". *Environmental Research Letters*, 12(6): 1-9.
- KHATAMI, R.; MOUNTRAKIS, G. & S.S. STEHMAN. 2016. "A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research". *Remote Sensing of Environment*, 177: 89-100.
- KIZER K, W. 2020. "Extreme Wildfires—A Growing Population Health and Planetary Problem". *JAMA*, 18: 1-2.
- KUHRT, E.; KNOLLENBERG, J. & V. MERTENS. 2001. "An automatic early warning system for forest fires". *Annals of Burns and Fire Disasters*, 14:151-154
- LANDSAT SPPA Team. 2015. *IDEAS-VEG-SRV-REP-1320 LANDSAT Products Description Document_v6.0.doc*. User Guide to the Landsat MSS, TM and ETM+. 68 p. Disponible en: <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/landsat-products-description-document.pdf>. [Consulta: diciembre, 2020].

- LAW, K. & J. NICHOL. 2004. "Topographic correction for differential illumination effects on Ikonos satellite imagery. International Archives of the Photogrammetry". *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35: 641-646
- LEÓN, A.; MADI, Y.; VÁZQUEZ, J.; RODRIGUES, J.; DUARTE, E. & J. UZCÁTEGUI. 2011. Grados de intervención de las formaciones vegetales en parques nacionales de Venezuela. Caso de estudio: Henri Pittier, Yacambú y San Camilo. *Trabajo presentado en el VIII Congreso Sobre Áreas Protegidas de la VIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo*. pp. 12. La Habana, Cuba, (4-8 de julio).
- MENG, R.; WU, J.; ZHAO, F.; COOK, B. D.; HANAVAN, R.P. & S. P. SERBIN. 2018. "Measuring short-term post-fire forest recovery across a burn severity gradient in a mixed pine-oak forest using multi-sensor remote sensing techniques". *Remote Sens. Environ.* 210: 282-296.
- MOUNTRAKIS, G.; IM, J. & C. OGOLE, 2011. "Support vector machines in remote sensing: A review". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3): 247-259.
- MUÑOZ, D.; CASTILLO, R. y V. SALAS. 2006. Estado de conservación del Parque Nacional Henri Pittier. Bioparques: Asociación Civil para la Conservación de los Parques Nacionales. Programa de Observadores de Parques. Disponible en: www.bioparques.org/ www.parkswatch.org. [Consulta: diciembre, 2020].
- NAVAZO, G.; NIETO, A. y M. MORENO. 2016. "Análisis de incendios forestales mediante sistemas de información geográfica y teledetección. Estudio de caso en Sierra de Gata (2015)". En: A. NIETO MASOT (Coord.), *Tecnologías de la Información Geográfica en el Análisis Espacial. Aplicaciones en los Sectores Público, Empresarial y Universitario*. pp. 247-268. Universidad de Extremadura. Grupo de Investigación en Desarrollo Territorial Sostenible y Planificación Territorial. Grupo de Investigación Geo-Ambiental. España.
- NAVEDA, J. 2015. *Cambio climático y áreas protegidas de Venezuela: posibles efectos ambientales y su contribución a la mitigación y adaptación*. Instituto Nacional de Parques. (Informe Técnico). Caracas, Venezuela. Disponible en: https://www.academia.edu/41195406/Cambio_clim%C3%A1tico_y_%C3%A1reas_protegidas_de_Venezuela_posibles_efectos_ambientales_y_su_contribuci%C3%B3n_a_la_mitigaci%C3%B3n_y_adaptaci%C3%B3n
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). 2020. *El 2020 está en camino de ser uno de los tres años más cálidos registrados (marzo 31)*. Disponible en: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-2020-est%C3%A1-en-camino-de-ser-uno-de-los-tres-a%C3%B1os-m%C3%A1s-c%C3%A1lidos>
- PEÑA, E. 2018. "Evaluación de la respuesta de la comunidad vegetal post-incendio en el MUP N°82 'Sierra de los Donceles' (2084 ha) de Hellín (Albacete) apoyado en el tratamiento de productos geomáticos públicos: escenas de satélite y LiDAR". *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 44(2): 183-194.
- REYNOSA, N. E. 2016. "Índices espectrales de vegetación para la detección de áreas quemadas". *La Calera Revista Científica*, 16(27): 111-114.
- RUJOUU-MARE, M. & M. A BOGDAN. 2016. "Mapping land cover using remote sensing data and GIS techniques: A case study of Prahova Subcarpathians". *Procedia Environmental Sciences*, (32): 244-255.
- TANE, Z.; ROBERTS, D.; VERAVERBEKE, S.; CASAS, Á.; RAMIREZ, C. & S. USTIN. 2018. "Evaluating endmember and band selection techniques for multiple endmember spectral mixture analysis using post-fire imaging spectroscopy". *Remote Sens*, 10: 389.
- TARABALKA, Y.; BENEDIKTSSON, J. A. & J. CHANUSSOT. 2009. "Spectral-spatial classification of hyperspectral imagery based on partitioning clustering techniques". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8): 2.973-2.987.