

Evaluación de áreas afectadas por incendios forestales utilizando imágenes satelitales Sentinel-2. Caso de estudio "Pinares de Mayarí"

Evaluation of areas affected by forest fires using Sentinel-2 satellite images. Case study Pinares de Mayarí

Yusniel Alberto Nuñez Acosta¹ (yusniel.alberto@ltu.insmet.cu) (<https://orcid.org/0000-0003-4004-3323>)

José Norlan Peña Ojeda² (jose.norlan@ltu.insmet.cu) (<https://orcid.org/0009-0006-7503-4397>)

Resumen

Los incendios forestales constituyen un grave problema ambiental, los cuales se han incrementado en los últimos tiempos a consecuencia de las intensas sequías provocadas por el cambio climático. Estas situaciones precisan de una herramienta que permita perfeccionar la gestión forestal ante esta contingencia. En consecuencia, los mapas de daños ocasionados por incendios forestales basados en imágenes de satélite demuestran ser una herramienta útil para la gestión forestal en momentos en que se precisa su control inmediato. De ahí que el objetivo del presente artículo se enmarque en presentar los resultados alcanzados en la delimitación y cálculo de las áreas afectadas por incendios forestales utilizando imágenes del satélite Sentinel-2 en la localidad Pinares de Mayarí, provincia Holguín. Los resultados que se ofrecen se basan en una investigación realizada en el mes de febrero de 2023, a partir de la aplicación del Programa de teledetección satelital Copernicus de la Agencia Espacial Euro (ESA). Durante la investigación se utilizaron métodos teóricos y empíricos como análisis-síntesis, inducción-deducción, revisión documental, encuesta, modelación y observación. Como aporte principal se logró cuantificar el área afectada por el incendio, así como los porcentajes de quemaduras de baja severidad, de gravedad moderada baja y alta severidad. Se concluyó que la utilización de los índices espectrales facilita la interpretación visual de las áreas afectadas, un cálculo mucho más exacto de las distintas categorías de afectación y demostrar la disminución de la vigorosidad de la vegetación y su actividad fotosintética.

Palabras clave: Sentinel-2, índices espectrales, teledetección satelital.

Abstract

Forest fires constitute a serious environmental problem. Forest fire damage maps based on satellite images are proving to be a useful tool for forest management. The objective of this research is to delimit and calculate the areas affected by forest fires using images from the Sentinel-2 satellite in Pinares de Mayarí province of Holguín, presented in the month of February 2023. Applying the Copernicus satellite remote sensing program of

¹ Máster en Ciencias en Bioseguridad. Ingeniero Agrónomo. Investigador Agregado. Especialista Centro Meteorológico Las Tunas. Cuba.

² Máster en Ciencias en Meteorología. Especialista en Meteorología. Centro Meteorológico Las Tunas. Cuba.

the Euro Space Agency (ESA). The information was processed through the EO BROWSER Platform, to identify the images, as well as view the spectral indices that were generated. The Sentinel Open Hub platform was used to download the images, and the SNAP software and QGIS software ver 3.22.4 were used to calibrate and georeference these images. The radiometric indices Burned Area AQ, Normalized Burning Ratio Index NBRI and Normalized Vegetation Index NDVI were used to characterize the spectral behavior or spectral signature of the burned area. As a result of the investigation, it was possible to quantify the area affected by the fire, which determined approximately 7,729 hectares, of which 74 percent were low severity burns and 26 percent were between low moderate severity and high severity. It was concluded that the use of spectral indices facilitates the visual interpretation of the affected areas, allows a much more accurate calculation, especially in the different categories of affectation, and demonstrates the decrease in the vigor of the vegetation and its photosynthetic activity.

Key words: Sentinel-2, spectral indices, satellite remote sensing.

La teledetección satelital y los incendios forestales

Los incendios forestales se han convertido en un problema ambiental de gran relevancia y gravedad en las últimas décadas. Problema se presenta a nivel mundial sobre todo en los países con grandes extensiones de áreas forestales (Cárdenas, 2013).

Los modelos actuales de cambio climático coinciden en que habrá mayor severidad del tiempo atmosférico para los incendios en el futuro. Se prevé que ambos: la ocurrencia y la severidad de los incendios aumenten, dando lugar a incendios mayores y mayor superficie afectada, lo cual plantea serias dudas sobre la capacidad de los organismos del manejo de incendios para mitigar efectivamente los impactos futuros de los incendios (González, 2013).

El uso de datos que proporcionan los satélites de observación de la tierra en la prevención y evaluación de los incendios forestales, se ha desarrollado notablemente en las últimas décadas (Salinero, 2009). El Programa Europeo de Vigilancia Ambiental Copernicus dispone de los satélites Sentinel-2. El sensor MultiSpectral Instrument (en lo adelante, MSI) a bordo de la serie de satélites Sentinel-2 registra como gran novedad, datos en el dominio espectral del límite del rojo (*red-edge*) cuya utilidad ha sido probada en aplicaciones agrícolas (Shang et al., 2015, como se citó en Fernández, Fernández-Manso, Quintano y Calvo, 2017).

De Santis y Vaughan (2009) señalan que los incendios forestales modifican la cubierta vegetal, reduciendo por ejemplo el contenido de clorofila y humedad de la vegetación. De manera similar, White, Ryan, Key y Running (1996) muestran que la disminución de la clorofila y humedad en la vegetación afectada conducen a un aumento de la reflectividad de las longitudes de onda del visible (VIS) e infrarrojo medio (SWIR)

respectivamente, y una pérdida en el infrarrojo cercano (IRC) por el deterioro de la estructura interna de la hoja.

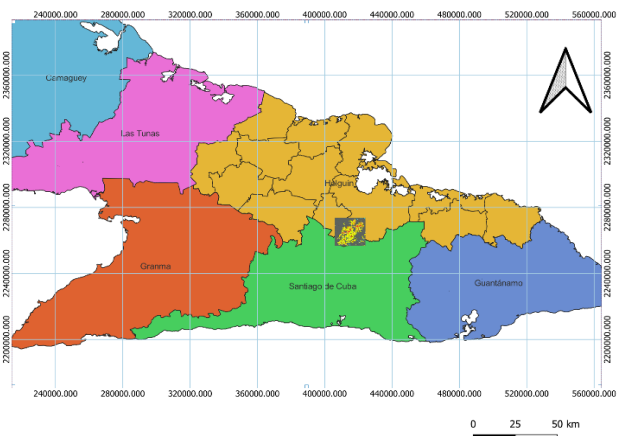
Hay varias propuestas metodológicas utilizando índices espectrales en imágenes satelitales como la metodología de Michalijos y Uboldi (2013), donde se identifican áreas afectadas por quemaduras a partir de índices radiométricos como el índice de vegetación (NDVI), de áreas quemadas y una clasificación supervisada, mediante el software ENVI, con al que se han obtenido buenos resultados. Otra propuesta más recientes es la realizada por Ávila (2020) para cuantificar áreas afectadas por incendios forestales utilizando imágenes satelitales Sentinel-2, Caso de estudio Páramo del Almorzadero, en Colombia, la cual calculó la matriz de covarianza y la fuerza de correlación de tres índices con el fin de realizar una composición multispectral RGB, para visualizar el contraste radiométrico de los niveles digitales, asociados a las bandas o longitudes de onda.

Luego de revisión bibliográfica se realizó esta propuesta investigativa con el objetivo de delimitar y calcular las áreas afectadas por incendios forestales utilizando imágenes del satélite Sentinel-2 en Pinares de Mayarí, provincia Holguín, aplicando el programa de teledetección satelital Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) y los sistemas de información geográfica.

Uso de índices espectrales en el incendio "Pinares de Mayarí"

La presente metodología se aplicó al incendio forestal presentado el día 19 de febrero del 2023 en el municipio Mayarí de la provincia Holguín (figura 1). De las dos escenas satelitales tomadas antes (imágenes del 18 de febrero 2023) y después del evento (imágenes del 10 marzo 2023), se recortó el área afectada por la quema. Dada la resolución espectral que tienen las imágenes satelitales Sentinel-2 con 13 bandas espectrales, en el visible e infrarrojo, se logra captar gran variabilidad espectral entre las coberturas vegetales y zonas afectadas por incendios, donde se analizó el comportamiento espectral *in situ* a partir de espectroradiometría de campo en las zonas afectadas por el evento.

Figura 1: Ubicación área de estudio



Municipio Mayarí

Mayarí se localiza en el centro-este de la provincia de Holguín. Al norte limita con la Bahía de Nipe, el océano Atlántico y los municipios de Banes y Antilla; al sur, con la provincia de Santiago de Cuba; al este, con el municipio de Frank País y al oeste con los municipios de Cueto y Báguanos. Su extensión territorial es de 1 310,6 km².

El programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) está diseñado para satisfacer las necesidades de información geográfica de los usuarios, mejorando la fiabilidad y la calidad de la información geográfica actual. Además de recopilar datos en tierra, mar y aire (componente *in-situ* del programa), la captura de datos desde el espacio (componente espacial) proporciona un valor añadido de gran importancia para la monitorización del planeta a escala global.

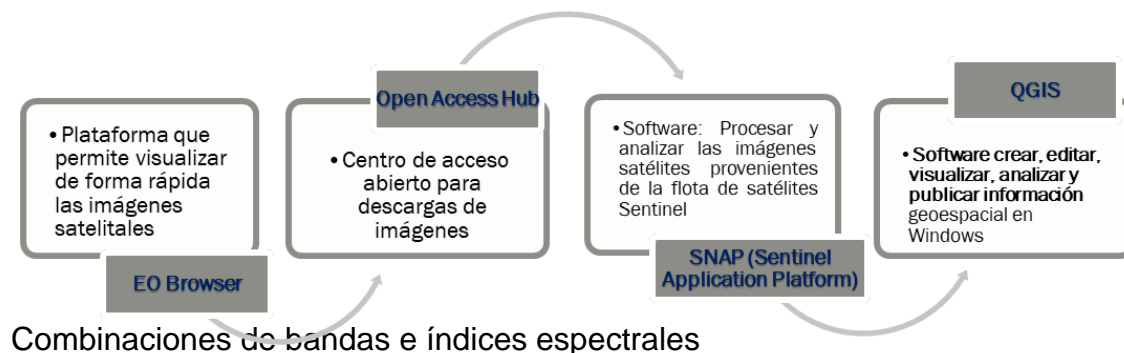
Mediante el visor EO Browser, una de las plataformas de descarga de imágenes satelitales que se puede emplear en la obtención de imágenes de satélite, se pueden visualizar imágenes provenientes de nueve recursos satelitales diferentes, seleccionar el momento temporal, la cobertura de nubes y realizar combinaciones de bandas. Así, permite realizar una selección del recurso satelital, la fecha y la posibilidad de realizar composiciones RGB son las funciones básicas del visor para disponer de las imágenes satélites y los análisis multiespectrales que se precisen buscar.

Con la utilización de Copernicus Open Access Hub, se brinda acceso completo, gratuito y abierto a los productos de los usuarios de Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, y Sentinel-5P a través del cual se puede descargar el paquete de imágenes generadas por los satélites.

El SNAP es una plataforma de interfaz que proviene del acrónimo Sentinel Application Platform y responde a un programa gratuito ofrecido por la Agencia Espacial Europea por sus siglas en inglés (ESA) para procesar y analizar las imágenes satélites provenientes de la flota de satélites Sentinel. Las herramientas de esta plataforma se emplean para gestionar imágenes multiespectrales provenientes de otras misiones como Envisat, Landsat, MODIS o SPOT. A partir de las imágenes originales, se realizan procesamientos geométricos y radiométricos para obtener algunos productos derivados que puedan resultar de interés para los proyectos de muchos usuarios.

El Sistema de Información Geográfica se apoyó en el uso del software QGIS 3.22.4 para la visualización espacial de los resultados y el análisis de los cálculos entre las combinaciones de bandas y los índices multiespectrales, generando mapas para cada resultado.

Figura 2. Diagrama de flujo



Cada satélite S2 lleva un sensor "Multi-espectral Image" (MSI) con 13 bandas espectrales situadas entre la región espectral de visible hasta el infrarrojo de onda corta; con cuatro bandas de 10 m de resolución espacial, seis bandas de 20 m y tres bandas de 60 m y una anchura de barrido de 290 km. S2 incorpora tres nuevas bandas en la región del *red-edge* que mejora la configuración del sensor para estudios de aguas y vegetación (Delegido, Verrelst, Alonso y Moreno, 2011).

Las combinaciones en base a imágenes satelitales Sentinel 2, con una resolución de 10 metros, utilizando las bandas 2-3-4-8-8A-11 y 12, ayudan a la precisión de las clasificaciones (características de las bandas en la tabla 1).

Tabla 1 Sentinel-2A – Sensor: MSI

Nro.	Nombre de banda	Longitud de onda (nm)	Ancho de onda (nm)	Resolución (m)
1	Coastal aerosol	443.9	27	60
2	Blue	496.6	98	10
3	Green	560	45	10
4	Red	664.5	38	10
5	Vegetation Red Edge	703.9	19	20
6	Vegetation Red Edge	740.2	18	20
7	Vegetation Red Edge	782.5	28	20
8	NIR	835.1	145	10
8a	Narrow NIR	864.8	33	20
9	Water vapour	945	26	60
10	SWIR – Cirrus	1373.5	75	60
11	SWIR	1613.7	143	20
12	SWIR	2202.4	242	20

Las combinaciones de bandas para observar el fuego en activo, columnas de humo y visualizar las áreas quemadas, fueron complementados y comparados con variables continuas que representan los índices multispectrales.

Para este estudio se escogieron tres combinaciones de bandas:

- Composición en color natural (True Color), Bandas (B4, B3, B2)
Con esta composición en color natural que introduce las bandas de luz visible roja, verde y azul en los tres canales correspondientes se ofrece un producto en color como la vería el ser humano de manera natural, lo que permitió conocer algunas características del penacho, como el alcance.
- Infrarrojo de color falso (False Color), Bandas (B8, B4, B2)
Con la composición en color falso que utiliza las bandas del infrarrojo cercano (NIR), el rojo y el verde, se emplearon para diagnosticar la densidad y la salud de la vegetación.
- Composición urbana en color falso (False Color Urban), Bandas (B12, B11, B4)
Esta composición se utiliza para visualizar mejor las zonas urbanizadas y detectar incendios. La vegetación queda representada en tonos de verde y el terreno urbanizado aparece en blancos, grises y morados. Esta composición resulta útil para detectar incendios forestales y sumideros volcánicos que se reflejan en tonos rojos y amarillos. Esto permitió observar la magnitud del fuego.
- Composición de infrarrojo de onda corta (SWIR) Bandas (B12, B8A, B4)
Las medidas tomadas en el infrarrojo de onda corta (SWIR) sirven para estimar la cantidad de agua presente en la vegetación y en el suelo. La vegetación adopta tonalidades de verde, los suelos desnudos y las zonas urbanas tienen tonos pardos, y el agua se ve negra. Esta composición es útil para cartografiar los daños debidos a incendios.

Índices multiespectrales

En la presente investigación, se aplicaron y analizaron tres índices radiométricos, los cuales son una transformación de las magnitudes físicas capturadas por el sensor y se convierten en valores numéricos almacenados en formato ráster, que tienen por objetivo resaltar información geográfica o dinámicas espacio-temporales en función de su nivel radiométrico físico.

- Área quemada (AQ): este índice consiste en una operación aritmética básica, se relacionan las magnitudes físicas de las bandas B8a y B11, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta respectivamente del programa Sentinel-2.

$$AQ = \frac{B8a}{B11}$$

Normalized Burn Ratio [NBRI] o índice normalizado del área quemada: este índice resalta las áreas incendiadas, mediante una diferencia entre los valores

obtenidos antes y después del incendio, discriminando las áreas que fueron quemadas y las que no fueron quemadas.

- Índice de relación de calcinación normalizado (NBRI): utiliza las bandas B8 infrarrojo cercano y B12 infrarrojo de onda corta, se utilizó para destacar las áreas calcinadas con la característica de que se normaliza aplicando las mismas bandas espectrales.

$$NBR = \frac{B8 - B12}{B8 + B12}$$

Este índice se calcula para una imagen capturada antes del incendio y en una imagen capturada después del incendio, la imagen pre-incendio se mantiene fija para que se pueda realizar una comparación. Luego se realiza un cálculo de la diferencia entre ambos y se obtiene el Δ NBRI. Para la interpretación del índice se usará la tabla del programa *FireMon del United States Geological Survey (USGS)* (tabla 2).

Tabla 2. Rangos para interpretar severidad de los incendios.

Δ NBRI	Severidad
<-0.25	Alta regeneración post-incendio
-0.25 a -0.1	Baja regeneración post-incendio
-0.1 a 0.1	Área sin quemar
0.1 a 0.27	Quemado de baja gravedad
0.27 a 0.44	Gravedad moderada-baja
0.44 a 0.66	Gravedad moderada-alta
>0.66	Quemadura de Alta severidad

Fuente: USGS BAIS2: Burned Area Index for Sentinel-2 o Índice de áreas quemadas para Sentinel2

- El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada [NDVI] Rouse, et al. (como se citó en Correa, 2016), es utilizado como indicador del vigor de la biomasa vegetal, lo que permite que este sea usado ampliamente en estudios relacionados a la evaluación del comportamiento de cultivos, de vegetaciones boscosas naturales.

Índice de vegetación normalizado (NDVI): ha sido ampliamente reconocido por sus características diferenciales para destacar el componente de la biomasa, es operado mediante las bandas del rojo B4 y la banda del infrarrojo cercano B8

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

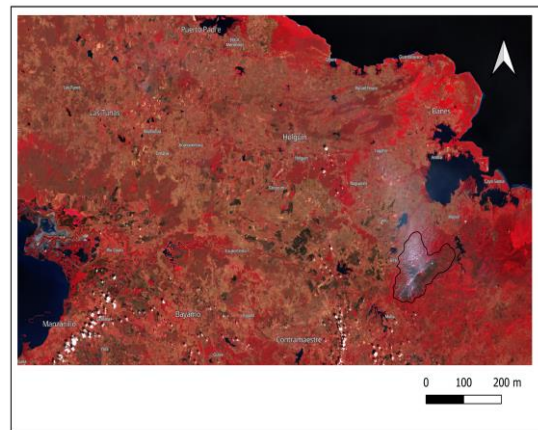
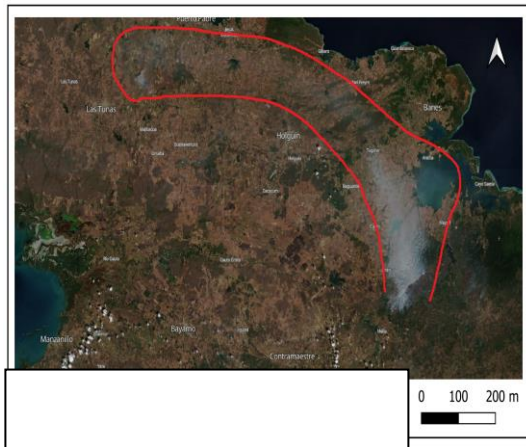
Consideraciones para determinar un incendio de grandes proporciones

Un análisis cualitativo con la utilización de combinaciones de bandas del Sentinel-2 de imágenes tomadas el 2 de marzo 2023, en momentos de alta severidad del incendio, se lograron obtener los siguientes resultados.

La composición en color natural (Figura 3) permitió conocer las áreas afectadas por el humo generado por la combustión de maderas, arbustos y otros materiales. La columna de humo dada la dirección del viento con una componente del Sur al Este. Se apreció afectaciones al Norte del siniestro (municipios de Mayarí, Báguano, Rafael Freyre, Holguín, el sur de Gibara) llegando hasta el nordeste de la provincia Las Tunas.

Figura 3. Composición en Color Natural (B4,B3, B2)

Figura 4. Infrarrojo Falso color (B8, B4 y B2)

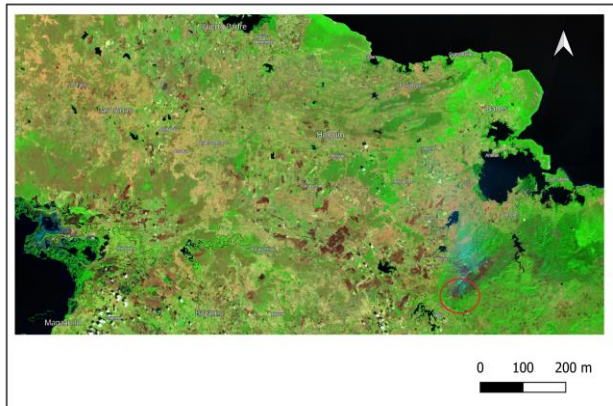


El uso de las imágenes de la composición de bandas (B8, B4 y B2) falso color (Figura 4) permitieron evaluar primeramente las áreas quemadas, la vegetación seca producto de la sequía imperante, al mostrar la cantidad de material inflamable orgánico, lo que permitió identificar una de las causas para el análisis de la magnitud del incendio.

La composición de infrarrojo de onda corta (SWIR) (Figura 5) muestra las zonas donde el fuego tenía mayor actividad (fuego activo), dado que esta combinación es utilizada para cartografiar incendios forestales. Además, se observa el estado de la vegetación y permite realizar valoraciones más certeras de las áreas quemadas, las que alcanzaron

colores pardos (suelo quemado). Preliminarmente se pudo constatar que el incendio se movía hacia el sur-suroeste de la zona objeto de estudio.

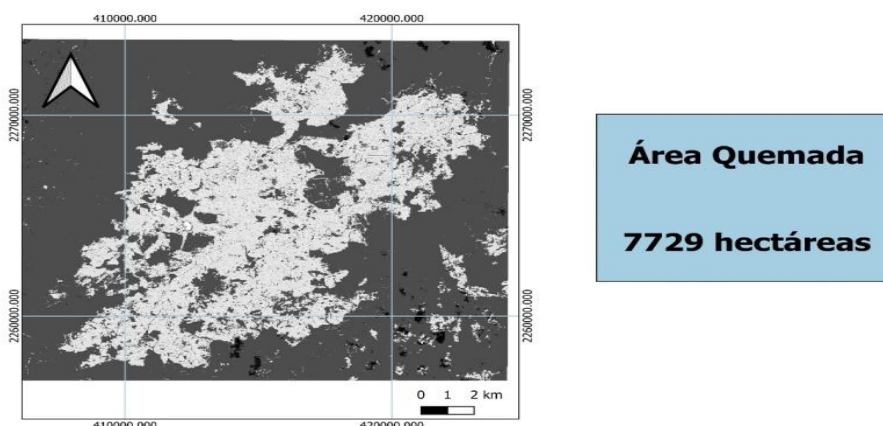
Figura 5 Composición de infrarrojo de onda corta (SWIR) Bandas (B12, B8A y B4)



El análisis cuantitativo de imágenes tomadas el 18 de febrero 2023, antes del incendio, y el 10 marzo del 2023, arrojó los siguientes resultados:

En la aplicación del índice de Área quemada (AQ) (Figura 6) se realiza una división sencilla con la calculadora ráster en el Qgis para las bandas 8ª y la banda 11 infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta. Estas son sensibles a los cambios en la vegetación logrando contrastar el área afectada y la zona de bosques que arroja resultados cuantitativos para discriminar y cuantificar el área quemada.

Figura 6: Área quemada: 7729 hectáreas

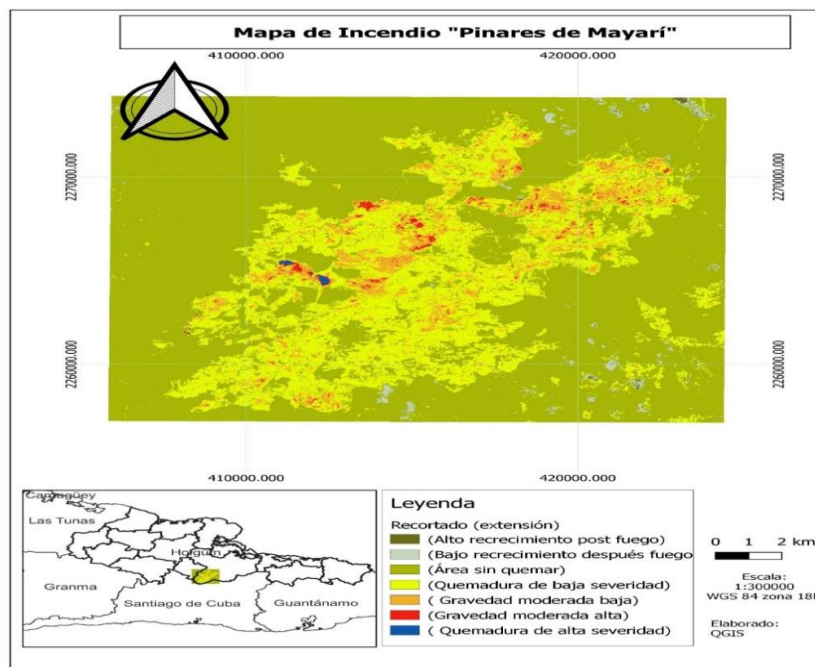


En este análisis de aritmética en la división de las bandas 8ª y 11 y luego utilizando la calculadora raster, se comprobó que la afectación de las áreas quemadas hasta el 10 de marzo del 2023 fue de 7 729 hectáreas.

El índice Normalizado de Área Quemada (NBR) (Figura 7) es un índice diseñado para resaltar áreas quemadas en grandes zonas de incendio. La fórmula es similar a NDVI, excepto que combina el uso de longitudes de onda de infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR).

La diferencia entre el NBR previo (Prefire) y posterior al incendio (Postfire), que luego se puede usar para estimar la severidad del incendio. Un valor más alto de dNBR indica un daño más severo, mientras que las áreas con valores negativos de dNBR pueden indicar un nuevo crecimiento después de un incendio.

Figura 7: Índice Normalizado área quemada

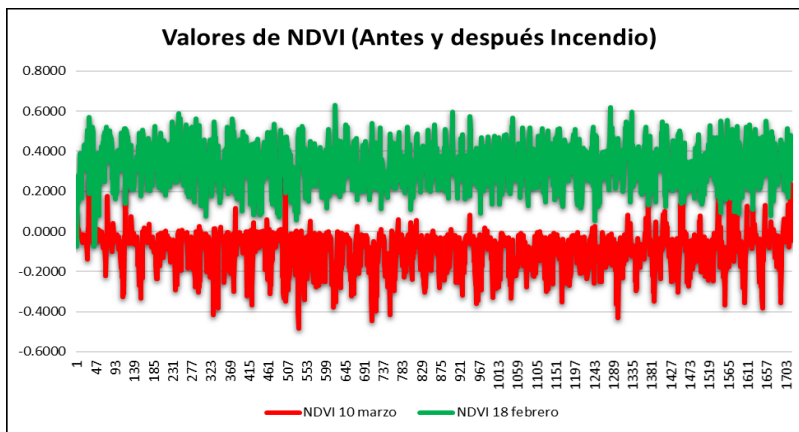


En la figura se muestra las áreas quemadas por diferentes categorías. El cálculo de las áreas se realizó con la calculadora ráster en el software Qgis. De un total de 7 729 hectáreas de áreas quemadas como se analizó en el índice anterior, con quemadura de baja severidad se identificaron 5 724.3 ha que representa el (74.2%), con gravedad moderada baja 1 818.7 ha (23.5%), con gravedad moderada alta 163.1 ha (2.1%) y con quemadura de alta severidad 22.4 ha (0.2%) del total del área afectada.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es el más utilizado para todo tipo de aplicaciones pues sirven para medir vegetación, el vigor y salud de esta por la absorción de clorofila además de su facilidad de cálculo, y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes estableciendo un valor de +1 para la cubierta vegetal sana y densa, y de -1 para las áreas que no tienen ninguna vegetación.

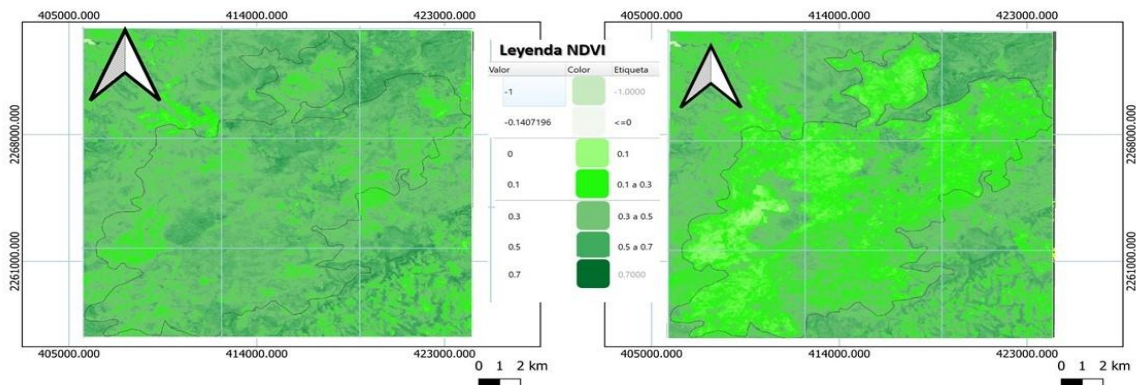
La figura 8 muestra los valores de NDVI de las dos imágenes ráster analizadas antes y después del incendio. Para la evaluación se realizó una grilla de 1720 puntos en la imagen y se extrajo los valores del ráster. Los valores promedio de NDVI de la imagen antes del incendio el 18 febrero, oscilaban cercanos a los 0.33 como promedio arrojando algunos valores máximos de 0.61 muy buenos para vigor y la salud de la vegetación en la zona. Los valores promedio después del incendio en la imagen del 10 de marzo eran valores negativos de -0.09 los cuales llegaron hasta -0.43 en las áreas de quemaduras de alta severidad.

Figura 8. Valores de NDVI antes Incendio (18-2-2023); después Incendio (10-03-2023)



La figura 9, muestra los valores de NDVI en el área quemada. La imagen de la izquierda pertenece al día 18 de febrero antes del incendio en la cual se aprecia una mayor coloración verde con gran intensidad y predominan los valores entre 0.3 y 0.5 de NDVI. Mientras que la imagen de la derecha es del día 10 de marzo después del incendio donde los valores NDVI bajan en mayor cantidad por debajo de 0.1, alcanzando valores negativos muy altos en áreas de coloración más clara.

Figura 9. Izq: NDVI antes Incendio (18-2-2023); Der: NDVI después Incendio (10-03-2023)



Consideraciones finales

Como resultado de la aplicación de la metodología propuesta, se concluye que, para cartografiar zonas afectadas por incendios, es conveniente utilizar imágenes satelitales del programa Sentinel-2, debido a su resolución espacial de 10, 20 y 60 metros con resolución temporal de cinco días y resolución radiométrica de 13 bandas espectrales.

El uso de las combinaciones de bandas para conocer las áreas afectadas por el humo, áreas quemadas y la mayor intensidad del fuego. Para ello se propone utilizar el software SNAP, que es un paquete de procesamiento de imágenes de este sensor y georeferenciar imágenes a través del software Qgis por su facilidad en uso y su característica de SIG libre de código abierto para escritorio.

Dentro del desarrollo de la investigación, se significa otro aporte, el uso de los índices multispectrales con la aplicación de diferentes métodos y utilización de algoritmos que permitieron cuantificar las 7 729 hectáreas afectadas por el incendio en Pinares de Mayarí, así como el índice de calcinación normalizado por cada una de las categorías de severidad de quemaduras y NDVI que muestra la vegetación verde y la vigorosidad de las plantas en cuanto actividad fotosintética.

Referencias

- Ávila, E. F. (2020). Propuesta metodológica para cuantificar áreas afectadas por incendios forestales utilizando imágenes satelitales Sentinel-2. Caso de estudio páramo del Almorzadero, Colombia. *UD y Geomática*, (15), 25-32.
- Cárdenas, P. S. (2013). La problemática de los incendios forestales y bases para su teledetección en el Perú. *Apuntes de Ciencia y Sociedad*, 3(2).
- Correa, E. R. (2016). Índices espectrales de vegetación para la detección de áreas quemadas. *La Calera*, 16(27), 111-114.
- De Santis, A. y Vaughan, P. 2009. Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. *Recursos Rurais*, 5, 93-100.
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., Moreno, J. (2011). Evaluation of Sentinel-2 red edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, 11(7), 7063-7081.
- Fernández, A., Fernández-Manso, O., Quintano, C., Marcos, E. y Calvo, L. (octubre, 2017). Utilización de las imágenes Sentinel-2 para cartografía de área quemada. En *Nuevas plataformas y sensores de teledetección*. Ponencia presentada en XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. España, Murcia.
- González, A. (5 de noviembre, 2013). *Informe Técnico General. Memorias del IV simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los incendios forestales: cambio climático e incendios forestales*. Ciudad México: Tecnología General. Rep. PWS-GTR-245, México.

- Michalijos, M. P. y Uboldi, J. (2013). Propuesta metodológica para la evaluación de áreas afectadas por incendios mediante el uso de imágenes satelitales en Sierra de la Ventana, Argentina. *Revista de Geografía Norte Grande*, (56), 223-234.
- Salinero, E. C. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista Real Academia Ciencias Exactas Físicas Naturales*, (103), 173-182.
- Vidal, P., De Santis, A., Pérez, W., y Honeyman, P. (2017). Uso de herramientas de teledetección para el análisis de la severidad y estimación de gases de efecto invernadero (GEI) en incendios forestales de gran magnitud. Estudio de caso incendio La Rufina, VI Región del LGB O'Higgins, Chile. *Revista de Teledetección*, (50), 59-69.
- White, J. D., Ryan, K. C., Key, C. C., Running, S. W. (1996). Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 6(3), 125-136. Recuperado de <https://doi.org/10.1071/WF9960125>