

Caracterización de zonas incendiadas del departamento de San Vicente mediante la aplicación de índice espectral NBR como estrategia para el fortalecimiento de la resiliencia

Gerson Vladimir Cornejo-Reyes¹, Edgar Antonio Marinero-Orantes² y Carlos Renán Funes Guadrón³

Centro de Investigación Ambiental de la Facultad Multidisciplinaria Paracentral de la Universidad de El Salvador.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9617-1266> Correo electrónico: gerson.cornejo@ues.edu.sv,

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3327-4553>; Correo electrónico: edgar.marinero@ues.edu.sv y

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7878-0009> Correo electrónico: carlos.funes@ues.edu.sv

RESUMEN

Existe un creciente interés en identificar, monitorear y evaluar el impacto de los incendios agrícolas y forestales por las afectaciones sociales, ambientales y económicas. Por lo que, en este artículo se aborda la caracterización de las zonas incendiadas en los distritos del departamento de San Vicente, El Salvador Centroamérica, utilizando imágenes multiespectrales para penetración atmosférica y geocolor con Sentinel 2, así como la aplicación del índice NBR para la identificación y validación de las zonas incendiadas durante el periodo de 1 de enero al 15 de abril de 2024. Con lo cual, se logró determinar que valores de NBR cercanos a 0 muestran zonas sin vegetación principalmente parcelas en preparación previo a la siembra, valores de -0.27 muestra las zonas recientemente incendiadas y valores de NBR de -0.75 a 0.80 indican puntos de calor o incendios que fueron registrados en el momento. Es así que, se logró determinar incendios atendidos en el distrito de San Esteban con un área de 2.56 km² y en el distrito de Apastepeque con un área de 3.7 km puntos de calor 0.07 km² entre otras zonas principalmente en áreas naturales protegidas. De esta manera, se genera una línea base como herramienta para la resiliencia comunitaria y toma de decisiones por los actores claves institucionales permitiendo trabajar en fortalecer la gobernanza, reducción de la vulnerabilidad, la adaptabilidad, la participación comunitaria y preparación y respuesta a emergencia como ejes claves de la resiliencia.

Palabras clave: NBR, San Vicente, Incendio, gestión de riesgo, índice espectral.

ABSTRACT

There is a growing interest in identifying, monitoring and evaluating the impact of agricultural and forest fires due to their social, environmental and economic effects. Therefore, this article addresses the characterization of the burned areas in the districts of the department of San Vicente, El Salvador, Central America, using multispectral images for atmospheric penetration and geocolor with Sentinel 2, as well as the application of the NBR index for identification and validation of the burned areas during the period from January 1 to April 15, 2024. With this, it was possible to determine that NBR values close to 0 show areas without vegetation, mainly plots in preparation prior to sowing, values of -0.27 shows recently burned areas and NBR values of -0.75 to 0.80 indicate hot spots or fires that were recorded at the time. Thus, it was possible to determine fires attended in the district of San Esteban with an area of 2.56 km² and in the district of Apastepeque with an area of 3.7 km heat points 0.07 km² among other areas mainly in protected natural areas. In this way, a baseline is generated as a tool for community resilience and decision-making

by key institutional actors, allowing work to strengthen governance, vulnerability reduction, adaptability, community participation, and emergency preparedness and response as axes keys to resilience.

Keywords: NBR, San Vicente, wildfire, risk management, spectral index.

INTRODUCCIÓN.

Uno de los factores más importantes que amenazan a los bosques es sin duda, incendios forestales. Aproximadamente el 98,8% de los incendios de los bosques en todo el mundo son causados por actividades humanas, y sólo 1,2% resultante de causas naturales (Sandal-Erzurumlu y Ebru-Yildiz, 2024). Por lo que, los incendios representan una amenaza recurrente que afecta los medios de vida de las comunidades. En este sentido, el presente estudio se enfoca en la caracterización espectral de los incendios ocurridos en el Departamento de San Vicente, El Salvador Centroamérica en el año 2024, utilizando herramientas de teledetección para la identificación y su análisis mediante imágenes multiespectrales de satélites de uso libre con sensores ópticos.

Asimismo, se pretende abordar aspectos claves de identificación, análisis, monitoreo y adaptación a los efectos adversos que plantea los incendios en las comunidades con un enfoque de resiliencia comunitaria que permita destacar la importancia de la organización comunitaria y el desarrollo territorial. Así también, integra un análisis de la gobernanza local ante la asistencia a estas emergencias como un componente a la adaptación, mitigación y concientización en espacios de participación con actores locales en la gestión integral de riesgos de desastres.

Esto debido a que los incendios se han convertido en un componente importante en la planificación y gestión de comunidades vulnerables a estos eventos, debido al cambio climático y el incremento demográfico, así como los componentes ambientales implícitos (Correo-Escaf *et al.*, 2021). Además, la ocurrencia de los incendios forestales es cada vez más frecuentes con un incremento en su intensidad, arriesgando las vidas humanas, infraestructuras y ecosistemas, lo que obliga a mejorar la capacidad de las comunidades locales para anticipar, resistir, adaptarse de forma resiliente y recuperarse de estos siniestros como medida esencial para reducir los impactos negativos y promover el desarrollo sostenible.

A nivel organizacional, un conjunto integral de acciones contra incendios puede plantearse como una estrategia en beneficio de la prevención, respuesta y recuperación. Estas medidas incluyen la planificación del sitio, la educación y concientización de agricultores, así como el uso de tecnologías avanzadas de detección y control de incendios (Ondurría y Pinto, 2004). Con lo cual, es clave la cooperación entre los diferentes actores de las instituciones y los diferentes niveles de gobierno local para coordinar esfuerzos y optimizar recursos.

Por lo cual, la gobernanza local mediante sus tomadores de decisión es un componente fundamental para la eficacia de las estrategias de resiliencia y por ello, deben contar con la información técnico-científico local y validada que permita una pronta respuesta y la posibilidad de generar políticas adaptadas a las características y necesidades específicas de sus comunidades. Esto incluye crear regulaciones, gestionar los recursos naturales y organizar sistemas de alerta temprana y planes de evacuación.

Todos estos elementos deben integrarse mediante un análisis técnico-científico de la academia, una participación ciudadana de las comunidades y la colaboración interinstitucional de la gobernanza local como pilares clave, que garantiza que se escuchen las voces de todos los actores y que las acciones sean inclusivas y sostenibles.

De esta forma, se propone diseñar una herramienta que denote la zonificación de incendios ocurridos en el departamento de San Vicente, para contribuir al fortalecimiento de un sistema de alerta temprana que permite aunar a las capacidades resilientes individuales, colectivas e institucionales. Con ello, es posible atender eficazmente a los incendios forestales reduciendo significativamente los daños en beneficio de una recuperación más rápida y eficiente. La información precisa sobre la ubicación, extensión y comportamiento de un incendio permite una asignación óptima de recursos y una planificación estratégica de las operaciones de emergencia.

En el contexto de los sistemas de alerta temprana, estos apoyan en la logística de evacuación, planes de contingencia y planes de emergencia a las comunidades afectadas. De igual manera, durante la fase de recuperación, el SAT continúa desempeñando un papel importante al proporcionar datos sobre las áreas afectadas y las necesidades de recuperación.

En resumen, los sistemas de alerta temprana son esenciales para la detección, concientización y recuperación de incendios, ya que ayudan a mitigar los impactos y desarrollar la resiliencia de las comunidades. Su inclusión en las estrategias de gestión de desastres no sólo protege vidas y bienes, sino que también promueve un desarrollo territorial más seguro y sostenible. La caracterización de las zonas incendiadas puede servir para el diseño de políticas y regulaciones relacionadas con el manejo del fuego a nivel nacional y local, y pueden aportar a una estrategia nacional para el manejo integrado del fuego (Cisneros *et al.*, 2024).

Además, la amenaza por incendios año con año en la época seca incrementa con frecuencia y en la intensidad en los impactos socioeconómicos y ambientales alrededor del mundo, ya que ocurren principalmente en bosques naturales o plantados producidos por la acción del ser humano o causados por la naturaleza, y que avanzan sin ningún control ocasionando daños ecológicos, climáticos, económicos y sociales, que se propaga sin control en los recursos forestales causando daños ecológicos, económicos y sociales (USAID, 2001 citado por Rosero-Cuesta y Osorio-Giraldo, 2013; Gil-Mora, 2022).

No obstante, a pesar del impacto los incendios se generan en parte por los productores agrícolas, ya que es una práctica común que ha sido utilizada desde tiempos inmemoriales y busca principalmente la quema de residuos de cultivos y la limpieza de terrenos para sembrar como una práctica para la preparación de la siembra (Ramos- Rodríguez *et al.*, 2022).

Es así que, los incendios forestales generan afectaciones ambientales de difícil cuantificación, que se incrementan con las prácticas culturales incorrectas que han pasado de generación en generación, las cuales fácilmente pueden perder su control y dar paso a un incendio forestal (Rosero-Cuesta y Osorio-Giraldo, 2013).

Resultado de ello, es la destrucción de los hábitats de especies locales y migrantes, incremento en la vulnerabilidad de las especies, disminución de la fotosíntesis lo que genera una disminución en la tasa de generación de oxígeno, producción de la muerte directa de las especies, así como alteración de las cadenas alimenticias entre otros factores (Gil-Mora, 2022).

Por lo que, al considerar las reservas ecológicas, estas presentan más afectación total por áreas de quema de manera acumulada, así como las tierras agropecuarias, la vegetación arbustiva y herbácea son las clases de cobertura vegetal que tienen mayor incidencia histórica de áreas de quema en relación con su superficie (Cisneros *et al.*, 2024).

Por tanto, estas amenazas se originan como consecuencia de una modificación de la fertilidad de los suelos al disminuir la acidez, afectar el ciclo de nutrientes y los procesos biológicos que también, pueden verse alteradas las propiedades físicas como la porosidad y la estabilidad estructural, ya que se generan capas hidrofóbicas en los suelos y disminuye su capacidad de infiltración (Rosero-Cuesta y Osorio-Giraldo, 2013).

En consecuencia, de lo antes señalado ante la gravedad que representan los incendios se deben desarrollar sistemas de vigilancia remota y el desarrollo de sistemas de repuesta inmediata a eventos (Parra-Lara y Bernal-Toro, 2010). Asimismo, se deben mejorar los sistemas de prevención y extinción, diseñar la cartografía de áreas afectadas por los fuegos y el estudio de la posterior evolución de las zonas quemadas, como objetivos primordiales en la gestión para reducir sus efectos. Inicialmente, los métodos empleados se basaban principalmente en la información obtenida en los trabajos de campo, evolucionando hacia la aplicación de nuevas tecnologías permitiendo una evaluación estadística y cartográfica más precisa (Dorrego y Álvarez, 2009).

La Percepción Remota como herramienta en la Gestión de Incendios.

Los incendios pueden ser determinados con tecnologías de geoposicionamiento cada vez más avanzadas, con la obtención de datos mediante técnicas de

observación de la tierra y el procesamiento de grandes volúmenes de información como una herramienta para el monitoreo de los recursos naturales y su degradación mediante su análisis temporal. Es así que, la percepción remota o teledetección mediante imágenes de satélite, es una tecnología que utiliza sensores remotos para obtener información sobre la superficie terrestre y se ha convertido en una herramienta para el monitoreo espectral del suelo, cuerpos de agua y la vegetación, así como de otros parámetros biogeoquímicos. Los productos de datos de teledetección dan la oportunidad de analizar métricas como la salud, extensión, humedad y densidad de la vegetación (Follette-Cook *et al.* 2021).

Con lo cual, la teledetección se plantea como una herramienta para evaluar la firma espectral mediante algoritmos de procesamiento de la información obtenida en lo que respecta a la interacción del espectro electromagnético con las diferentes superficies de la vegetación y el estado suelo. Esta ventaja plantea la posibilidad de aplicar esta tecnología como parte de las metodologías para evaluar los riesgos que planea el suscitarse una amenaza, evaluar la exposición y vulnerabilidad en la zona de interés, valorar la magnitud y la frecuencia de los impactos, así como implementar sistemas para el monitoreo a escala de las diferentes amenazas por incendios (NASA, 2023).

La teledetección satelital juega un papel importante tanto en los avances de la ciencia de los incendios como en las aplicaciones para los incendios y las respuestas por parte de la sociedad. Existen diferentes satélites, sensores y sistemas que recopilan información en el rango del espectro electromagnético específico del espectro visible, infrarrojo cercano e imágenes infrarrojo de onda corta, tales como: Landsat 7, 8 y 9, Sentinel 1 y 2, MODIS, Visible Infrared Imagen Radiometer Suit (VIIRS), Soil Moisture Active Passive (SMAP), ECOSTRESS, EO-1 Hyperion, Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI), FIRMS (Fire Information for Resource Management System) entre otros son destinados para el monitoreo y evaluación de los cambios de la cubierta de suelo por incendios agrícolas o forestales (Follette-Cook *et al.*, 2021).

La mayoría de estos satélites son considerados satélites ópticos y radiométricos multiespectrales. Sin embargo, existe satélites con sensores que pueden obtener mayor información de un pequeño rango del espectro electromagnético generando imágenes hiperespectrales.

Una forma de aprovechar estas tecnologías es mediante el uso de imágenes multiespectrales de los satélites, que toman un pequeño rango de longitud de onda del espectro electromagnético en bandas individuales, las cuales pueden ser transformada en una banda compuesta para conseguir que ciertos rasgos o patrones de la superficie se puedan diferenciar mejor.

Otra forma es realizar el cálculo de índices espectrales para el análisis de vegetación, suelo y cuerpos de agua que pueden ser aplicados en el análisis de las áreas quemadas, contenido de agua y parámetros biofísicos en general.

Estos índices son una ecuación matemática que es aplicada en varias bandas espectrales para cada pixel y con lo cual, se consideran como una razón que destaca un proceso específico o una propiedad de las diferentes superficies, al reducir los efectos de la atmosfera, el ruido y el ángulo del sol para realizar análisis del espacio en un periodo determinado (Beaudry *et al.*, 2023; Olivera y Fernández, 2024).

Es así que, se pueden utilizar índices como Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) para estudiar la calidad del agua de los estanques y pequeños cuerpos de agua, Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) y el Floating Algae Index (FAI) son propuestos para determinar concentraciones de Clorofila (Chl-a) en áreas costeras y estuarinas, el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) se destina para analizar la salud de la vegetación o presencia de microorganismos en cuerpos de agua (Torres-Pérez *et al.*, 2023).

La detección de zonas quemadas a partir de imágenes de satélite es una de las formas más sencillas y útiles de la teledetección por satélite. En general, el enfoque se basa en una detección de cambios al analizar imágenes previas y posteriores al evento. Sin embargo, surgen algunas fuentes potenciales de error, como la presencia de nubes en el período previo o posterior al evento (Laneve *et al.*, 2024).

No obstante, los índices establecidos para zonificación de incendios son los que relación la banda del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta, en los que existen una amplia gama de índices espectrales que pueden ser utilizados para determinar zonas de incendios como el Normalized Burn Ratio (NBR) y el plus (NBR+), Normalized Burn Ratio-SWIR (NBRSWIR), Normalized Difference Shortwave Infrared Index (NDSWIR), Mid- Infrared Bi-Spectral Index (MIRBI) y Burnt Area Index for Sentinel 2 (BAIS2) (Alcaras *et al.*, 2022).

Con estos índices se facilita el monitoreo de las zonas que tienen mayor ocurrencia, se puede realizar un análisis económico y el impacto ambiental que ocasionan estos siniestros al detectarse de manera remota y con la validación en el lugar.

Es de esta manera que, los estudios sobre incendios de cobertura vegetal y biodiversidad son de gran importancia en la comprensión de las tensiones y conflictos que establece el desarrollo en las relaciones de la sociedad y la naturaleza (Parra-Lara y Bernal- Toro, 2010). No obstante, los datos y la información global sobre los incendios forestales están fragmentados y son inconsistentes en muchas áreas del mundo, pero es posible estimar un acercamiento del impacto de los incendios al aplicar tecnologías de percepción remota.

ANTECEDENTES.

El estudio fue realizado en las zonas rurales destinadas principalmente a parcelas agrícolas o zonas de áreas naturales protegidas en el departamento de San Vicente, El Salvador, Centroamérica, a una longitud W 88°48'0" y una latitud N

13°37'59.99" en la que se delimitan dos municipios; San Vicente Sur que le conforman los distritos de San José Verapaz, Guadalupe, Tepetitán, San Cayetano Istepeque, Tecoluca y San Vicente, así como el municipio de San Vicente norte conformado por los distritos de San Sebastián, Santo Domingo, San Esteban, Santa Clara, San Ildefonso y Apastepeque.

El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social en el año 2003 destaca que la zona de estudio cuenta con una población de 52,404 habitantes, de los cuales, 26,039 son hombres (49.69%) y 26,365 son mujeres (50.31%); del total de población 30,608 es población urbana y 21,796, es población rural, en el siguiente cuadro se muestra la población desagregada por edades y sexo (Comité Operativo de Emergencias Municipal, 2003).

Los terrenos son llanos cultivados en forma dispersa con maíz, maicillo (sorgo), hortalizas, caña de azúcar, frutales y otros como medios de vida de subsistencia o comercio interno principalmente. En algunos terrenos de las Clases VI y VII hay cultivos de café y pastos. En terrenos de fertilidad intermedia hay cultivos de henequén, y en terrenos de fertilidad variada con una vegetación natural y matorrales. La zona de San Vicente se encuentra a mayor altitud que las otras dos zonas (425 metros sobre el nivel del mar), pero las tres tienen el mismo clima, que corresponde a Sabana Tropical Caliente. El promedio de lluvia anual en la zona de San Vicente varía entre 1900 y 2000 milímetros. El país se caracteriza por contar con una época lluviosa que normalmente ocurre desde la segunda quincena de mayo hasta la segunda quincena octubre y la época lluviosa desde noviembre hasta abril. Como en la mayor parte de las zonas tropicales, la lluvia ocurre principalmente en tormentas cortas, intensas, convectivas, que cubren extensiones pequeñas. Estas tormentas convectivas están asociadas con zonas de inestabilidad en los vientos del oriente que pasan sobre la América Central. Estas zonas de inestabilidad procedentes del Caribe son a menudo intensificadas por la influencia de corrientes de aire húmedo tropical del océano Pacífico oriental (Consejo Nacional de Planificación y Coordinación Económica, 1974).

Estas condiciones climáticas se ven influenciadas con la incertidumbre en los diferentes escenarios que plantea un incremento en las temperaturas y períodos más intensos y frecuentes de sequía que agravan afectan la población mencionada y daños a la biodiversidad con la ocurrencia de incendios principalmente en las zonas agrícolas. Para este año el Servicio de Cambio Climático del sistema Copernicus ha registrado 1.28° como temperatura promedio en junio de 2024 y que proyecta alcanzar 1.5°C para marzo de 2033 (Copernicus, 2024).

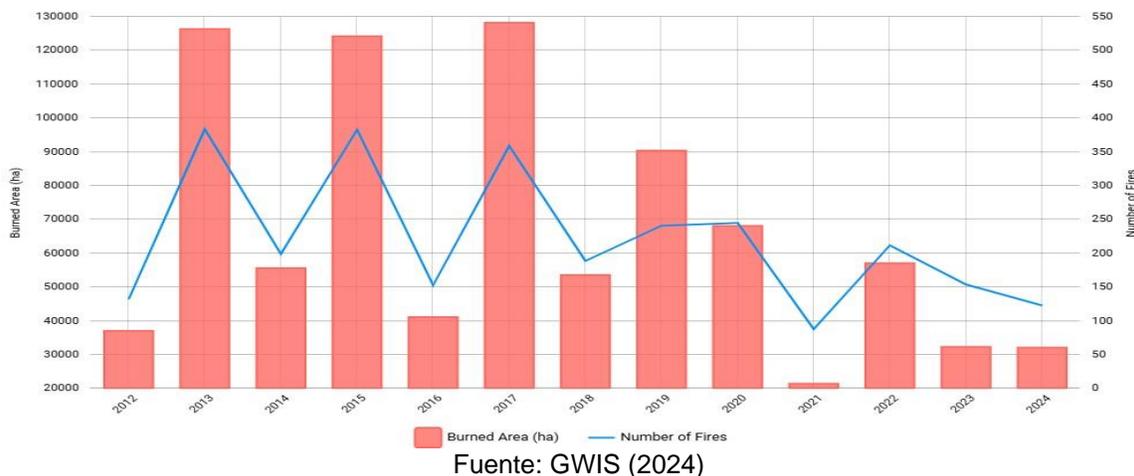
Asimismo, para el año 2024 en El Salvador incrementó el número de afectaciones por incendios a pesar de ser un país con un área territorial relativamente pequeña de 20,422.75 km² de la cual 1,463.04 km corresponde a zona boscosa, 10,785.42 km² corresponde a savana, 266.04 km² zona arbustiva, 2,753.82 km² corresponde a cultivos y 494.82 km² en las que se pueden incluir zonas urbanas y otras (Group on Earth Observation, 2024).

En este sentido, los productos globales de áreas quemadas derivados de imágenes satelitales brindan información sobre los atributos espaciales y temporales de todas las áreas afectadas por incendios, pero no contienen información sobre eventos de incendios forestales individuales.

Este hecho hace imposible distinguir ciertos tipos de incendios forestales o estudiar su comportamiento u ocurrencia en función de la dinámica de eventos individuales. Ante esta situación el programa Copernicus brinda diferentes servicios de análisis de los recursos naturales generando datos mediante una flota de satélites y sensores especializados. Uno de los servicios es el Sistema de Información de Incendios Globales (Global Wildfire Information System - GWIS) que se derivan siguiendo la plataforma GlobFire que utiliza los productos espectrales obtenidos del sensor MODIS y el VIIRS (Visible Infrared Imagin Radiometer Suite) de los satélites TERRA y AQUA que permite definir el área quemada para caracterizar eventos de incendios forestales y calcular el área quemada de cada evento (Group on Earth Observation, 2024).

No obstante, el sistema GWIS permite consultar un base de datos de los diferentes incendios suscitados en El Salvador almacenando información estadística de áreas quemadas y número de incendios ocurridos en los diferentes con información desde el año 2012 hasta el 2024. Por consiguiente, se determina la ocurrencia anual a nivel de El Salvador y con lo cual, se puede identificar los años con más área quemada que corresponde a 2013, 2015, 2017 y 2019 con valores que oscilan entre los 90,000 a 130,000 Ha quemadas y un estimado entre 300 a 400 incendios. En el Año 2024 se registraron cerca de 100 a 150 incendios significativos o un gran número considerado como un subregistro que corresponde a incendios pequeños focalizados en los que no existe registro y esto impacto a un área territorial de 30,000 (Fig. 1) (GEO, 2024).

Figura 1. Registro de áreas quemadas y número de incendios suscitados anualmente en El Salvador consultado de la base de datos del Global Wildfire Information System (GWIS) de Copernicus.



Los incendios suelen suscitarse en la época seca que corresponde desde diciembre a abril, con lo que principalmente surge un incremento sustancial en el número de incendios a partir de febrero hasta abril con valores cercanos a los 30 incendios por semana en promedio desde el año 2012 hasta el 2023 y para el año 2024 en abril se alcanzaron 20 incendios. No obstante, ya se han alcanzado máximos de hasta 90 incendios por semana (Fig. 2).

De igual manera, el periodo de mayor afectación por incendios oscila de febrero a marzo con un promedio de 10,000 a 12,000 Ha incendiadas desde el año 2012 al 2023 y un incremento en abril con cerca de 7,000 Ha quemadas para el año 2024, pero que ya se han alcanzado registros de hasta 35,000 Ha incendiadas principalmente en marzo y que corresponden a quemas agrícolas controladas principalmente del cultivo de la caña y seguido de granos básicos, así como de hortalizas que han llegado a afectar hasta áreas naturales protegidas (Fig. 3) (Group on Earth Observation, 2024)

Figura 2. Registro de número de incendios suscitados semanalmente en El Salvador consultado en la base de datos del Global Wildfire Information System (GWIS) de Copernicus.

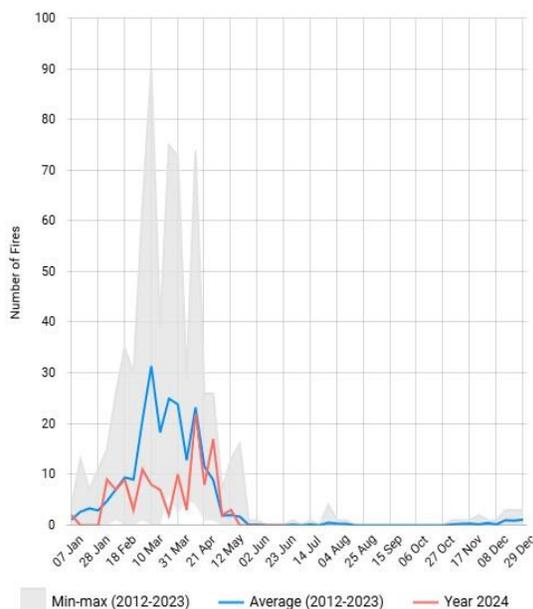
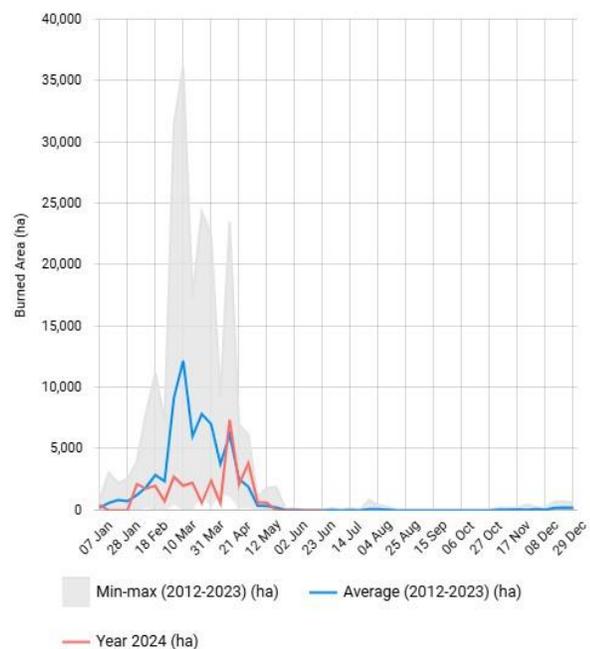


Figura 3. Registro de áreas quemadas semanalmente en El Salvador consultado en la base de datos del Global Wildfire Information System (GWIS) de Copernicus.



En este sentido, es necesario considerar los parámetros meteorológicos ya que las altas temperaturas, el aire seco y principalmente el contenido de humedad relativa son factores que inciden en la propagación de los incendios (Tian *et al.*, 2022).

La modificación de los regímenes de fuego y su impacto en la recuperación de la vegetación, propiedades del suelo y la estructura del combustible son áreas de investigación clave actuales para poder determinar umbrales de la vegetación susceptible a los incendios forestales (Peña-Molina *et al.*, 2024). Es así que, las perturbaciones y la restauración de los bosques son procesos clave en la transmisión de carbono entre la superficie terrestre y la atmósfera.

En los bosques, el fuego es el principal y más común disturbio. El proceso de reconstrucción de la vegetación post-desastre juega un papel esencial en la restauración de la estructura y función de un bosque, y también mantiene la salud de las personas y la salud del ecosistema (Zhao *et al.*, 2023). Con lo cual, se puede considerar imprescindible el solventar la necesidad de monitorear y analizar las zonas de afectaciones en espacios de discusión y organización con los actores clave de las instituciones en gestión de riesgos y gobernanza local para la asistencia y atención de estas amenazas”.

En este espacio se evalúan alternativas para la atención a este tipo de eventos y que permite impulsar actividades para la conservación y restauración de los recursos naturales. La Mesa de Fuego se encuentra conformada por instituciones responsables de la gobernanza local, la gestión de riesgos, los recursos naturales, cuerpo de bomberos y servicios de atención inmediata.

Finalmente, queda claro que la mesa de fuego lleva a cabo acciones como jornadas de atención o mitigación de los incendios en las comunidades la zona rural, jornadas de reforestación en áreas naturales protegidas, así como jornadas de concientización a productores y miembros de las diferentes comunidades en los distritos de San Vicente para disminuir la ocurrencia los incendios. Las zonas que han sido intervenidas se han enfocado en la zona noreste de San Vicente y Sur, puesto que se caracterizan por ser zonas de producción agrícola principalmente de la caña de azúcar.

METODOLOGÍA.

En la caracterización espectral de las zonas incendiadas se utilizó la metodología de Mapeo de áreas incendiadas con el programa Plataforma de Aplicación Sentinel (SNAP) publicada por Sercor Italia SPA (2017) en el que se utiliza el índice espectral Razón o Proporción Quemada Normalizada (Normalized Burn Ratio - NBR) previamente definido por García-López y Caselles (1991), puesto que tiene alta reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y baja reflectancia en el infrarrojo de onda corta con valores que oscilan entre -1 a 1. Este rango del espectro suele interaccionar con las estructuras internas de la planta y las superficies de suelo descubierto.

La radiación (solar reflejada, terrestre o emitida por el sensor y reflejada) que llega de la superficie terrestre y que ha atravesado la atmósfera, es almacenada en formato digital. El tipo de información que se obtiene dependerá de la longitud de onda en la que el sensor capte radiación. El análisis de esta información permite el reconocimiento de las características de los objetos observados y de los fenómenos que se producen en la superficie terrestre y oceánica y en la atmósfera

Por tanto, el resultado de aplicar este índice mostrará zonas con vegetación al contar con valores altos positivos, mientras que los valores bajos cercanos a cero indican suelo descubierto y áreas recientemente incendiadas. De esta forma, se puede establecer las condiciones previas y posteriores a la ocurrencia del incendio y realizar la caracterización con el fin de establecer una línea base.

El fundamento de este método se basa en procesar los datos de reflectancia obtenidas a nivel satelital por el Sentinel 2 con un nivel de procesamiento L2A, los cuales ya cuentan con corrección atmosférica lo que implica disminuir el efecto de la radiación solar y su interacción con las diferentes partículas de la atmósfera. El objetivo de utilizar este tipo de imágenes es determinar los valores de reflectancia más certeros al remover los efectos de aerosoles y gases de la atmósfera (Bottom-Of-Atmosphere, BOA).

La validación de la información supone el analizar los niveles de reflectancia del NBR haciendo un sondeo *in situ* de las zonas de mayor impacto o aquellos incendios más significativos con gráficos de dispersión, así como utilizar información proporcionada por las comunidades o actores claves que atienden los siniestros.

Además, durante la validación se realizó una combinación multiespectral para penetración atmosférica antes y después de ocurrido el periodo de incendios mediante el procesamiento de imágenes satelitales del Sentinel 2 para asegurar las zonas que fueron incendiadas durante el periodo de interés.

Es así que se elaboró una combinación multiespectral de penetración atmosférica con la finalidad de resaltar las zonas incendiadas, la cual dispone del uso de 3 canales RGB con los que cuentan los píxeles de los monitores: rojo, verde y azul, que pueden utilizarse cada canal del monitor para representar la información espectral o los niveles de reflectancia de una banda y obtener así una composición de color. Por tanto, los datos multiespectrales se pueden representar por medio de composiciones de color o combinaciones de tres bandas (IGN, 2018).

De esta manera, se utilizaron las bandas 12 y 11 aplicada para hacer análisis de humedad en suelo o humedad en la vegetación dentro del infrarrojo de onda corta con una longitud que oscila entre 2202.4 nm a 2185.7 nm y 1613.7 nm a 1610.4 nm respectivamente, con una resolución espacial de 20 m. Asimismo, el uso de la banda 8 del infrarrojo presenta una longitud de onda de e 864.7 nm a 864.0 nm y 20 m de resolución espacial, la cual es utilizada para analizar la salud de la vegetación.

La utilización de la B12, B11 y B8A es debido a que se puede analizar la firma espectral de las superficies que cuentan con estrés hídrico al procesar los niveles de reflectancia de la banda 12 y 11. Asimismo, la vigorosidad o salud de la vegetación se evalúa con los niveles de reflectancia de la banda 8, debido a que se pueden analizar estructuras internas de la planta y al ajustar esta combinación en el canal RGB se puede filtrar la información.

El área de interés definida para el estudio corresponde a la delimitación departamental de San Vicente, El Salvador, Centroamericana, en la cual se seleccionaron imágenes del 1 de enero de 2024 y otra del 15 de abril de 2024, considerado como el periodo en el que ocurren más incendios en El Salvador y que se ajusta a la época seca de la región.

Sin embargo, para lograr caracterizar y delimitar la zona fue necesario procesar una imagen de geocolor para ambas fechas antes mencionadas, las cuales proporcionan una aproximación lo más cercana posible al color real durante el día, y por lo tanto permiten una interpretación intuitiva de las características de parámetros biogeoquímicos y topográficos de la zona. Este geocolor es elaborado mediante el uso de la banda 4 (664 nm) correspondiente al color rojo, banda 3 (559.8 nm) y la banda 2(492.4 nm) (CIRA, 2019).

Mediante el uso de plataformas de Sistemas de Información Geográfica se procesó el índice NBR mediante el cálculo de la diferencia entre los valores de reflectancia de la banda 12 y la banda 8A $NBR: (B12 - B8A) / (B12 + B8A)$ (García-López y Caselles, 1991).

Para ello, se utilizó ArcGis para delimitar la zona de interés y determinar las combinaciones espectrales necesarias. Adicionalmente, se identificaron diferentes incendios registrados al momento, así como zonas que fueron afectadas por estos; mediante la determinación de puntos de interés para el análisis de reflectancia del índice espectral con SNAP al procesar gráficos de dispersión. De esta manera, se recopiló la información biogeofísica de la zona aplicando mediante percepción remota para caracterizar los incendios de San Vicente.

Es necesario aclarar que el estudio no se centró en delimitar el área total impactada por los incendios registrada mediante el uso del índice espectral, puesto que solamente se busca la validación de la metodología y su posible aplicabilidad en la zona, así como considerar la futura implementación de otros índices que permita brindar un acercamiento de la intensidad de estos siniestros.

Una vez obtenida la información se socializó con los actores claves en gestión de riesgo en la zona con la finalidad de analizar en un espacio participativo considerando los ejes claves de la gestión del riesgo desde la identificación y monitoreo de la amenaza, el impacto posible en las comunidades de la zona y las

medidas de concientización como parte de las actividades en prevención de incendios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Al procesar la combinación multispectral de penetración atmosférica se denota que en la mayor parte del territorio disminuyen los valores de reflectancia en el infrarrojo cercano desde el 1 de enero al 15 de abril y que se proyecta en el canal azul, lo que se interpreta como una disminución en la salud de la vegetación principalmente en zonas de producción agrícola cambiando de colores azules a verdes al ser terrenos descubiertos y colores café cuando han sido zonas incendiadas previo a ser tomada la imagen.

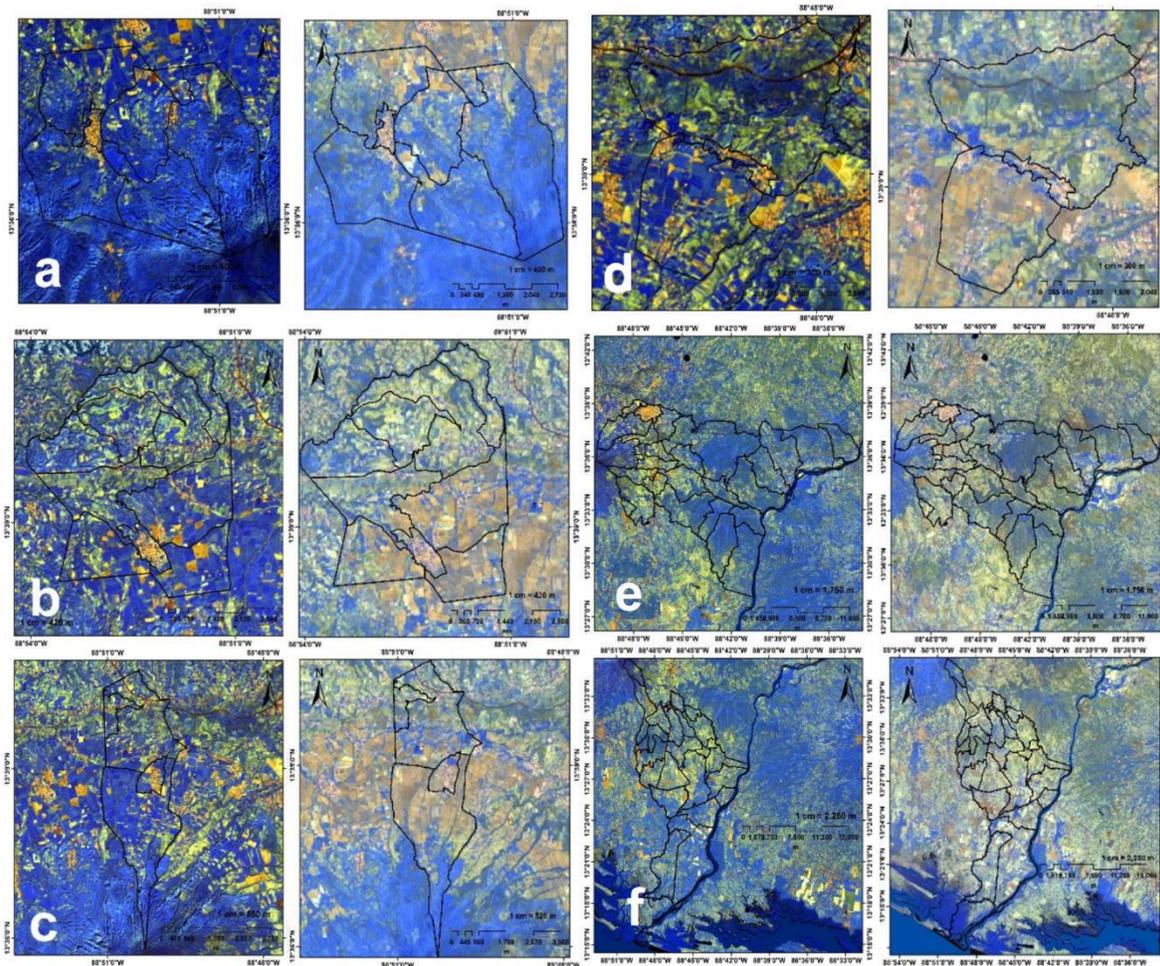
En este sentido, en el departamento de San Vicente ocurrieron incendios que pueden identificarse por áreas café con forma geométrica definida y que corresponden en su mayoría a incendios agrícolas como medidas de preparación del terreno previo a la época lluviosa.

Para el caso del municipio de San Vicente Sur la ubicación de estos incendios son las siguientes: la zona norte del distrito de Guadalupe, al sur en Verapaz, la zona centro de Tepetitán, al sur en San Cayetano Istepeque, al este en San Vicente y al sur en Tecoluca.

En su mayoría, son incendios agrícolas en parcelas de producción principalmente de caña de azúcar, granos básicos y hortalizas en menor medida. Esto debido a que la economía se basa principalmente la producción y comercialización de azúcar y derivados obtenidos de esta en Ingenios azucareros con modelos de producción convencional. No obstante, también se pudo identificar afectaciones de bosques perennes en Áreas Naturales Protegidas como La Joya al este en el distrito de San Vicente y el cercano al cerro la Cucaracha (Fig. 4).

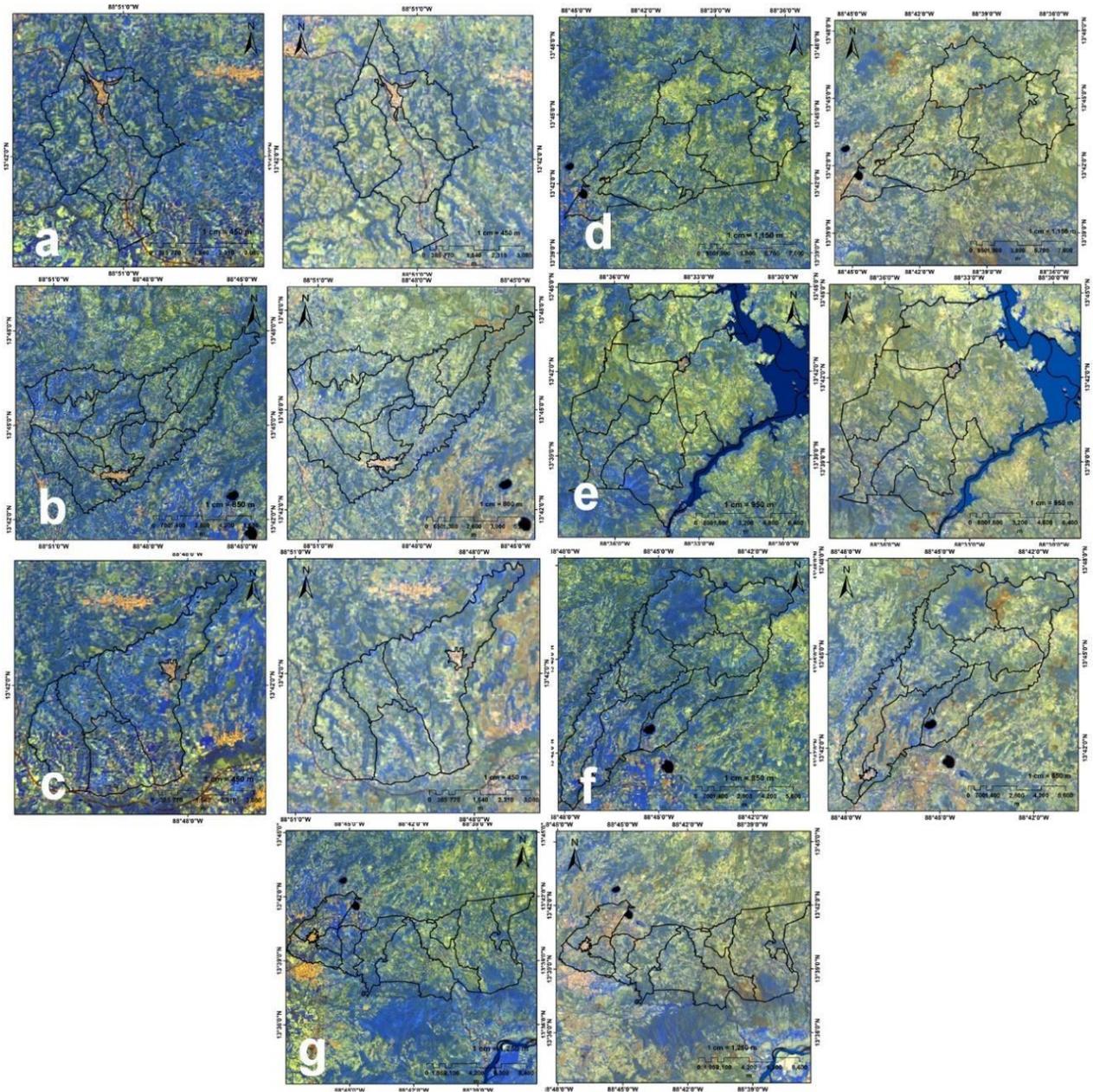
Asimismo, se deben descartar todos los incendios pequeños puesto que la resolución espectral de las imágenes no logra detectar y por lo cual, se sugiere utilizar otra metodología como el uso de vehículos aéreos no tripulados con cámara espectral para realizar la captura de los datos a nivel local. No obstante, esto supondrá contar con equipo especializado y personal capacitado que permita dar asistencia inmediata a las comunidades y que dependerá de los recursos disponible

Mapa 1. Zonificación de incendios proyectados con una combinación multispectral de penetración atmosférica de los distritos de San Vicente Sur del periodo del 01 de enero y el 15 de abril de 2024. La proyección de los distritos muestran una imagen inicial de la zona que fue incendiada a la izquierda y a la derecha una imagen posterior a la ocurrencia del periodo de incendios: a) Guadalupe b) Veracruz c) Tepetitán d) San Cayetano Istepeque e) San Vicente y f) Tecoluca.



En el caso del municipio del San Vicente Norte no se registraron muchas zonas incendiadas salvo el caso de los distritos de San Esteban Catarina que presentó un incendio relativamente grande con un perímetro de 12,514.5 m y un área de 2.6 Km² y otro en el sureste del distrito de Apastepeque con un perímetro de 12,1717 m y un área de 3.7 Km² ubicado en el Cerro Sihuatepec y 52 m de perímetros con 0.76 Km² de área visto como un punto de calor ubicado en el área Natural Protegida La Joya (Fig. 5)

Mapa 2. Zonificación de incendios proyectados con una combinación multispectral de penetración atmosférica de los distritos de San Vicente Norte correspondiente al periodo del 01 de enero y el 15 de abril de 2024. La proyección de los distritos muestra una imagen inicial de la zona que fue incendiada a la izquierda y a la derecha una imagen posterior a la ocurrencia del periodo de incendios. Los distritos evaluados son: a) Santo Domingo b) San Sebastián c) San Lorenzo d) Santa Clara e) San Ildefonso f) San Esteban Catarina y g) Apastepeque.



De igual manera, se realizaron las proyecciones de geocolor de los distintos distritos de San Vicente Sur a la que se le aplicó los valores negativos desde -0.27 del índice NBR como filtro para identificar las zonas que fueron incendiadas y descartar

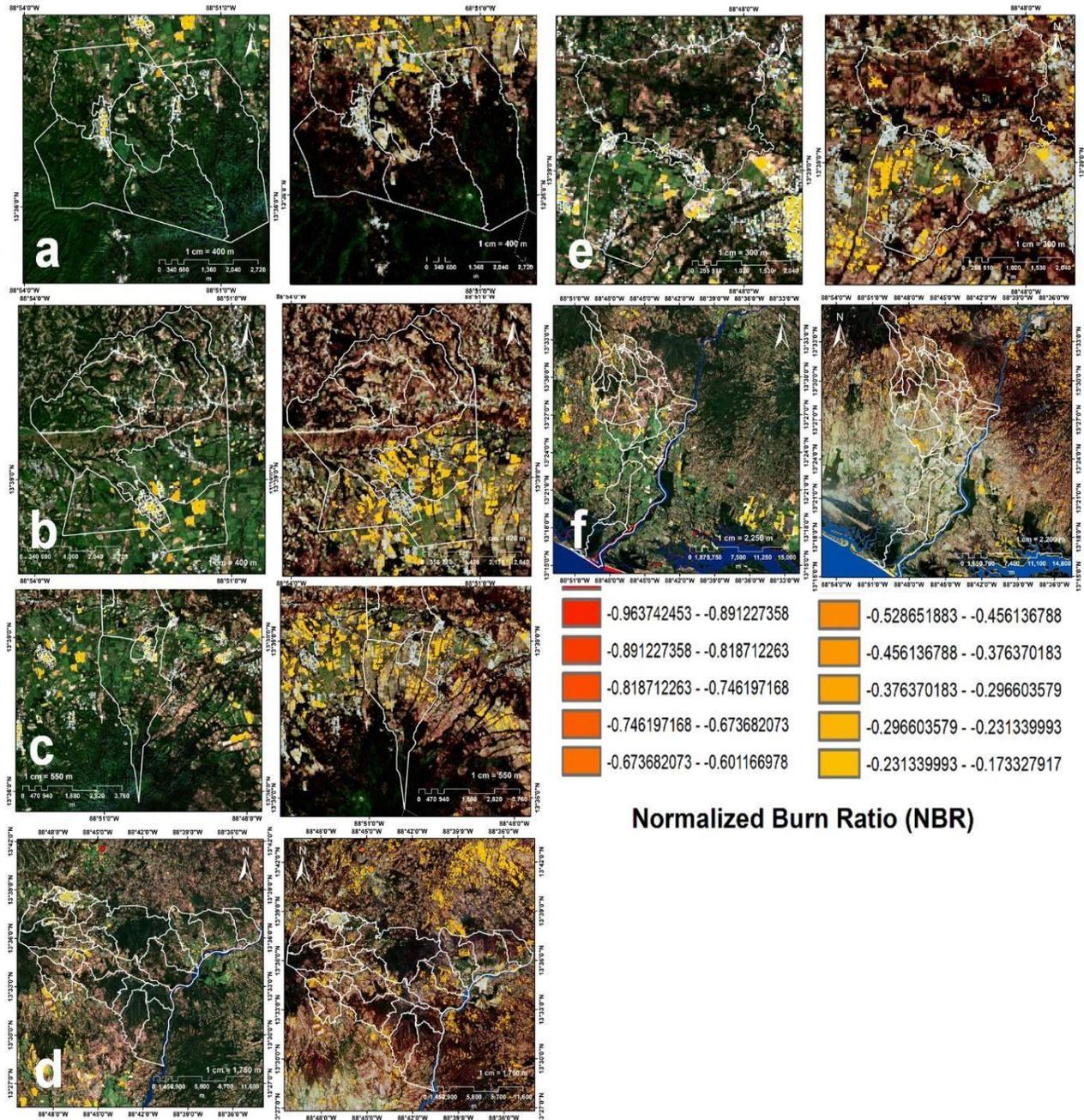
las zonas descubiertas de vegetación y las que cuentan con abundante vegetación. Es así pues, que se consideró que los valores por encima de 0.25 corresponden a zonas con vegetación, valores cercanos a 0 son zonas con bajo crecimiento de vegetación, valores menores a 0 corresponde a zonas estables haber sido quemadas, valores entre -0.27 a -0.44 consideradas como zonas quemadas con gravedad baja a moderada, -0.44 a -0.66 zonas quemadas con gravedad moderada a alta y valores por encima de 0.66 zonas incendiadas con gravedad alta que ocurrieron el día en que fue tomada la imagen.

De esta forma, se utilizó una paleta de colores con diferentes rangos de NBR para poder validar las zonas incendiadas con registros previos que poseen los actores locales en gestión de riesgos de la Comisión Departamental de Protección Civil. Estos registros son proporcionados por los observadores locales al considerar aquellos que pueden representar una amenaza directa a las comunidades y con lo cual, se atiende el siniestro y se coordinan acciones de prevención, mitigación y concientización tanto en materia de incendios agrícolas como en forestales.

Por esta razón, es válido considerar que el NBR es capaz de detectar áreas quemadas con gran precisión. Al comparar imágenes satelitales antes y después del incendio, el índice proporciona una clara delineación de las áreas afectadas, lo cual es esencial para una respuesta rápida y efectiva. Además, el Sentinel 2 L2A posee una recurrencia de toma de imágenes de cinco días de datos a gran escala y con alta frecuencia temporal, por lo que es posible crear una línea base para futuras investigaciones en años posteriores. Esto permite un monitoreo continuo y actualizado de vastas extensiones de terreno, incluyendo áreas remotas y de difícil acceso, donde los métodos tradicionales de monitoreo podrían no ser factibles, así como cuantificar la severidad del daño. Sin embargo, al ser sensores ópticos existe la posibilidad de obstrucción del ángulo de visualización del satélite para realizar las diferentes observaciones de la tierra por la presencia de nubes.

La visualización de los datos obtenidos mediante NBR puede ser una herramienta poderosa para educar al público y a los responsables de la toma de decisiones sobre la magnitud y el impacto de los incendios forestales. Un público mejor informado es más propenso a apoyar medidas de prevención y a actuar de manera responsable. El uso del NBR como índice espectral para la caracterización de incendios se plantea como una herramienta con la que se pueden validar las zonas incendiadas mediante la reflectancia del infrarrojo cercano y de onda corta del espectro electromagnético que posee las diferentes superficies y que son propias de su firma espectral, con lo que se delimitó las zonas en los distintos distritos (Fig. 6).

Mapa 3. Zonificación de incendios de los distritos de San Vicente Sur proyectados con una combinación para geocolor acoplada con el índice Normalized Burn Ratio (NBR) para el periodo del 01 de enero y el 15 de abril de 2024. La proyección de los distritos muestran una imagen inicial de la zona que fue incendiada a la izquierda y a la derecha una imagen posterior a la ocurrencia del periodo de incendios: a) Guadalupe b) Verapaz c) Tepetitán d) San Cayetano Istepeque e) San Vicente y f) Tecoluca.



Es necesario tomar en cuenta que el agua presenta una alta reflectancia en el infrarrojo cercano correspondiente a la banda B08 pero que no denotan incendios y deben considerarse en el análisis.

Por tanto, los cuerpos de agua, ríos, lagos, lagunas, embalses entre otros se debe aplicar una máscara, filtro o excluirse del análisis para incendios puesto que mostrarán altos valores negativos de NBR. Con lo cual, se sugiere el aplicar el índice de agua de diferencia normalizada (Normalized Difference Water Index NDWI) o el índice de agua modificado de diferencia normalizada (Modified Normalized Difference Water Index MNDWI) para ubicar los cuerpos de agua y que de esta forma no influyan en el análisis.

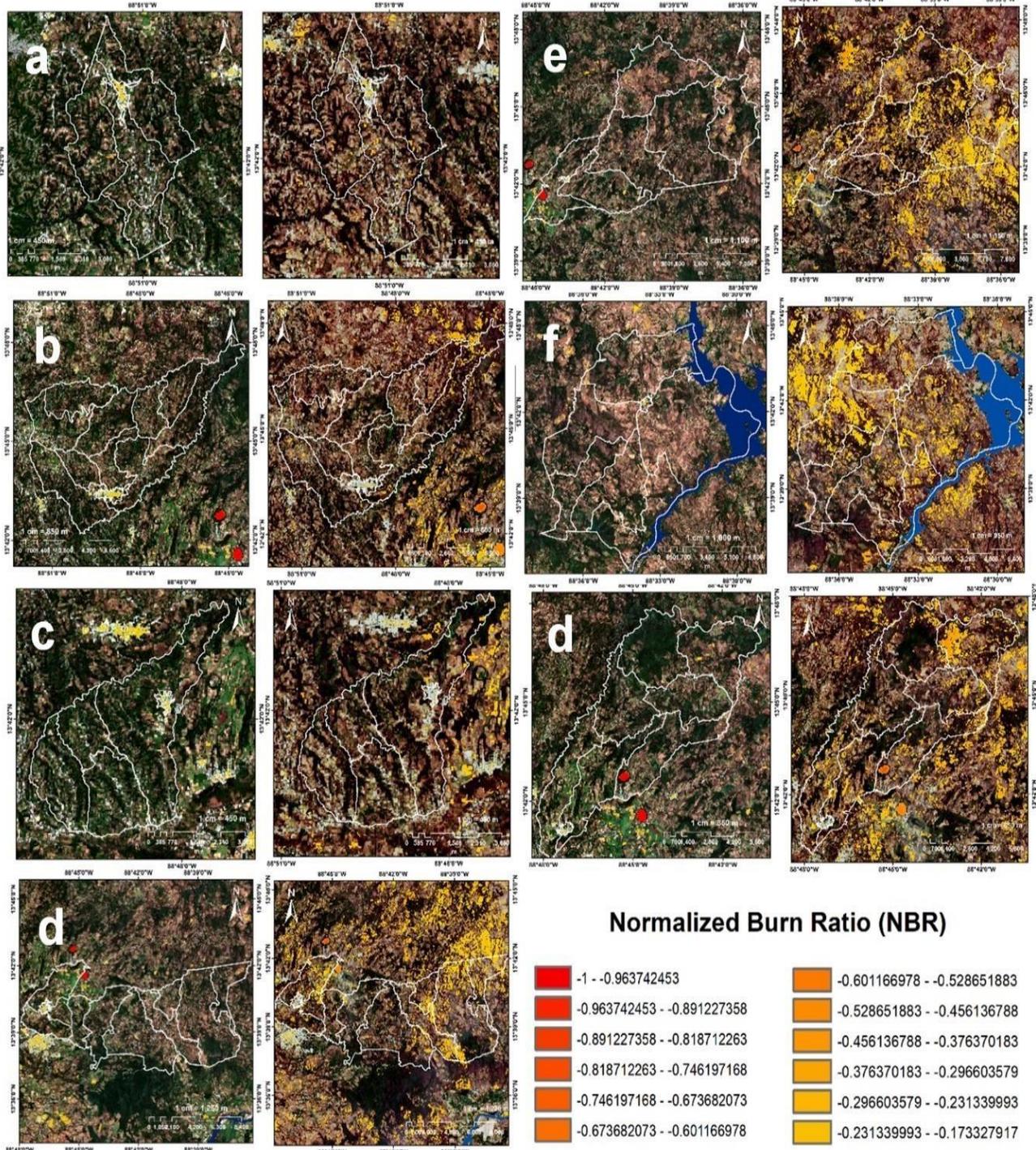
Una vez considerado lo anterior, el resultado de este análisis permitió validar la información de las imágenes multiespectrales mediante la interpretación el NBR y así corroborar los daños ocurridos en San Esteban y Apastepeque entre los incendios más grandes registrados.

En este sentido, los actores clave de las Unidad de Medio Ambiente y Gestión de Riesgos responsable de la gobernanza local validaron los datos reportados de estos incendios al realizar el control de la propagación y la concientización de las comunidades en jornadas que se focalizaron en los productores agrícolas y niños al considerar a estos como los futuros productores de la zona.

En el caso de Guadalupe los valores de NBR oscilan los -0.1 a -0.25, Verapaz alcanza máximos de -0.35, Tepetitán cuenca con valores de -0.35 y San Vicente cuenta con un punto de calor con valores máximos de -0.75 cercano al Área Natural Protegida La Joya.

Algunos distritos se caracterizan por presentar mayor número como es el caso de Apastepeque, San Esteban Catarina, Santa Clara, Tepetitán, San Cayetano, Tecoluca y San Vicente por contar con zonas de producción agrícola. Por lo contrario, los distritos de Santo Domingo, San Sebastián, San Lorenzo y San Idefonso presentaron menor número de incendios tanto en el área de limitada por el índice espectral como los reportes de las comunidades. Para el caso de San Idefonso la mayor parte de lo mostrado por el índice corresponde a parcelas descubiertas o destinadas para la producción agrícola, ya que no se reportaron incendios significativos durante el periodo de estudio (Fig. 7).

Mapa 4. Zonificación de incendios de los distritos de San Vicente Norte proyectados con una combinación para geocolor acoplada con el índice Normalized Burn Ratio (NBR) para el periodo del 01 de enero y el 15 de abril de 2024. La proyección de los distritos muestran una imagen inicial de la zona que fue incendiada a la izquierda y a la derecha una imagen posterior a la ocurrencia del periodo de incendios: a) Guadalupe b) Verapaz c) Tepetitán d) San Cayetano Istepeque e) San Vicente y f) Tecoluca.



Asimismo, para complementar la caracterización se utilizó programa Sentinel Application Platform (SNAP) de la Agencia Espacial Europea, para delimitar los distritos de interés y poder ubicar los puntos de calor, así como procesar un diagrama de dispersión que demuestre las variaciones en la reflectancia del NBR.

Para lograr esto es necesario adaptar las imágenes satelitales puesto que algunas cuentan con diferentes resoluciones espaciales y por lo cual, es necesario que cada pixel de cuenten con la misma resolución, es decir, reajustar la resolución de 30 m de la banda del infrarrojo cercano B8A, la banda del infrarrojo de onda corta la B12 y B11 a una resolución de 10 m característica de la banda B2.

Posteriormente, se calculó el índice NBR y se hizo un análisis comparativo con la combinación multispectral de penetración atmosférica, para luego importar el archivo shape con la finalidad de delimitar los diferentes distritos de interés (Fig. 8). Es así que es posible evidenciar que parcelas agrícolas con colores café probablemente han sufrido de incendios y que el suelo se encuentra en un proceso de restauración de las propiedades biogeofísicas (Fig. 9)

Mapa 5.
Delimitación de la zona de interés del distrito de Tecoluca para la evaluación de zonas incendiadas utilizando NBR mediante el procesamiento con SNAP

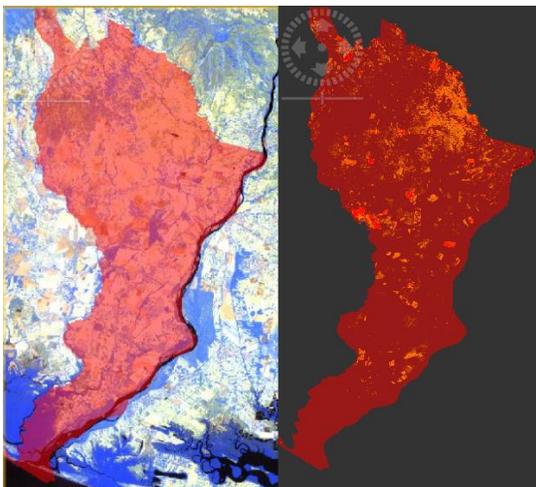
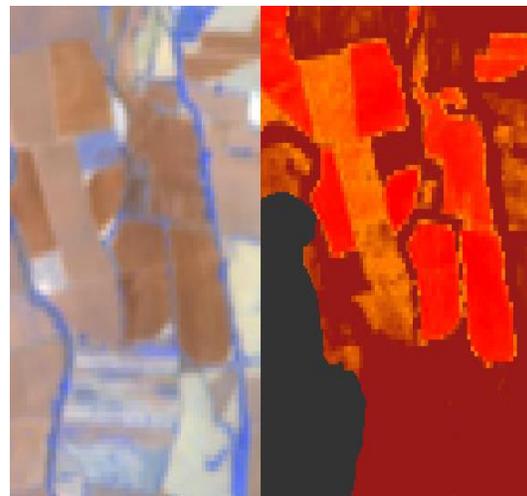
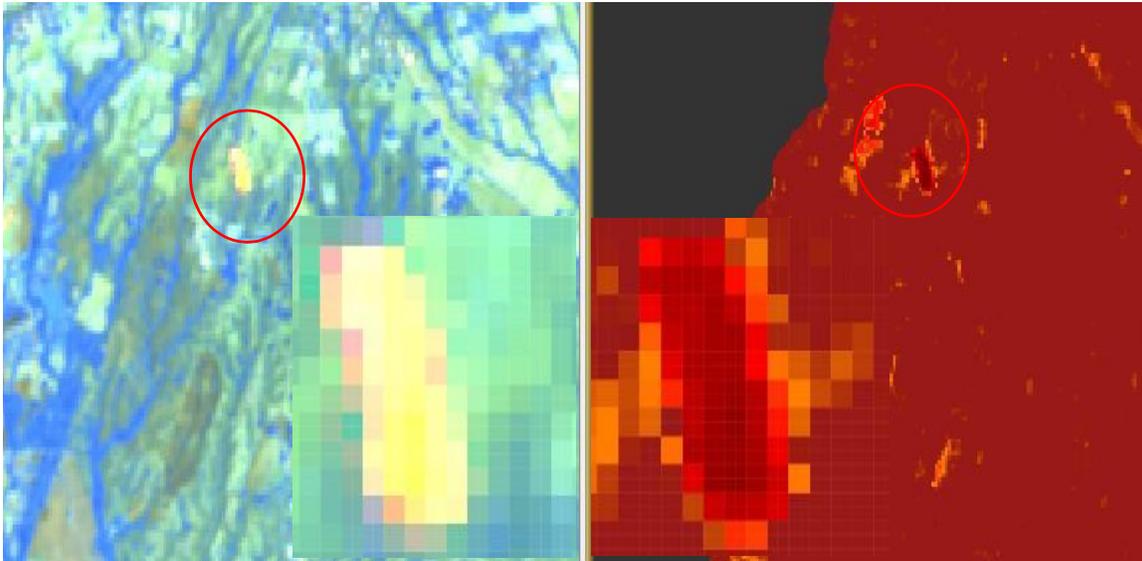


Figura 6:

Comparación de zonas incendiadas mediante imagen multispectral y NBR



Mapa 7: Puntos de calor identificados y validado para el 15 de abril de 2024 con un acercamiento que denota los datos de los píxeles, con los cuales se realizó un estudio comparativo de los valores de reflectancia al utilizar una combinación multispectral (izquierda) y el índice NBR (derecha)



Para el caso de los incendios de mayor tamaño como el de San Esteban, Apastepeque, y en el Área Natural Protegida La Joya que fueron determinados y atendidos, se ubicaron diferentes puntos geográficos en los que se incluían cubierta de suelo sin vegetación, con vegetación, zonas incendiadas y otras superficies con variaciones en el color evidenciado en las imágenes multispectrales y el índice NBR.

Para lo cual, fue necesario recolectar las coordenadas geográficas de latitud y longitud para categorizar puntos de interés en el análisis para cada uno de los incendios mencionados anteriormente

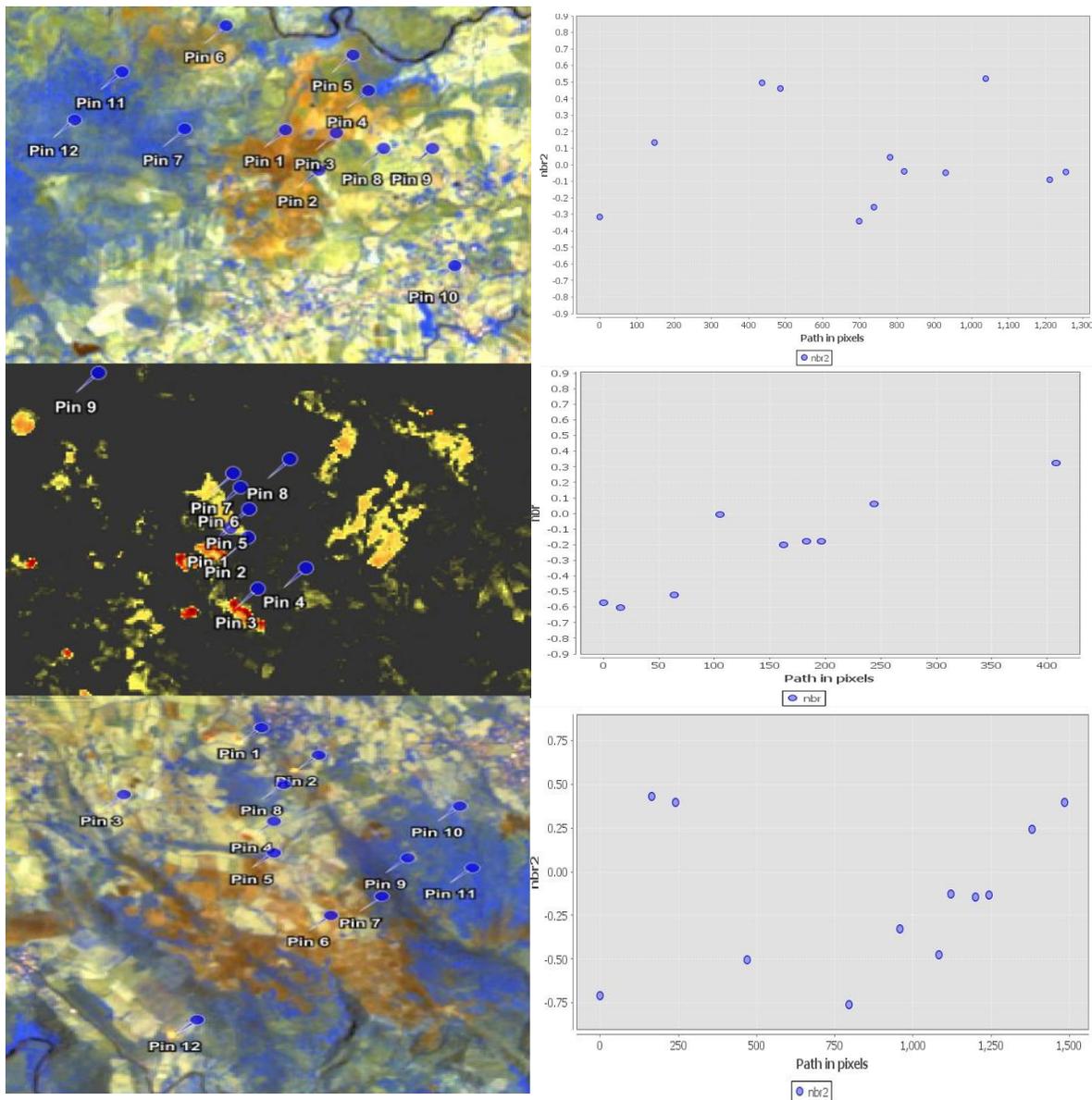
Esto permitirá poder realizar un monitoreo continuo y análisis de series temporales con imágenes ópticas con Sentinel 2 L2A u otros satélites como Landsat, así como imágenes radiométricas (Tabla 1). Esto con la finalidad de poder determinar los valores de NBR y su relación con las características que presenta la cubierta de suelo considerando los diferentes cambios que pueden ocurrir. Vale la pena señalar que los sitios de estudio tienen una historia de múltiples incendios, lo que resulta en condiciones ambientales más diversas en comparación con otras áreas potenciales

Tabla 1: Datos geográficos de los diferentes puntos de interés a evaluar de los incendios más grandes identificados.

Punto ubicado	Lat	Long	Distrito
Pin 1	13.65366838	-88.65540286	Apastepeque
Pin 2	13.65062424	-88.6510375	
Pin 3	13.64609536	-88.66597903	
Pin 4	13.64318993	-88.65440554	
Pin 5	13.63966492	-88.65438098	
Pin 6	13.63273418	-88.64998894	
Pin 7	13.63483939	-88.6460294	
Pin 8	13.64735255	-88.65369513	
Pin 1	13.77732476	-88.72054078	San Esteban Catarina
Pin 2	13.7735475	-88.7178314	
Pin 3	13.77708203	-88.71647011	
Pin 4	13.78107684	-88.71390993	
Pin 5	13.78450293	-88.71513714	
Pin 6	13.78714255	-88.72542155	
Pin 7	13.77735811	-88.7286788	
Pin 1	13.57867415	-88.67816596	Área Natural Protegida La Joya
Pin 2	13.57892975	-88.68047773	
Pin 3	13.57318493	-88.67452389	
Pin 4	13.57435186	-88.67573324	
Pin 5	13.58202644	-88.67698833	
Pin 6	13.58669678	-88.66796572	
Pin 7	13.58950179	-88.66752332	
Pin 8	13.58945843	-88.67399127	
Pin 9	13.58969851	-88.67861313	
Pin 10	13.59156353	-88.68352367	
Pin 11	13.59368205	-88.69102339	
Pin 12	13.58866952	-88.69708639	
Pin 13	13.5830865	-88.69399747	

Como resultado se obtuvo un diagrama de dispersión, en el que los puntos ubicados se categorizan correlativamente de izquierda a derecha la distancia entre estos y los valores de NBR. Es así, que se evidencia que aquellas superficies con valores positivos cuentan con vegetación saludable o con poca densidad principalmente mayores de 0 y que en la imagen no muestra color debido a que solamente se otorgó la paleta de colores desde -0.27 o menor a este y los valores negativos corresponden a todos los puntos ubicados en las zonas incendiada y por ende cuenta con colores rojos más intensos como los puntos (Fig. 11).

Mapa 8: Delimitación de puntos geográficos en diferentes condiciones de la cubierta del suelo para analizar las variaciones en los valores de NBR (izquierda) con un diagrama de dispersión (derecha). Valores negativos propios de las zonas incendiadas se ubican en píxeles con colores café y naranja a rojo intenso en el NBR que se denotan con valores muy negativos en el diagrama de dispersión.



La modificación de los regímenes de fuego y su impacto en la recuperación de la vegetación, propiedades del suelo y la estructura del combustible son áreas de investigación clave actuales que intentan identificar los umbrales de la vegetación susceptible a los incendios forestales (Peña-Molina *et al.*, 2024).

Con esta metodología es posible mejorar la previsibilidad de los acontecimientos posteriores a un incendio, la severidad de las quemaduras utilizando rasgos

estructurales y funcionales de la vegetación previos al incendio. Por lo que, de manera indirecta es posible evaluar atributos como la vegetación que surgen como predictores más importantes de la gravedad de las quemaduras (Lee *et al.*, 2024). Asimismo, el uso del NBR puede ser validado al interpretar los valores de NDVI destinado para analizar la salud de la vegetación y con lo cual se puede evidenciar el quemado del tejido forestal sano al alcanzar valores de reflectancia negativos. Esto denota plantas insalubres y áreas sin tejido vegetal después del fuego. Por tanto, se puede afirmar que la superficie boscosa cubierto por árboles ha disminuido (Sandal-Erzurumlu y Ebru-Yildiz, 2024).

CONCLUSIÓN

La utilización de imágenes multiespectrales de penetración atmosférica y geocolor así como la aplicación del índice NBR son metodologías factibles para la identificación, caracterización y monitoreo de los incendios ocurridos durante la época seca, con los que se pueden ubicar las zonas incendiadas previamente, los puntos de calor registrados al momento, el área del incendio, la estimación de la intensidad de los incendios, el perímetro, así como las variaciones en la cubierta de la vegetación y el suelo de utilidad para la planificación de los programas de conservación y restauración de las cuencas hidrográficas.

La zonificación de los incendios en el departamento de San Vicente y sus diferentes distritos es una herramienta que beneficia la gestión de riesgos al lograr una detección temprana y un monitoreo continuo de las áreas propensas a incendios, lo que se refleja en la fácil implementación de medidas preventivas y de mitigación antes que los incendios se descontroren. Por tanto, la zonificación plantea ser una herramienta a utilizarse como mapas de gestión de riesgos que ayudan a las autoridades locales y a los equipos de respuesta a planificar de manera más efectiva los recursos y la logística. Con lo cual, la disponibilidad de datos precisos y actualizados fomenta una toma de decisiones informada y transparente con la finalidad que las autoridades locales pueden diseñar políticas programas de manejo de incendios más efectivos, basados en evidencia científica y datos empíricos. Esto resulta en una mejora de las acciones de preparación de los actores clave de la gobernanza a local, así como de las comunidades vulnerables al estar educados y conscientes de las acciones a tomar en caso de incendio, reduciendo así el impacto sobre vidas, la infraestructura y los medios de vida.

El uso de imágenes satelitales y del índice NBR para monitorear, identificar y analizar los impactos de los incendios forestales y agrícolas es una herramienta indispensable en la gestión integrada del riesgo de desastres. Este enfoque fortalece aún más la resiliencia, ya que proporciona a la comunidad datos precisos y actualizados que pueden utilizar para planificar ante futuros incendios forestales. Además, la adopción de estas herramientas puede mejorar la toma de decisiones informadas en la gobernanza local, lo que permite facilitar la asignación de recursos, la implementación de medidas preventivas y restaurativas y la coordinación entre los diversos actores de la gestión de emergencias.

RECOMENDACIONES

Complementar estudios futuros con otros índices mejorados para la delimitación e intensidad de los incendios mediante la aplicación de la Diferencia de la Proporción Quemada Normalizada (dNBR), el índice de Proporción Quemada Relativizada (RBR) y el RBR+ entre otros.

Realizar un análisis comparativo con imágenes multiespectrales de otros satélites ópticos como el Landsat 9 con el fin de corroborar la información de los índices aplicados.

Sondear estudios de caracterización de la biodiversidad y áreas quemadas utilizando imágenes radiométricas de Sentinel 1, que permita definir una metodología para el monitoreo de incendios y de esta manera, evitar la obstrucción de las imágenes por nubes

REFERENCIAS

- ALCARAS, E., CONSTANTINO, D., GUASTAFERRO, F., PARENTO, C. Y PEPE M. (2022). Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A new index for Sentinel-2 Imagery. *Remote Sens.* 2022, 14, 1727. <https://doi.org/10.3390/rs14071727>
<https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1727#metrics>
- BEAUDRY, B., MCCULLU, A., CRUZ, S., Y TORRES-PÉREZ, J. (2023). ARSET - Spectral Indices for Land and Aquatic Applications. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). <http://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-spectral-indices-land-and-aquatic-applications>
- CAMPO PARRA-LARA, Á. D., Y BERNAL-TORO, F. H. (2010). Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal. *El Hombre y la Máquina*, (35), 67-81. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/478/47817140008.pdf>
- CORREO-ESCAF, C. D., GALARZA-SÁNCHEZ, J.N., Y CRUZ-PRADA, F., (2021). Como orientar la gestión del riesgo de desastres por incendios forestales a nivel municipal. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 46 pp. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Como-orientar-la-gestion-del-riesgo-de-desastres-por-incendios-forestales-a-nivel-municipal.pdf>
- CIRA (CONNECTING MODELS AND OBSERVATIONS). (2019). Producto Geocolor. Guía rápida. Recuperado de: https://rammb.cira.colostate.edu/visitview/custom/AmeriGEOweek_Aug2019/QuickGuides/QuickGuide_CIRA_Geocolor_es.pdf
- CISNEROS VACA, C., CALAHORRANO, J., Y MANZANO, M. (2024). Análisis espacial y temporal de incendios forestales en el Ecuador utilizando datos de sensores remotos. *Colombia forestal*, 27(1), e20111. DOI:

- <https://doi.org/10.14483/2256201X.20111>
<https://www.redalyc.org/journal/4239/423977537001/423977537001.pdf>
- COEM (Comité Operativo de Emergencias Municipal). (2003). Plan de Mitigación y Uso de Tierras. San Vicente. USAID. Recuperado de: <https://www.eird.org/deslizamientos/pdf/spa/doc15415/doc15415-a.pdf>
- CONSEJO NACIONAL DE PLANIFICACIÓN Y COORDINACIÓN ECONÓMICA (CONAPLAN) (1974). El Salvador – Zonificación Agrícola – Fase 1. Estudio realizado por el Departamento de Desarrollo Regional con la colaboración del del Gobierno de El Salvador. Secretaria General, Organización de los Estados Americanos, Washington, D.C. Recuperado de: <https://www.oas.org/USDE/publications/Unit/oea34s/ch050.htm>
- COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. (2024). Global Temperature trend monitor. How close are we to reaching a global warming of 1.5 °C. European Commission
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-c3s-global-temperature-trend-monitor?tab=app>
- DORREGO, X Y ÁLVAREZ, G. (2009). Teledetección y SIG en la gestión de los incendios forestales en Galicia. Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud, 23-26 de septiembre de 2009. pp. 297-300. Editores: Salomón Montesinos Aranda y Lara Fernández Fornos. Recuperado de: <https://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal75.pdf>
- FOLLETTE-COOK, M., GUPTA, P., PRADOS, A., MCCULLUM, A., TORRES-PÉREZ, J., BENGTSSON, Z., MEHTA, A., PODEST, E., MCCARTNEY, S., FIELD, R., ORLAND, E., RIOS, B., BARRETT, B., RAGA, G. (2021). *Observaciones de Satélites y Herramientas para el Riesgo, Detección y Análisis de Incendios*. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/spanish/arset-observaciones-de-satelites-y-herramientas-para-el-riesgo>
- GARCÍA LÓPEZ, M. J. Y CASELLES V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto Int.* 31-37 pp. Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/10106049109354290?scroll=top&needAccess=true>
- GEO (GROUP ON EARTH OBSERVATION) (2024). Global Wildfire Information System GWIS. Copernicus Europe's eyes on Earth. Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA). Unión Europea. Recuperado: <https://gwis.jrc.ec.europa.eu/apps/gwis.statistics/seasonaltrend/SLV/2024/C02>
- GIL MORA, J. E. (2022). INCENDIOS FORESTALES: causas e impactos. *El Antoniano*, 135(1), 68 - 113. <https://doi.org/10.51343/anto.v135i1.866>
- IGN (Instituto Geográfico Nacional). (2018). Fundamentos de teledetección aplicada. El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, España. Proyecto cofinanciado por la Comisión Europea. Recuperado de:

- https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/2_Fundamentos_teledeteccion_aplicada.pdf
- LANEVE, G., DI FONZO, M., PAMPANONI, V. Y BUENO MORLES, R. (2024). Progress and Limitations in the Satellite-Based Estimate of Burnt Areas. *Remote Sens.* 2024, 16, 42. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/rs16010042>
- LEE, K.; VAN LEEUWEN, W.J.D.; GILLAN, J.K.; FALK, D.A. (2024). Examining the Impacts of Pre-Fire Forest Conditions on Burn Severity Using Multiple Remote Sensing Platforms. *Remote Sens.* 16, 1803. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/rs16101803>
- NASA ARSET (National Aeronautics and Space Administration). (2023). Building Climate Risk Assessments from Local Vulnerability and Exposure. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). <http://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-building-climate-risk-assessments-local-vulnerability-and>
- OLIVERA, J. M. Y FERNÁNDEZ, C. (2024). Evaluación de áreas quemadas mediante teledetección. Incendio cercano a la localidad de Tres Bocas (Río Negro) en diciembre de 2021. Serie Técnica Big Data y Gestión Ambiental. Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. Uruguay. ISBN 978-9915-9481-9-5 Recuperado de: https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/Serie_InfTec_SivInformacion_Ambiental_Incendios_feb2024.pdf
- ONDURRÍA, D. V Y PINTO, P. M. (2004). La educación como herramienta fundamental en la prevención de incendios forestales. *Tabanque N°18.* 189-206. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/1138366.pdf>
- PEÑA-MOLINA, E., MOYA, D., MARINO, E., TOMÉ, J.L., FAJARDO-CANTOS, Á., GONZÁLEZ-ROMERO, J., LUCAS-BORJA, M.E., Y DE LAS HERAS, J. (2024). Fire Vulnerability, Resilience, and Recovery Rates of Mediterranean Pine Forests Using a 33-Year Time Series of Satellite Imagery. *Remote Sens.* 16, 1718. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/rs16101718>
- RAMOS-RODRÍGUEZ, M. P., ALCÍVAR-COBEÑA, A., CEDEÑO-LUNA, N.A, Y MANRIQUE-TOALA, T. O. (2022). Usos tradicionales del fuego en las actividades agrícolas de la parroquia Convento, cantón Chone, Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 10(3), 319-335. Epub 05 de septiembre de 2022. Recuperado en 11 de junio de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692022000300319&lng=es&tlng=es.
- ROSETO CUESTA J., Y OSORIO GIRALDO, I., (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte. *Cuaderno Activa*, 5(1), 59–67. Recuperado a partir de <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/130>
- SANDAL-ERZURUMLU, G. Y EBRU-YILDIZ, N. (2024). Determination of fire intensity after forest fire by remote sensing: marmaris case study. *BIO Web of Conferences I-CRAFT-2023* 85, 01041 Recuperado de: https://www.bioconferences.org/articles/bioconf/pdf/2024/04/bioconf_i-craft2024_01041.pdf

- <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248501041>
- SERCO ITALIA SPA (2017). *Burned Area Mapping with Sentinel-2 (SNAP), Portugal (version 1.2)*. Recuperado de RUS Lectures at <https://rus-copernicus.eu/portal/the-rus-library/learn-byyourself>
- TIAN, Y., WU, Z., LI, M., WANG, B. Y ZHANG, X. (2022). Forest Fire Spread Monitoring and Vegetation Dynamics Detection Based on Multi-Source Remote Sensing Images. *Remote Sens.* 2022, 14, 4431. <https://doi.org/10.3390/rs14184431>
- TORRES-PÉREZ, J. L., MACCULLUM, A., BEAUDRY, B. Y CRUZ, S. (2023). ARSET - Spectral Indices for Land and Aquatic Applications. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). <http://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-spectral-indices-land-and-aquatic-applications>
- ZHAO, G., XU, E., YI, X., GUO, Y., ZHANG, K. (2023). Comparison of Forest Restorations with Different Burning Severities Using Various Restoration Methods at Tuqiang Forestry Bureau of Greater Hinggan Mountains. *Remote Sens.* 15, 2683. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/rs15102683>