

Evaluación Espacio-temporal Post-incendio (2017 - 2025) en zonas forestales vulnerables a la sequía con Sentinel 2: Casos de estudio El Arenal y Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México

Spatio-temporal post-fire assessment (2017–2025) in drought-vulnerable forest areas using Sentinel-2: Case studies in El Arenal and the Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, Mexico

Diego Armando Piñón Sánchez¹, Michelle Farfán Gutiérrez², Jean Bernard Hayet³, José Luis Gallardo Salazar⁴

¹ Estudiante del PE de Ingeniería Geomática.

² Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato.

³ Departamento de Ciencias de la Computación, Centro de Investigación en Matemáticas, CIMAT A.C.

⁴ Centro Académico Regional – Morelia, Universidad de Chapingo.

da.pinonsanchez@ugto.mx, michelle.farfán@ugto.mx, jbhayet@cimat.mx, jgallardos@chapingo.mx

Resumen

El presente estudio analizó la recuperación de la vegetación nativa en dos zonas afectadas por incendios forestales en el municipio de Guanajuato durante el año 2024: El Arenal y Santa Rosa. Se tuvo como objetivo desarrollar herramientas computacionales para el monitoreo y el análisis comparativo de la recuperación de la vegetación en dichas áreas afectadas. Se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 desde 2017 hasta 2025 para calcular índices espectrales de relevancia (NDVI, NDWI, NBR y BAI), permitiendo cuantificar y evaluar cambios en la vegetación y humedad post-incendio. A partir del análisis, se observó que la zona quemada del Arenal presenta una recuperación más rápida que la zona quemada de la Sierra de Santa Rosa, con zonas que muestran espectralmente una alta severidad del fuego a un año del incendio con caras de la topografía de exposición sur. El uso de herramientas como Google Earth Engine facilitaron el acceso a tareas de procesamiento multitemporal de datos, siendo relevante el continuar con el monitoreo de los datos para optimizar acciones de gestión ambiental y programas de restauración post-incendio.

Palabras clave: recuperación vegetal post-incendio; Google Earth Engine, Sentinel-2; índices espectrales, incendios forestales.

Introducción

La cuantificación de la severidad del fuego es un pilar en el estudio de la respuesta de los ecosistemas a los incendios forestales, con una reconocida importancia global en la ecología del fuego (Han *et al.*, 2021). Sin embargo, en México este enfoque es aún incipiente, existiendo una notable escasez de investigación en sus extensos y biodiversos ecosistemas de matorrales y bosques de encino. Esta brecha de conocimiento resulta particularmente crítica en las zonas semiáridas del país, donde la sequía meteorológica recurrente en los últimos años compromete de manera significativa la resiliencia de los ecosistemas y la capacidad de regeneración de las especies post-incendio.

El estado de Guanajuato, en el centro del país, ejemplifica esta problemática de forma importante. Datos del sensor MODIS revelan que la incidencia de incendios forestales en la región se ha multiplicado por 13 en las últimas dos décadas (2000-2024). Este drástico incremento es exacerbado por un manejo irresponsable del fuego por parte de la población y que se combina con la persistente sequía meteorológica que ha afectado a la totalidad de los municipios del estado desde 2019. Dicha condición climática no solo favorece la rápida propagación del fuego, sino que también crea un escenario de vulnerabilidad social y ecológica en un contexto de calentamiento global.

Durante el año 2024, el municipio de Guanajuato experimentó dos incendios forestales de importante magnitud en un contexto de sequía extrema de acuerdo con el monitor de CONAGUA. El primero, ocurrió el 26 de marzo del año 2024, fue un mega incendio forestal de acuerdo con la definición de Neger *et al.*, 2022, en la Sierra de Santa Rosa, que quemó cerca de 2333 hectáreas de bosque de encino. El segundo, ocurrido el 27 de abril del mismo año, en la localidad del Arenal, afectó 54 hectáreas de matorral subtropical caducifolio. La severidad del fuego rara vez es homogénea, lo que genera un mosaico con distintos niveles de quema y afectación de la vegetación en el paisaje. Se sabe que el proceso de regeneración puede estar limitado por la sequía, por lo tanto se vuelve indispensable el uso de herramientas de teledetección para el monitoreo de la regeneración post-incendio. Esta actividad resulta relevante ya que dichas zonas forestales quemadas proveen de importantes servicios ecosistémicos vitales para los habitantes y fauna de la Sierra de Santa Rosa, del Arenal y de la ciudad capital de Guanajuato, como son la regulación hídrica y la captura de dióxido de carbono.

Por lo tanto, el presente estudio empleó una serie de tiempo de cuatro índices espectrales; el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), el NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), el NBR (Índice Normalizado de Incendios) y el BAI (Índice de Área Quemada), para monitorear la recuperación de las zonas quemadas e identificar si las áreas de alta severidad están logrando recuperarse un año después de los incendios forestales ocurridos y poder orientar las acciones de restauración post-incendio.

Metodología

Descripción de las áreas de estudio

Para el presente estudio, se consideraron dos áreas quemadas en la zona norte del municipio de Guanajuato; los incendios ocurrieron en los meses de sequía meteorológica del año 2024 (ver Figura 1).

La primera área quemada, se ubica en la localidad del Arenal, dentro del Área Natural Protegida Estatal Cuenca de la Soledad, ubicada en las coordenadas (21.069, -101.286), al noroeste del municipio de Guanajuato. Es prioritaria para el abastecimiento de agua de la Presa de la Soledad que provee de agua para la cabecera municipal de la ciudad de Guanajuato. La vegetación nativa previa al incendio se componía de vegetación secundaria de matorral subtropical caducifolio con dominancia de la especie *Eysenhardtia polystachya*, conocida como Palo dulce. Es importante mencionar, que la topografía en la cual ocurrió el incendio en esta zona, con una extensión de 60 ha y con una duración de un día, es definida como una microcuenca tributaria del río principal que abastece a la presa de la Soledad.

La Sierra de Santa Rosa alberga la segunda área quemada, ubicada en su sección centro - noroeste, cerca a la Cañada de la Virgen (ver Figura 1). Aquí, el paisaje está conformado por bosques de encino, que son aprovechados para la elaboración de carbón mediante hornos nómadas tradicionales. La superficie afectada es de aproximadamente 2334 ha y el incendio tuvo una duración de 7 días. Es importante mencionar que la topografía del lugar es compleja, con pendientes superiores a los 30 grados.

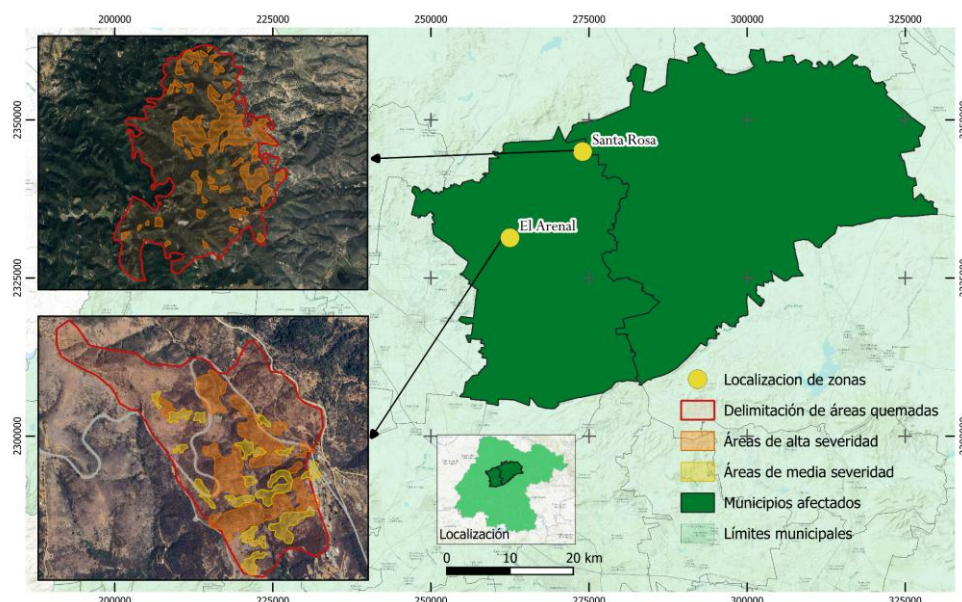


Figura 1. Localización y delimitación de las zonas afectadas por los incendios monitoreados en el municipio de Guanajuato ocurridos en el año 2024. Se muestra la clasificación en severidad de la quema del fuego con zonas de alta y media severidad.

Métodos

El análisis de la recuperación de las zonas afectadas por incendios es una tarea compleja, ya que implica un estudio de las zonas afectadas a corto, medio o largo plazo. Además, cubrir una superficie que, para el caso de los incendios de Santa Rosa y del Arenal, resulta ser extremadamente importante. En los últimos años, se ha mostrado (Caccamo *et al.*, 2014; Casady *et al.*, 2010; Roodsarabi *et al.*, 2022) que las imágenes satelitales multiespectrales pueden aportar soluciones, a este análisis de recuperación de la vegetación post incendio. Eso se puede lograr a través del estudio de las variaciones temporales de indicadores de buena salud de la vegetación evaluados sobre las imágenes ópticas captadas por satélites de observación, usando el hecho de que la vegetación tiene un patrón característico de reflexión de la luz solar, en particular bandas espectrales del infrarrojo cercano (en las cuales la clorofila tiene alta reflectancia en el infrarrojo).

Entre las opciones de imágenes de observación satelital, el presente estudio se basa en el uso de los datos del satélite Sentinel 2 (The Sentinel Observation Program, s.f.), accesibles de forma gratuita, y de resolución suficiente para analizar las dos áreas de estudio, con 20 metros de tamaño de píxel. A modo de comparativa, una alternativa es el uso de imágenes MODIS (NASA, s.f.), pero su resolución espacial es gruesa, 1 km de tamaño de píxel, por lo que para las áreas quemadas que son de nuestro caso de estudio, no permitiría realizar la comparativa por ejemplo, con el área quemada del Arenal.

Las imágenes de Sentinel 2 proveen cada semana desde 2017, 13 canales correspondiendo a diferentes longitudes de onda, desde 443 hasta 2190 nanómetros; además cada canal tiene diferente resolución espacial, de 10, 20 o 60 metros por píxel. Típicamente, en función de la aplicación, se usa cierta combinación de dichas bandas para proveer una información de relevancia. En el caso de la vegetación, es común usar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), evaluado en un píxel (p) como:

$$NDVI = \frac{B_8(p) - B_4(p)}{B_8(p) + B_4(p)}$$

donde $B_i(p)$ representa el valor reflejado en la banda espectral i (i siendo un entero entre 1 y 13), en el píxel p . Para la plataforma Sentinel 2, B_8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR) y B_4 , a la banda del rojo (Red). Este índice presenta rangos entre -1 y 1, donde, por lo general, valores mayores a 0.2 o 0.3 suelen indicar presencia de vegetación fotosintéticamente activa.

Por otro lado, el Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI), maximiza la reflectancia del agua empleando las bandas del infrarrojo cercano (NIR), y la absorción de la vegetación del suelo adyacente, empleando en este caso, la banda verde. Se presenta en un rango que va de -1 a 1, donde los valores bajos o negativos, son asociados a baja humedad, presencia de vegetación escasa o seca, suelos quemados, rocas expuestas o asfalto, mientras que aquellos altos o positivos (de 0.0 hasta 0.3), se relacionan a la vegetación con alta actividad fotosintética producto de los altos contenidos de agua (Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior [UNOOSA], s. f.). Entonces, para el mismo píxel (p):

$$NDWI = \frac{B_3(p) - B_8(p)}{B_3(p) + B_8(p)}$$

Para Sentinel 2, B_8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR) y B_3 , a la banda del verde (Green).

En el caso del Índice Normalizado de Área Quemada (NBR), se sigue un planteamiento similar a los dos índices antes mencionados, solo que éste combina las bandas correspondientes al infrarrojo cercano (NIR) y al infrarrojo de onda corta (SWIR). Este también tiene valores entre -1 y 1, donde valores altos de NBR indican vegetación saludable (por encima de 0.3), mientras que valores bajos indican suelos desnudos y áreas quemadas. Aquellos valores cercanos a cero, suelen ser indicativos de áreas no quemadas (Chuvieco *et al.*, 2005). Entonces, para el píxel (p):

$$NBR = \frac{B_8(p) - B_{12}(p)}{B_8(p) + B_{12}(p)}$$

Para Sentinel 2, B_8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR) y B_{12} , a la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR).

El Índice de Área Quemada (BAI), fue diseñado específicamente para poder discriminar áreas afectadas por el fuego. Zonas quemadas suelen presentar una reflectancia muy baja en el infrarrojo cercano y muy alta en el rojo, cosa contraria a lo que sucede en la vegetación sana (Ariza *et al.*, 2013). Para un píxel (p):

$$BAI = \frac{1}{(B_4(p) - 0.06)^2 + (B_8(p) - 0.1)^2}$$

En este caso, B_4 corresponde a la banda del rojo (Red) y B_8 , a la banda del infrarrojo cercano (NIR). Este no cuenta con una escala fija ni con un límite teórico, pero se puede decir que, en zonas con valores de BAI altos, hay una mayor probabilidad de quema, siendo útil para definir zonas quemadas con precisión.

Se generaron series de tiempo con los índices espectrales NDVI, NDWI, NBR y BAI, promediados para cada una de las regiones afectadas por el fuego, previamente delimitadas mediante el uso de imágenes Sentinel 2 y el índice espectral NBR, para evaluar la recuperación de la vegetación nativa post-incendio en dichas zonas. El estudio se centró de manera principal en el comportamiento del NDVI entre los años 2017 y 2025, complementando con el resto de índices espectrales como apoyo para caracterizar cambios en humedad, la severidad de las quemaduras y la dinámica de recuperación vegetal en los sitios de Santa Rosa y El Arenal.

Definición de áreas control

Además de contar con el análisis multitemporal de índices espectrales para las zonas afectadas por incendios, se definieron un par de áreas de "control" (ver Figura 2, en donde las áreas afectadas aparecen en naranja y las de control en verde). El establecer estas áreas de control, tiene como finalidad, el contar con información de sitios que no fueron afectados por el fuego. Por tanto se generaron series de tiempo comparables de los mismos índices espectrales: NDVI, NDWI, NBR, BAI. Estas corresponden a regiones con cercanía y características fisiográficas similares a las zonas quemadas. Para el Arenal, se estableció un área de control localizada al noroeste del sitio afectado, en la región de la Cuenca de la Soledad. Por otro lado, en Santa Rosa, la zona de control definida se ubica al suroeste del área comprometida por el incendio.

Con ello se permite contar con una pauta para comparar el comportamiento de la vegetación entre las zonas afectadas por el fuego versus las zonas que no fueron perturbadas por el fuego, buscando evaluar de manera relativa la recuperación vegetal en función del tiempo.

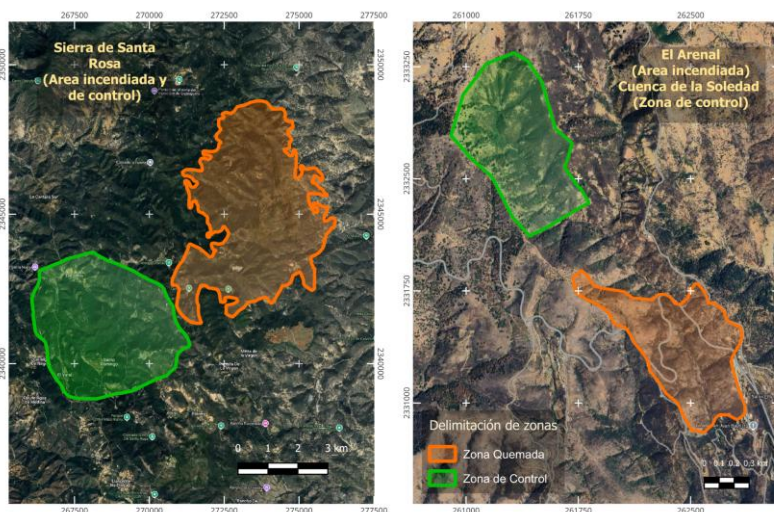


Figura 2. Localización y delimitación de las zonas afectadas y de control en Santa Rosa (izquierda) y en El Arenal (derecha).

Esquema de trabajo

Para la obtención de las series temporales, a partir de las zonas de estudio y de control planteadas, y de los insumos digitales propuestos, se diseñó el esquema de trabajo que se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 3.

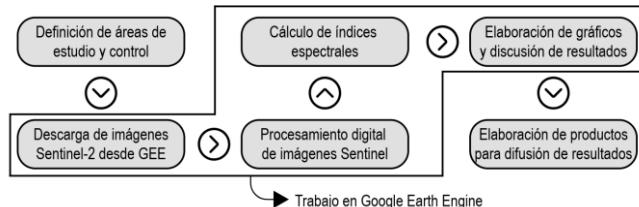


Figura 3. Flujo de trabajo seguido para la estimación de los índices espectrales NDVI, NDWI, NBR, BAI con imágenes Sentinel 2.

Como primer paso, se delimitaron las zonas afectadas por los incendios forestales y las clases de alta severidad dentro de éstas así como las áreas de control. De manera paralela, se comenzó a desarrollar un script en Google Colab, (disponible en la sección de apéndices de este documento), empleando herramientas de Google Earth Engine (GEE) (en particular su API en Python), con el objetivo de comenzar con la descarga masiva de imágenes satelitales de Sentinel-2 que cubrieran los polígonos definidos para el periodo de tiempo del 2017 al 2025.

Como segundo paso, se procedió al procesamiento digital de las imágenes. Dentro del mismo entorno de Colab, se generaron recortes para cada área de interés, se aplicaron máscaras para filtrar escenas con presencia de nubosidad que pasaran el filtro del 20% definido para la descarga masiva, y se implementaron, además, funciones para escalar las reflectancias y para calcular el índice NDVI en las imágenes.

Para el tercer paso, se incorporaron nuevas funciones, teniendo por objetivo el calcular nuevos índices espectrales en el análisis: el índice NDWI (Índice de Diferencia de Agua Normalizado), el Índice de Área quemada (BAI) y el índice NBR (Normalized Burn Ratio). Se crearon funciones específicas con las cuales se pudo calcular la media mensual de cada índice, dentro del rango de tiempo establecido para este estudio. A su vez, se integraron modelos digitales de elevación (MDE), como variables adicionales para el estudio de ambas zonas, con el fin de establecer posibles correlaciones topográficas exposición norte o sur en la recuperación post incendio.

En el cuarto paso, se generaron archivos CSV y gráficos exportables desde el entorno de Google Colab, los cuales reúnen los resultados del monitoreo multitemporal y series de tiempo. Finalmente, se inició la elaboración de los productos derivados de este proyecto: un artículo científico, una infografía divulgativa y un sitio web interactivo (disponible en la sección de apéndices de este documento), desde el cual consultar los principales resultados.

Resultados

Series de tiempo en el área quemada de El Arenal.

A continuación se presentan los gráficos obtenidos por cada índice espectral calculado en el área quemada de El Arenal, incluyendo los promedios en las zonas de alta severidad, el área afectada general, y la zona de control.

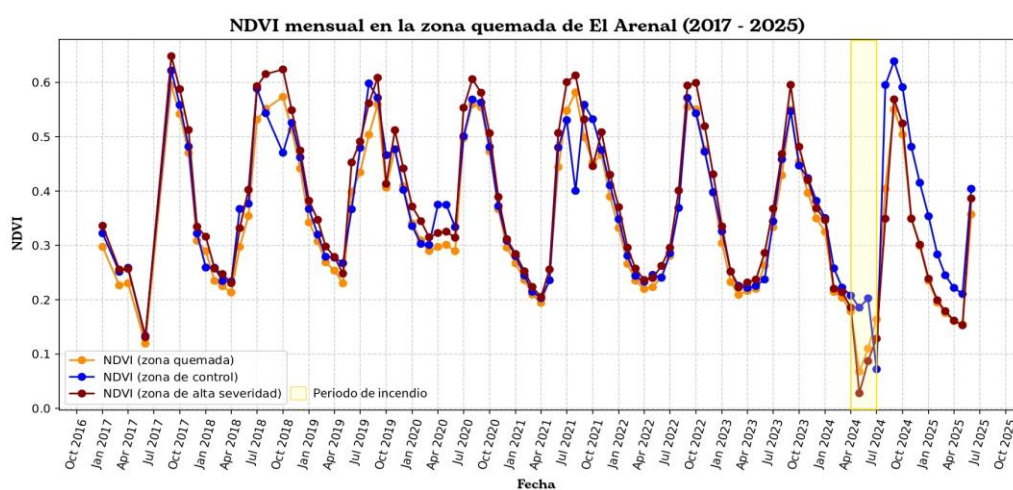


Figura 4. NDVI promedio mensual (2017 - 2025) en el área quemada del Arenal. En color amarillo se muestra la ocurrencia del incendio y los valores bajos del índice NDVI.

En la Figura 4, se puede observar el comportamiento del NDVI mensual promedio, el cual puede tener un rango de valores entre -1 y 1, donde la vegetación fotosintéticamente activa tiene valores que varían entre 0.2 y 0.8, con valores más altos indicando mayor densidad y salud de la vegetación. Puede observarse que en las tres zonas existe un patrón estacional bien definido, con picos de vegetación en temporada de lluvias, entre los meses de julio a septiembre, con valores entre 0.5 hasta 0.65 y con temporales de estiaje o sequía, donde el NDVI suele disminuir y tener valores entre 0.2 y 0.3. Sin embargo, en los meses comprendidos entre abril y julio de 2024, habiendo ocurrido el incendio el 27 de abril, se puede notar una disminución abrupta en los valores del índice, especialmente en el área de alta severidad, donde el NDVI baja hasta un valor por debajo de 0.05 (en la zona de alta severidad) para el mes de mayo, siendo indicativo de una vegetación claramente afectada por el incendio al presentar una nula actividad fotosintética.

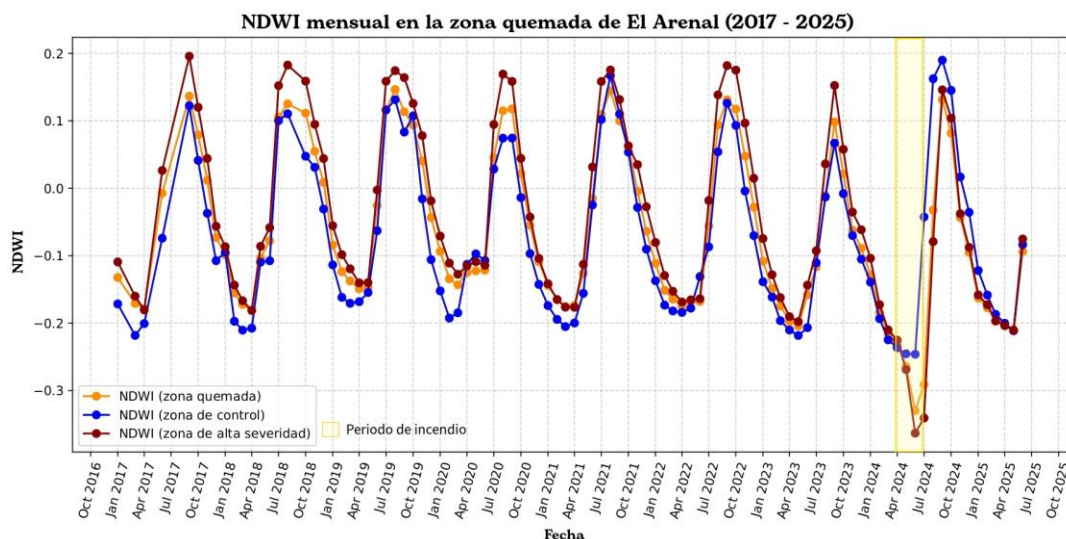


Figura 5. NDWI mensual promedio (2017 - 2025) en el área quemada del Arenal.

El segundo de los índices espectrales calculados, fue el NDWI mensual promedio, representado en la Figura 5. Dicho índice para vegetación fotosintéticamente activa varía entre -0.1 y 0.4. Valores más altos dentro de este rango indican mayor contenido de agua en la vegetación. Del mismo modo, se observan fluctuaciones cíclicas que dan indicio de la estacionalidad de la humedad en la zona. De igual manera, en la fecha en que ocurrió el incendio, 27 de abril del año 2024, se puede notar una disminución abrupta en los valores del índice, en la zona quemada, llegando a valores de -0.3, y en las zonas de alta severidad, bajando hasta valores cercanos a -0.35. A diferencia de esta caída, los valores del NDWI en la zona de control se mantienen más estables y continuos en este mismo periodo de tiempo, cercanos a -0.2 (ver Figura 5, recuadro amarillo).

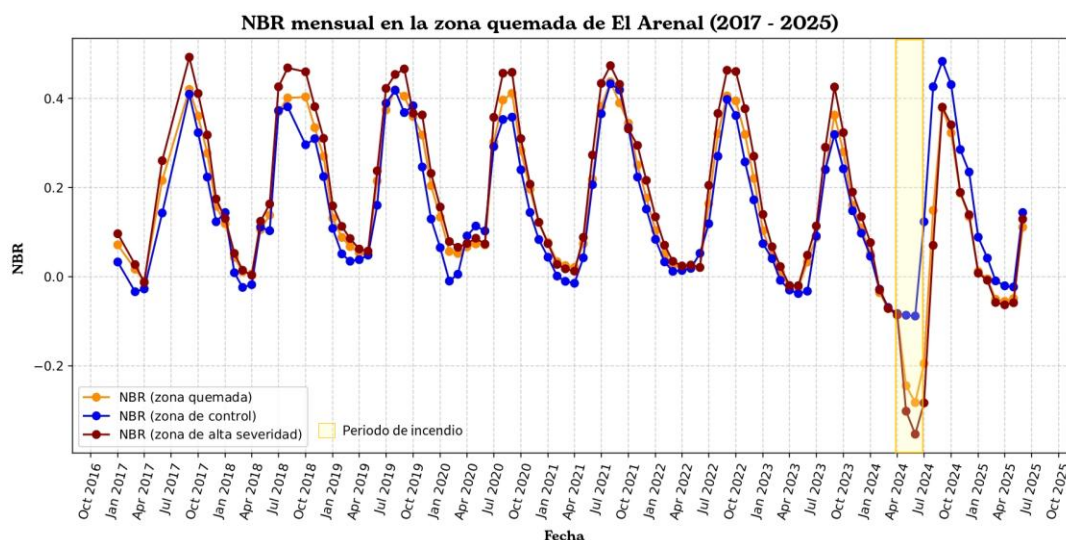


Figura 6. NBR mensual promedio (2017 - 2025) en el área quemada del Arenal. En el recuadro amarillo se observa el efecto del incendio forestal en el valor del índice espectral.

Por otra parte, para el tercer índice espectral, el NBR de esta zona (Figura 6), muestra un comportamiento oscilante similar a los anteriores, donde existen picos de entre 0.3 y 0.5 en temporadas húmedas, mientras que en época de estiaje o sequía, el NBR baja; aún así, se mantiene en valores mayormente positivos. Se ve un desplome crítico de los valores de NBR en la zona quemada y en la de alta severidad, llegando a valores negativos por debajo del -0.25 en el área de alta severidad, en el periodo marzo - julio del año 2024. Este índice reacciona de manera fuerte a la pérdida de vegetación y presencia de cenizas, lo que nos da mucha certeza sobre el impacto que tuvo el fuego en la zona. A pesar de que el NBR aumenta para el mes de mayo de 2025, aún está por debajo de los valores usuales presentados antes del incendio para el mismo mes (ver Figura 6).

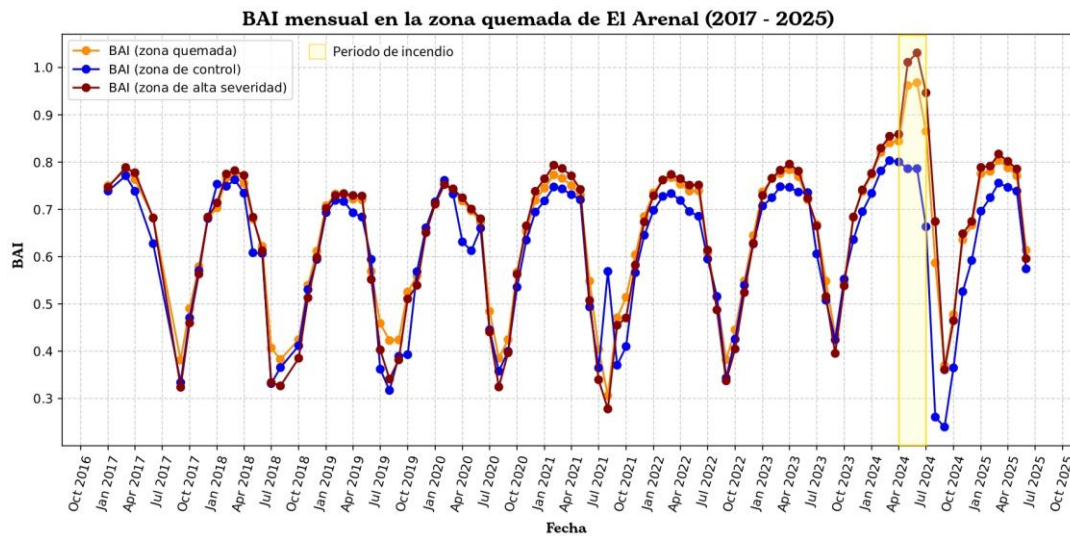


Figura 7. BAI mensual promedio (2017 - 2025) en el área quemada del Arenal.

Finalmente, el cuarto índice es el BAI (Índice de Área Quemada). En este caso, se observa que entre 2017 y 2023 la zona quemada, la zona de alta severidad y la zona de control, presentan una oscilación regular, variando entre 0.3 y 0.8, ajustándose a las condiciones estacionales indicando, además, la ausencia de incendios. En abril de 2024, se produce un aumento abrupto del BAI, donde la zona de alta severidad alcanza el valor máximo (1.0), mientras que la zona quemada alcanza aproximadamente un valor BAI promedio de 0.85. Sin embargo, se puede ver que los valores, una vez pasó un año, bajan, y, si bien siguen estando por encima de los datos de la zona control, están muy próximos a 0.8 (para los meses de febrero a mayo de 2025), lo que se acerca a valores anteriores para el mismo periodo del año (ver Figura 7).

Serie de tiempo en el área quemada de la Sierra de Santa Rosa

Se presentan los resultados obtenidos para cada índice espectral calculado para la segunda área de estudio, ubicada en Santa Rosa, incluyendo los promedios en las zonas de alta severidad, el área afectada general, y la zona de control.

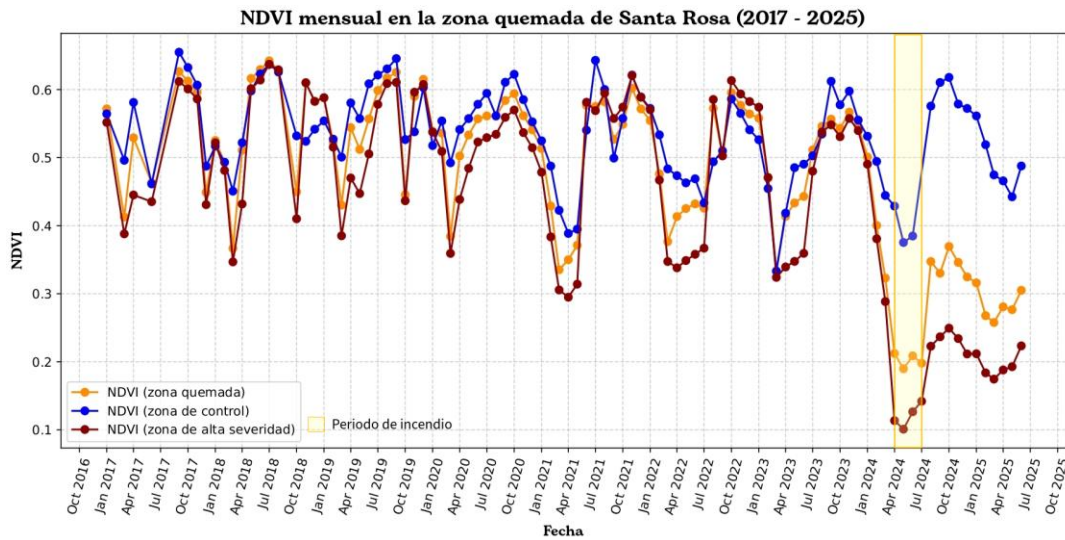


Figura 8. NDVI mensual promedio (2017 - 2025) en el área quemada de Santa Rosa.

El NDVI mensual para esta zona, mostró un comportamiento relativamente estable en el periodo pre-incendio, con valores generales siendo superiores a 0.3 y alcanzado niveles por encima de 0.6. Sin embargo, entre abril y julio de 2024 se observa un declive importante en los valores del índice, estando cercano a 0.1 en mayo, en las zonas de alta severidad, mostrando una baja actividad fotosintética, producto de la pérdida de vigorosidad vegetal producto del incendio suscitado en la zona. Después del incendio ocurrido el 26 de marzo de 2024, el NDVI aumenta ligeramente, estando aún muy por debajo de los valores presentes para la zona de control. En mayo del año 2025, el NDVI para la zona quemada, se acerca a 0.3, mientras que para la zona de alta severidad, el valor está por debajo del 0.2. En la zona de control, en el mismo tiempo, el NDVI es muy cercano a 0.45, muy por encima de los valores post-incendio en las zonas afectadas (ver Figura 8).

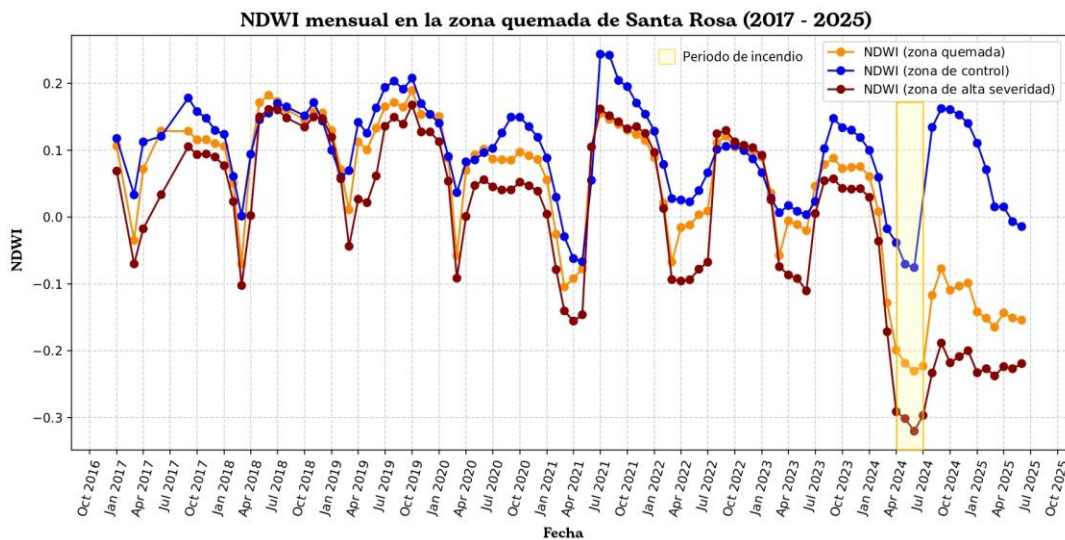


Figura 9. NDWI mensual promedio (2017 - 2025) en el área quemada de Santa Rosa.

El segundo de los índices calculados, fue el NDWI mensual promedio. Antes del incendio, se observan valores oscilantes entre -0.1, comunes en los primeros meses del año, y llegando hasta 0.25 en época de lluvias. Del mismo modo que con el NDVI, existe una caída drástica de los valores de humedad durante los meses de abril a julio de 2024, (el incendio que ocurrió en esta zona sucedió en el mes de marzo), donde, en la zona de alta severidad el valor cayó hasta aproximadamente -0.4 en junio de 2024, producto de la falta de humedad en el suelo a causa del incendio. En el área quemada, el promedio en el mismo mes fue de aproximadamente -0.25. La zona de control se mantuvo en valores normales, superiores a -0.1 (véase Figura 9).

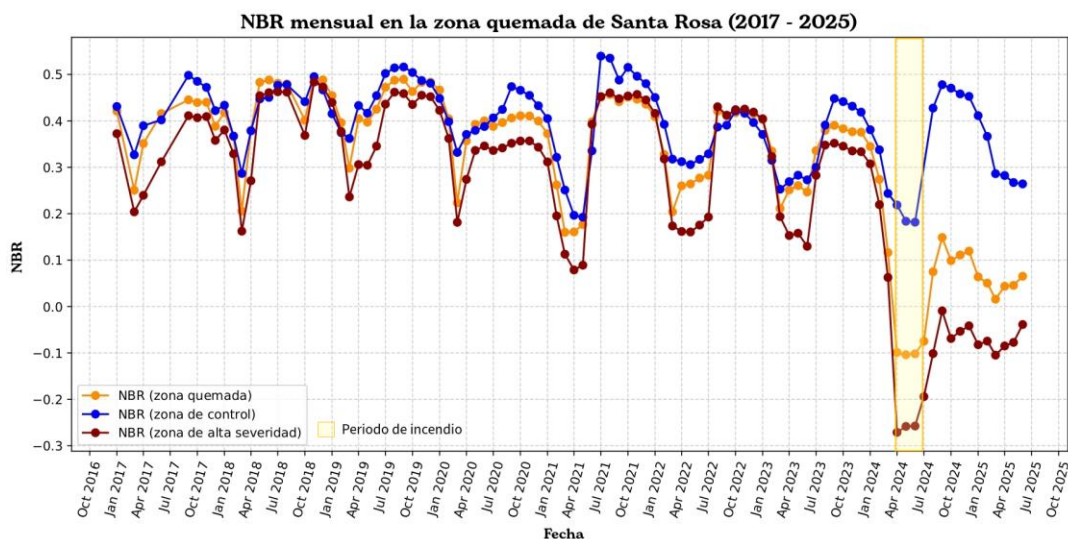


Figura 10. NBR mensual promedio (2017 - 2025) en el área quemada de Santa Rosa.

El NBR de esta área muestra un comportamiento cíclico antes de ocurrir el incendio, con valores por debajo de 0.1 para los meses de sequía (entre marzo y mayo), y valores por encima de 0.1 en los meses con mayor presencia de humedad. Los valores se desploman drásticamente en abril de 2024 para la zona quemada y la de alta severidad, con el pico más bajo de aproximadamente -0.35 en la zona de severidad más alta, mientras que para la zona de control, el valor en abril de 2024, se mantiene por encima de -0.1. Estos valores se recuperan muy poco después de haber ocurrido el incendio, donde, para el área de alta severidad en abril de 2025, el valor del NBR es cercano a -0.25, mientras que para la zona de control, en la misma fecha, se presenta un valor promedio positivo. Esto puede darnos una idea tanto de la magnitud del megaincendio, como del lento proceso de recuperación de vegetación que existe en la zona (ver Figura 10).

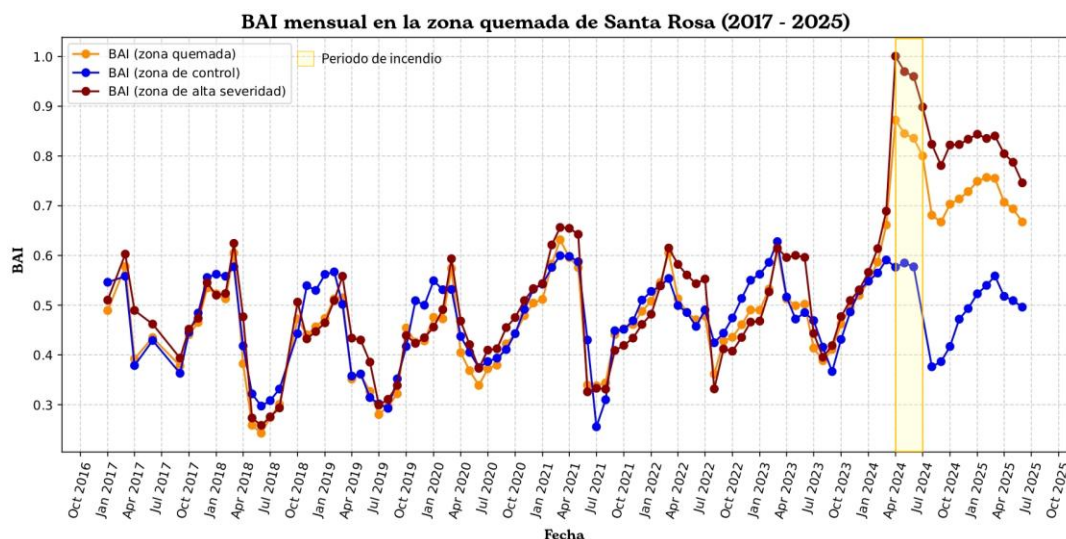


Figura 11. NBR mensual promedio (2017 - 2025) en el área quemada de Santa Rosa.

El Índice de Área Quemada (BAI), muestra una periodicidad entre 2017 y 2023, con valores oscilando entre 0.25 y 0.6, lo que muestra una ausencia de incendios significativos, además de condiciones estacionales normales. Sin embargo en abril de 2024 se observa un despunte abrupto del valor del BAI tanto en el área quemada, como en el área de alta severidad. En la primera, llega aproximadamente a 0.85, mientras que, en la zona de alta severidad, llega a su pico máximo de 1.0, siendo un comportamiento típico de zonas incendiadas. Post-incendio se observa una disminución ligera, manteniendo picos de BAI altos, por encima de 0.7 en la zona de alta severidad. Eso indica la persistencia de señales espectrales de suelos quemados, además de una lenta regeneración de la vegetación, ya que en la zona control, los valores BAI, pasado un año el incendio, están por debajo de 0.55 (ver Figura 11).

Análisis de la relación entre exposición y recuperación vegetal

A partir de los modelos digitales de elevación (MDE), se calculó la pendiente y exposición de la topografía en función del azimut norte y sur para las áreas afectadas de Santa Rosa y El Arenal. La exposición y orientación, se clasificaron en dos grupos: Norte ($315^\circ - 45^\circ$) y Sur ($135^\circ - 225^\circ$).

Utilizando imágenes de Sentinel 2, se estimó el índice espectral de NDVI para el mes de mayo de 2025, y se extrajeron los valores en zonas de alta severidad en cada tipo de exposición. Posteriormente, se calculó el NDVI promedio para exposiciones Norte y Sur en ambas zonas de estudio (véanse Figuras 12 y 13).

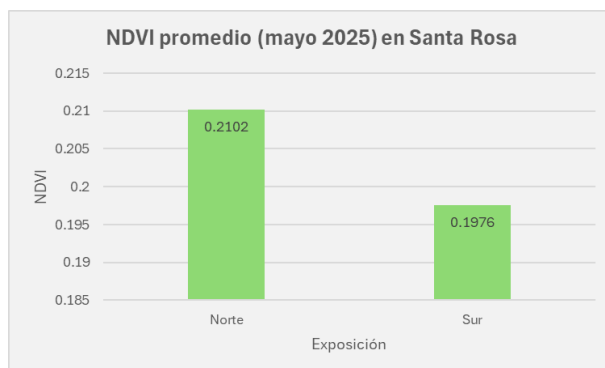


Figura 12. NDVI promedio en función de la exposición de ladera sur o norte para mayo de 2025 en el área quemada de Santa Rosa.

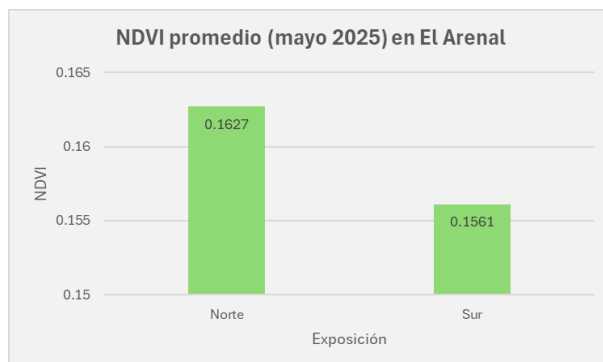


Figura 13. NDVI promedio en función de la exposición de ladera sur o norte para mayo de 2025 en el área quemada de El Arenal.

Discusión

Al comparar los diferentes índices espectrales analizados para las regiones del Arenal y Santa Rosa, se observa que el impacto del fuego (según los valores arrojados del BAI y NBR), fue mayor en Santa Rosa, donde se registraron picos más abruptos que en el Arenal. Aún así, en ambas zonas, los valores correspondientes al periodo de incendio cayeron notablemente respecto a los patrones registrados en años anteriores, lo cual evidencia el impacto del fuego en la capacidad de fotosíntesis de la vegetación.

Por otra parte, los valores promedio resultantes en los índices NDVI y NDWI, que permiten evaluar el estado de la vegetación y la humedad, respectivamente, muestran una recuperación de la vegetación más acelerada en El Arenal. Esto se observó ya que las curvas correspondientes a las zonas de alta severidad (y del resto del área quemada), se acercan progresivamente a los valores de su zona de control. En cambio, en Santa Rosa se detectó una recuperación más lenta, ya que, si bien, se nota un incremento en los valores de NDVI y NDWI después del incendio, estos aún se mantienen alejados de sus niveles base.

Estos resultados permiten afirmar que la zona afectada del Arenal presenta una recuperación más rápida y consistente que la de Santa Rosa. Las causas de esta diferencia pueden estar relacionadas a una amplia diversidad de factores: en primer lugar, la extensión del incendio y su severidad, siendo considerablemente mayor en Santa Rosa; estudios recientes, demuestran que áreas de menor extensión afectada tienden a recuperar más rápido cuando se implementan acciones inmediatas de restauración (Roodsarabi *et al.*, 2022); segundo, las diferencias en la morfología del terreno y en el tipo de vegetación presente en cada uno de los ecosistemas; y finalmente, el grado de intervención institucional para prevenir, contener y restaurar las áreas afectadas, donde la aplicación de medidas puede marcar una diferencia significativa.

Existe además, una marcada diferencia en el valor del índice espectral NDVI en las zonas de alta severidad y la exposición topográfica en ambas áreas de estudio. Se puede observar que el valor promedio de NDVI es mayor en la exposición Norte, en comparación con el promedio registrado en la exposición Sur. En particular para el área quemada de la Sierra de Santa Rosa, los resultados del análisis de NDVI indican una diferencia espectral en el vigor de la vegetación forestal. La clase orientada al norte exhibe un valor promedio de NDVI de 0.2102, que es notablemente superior al de la clase sur, con 0.1976. Esta diferencia de 0.0126 representa una disminución en el vigor fotosintético de aproximadamente un 6% en la vegetación de la ladera sur. Lo que muestra el efecto de la exposición en la recuperación post-incendio del área quemada siendo menor en esta condición.

El uso de plataformas como Google Earth Engine resultó clave para el análisis ya que permitió agilizar el procesamiento y la comparación de múltiples imágenes satélites, ampliando las posibilidades del monitoreo más allá del uso exclusivo del NDVI. No obstante, también existieron limitaciones como la presencia de nubosidad en las imágenes disponibles, siendo parte de una serie de condiciones atmosféricas que pueden interferir con la calidad de los datos; o la falta de una serie temporal con más datos posteriores al incendio, lo cual es una dificultad a la hora de tratar de establecer modelos de tendencia sólidos. Por ello se recomienda que este tipo de análisis se realicen de manera periódica, con perspectiva a mediano y largo plazo, para fortalecer la precisión de los resultados.

El uso de índices espectrales multitemporales, a través de su expresión mediante series de tiempo, no sólo permiten estimar la severidad de un incendio y el estado de recuperación de la vegetación, sino que también puede convertirse en una herramienta clave para la planeación de estrategias de conservación y restauración ecológica, pues ofrece una visión amplia y detallada del comportamiento de la vegetación en el tiempo.

Conclusiones

Los análisis multitemporales mostraron que la zona del Arenal presenta una recuperación de la vegetación más rápida y consistente que el área quemada de Santa Rosa. Índices espectrales como el NDVI y NDWI reflejaron un acercamiento más temprano a la zona de control en el Arenal; mientras que en Santa Rosa aún está muy por debajo de los niveles previos al incendio.

Dicha diferencia puede estar relacionada con factores como la extensión de la zona quemada, la severidad del incendio, las condiciones de topografía y el tipo de vegetación y periodos de sequía intensa, además de la implementación de estrategias de restauración ecológica después del evento, aplicadas con mayor o menor efectividad.

El uso de imágenes satelitales, además de plataformas como Google Earth Engine, resultaron esenciales para el análisis espacial y temporal de la regeneración de la cobertura vegetal, permitiendo recolectar datos de gran relevancia a un bajo coste energético y de hardware, haciendo de estos modelos, idóneos para monitoreos a largo plazo.

Finalmente, se recomienda mantener un monitoreo periódico en ambas zonas para evaluar la tendencia que sigue la recuperación vegetal a mediano y largo plazo. Eso permitirá no solo seguir con los casos presentados en este estudio, sino también, construir las bases para la réplica de modelos de análisis que puedan ser aplicados en otras regiones, sirviendo como apoyo técnico en la toma de decisiones en programas de prevención y restauración post-incendio.

Bibliografía/Referencias

- Ariza, A., García, S. J., Rojas, S., & Ramírez, M. (2013). Desarrollo de un modelo de corrección de imágenes de satélite para inundaciones: CAIN – Corrección atmosférica e índices de inundación. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), UN-SPIDER. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- Caccamo, G., Bradstock, R., Collins, L., Penman, T., & Watson, P. (2014). Using MODIS data to analyse post-fire vegetation recovery in Australian eucalypt forests. *Journal of Spatial Science*, 60(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/14498596.2014.923380>
- Casady, G., Van Leeuwen, W., & Marsh, S. (2010). Evaluating post-wildfire vegetation regeneration as a response to multiple environmental determinants. *Environmental Modeling and Assessment*, 15(4), 295–307. <https://doi.org/10.1007/s10666-009-9213-2>
- Chuvieco, E., Ventura, G., Martín, M. P., & Gómez, I. (2005). Assessment of different spectral indices in the red–near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 26(11), 2261–2277. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2025). Monitor de sequía en México. Consultado el 8 de marzo de 2025. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Google. (s. f.). Google Earth Engine. Consultado el 8 de marzo de 2025. <https://earthengine.google.com/>
- Han, D., Di, X., Yang, G., Sun, L., & Weng, Y. (2021). Quantifying fire severity: A brief review and recommendations for improvement. *Ecosystem Health and Sustainability*, 7(1), 1973346. <https://doi.org/10.1080/20964129.2021.1973346>
- NASA. (s. f.). The MODIS observation program. <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
- Neger, C., León-Cruz, J. F., Galicia Sarmiento, L., & Manzo-Delgado, L. D. L. (2022). Dinámica espaciotemporal, causas y efectos de los megaincendios forestales en México. *Madera y Bosques*, 28(2), e2822302. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822302>

Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior (UNOOSA). (s. f.). Índice Normalizado de Área Quemada (NBR). Consultado el 8 de marzo de 2025. <https://un-spider.org/es/node/10959>

Plotly. (s. f.). Dash. Consultado el 8 de marzo de 2025. <https://dash.plotly.com/>

Roodsarabi, Z., Sam-Khaniani, A., & Kiani, F. (2022). Investigation of post fire vegetation regrowth under different burn severities based on satellite observations. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 321–340. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03345-3>

The Sentinel Observation Program. (s. f.). Copernicus. <https://sentinels.copernicus.eu/>

Xie, Y., Sha, Z., & Yu, M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: A review. *Journal of Plant Ecology*, 1(1), 9–23. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtn005>

Apéndice

Recursos complementarios del análisis

Los archivos, códigos y resultados adicionales utilizados en el análisis están disponibles en los siguientes enlaces:

Repositorio web con visualizaciones interactivas: <https://jbhayet-regeneration.hf.space/>

Repositorio del mosaico multiespectral con vuelo de drone del área quemada del Arenal: Incendio El Arenal 2025| Proyecto UAV

Código en Google Colab para procesamiento de NDVI y NDWI en Earth Engine: <https://colab.research.google.com/drive/1CL6L0dtwPJSvQE7I85sxxTACIgHWu12i?usp=sharing>