ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1796

Assessment of Wildfire Vulnerability Using Satellite Image in the Michiquillay River Micro-watershed, Cajamarca - 2024

J. Silvana Castillo-Rios[1], *Gladys S. Licapa-Redolfo*[2], *Edilberto Gastolomendo-Malimba*[1], *Haydeé Díaz-Rimarachín*[1]
[1]Universidad Privada del Norte, Perú. N00228137@upn.pe, N00219829@upn.pe, N00220092@upn.pe
[2]Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

Abstract*– This study aimed to assess wildfire vulnerability in the Michiquillay River micro-watershed, Cajamarca – 2024, using remote sensing and geospatial analysis. Sentinel-2 imagery and spectral indices NDVI and NBR were employed to identify high-risk areas. The methodology included a multi-temporal analysis of satellite images from June, September, and November 2024, processed in ArcGIS Pro. The average NDVI was calculated at 0.4589, and the average NBR ranged from -0.092 to 0.3, both combined into a vulnerability index. Additionally, factors such as altitude (2,937 – 3,994 m.a.s.l.), annual precipitation (740 – 1,030 mm), and slopes greater than 27° were evaluated. Results showed that 32% of the area presents high or very high vulnerability, mainly concentrated in agricultural and pasture areas, whereas forested regions have lower risk due to higher moisture content. The study concluded that geospatial analysis effectively identifies critical areas and that the combination of NDVI and NBR is a reliable approach for assessing fire susceptibility. The findings will support the planning of wildfire prevention and risk management strategies in the Cajamarca region.

***Keywords*-- Wildfires, Remote Sensing, Geospatial Analysis, Vulnerability, Spectral Indices.**

Evaluación de la Vulnerabilidad a Incendios Forestales mediante Imágenes Satelitales en la microcuenca del río Michiquillay, Cajamarca – 2024

J. Silvana Castillo-Rios[1], *Gladys S. Licapa-Redolfo*[2], *Edilberto Gastolomendo-Malimba*[1], *Haydeé Díaz-Rimarachín*[1]
[1]Universidad Privada del Norte, Perú. N00228137@upn.pe, N00219829@upn.pe, N00220092@upn.pe
[2]Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

Resumen*– El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la vulnerabilidad a incendios forestales en la microcuenca del río Michiquillay, Cajamarca – 2024. Utilizando teledetección y análisis geoespacial. Se emplearon imágenes Sentinel-2 y los índices espectrales NDVI y NBR para identificar áreas de riesgo. La metodología incluyó el análisis multitemporal de imágenes satelitales de los meses de junio, septiembre y noviembre de 2024, procesadas en ArcGIS Pro. Se calcularon el NDVI promedio teniendo un valor de 0.4589 y el NBR promedio de -0.092 a 0.3, combinados en un índice de vulnerabilidad. Además, se evaluaron factores como la altitud (2937 – 3994 msnm), precipitación anual (740 – 1030 mm) y pendiente mayor a 27 °, los resultados mostraron que el 32 % del área presenta vulnerabilidad alta o muy alta, concentrada en áreas agrícolas y pastizales. Las áreas boscosas tienen menor riesgo debido a su mayor humedad. Se concluyó que el análisis geoespacial permite identificar áreas críticas y que la combinación del NDVI y NBR es efectiva para evaluar la susceptibilidad al fuego. La información obtenida servirá para la planificación de estrategias de prevención y gestión del riesgo en la región de Cajamarca.

Palabras clave—Incendios Forestales, Teledetección, Análisis Geoespacial, Vulnerabilidad, Índices espectrales.

I. Introducción

Históricamente, los incendios forestales han modelado los ecosistemas, especialmente en regiones de clima mediterráneo, donde el fuego es un factor clave en la configuración del paisaje. Su ocurrencia está influenciada por variables como la cobertura vegetal, la topografía y las condiciones meteorológicas (altas temperaturas, baja humedad y viento), además de la actividad humana, que constituye la principal causa de ignición. La creciente frecuencia e intensidad de estos incendios exige un enfoque integral que combina el análisis geoespacial, la teledetección y el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para su prevención y mitigación [1].

A nivel mundial, los incendios forestales representan una amenaza significativa debido a su impacto en el medio ambiente, la economía y la seguridad humana. Diversos estudios han demostrado que su ocurrencia está influenciada por factores como la velocidad del viento y la precipitación, los cuales afectan la ignición, propagación e intensidad del fuego [2]. Además, la frecuencia e intensidad de estos desastres han aumentado debido a factores climáticos y antrópicos, generando impactos significativos en la biodiversidad, la calidad del aire y la seguridad de las comunidades [3, p. 70].

El uso del fuego para actividades agrícolas y ganaderas, la expansión de las fronteras urbanas en zonas de interfaz con ecosistemas naturales, la propagación de las temporadas secas, el aumento de temperaturas y la diminución de precipitaciones han creado condiciones propicias para la propagación del fuego. Eso ha afectado especialmente relictos, pastizales, humedales y selvas tropicales [4].

Además, la deforestación también ha contribuido al deterioro de los bosques, generando emisiones de gases de efecto invernadero que impactan el equilibrio climático global [5]. Se estima que cada año se pierden aproximadamente tres millones de hectáreas de bosque debido a incendios, afectando ecosistemas estratégicos y generando pérdidas económicas y ambientales irreversibles [6].

El Perú no es ajeno a esta problemática, ya que registra una alta incidencia de incendios forestales en diversas regiones, con severas consecuencias para los ecosistemas y las comunidades locales. Entre 2001 y 2021, el país perdió aproximadamente 251 000 hectáreas de cobertura boscosa a causa del fuego, lo que representa el 6.9% de la superficie destruida por incendios en Sudamérica [7]. Según el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), la mayoría de los incendios forestales en Perú tienen origen antrópico, asociados a la expansión agrícola, la quema de pastizales y la habilitación de nuevas tierras para cultivos [8]. En particular, la sierra y selva alta presentan un alto riesgo de incendios, especialmente en la puna húmeda, donde las quemas recurrentes para promover el rebrote de pastos han degradado extensas áreas naturales [9]. Esta tendencia se ha visto acentuada en los últimos años debido al incremento de temperaturas y la reducción de precipitaciones en ciertas regiones del país, lo que ha generado condiciones propicias para la propagación del fuego [5].

En la región de Cajamarca, los incendios forestales han sido una amenaza constante, impulsados por la expansión agrícola. Un caso emblemático ocurrió en Granja Porcón en 2022, donde un incendio forestal arrasó con 432.43 hectáreas, afectando significativamente la biodiversidad local [6]. Estudios recientes han identificado que la provincia de Cajamarca presenta zonas de alta vulnerabilidad a incendios debido a la combinación de factores como la pendiente del

terreno, la densidad de vegetación seca y las condiciones climáticas adversas [8]. Adicionalmente, el análisis multitemporal mediante imágenes satelitales ha demostrado que la pérdida de cobertura vegetal en la región es significativa, y que las áreas afectadas por incendios tardan años en recuperarse, comprometiendo la disponibilidad de recursos hídricos y aumentando el riesgo de desertificación [6].

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la vulnerabilidad a incendios forestales en la microcuenca de Michiquillay, Cajamarca, utilizando herramientas de teledetección y análisis geoespacial. A través del uso de imágenes satelitales Sentines-2 y la aplicación de índices espectrales como NDVI y el NBR, se pretende identificar las áreas de mayor riesgo y contribuir a la planificación de estrategias de prevención y manejo del fuego en la región. El estudio se orienta a proporcionar información clave para la toma de decisiones en materia de gestión de riesgos y conservación de ecosistemas vulnerables en Cajamarca.

II. METODOLOGÍA

A. Tipo de metodología

El presente estudio adopta un enfoque metodológico cuantitativo, de tipo descriptivo y analítico [10], basado en el uso de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la evaluación del riego de incendios forestales. Puesto que el método principal es el análisis multitemporal y espacial, que permite estudiar la evolución de la cobertura vegetal y la acumulación de biomasa seca mediante índices espectrales [11]. Este tipo de metodología ha sido ampliamente utilizada en estudios de monitoreo de incendios forestales en diversas regiones del mundo [12], [13].

B. Ámbito de estudio

El estudio se llevó a cabo en la microcuenca del río Michiquillay, ubicada en el distrito de la Encañada, en la provincia de Cajamarca. El cual comprende 6032.43 hectáreas asimismo esta microcuenca se encuentra en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes y forma parte de la Subcuenca del Río Grande, la cual drena hacia la cuenca del Río Jequetepeque, un sistema hidrográfico de gran importancia para el abastecimiento de agua en la región y para actividades agrícolas y pecuarias, por lo que las precipitaciones varían de entre 740 a 1030 mm al año [14].

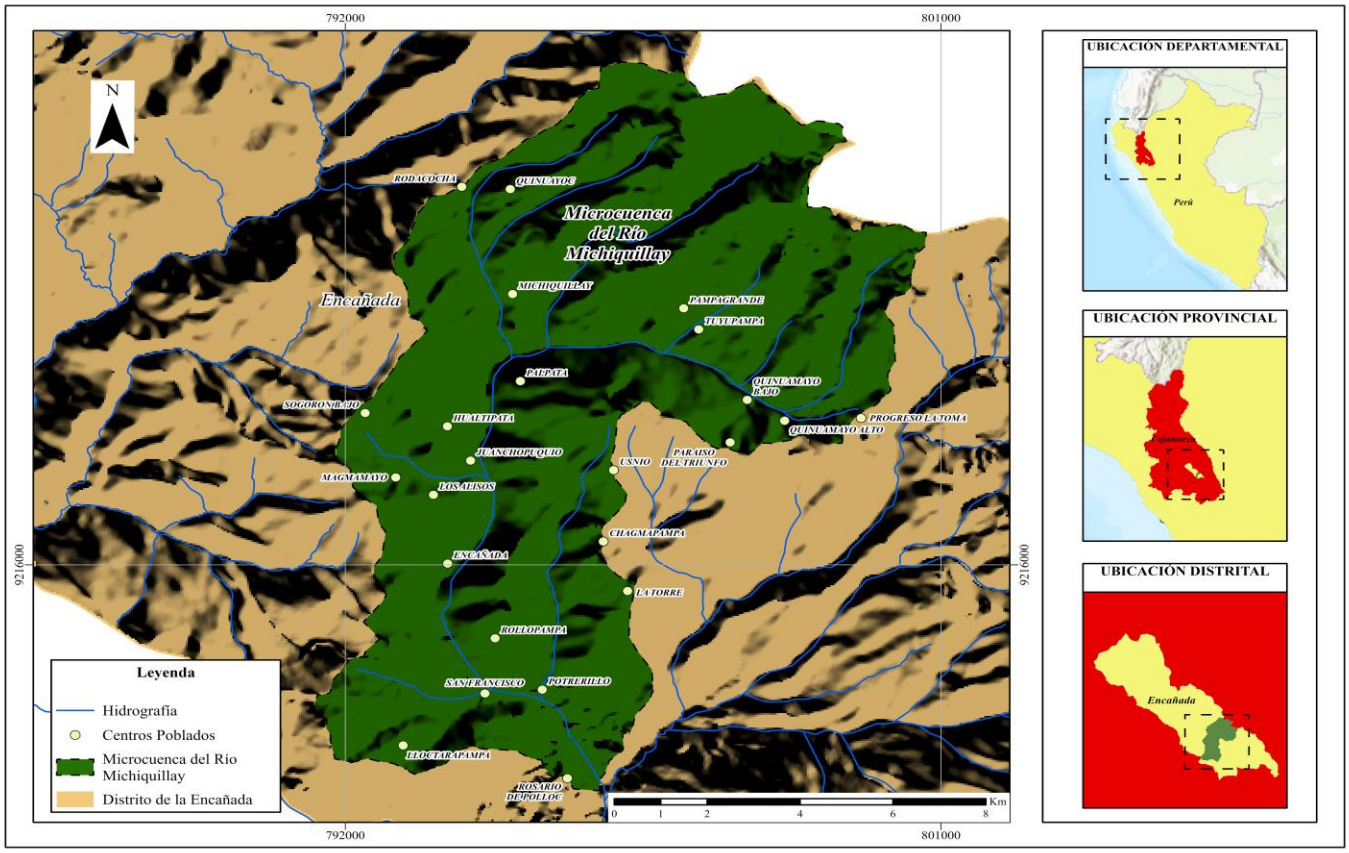

Fig. 1 Ubicación del área de estudio

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Variable	Unidades	Valor	
		Mínimo	Máximo
Altitud	msnm	2937	3994
Área	ha	6032.43	
Perímetro	km	43.18	

C. Procesamiento de Imágenes Satelitales

Para el análisis se utilizarán imágenes del satélite Sentinel – 2, descargadas de la plataforma Copernicus Open Access Hub. Se seleccionaron imágenes de los meses en las que no se presenció nubosidad, correspondientes a Junio Septiembre y Noviembre del 2024, con el objetivo de analizar la variabilidad estacional de la vegetación. Las imágenes empleadas corresponden al nivel 2A, lo que significa que han sido sometidas a correcciones radiométricas y atmosféricas. Antes de su análisis, se volvieron a muestrear a una resolución de 10 metros con el fin de homogenizar la resolución espacial de todas las bandas, ya que las imágenes de Sentinel – 2 presentan resoluciones de 10, 20 y 60 metros [6]. luego se procedió a hacer el recorte del área de estudio en base a los límites de la microcuenca. Para el procesamiento de datos, se utilizaron las herramientas Sentinel Application Platforms (SNAP) y el software ArcGIS Pro.

D. Cálculo NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es un indicador ampliamente utilizado en la teledetección para evaluar la cantidad y vigor de la vegetación en una determinada área geográfica. Asimismo, el NDVI posibilita la delimitación y representación espacial de zonas con cobertura vegetal en mapas, permitiendo identificar variaciones anómalas en su crecimiento [15]. Para su cálculo, se aplica la ecuación (1).

$$NDVI = \frac{NIR_{Band} - RED_{Band}}{NIR_{Band} + RED_{Band}} \dots (1)$$

Dónde:

NIR_{Band}: Banda Infrarrojo Cercano.
RED_{Band}: Banda Rojo Visible.

En la que se usa la combinación de la Banda B8A (NIR) y la Banda B4 (RED) para el satélite usado (Sentinel-2) [16]. El esquema de la clasificación de colores utilizado por defecto se conoce como NDVI3. En los mapas, los píxeles en tonos rojos y naranjas indican zonas sin cobertura vegetal, mientras que los píxeles amarillos corresponden a áreas con vegetación escasa o de densidad moderada. Por otro lado, los píxeles verdes representan regiones con alta densidad y vigor vegetativo [17].

E. Cálculo NBR

El Índice de Quemado Normalizado (NBR) es un índice espectral utilizado en teledetección para evaluar la severidad de incendios forestales y detectar áreas afectadas por el fuego. Se basa en la diferencia en la diferencia de reflectancia entre la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda del Infrarrojo de onda corta (SWIR), lo que permite identificar zonas quemadas y analizar su impacto en la vegetación [18]. Asimismo, de acuerdo con [13], este índice ha sido utilizado en múltiples estudios para clasificar la severidad del fuego y analizar su distribución espacial en paisajes afectados, el cual se aplica la ecuación (2).

$$NBR = \frac{NIR_{Band} - SWIR_{Band}}{NIR_{Band} + SWIR_{Band}} \dots (2)$$

Donde:

NIR_{Band}: Banda Infrarrojo Cercano.
$SWIR_{Band}$: Banda Infrarrojo de Onda Corta.

Por lo tanto, en el cálculo se usa la banda B8A (NIR) y la banda B12 (SWIR). En general, un valor elevado de NBR sugiere la presencia de Vegetación saludable, mientras que un valor bajo indica superficies desnudas o quemadas recientemente. Su cálculo es similar al del NDVI ya que se basa en la relación entre los valores NIR y SWIR [18]. En contraste, los valores altos de NBR representan áreas con vegetación saludable y alta humedad, lo que reduce la vulnerabilidad a incendios [13].

F. Cálculo de Vulnerabilidad a Incendios Forestales en Software GIS

La herramienta Raster Calculator permite realizar operaciones matemáticas y lógicas con rasters. Puesto que se puede ejecutar operaciones de suma, resta, multiplicación, división o aplicar funciones a los valores de los píxeles de un raster, ya que el funcionamiento es como una calculadora para mapas [19]. Esto permite crear nuevos rasters, combinando rasters existente para obtener información nueva, también se puede analizar datos, realizando cálculos específicos para obtener respuestas a preguntas sobre los datos usados, asimismo se puede preparar datos transformando los valores de un raster para adaptarlos a otros análisis o modelos [20].

Entonces para evaluar la vulnerabilidad a incendios forestales, se combinan el NDVI promedio y NBR promedio con la herramienta Raster Calculator, ya que estos índices reflejan la cantidad de biomasa y su nivel de humedad, respectivamente. Para ello se propone la ecuación (3) y se muestra en la figura 2

$$IVF = (1 - NDVI_{Prom}) + (1 - NBR_{Prom}) \dots (3)$$

Donde:

$NDVI_{Prom}$: Valor promedio del NDVI en la serie temporal.
NBR_{Prom}: Valor promedio del NBR en la serie temporal

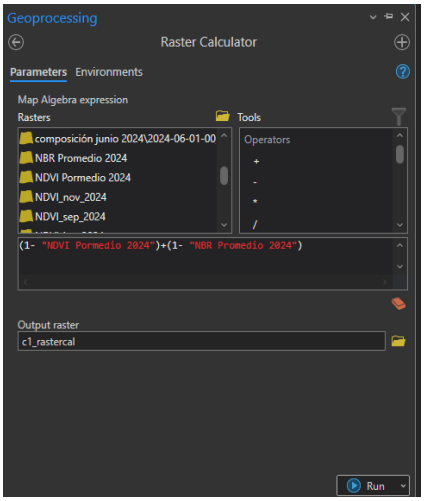

Fig. 2 Aplicación de ecuación (3) en el Software ArcGis Pro.

Por lo tanto, se invierte el NDVI (1-NDVI) porque los valores altos indican vegetación densa y baja vulnerabilidad, mientras que los valores bajos presentan zonas degradadas con alto riesgo de incendio. También se invierte el NBR (1-NBR), porque los valores altos representan vegetación con alta humedad, mientras que los valores bajos o negativos indican biomasa seca y suelos expuestos, aumentando la probabilidad de ignición [13]. Entonces la suma de ambos términos permite identificar zonas con menor cobertura vegetal y mayor riesgo de incendio, clasificando el territorio en niveles de vulnerabilidad [21].

Tras calcular el índice de vulnerabilidad a incendios forestales (IVF), los valores obtenidos se categorizan en rangos de riesgo [2] como se muestra en la Tabla 2.

TABLA II.
RANGO DE VULNERABILIDAD

Valor de IVF	Nivel de Vulnerabilidad	Interpretación
0.0 - 0.5	Muy Baja	Vegetación densa y alta Humedad
0.51 - 1.0	Baja	Vegetación moderada, condiciones normales
1.01 - 1.5	Moderada	Vegetación en estrés Hídrico, riesgo medio
1.51 - 2.0	Alta	Suelo expuesto, biomasa seca, alta Vulnerabilidad
2.01 - 2.5	Muy Alta	Áreas Críticas, material inflamable, alto riesgo de incendio

III. RESULTADOS

A. *Parámetros Climáticos*

En la Figura 3, muestra la variación mensual de precipitación (barras Verdes) y Temperatura (línea amarilla y naranja), indicadores clave para evaluar la vulnerabilidad a incendios forestales. Se observa un periodo seco entre julio y agosto, con precipitaciones inferiores a 5 mm, lo que coincide con temperaturas moderadas y menor humedad, condiciones propicias para la acumulación de biomasa seca. En contraste, los picos de precipitación en abril y diciembre indican la presencia de una estación lluviosa, favoreciendo la recuperación de la vegetación. La relación entre baja precipitación y estrés hídrico en la temporada seca sugiere un aumento del riesgo de incendios forestales, especialmente en áreas con vegetación degradada. Este análisis permite identificar periodos críticos dende la propagación del fuego podría ser más intensa, facilitando la planificación de estrategias de prevención y gestión al riesgo.

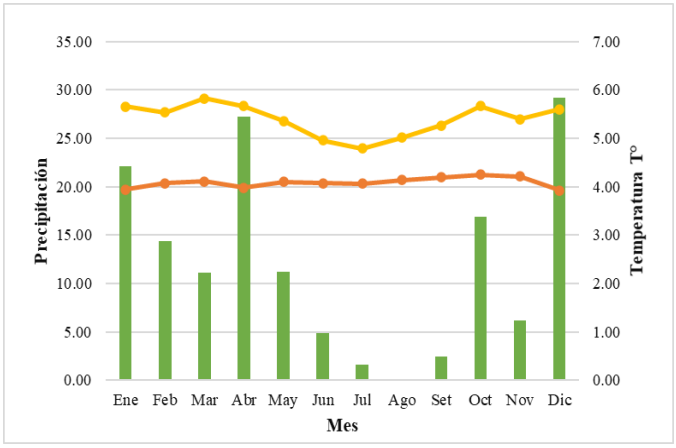

Fig. 3 Variación mensual de precipitación y temperatura máxima (línea naranja) y mínima (línea amarilla) en la microcuenca del río Michiquillay – 2024.

Asimismo, en la figura 4 se muestra los valores promedio anual de Temperatura máxima con 20.44°C, temperatura mínima de 6.53°C, precipitación de 2.45 mm y humedad relativa de 81.62 %, parámetros fundamentales en la evaluación de la vulnerabilidad a incendios forestales. La baja precipitación y la temperatura elevada indican condiciones favorables para la desecación de la vegetación, aumentando la disponibilidad de biomasa seca. Sin embargo, la humedad relativa alta (81.62%) sugiere que, a pesar del déficit de lluvias, la humedad atmosférica podría mitigar parcialmente la inflamabilidad de la vegetación. Estos factores combinados permiten identificar periodos críticos donde la prevención y gestión del riesgo en el área de estudio.

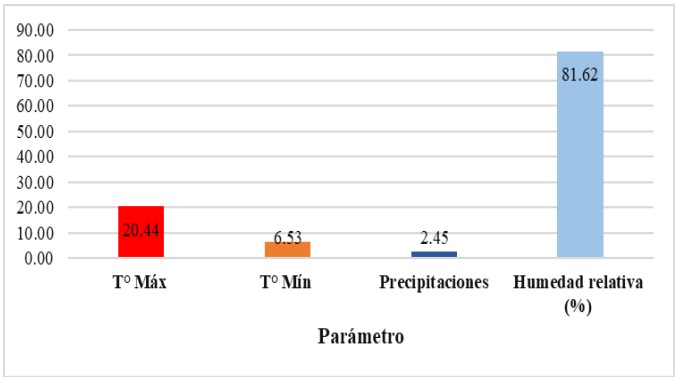

Fig. 4 Parámetros climáticos promedio anual en la microcuenca del río Michiquillay – 2024.

B. Información Digital

De forma gratuita se obtuvo la información digital sobre el modelo de elevación digital, la precipitaciones anuales y cambios de uso del suelo, en formato vectorial (Shapefile) desde el Geoservidor del Ministerio del Ambiente, con datos actualizados hasta el 2017 [8]. Posteriormente, utilizando el Software ArcGIS Pro, se delimitó el área correspondiente a la cuenca del río Michiquillay mediante la herramienta de corte de vectores (Clip) cómo se muestra en la figura 5.

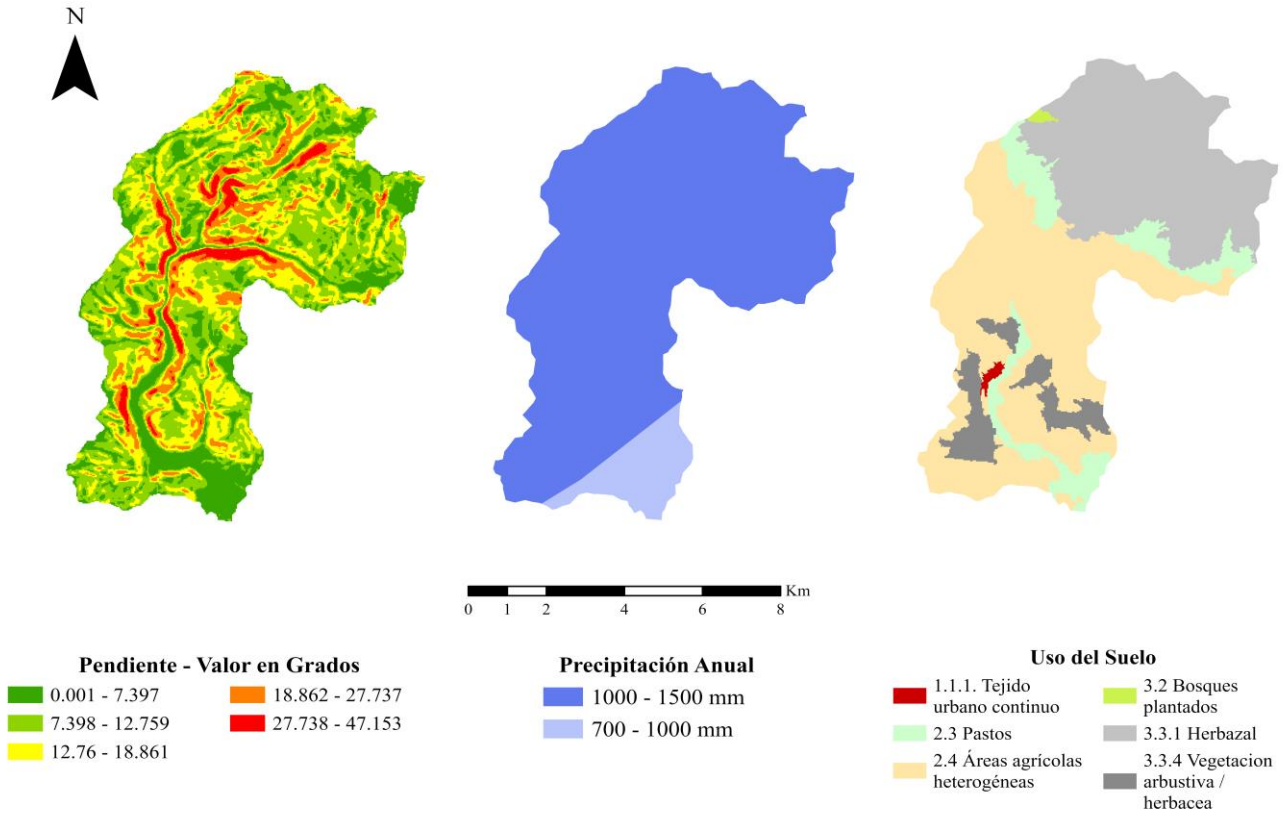

Fig. 5 Información digital de la ZEE de la región Cajamarca [22].

Los mapas muestran factores clave en la evaluación de la vulnerabilidad a incendios forestales: pendiente, Precipitación anual y Uso del suelo. El mapa de pendiente indica que las zonas con mayor inclinación (>27°) se concentran en las partes altas y en los márgenes de los ríos, lo que podría influir en la propagación del fuego y dificultar el acceso para su control. La precipitación anual varía entre 700 y 1500 mm, siendo menos en la parte sur, lo que sugiere un área más propensa a la sequedad y, por ende, a la ignición. Por otro lado, el uso del suelo evidencia la presencia de áreas agrícolas, pastizales y vegetación arbustiva, que pueden representar un riesgo debido a la acumulación de material combustible. La combinación de estos factores permite identificar zonas de mayor vulnerabilidad a incendios y establecer estrategias de prevención y manejo del fuego.

C. NDVI Promedio – 2024

Para el cálculo del NDVI promedio se realizó con el uso de Raster Calculator en ArcGIS Pro, el cual permitió calcular de manera eficiente el NDVI promedio a partir de imágenes satelitales de los meses de junio, septiembre y noviembre del 2024, la expresión ingresada en la herramienta es la ecuación (4), y se muestra en la figura 6.

$$NDVI_{Prom} = \frac{(NDVI_{jun} + NDVI_{sep} + NDVI_{nov})}{3} \quad \ldots(4)$$

Donde:

$NDVI_{jun}$: NDVI correspondiente a junio de 2024.
$NDVI_{sep}$: NDVI correspondiente a septiembre de 2024.
$NDVI_{nov}$: NDVI correspondiente a noviembre de 2024.

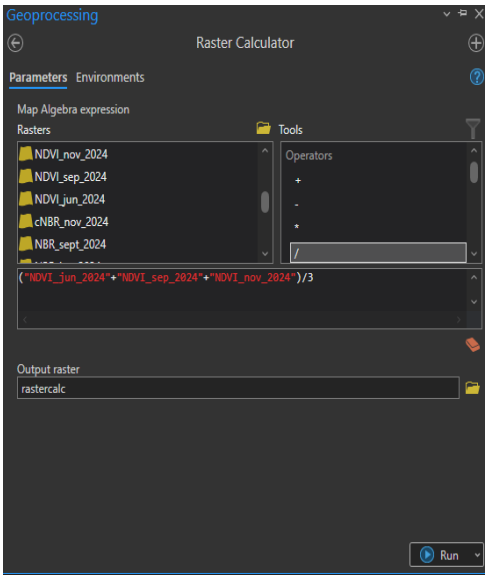

Fig. 6 Expresión para el calculo del NDVI promedio usada en ArcGIS Pro.

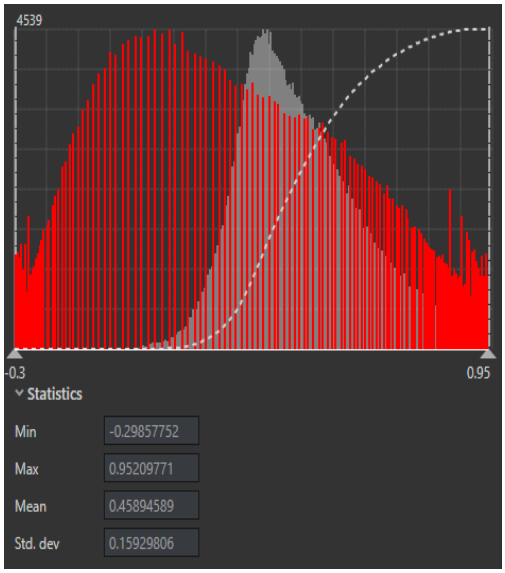

Fig. 7 Histograma del NDVI promedio 2024.

Esta ecuación indica que se están sumando los valores de NDVI de tres imágenes correspondientes a los meses seleccionados y luego dividiendo el resultado entre tres, lo que genera un promedio del NDVI a lo largo del tiempo. Los valores obtenidos se interpretan de la siguiente manera en la Tabla III.

TABLA III.
CLASIFICACIÓN DEL NDVI PROMEDIO

Estadística	Valor	Interpretación
Mínimo (Mín)	-0.286	Representa áreas sin vegetación, suelos desnudos o cuerpos de agua.
Máximo (Máx)	0.9521	Indica la presencia de vegetación densa y saludable.
Media (Mean)	0.4589	Refleja un promedio de vegetación moderada en la zona de estudio.
Desviación estándar Std. Dev,	0.1593	Indica una variabilidad moderada en la distribución de valores de NDVI.

En la figura 7, se muestra el histograma de la distribución de los valores del NDVI promedio en el área de estudio, con una curva de frecuencia que representa la cantidad de píxeles en cada rango del índice. Se observa una tendencia bimodal, con una mayor concentración de valores en el rango entre 0.3 y 0.6, lo que sugiere una predominancia de vegetación moderada.

D. NBR Promedio – 2024

Para el cálculo del NBR promedio, se realizó utilizando imágenes satelitales de los meses de junio, septiembre y noviembre de 2024, con el objetivo de evaluar la humedad de la vegetación y la acumulación de biomasa seca en la zona de estudio. En la herramienta Raster Calculator de ArcGIS Pro, se utilizó la ecuación (5) y expresada en la figura 8.

$$NBR_{Prom} = \frac{(NBR_{jun} + NBR_{sep} + NBR_{nov})}{3} \quad \ldots(5)$$

Donde:

NBR_{jun}: NBR correspondiente a junio de 2024.
NBR_{sep}: NBR correspondiente a septiembre de 2024.
NBR_{nov}: NBR correspondiente a noviembre de 2024.

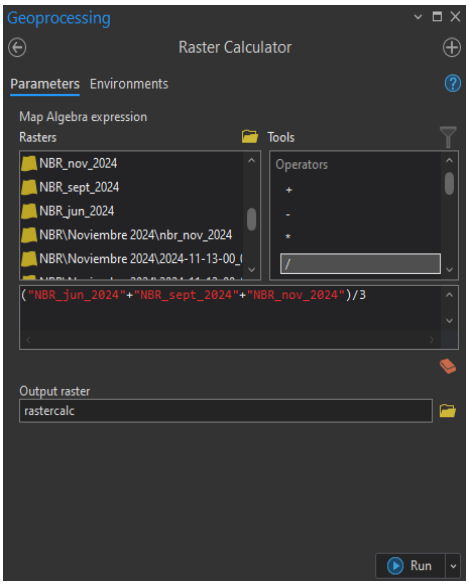

Fig. 8 Expresión para el cálculo del NBR promedio usada en ArcGIS Pro.

Por ende, se suma los valores de NBR obtenidos en las tres imágenes satelitales, para luego ser divididas entre 3 para obtener el valor medio en cada píxel, reflejando la tendencia general de la humedad y biomasa seca en el área de estudio, puesto que esto ayuda a suavizar variaciones temporales y proporcionar un análisis más estable de la vegetación.

Por lo tanto, en la figura 9 se presenta el histograma el cual representa la distribución de los valores del NBR promedio, donde se observa un rango de valores desde -0.64 hasta 0.743, lo que indica diferencias en la humedad y la biomasa en el área de estudio, asimismo los valores negativos (-0.64 a -0.092, en colores púrpura y rojo), representan biomasa seca, suelos desnudos o áreas con menor contenido de humedad. Los valores cercanos a 0 (en colores naranjas y amarillos) indican vegetación en estrés hídrico, lo que podría aumentar el riesgo de incendios si persisten en condiciones secas. Por otro lado, los valores positivos (>0.1, en colores verdes claros y oscuros) reflejan vegetación con mayor humedad, lo que reduce la susceptibilidad al fuego, entonces en el pico de concentración se observa que la mayor parte de los valores se encuentran entre -0.1 y 0.3, lo que indica que la vegetación presenta niveles variables de humedad, pero con un número significativo de áreas con riesgo moderado de incendios.

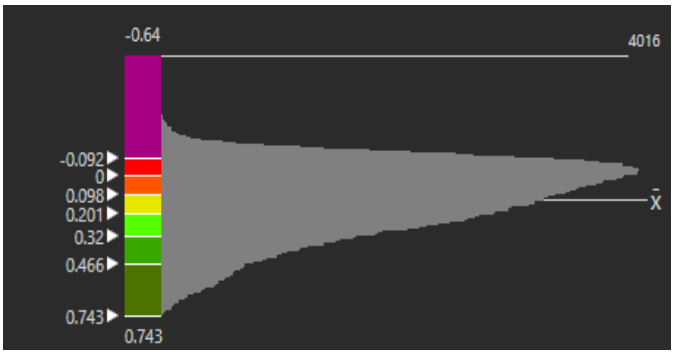

Fig. 9 Histograma del NBR promedio 2024.

E. Cálculo de Vulnerabilidad a Incendios Forestales

La evaluación de vulnerabilidad a incendios forestales en la microcuenca del río Michiquillay se realizó a partir del calculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) promedio y el Índice de Quemado Normalizado (NBR) promedio, utilizando imágenes satelitales de los meses de junio, septiembre y noviembre de 2024. Para obtener el nivel de susceptibilidad al fuego, se empleó la ecuación (3) en ArcGIS Pro. La ecuación (3), permite identificar áreas con baja cobertura vegetal y alta acumulación de biomasa seca, factores determinantes en la propagación del fuego. Se invierte el NDVI porque los valores altos indican vegetación saludable y baja vulnerabilidad, mientras que valores bajos representan áreas degradadas con alto riesgo de incendio. Del mismo modo, el NBR se invierte ya que los valores elevados reflejan vegetación con alta humedad y menor riesgo de fuego, mientras que valores bajos sugieren biomasa seca y suelos expuestos, aumentando la inflamabilidad.

En la Tabla IV, se presentan los resultados obtenidos categorizados en cinco niveles de vulnerabilidad, donde los valores más bajos indican bajo riesgo de incendios y los valores más altos corresponden a áreas críticas.

TABLA IV.
NIVEL DE VULNERABILIDAD A INCENDIOS FORESTALES

Valor de IVF	Nivel de Vulnerabilidad	Interpretación
0.3-0.88	Muy Baja	Vegetación densa y alta humedad, Bajo riesgo de incendios forestales.
0.88-1.19	Baja	Vegetación moderada, con bajo estrés hídrico.
1.19-1.45	Moderada	Vegetación con estrés hídrico y suelos expuestos. Riesgo medio.
1.45-1.67	Alta	Suelo expuesto y biomasa seca. Mayor susceptibilidad a incendios forestales.
1.67-2.93	Muy Alta	Áreas críticas con material inflamable. Alto riesgo de incendio forestal.

Los mapas generados como se muestra en la figura 10 evidencian que las áreas de alta y muy alta vulnerabilidad con colores naranja y rojo, se concentran áreas agrícolas y pastizales, donde la vegetación es escasa y existe una acumulación de material seco. En contraste las áreas con baja humedad son mayor y el riesgo de incendios es menor.

Para respaldar estos hallazgos, se analizaron otros factores físicos y climáticos que influyen en la propagación del fuego. Se observó que las áreas con pendientes pronunciadas mayores a 27° presentan mayor riesgo de propagación del fuego, especialmente en áreas donde la vegetación es escasa y los suelos están expuestos. Asimismo, el análisis de precipitación anual indica que la región recibe entre 700 a 1500 mm de lluvia, con valores más bajos en el sector sur, lo que incrementa la susceptibilidad a la sequedad del suelo en temporadas secas, finalmente, la evaluación de uso del suelo muestra que las áreas con pastizales y tierras agrícolas tienen mayor vulnerabilidad, debido a su alta inflamabilidad, mientras que las zonas boscosas presentan menor riesgo gracias a su mayor retención de humedad.

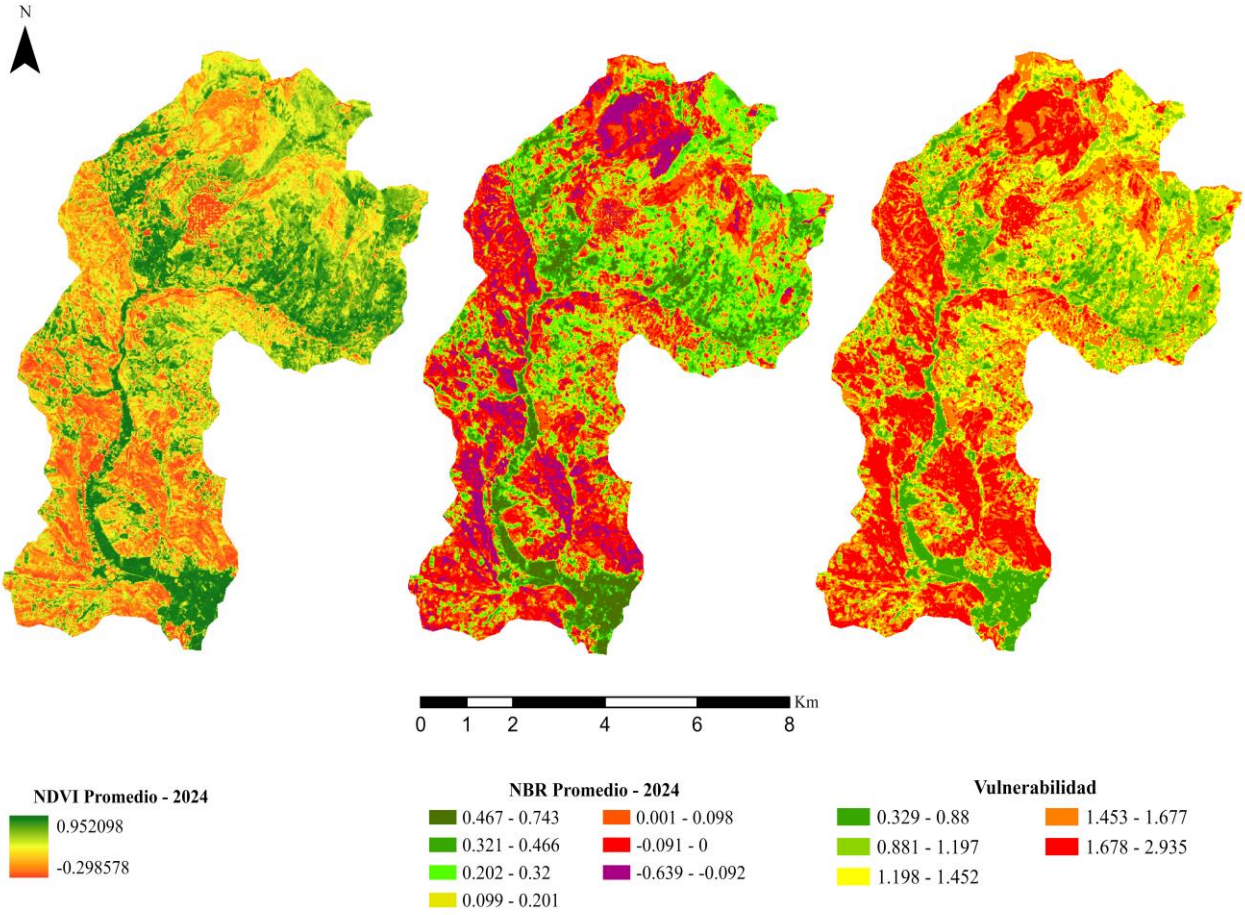

Fig. 10 Mapa de NDVI promedio, NBR promedio y Vulnerabilidad a incendios forestales en la microcuenca del río Michiquillay – 2024.

IV. Discusiones

La evaluación de vulnerabilidad a incendios forestales en la microcuenca del río Michiquillay, Cajamarca, revela la importancia del uso de índices espectrales derivados de imágenes satelitales, como el NDVI y el NBR, obtenidas a partir de imágenes Sentinel-2, permitió caracterizar la cobertura vegetal y la humedad del suelo, dos factores esenciales en la evaluación del peligro de incendios. Estos resultados coinciden con estudios previos, como el de Nakada Bedriñana [8], quien desarrollo un modelo digital de vulnerabilidad a incendios forestales en Cajamarca, resaltando la importancia del análisis multitemporal para detectar cambios en la vegetación y el contenido de humedad.

La combinación de estos índices ha permitido detectar áreas con baja cobertura vegetal, suelos expuestos y alta acumulación de biomasa seca, factores críticos en la ocurrencia y propagación de incendios forestales. Este enfoque ha sido ampliamente validado en estudios previos que han demostrado la efectividad del NBR y NDVI en la evaluación de la severidad de incendios y resiliencia del ecosistema tras un evento de fuego [6].

Desde una perspectiva regional, los incendios forestales representan una problemática recurrente en Cajamarca. Se estima que más de 10 000 hectáreas de bosques y cultivos han sido devastadas en los últimos años debido a incendios, los cuales se han intensificado por la expansión de la frontera agrícola y las prácticas de quema incontrolada [23]. En este sentido, la detección de áreas vulnerables mediante herramientas SIG permite anticipar y mitigar estos eventos, contribuyendo a la gestión del territorio y la conservación ambiental.

El uso del NBR como indicador de vulnerabilidad ha sido ampliamente validado en estudios internacionales. En ese sentido una investigación destaca la aplicación para evaluar la severidad de incendios mediante teledetección, permitiendo diferenciar áreas afectadas de áreas con vegetación intacta

[13]. Asimismo, el estudio de Alcaras et al. [18] propone una variante mejorada de NBR (NBR+) para mejorar la precisión en la teledetección de áreas quemadas utilizando imágenes Sentinel-2. En el presente estudio, el NBR promedio permitió identificar zonas con biomasa seca y baja humedad, lo que se traduce en una mayor susceptibilidad al fuego.

Por otro lado, la relación entre pendiente, uso del suelo y precipitación anual influye significativamente en la vulnerabilidad a incendios forestales. En áreas con pendientes superiores a 27°, el fuego puede propagarse rápidamente debido a la acumulación de material seco y el efecto del viento. Estos hallazgos coinciden con estudios previos, como el de Logaña Hayo y Cando Jácome [24], quienes identificaron la influencia de la topografía en la propagación de incendios en la Reserva Geobotánica Pululahua. Además, en sectores con baja precipitación anual, la vegetación experimenta estrés hídrico, lo que aumenta la inflamabilidad del material vegetal.

Finalmente, el presente estudio reafirma que la integración de imágenes satelitales y SIG permite realizar una evaluación precisa y oportuna de la vulnerabilidad a incendios forestales.

V. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidenciaron que las zonas con mayor vulnerabilidad a incendios se localizan en áreas agrícolas y pastizales, donde el NDVI refleja baja cobertura vegetal y el NBR indica acumulación de biomasa seca. En contraste, las áreas con baja vulnerabilidad coinciden con sectores boscosos, donde la mayor humedad y densidad de vegetación reducen la probabilidad de incendios.

El análisis geoespacial también permitió identificar la influencia de factores topográficos y climáticos en la propagación del fuego. se determinó que las zonas con pendientes pronunciadas mayores a 27° presentan un riesgo elevado, ya que la inclinación del terreno facilita la propagación del fuego. asimismo, la menor precipitación anual en el sector sur de la microcuenca incremente la sequedad del suelo, aumentando la inflamabilidad del material vegetal.

En conclusión, el presente estudio proporciona una base científica y técnica para la gestión del riesgo de incendios forestales en la microcuenca del río Michiquillay, contribuyendo a la conservación del paisaje y la reducción de impactos socioambientales en la región.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se plantean diversas estrategias orientadas a minimizar la vulnerabilidad y el riesgo de incendios forestales. Entre ellas destacan: la Implementación de programas de manejo y reducción de combustibles vegetales en zonas agrícolas y pastizales; la restauración ecológica mediante la reforestación con especies nativas resistentes al fuego; el establecimiento de sistemas de monitoreo satelital y de alerta temprana apoyados en índices espectrales como NDVI y NBR; la captación y sensibilización de las comunidades locales en prácticas agrícolas sostenibles y prevención de incendios; y el impulso de políticas locales y ordenanzas municipales que regulen el uso del fuego. La ejecución de estas estrategias fortalecerá la resiliencia del territorio, protegerá los ecosistemas vulnerables y contribuirá a un manejo integral de riesgos en la región de Cajamarca.

Referencias

[1] E. Chuvieco, M. P. Martín, J. Martínez, y F. J. Salas, “Geografía e Incendios Forestales”, 1998, Consultado: el 29 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://digital.csic.es/handle/10261/6427

[2] D. Pazmiño, “Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador”, *FIGEMPA Investig. Desarro.*, vol. 7, núm. 1, pp. 10–18, jun. 2019, doi: 10.29166/revfig.v1i1.1800.

[3] L. M. Pérez Pineda, “Análisis cronológico y de riesgo por incendios forestales en páramos y bosques altoandinos en Colombia desde los años 70”, 2021, Consultado: el 29 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/1992/53828

[4] J. J. Quispe Varillas, “Delimitación de áreas afectadas por incendios forestales mediante aprendizaje profundo en imágenes satelitales”, *Univ. Nac. Federico Villarreal*, 2024, Consultado: el 29 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/9326

[5] P. Sabuco Cárdenas, “La problemática de los incendios forestales y bases para su teledetección en el Perú”, *Apunt. Cienc. Soc.*, vol. 3, núm. 2, p. 5, 2013.

[6] E. G. Malimba, H. Díaz Rimarachín, y G. S. Licapa-Redolfo, “Reconstructing Ecosystems: Analysis of the Recolonization of Flora After the 2022 Fires in Pampa Caballero, Granja Porcon, Cajamarca”, en *Proceedings of the 4th LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2024): “Creating solutions for a sustainable future: technology-based entrepreneurship”*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024. doi: 10.18687/LEIRD2024.1.1.736.

[7] J. A. Samamé Saavedra, “Los incendios forestales y su repercusión en el ecosistema peruano: Forest fires and their impact on the Peruvian ecosystem”, *Latam Rev. Latinoam. Cienc. Soc. Humanidades*, vol. 4, núm. 2, p. 21, 2023.

[8] M. Nakada Bedriñana, “Modelo digital de vulnerabilidad por incendios forestales en la provincia de Cajamarca - Perú”, 2022, Consultado: el 29 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.12996/5217

[9] A. A. Aronés Cisneros, A. Badia i Perpinyà, J. Nadal Tersa, y V. Bonnesoeur, “Incendios forestales en ecosistemas de la puna húmeda en los Andes de Ayacucho, Perú”, *Investig. Reg. J. Reg. Res.*, núm. 59, pp. 127–147, 2024.

[10] M. C. M. R. V y I. P. Cabrera, “Tipos de estudio en el enfoque de investigación cuantitativa”, *Enferm. Univ.*, vol. 4, núm. 1, pp. 35–38, 2007.

[11] J. R. Jensen y K. Lulla, “Introductory digital image processing: A remote sensing perspective”, *Geocarto Int.*, vol. 2, núm. 1, pp. 65–65, mar. 1987, doi: 10.1080/10106048709354084.

[12] S. A. Parks, G. K. Dillon, y C. Miller, “A New Metric for Quantifying Burn Severity: The Relativized Burn Ratio”, *Remote Sens.*, vol. 6, núm. 3, Art. núm. 3, mar. 2014, doi: 10.3390/rs6031827.

[13] C. H. Key y N. C. Benson, “Landscape Assessment (LA)”, 2006.

[14] I. N. de R. N. D. G. de E. y Proyectos, “Estudio integrado de caracterización de recursos naturales renovables en microcuencas altoandinas para el alivio a la pobreza en sierra: Microcuenca Encañada Cajamarca”, *Aut. Nac. Agua*, 1998, doi: 10/I5C/25/I-II.

[15] “Procesamiento de Imágenes Satelitales para analizar el impacto de incendios forestales en el distrito de Ocongate, Quispicanchi, Cusco, Perú”, Ingenia Web. Consultado: el 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ingeniaweb.up.edu.pe/proyecto/proyecto-estudiante/

[16] “Estimación de áreas afectadas por incendios en la reserva forestal protectora bosque oriental de Bogotá: Usando imágenes satelitales Sentinel- 2, basado en objetos geográficos (GEOBIA) - ProQuest”.

Consultado: el 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.proquest.com/openview/8e3c300d7d5bdb424131ab65f0eefe2e/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393
[17] "Función NDVI a color—ArcGIS Pro | Documentación". Consultado: el 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-colorized-function.htm
[18] E. Alcaras, D. Costantino, F. Guastaferro, C. Parente, y M. Pepe, "Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index for Sentinel-2 Imagery", *Remote Sens.*, vol. 14, núm. 7, Art. núm. 7, ene. 2022, doi: 10.3390/rs14071727.
[19] "Calculadora ráster (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro | Documentación". Consultado: el 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/raster-calculator.htm
[20] "Calculadora raster con ArcGIS | Tutorial ArcGIS | GEASIG". Consultado: el 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://geasig.com/calculadora-raster-con-arcgis/
[21] L. B. Lentile* *et al.*, "Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects", *Int. J. Wildland Fire*, vol. 15, núm. 3, pp. 319–345, sep. 2006, doi: 10.1071/WF05097.
[22] Wow_themes, "Cajamarca – Geoservidor". Consultado: el 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/cajamarca/
[23] E. P. de S. E. S. A. E. PERÚ, "Cajamarca: incendios forestales arrasan con más de 10,000 hectáreas de bosques y cultivos". Consultado: el 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://andina.pe/agencia/noticia-cajamarca-incendios-forestales-arrasan-mas-10000-hectareas-bosques-y-cultivos-1001120.aspx
[24] C. P. Logaña Hayo y M. Cando Jácome, "Evaluación de áreas Vulnerables a Incendios Forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua del Cantón Quito, Utilizando Imágenes Ecostress", *Cienc. Lat. Rev. Multidiscip.*, vol. 8, núm. 1, pp. 103–131, 2024.