

## Teledetección aplicada a incendios forestales en ecosistemas andinos: Detección y análisis de severidad en Cusco

Remote sensing applied to forest fires in Andean ecosystems: Detection and severity analysis in Cusco

Sensoriamento remoto aplicado a incêndios florestais em ecossistemas andinos: Detecção e análise de severidade em Cusco

Lizbeth Carol Cruz Ledesma\*, <https://orcid.org/0000-0003-2393-2815>  
Fray Masias Cruz Reyes, <https://orcid.org/0000-0003-3359-1727>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

\*Autor para correspondencia: [cruz.l.carol@gmail.com](mailto:cruz.l.carol@gmail.com)

### RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo detectar y analizar la severidad de los incendios forestales en ecosistemas andinos del departamento de Cusco mediante técnicas de teledetección. Para ello, se aplicó un enfoque cuantitativo, descriptivo-explicativo y de tipo aplicado, basado en el procesamiento de datos satelitales MODIS, VIIRS y Landsat 8, integrados en plataformas SIG y Google Earth Engine. El diseño metodológico fue no experimental y longitudinal retrospectivo, sustentado en registros del periodo 2015–2024, sobre los cuales se construyeron mosaicos pre y postincendio, se aplicaron máscaras atmosféricas y se calcularon los índices NBR y dNBR para evaluar la pérdida de biomasa con precisión radiométrica. Los resultados permitieron delimitar un área de estudio definida por un buffer de 20 km alrededor del mayor conjunto glaciar del sur de Cusco, donde se concentró la recurrencia de puntos de calor. Asimismo, el análisis espectral reveló patrones heterogéneos de severidad, caracterizados por parches de alta intensidad insertos en matrices de afectación moderada. La integración de recurrencia temporal y severidad permitió identificar zonas críticas donde el fuego se repite con mayor frecuencia e impacto. En conclusión, la teledetección demostró ser una herramienta robusta para comprender la dinámica espacio-temporal del fuego y aportar insumos esenciales para la gestión del riesgo en ecosistemas andinos.

**Palabras clave:** Teledetección; incendios forestales; severidad del fuego; ecosistemas andinos

### ABSTRACT

This research aimed to detect and analyze the severity of forest fires in Andean ecosystems of the Cusco region using remote sensing techniques. A quantitative, descriptive-explanatory, and applied approach was used, based on the processing of MODIS, VIIRS, and Landsat 8 satellite data, integrated into GIS platforms and Google Earth Engine. The methodological design was non-experimental and retrospective longitudinal, based on records from the period 2015–2024. Pre- and post-fire mosaics were constructed from this data, atmospheric masks were applied, and the NBR and dNBR indices were calculated to assess biomass loss with radiometric precision. The results allowed for the delimitation of a study area defined by a 20 km buffer around the largest glacial complex in southern Cusco, where hotspots were concentrated. Furthermore, spectral analysis revealed heterogeneous severity patterns, characterized by high-intensity patches embedded within matrices of moderate impact. Integrating temporal recurrence and severity allowed for the identification of critical zones where fire recurs with greater frequency and impact. In conclusion, remote sensing proved to be a robust tool for understanding the spatiotemporal dynamics of fire and providing essential input for risk management in Andean ecosystems.

**Keywords:** Remote sensing; forest fires; fire severity; Andean ecosystems

## RESUMO

A pesquisa teve como objetivo detectar e analisar a severidade de incêndios florestais em ecossistemas andinos da região de Cusco, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Foi utilizada uma abordagem quantitativa, descriptiva-explicativa e aplicada, baseada no processamento de dados de satélite MODIS, VIIRS e Landsat 8, integrados em plataformas SIG e no Google Earth Engine. O delineamento metodológico foi longitudinal, retrospectivo e não experimental, baseado em registros do período de 2015 a 2024. Mosaicos pré e pós-incêndio foram construídos a partir desses dados, máscaras atmosféricas foram aplicadas e os índices NBR e dNBR foram calculados para avaliar a perda de biomassa com precisão radiométrica. Os resultados permitiram a delimitação de uma área de estudo definida por um buffer de 20 km ao redor do maior complexo glacial no sul de Cusco, onde os pontos críticos estavam concentrados. Além disso, a análise espectral revelou padrões heterogêneos de severidade, caracterizados por manchas de alta intensidade inseridas em matrizes de impacto moderado. A integração da recorrência temporal e da severidade permitiu a identificação de zonas críticas onde o fogo recorre com maior frequência e impacto. Em conclusão, o sensoriamento remoto demonstrou ser uma ferramenta robusta para a compreensão da dinâmica espaço-temporal do fogo e para o fornecimento de informações essenciais para a gestão de riscos em ecossistemas andinos.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto; incêndios florestais; severidade do fogo; ecossistemas andinos

Recibido: 9/11/2025 Aprobado: 2/12/2025

## Introducción

Los incendios forestales han adquirido una creciente relevancia científica, ambiental y social en las últimas décadas, particularmente en regiones montañosas sensibles como los Andes (CENEPRED, 2021; Infobae, 2024). Su frecuencia e intensidad se han incrementado como consecuencia de múltiples factores asociados al cambio climático, la variabilidad meteorológica y las prácticas antrópicas, lo cual ha generado condiciones de riesgo sin precedentes para los ecosistemas altoandinos (CONIDA, 2024; IPCC, 2023). En este contexto, la teledetección se ha consolidado como una herramienta esencial para la detección, evaluación y monitoreo de incendios, permitiendo analizar la severidad del fuego y los procesos de recuperación de la vegetación con alta precisión espacial y temporal (Díaz et al, 2023; Keeley et al, 2022).

El avance de plataformas satelitales como Sentinel-2 ha permitido mejorar notablemente la estimación de la severidad del fuego, tal como lo confirma Howe et al. (2022), quienes evidencian que este sensor supera o iguala el desempeño de Landsat en varios índices espectrales, captando con mayor detalle la complejidad espacial de los incendios gracias a su resolución de 10 metros (Giglio et al, 2018). Estos aportes son especialmente relevantes en ecosistemas andinos, donde el mosaico de coberturas y la abrupta topografía exigen una capacidad robusta de discriminación espacial.

La utilidad de los índices espectrales para evaluar la severidad del fuego ha sido demostrada por múltiples estudios. Maxwald et al. (2022) identificaron que índices como el LCCI y el NDRESWIR permiten monitorear con precisión la recuperación post-incendio en los Andes del sur de Ecuador, mostrando incluso cómo especies de ciclo de vida corto permiten una regeneración acelerada tras el primer año. Este tipo de evidencia demuestra que los índices derivados de imágenes multitemporales no solo cuantifican los impactos, sino que también permiten caracterizar la resiliencia ecológica de los ecosistemas afectados.

En paralelo, Miranda et al. (2022) desarrollaron una base de datos de alta resolución para comprender regímenes de incendios en Chile mediante flujos de trabajo implementados en Google Earth Engine, reconstruyendo más del 60 % de cicatrices de incendios históricos. Este tipo de iniciativas revela el enorme potencial de la teledetección para generar repositorios de información robusta, replicables y de acceso abierto, esenciales para mejorar la toma de decisiones y el diseño de políticas de gestión del fuego.

Otro aporte clave proviene del trabajo de Carrión et al. (2024), quienes demostraron en Ecuador la correspondencia entre el conocimiento tradicional y los indicadores climáticos y satelitales asociados con la ocurrencia de incendios, mayoritariamente de baja severidad. Esta evidencia reafirma la importancia de integrar enfoques interculturales y de conocimiento local en el manejo del fuego, particularmente en territorios andinos donde el uso tradicional del fuego forma parte de la dinámica ecológica y productiva.

Las investigaciones aplicadas a ecosistemas andinos continúan mostrando patrones consistentes. González et al. (2024) evaluaron un incendio en Loja (Ecuador) combinando índices NBR, NDVI y NDMI con modelos de severidad, observando reducciones sustanciales de áreas afectadas en solo dos años y evidenciando una recuperación ecológica notable. Estos resultados refuerzan la utilidad del dNBR y del dNDVI como métricas

para evaluar tanto daños inmediatos como trayectorias de regeneración en ecosistemas de montaña. En el Perú, estudios recientes han demostrado la relevancia del sensoriamento remoto para caracterizar la magnitud y la dinámica de los incendios andinos. Añamuro et al. (2020) estimaron más de 2,400 hectáreas afectadas por un incendio en Puno, mostrando una predominancia de niveles de severidad baja y media mediante los índices NBRI y  $\Delta$ NBR. Del mismo modo, Arónés et al. (2024) evidenciaron que en Ayacucho las causas de los incendios son exclusivamente antrópicas y que algunas zonas presentan recurrencias de hasta nueve eventos, resaltando la urgencia de combinar datos satelitales y entrevistas para comprender los patrones territoriales del fuego.

Las limitaciones de los sistemas de detección de focos de calor en áreas altoandinas han sido abordadas por Zubieta et al. (2023), quienes muestran que, aunque los productos MODIS y VIIRS registran de forma confiable incendios activos, su omisión supera el 90 % en quemadas pequeñas o de corta duración. Esta brecha evidencia la necesidad de enfoques complementarios de monitoreo que integren índices espectrales, análisis multitemporal y trabajo de campo para una interpretación integral de los incendios en la región andina.

Los factores climáticos también desempeñan un rol determinante. Prudencio et al. (2021) demostraron que la precipitación acumulada, la frecuencia de días secos y cálidos y el contenido de humedad de la vegetación influyen significativamente en la probabilidad de incendios en los Andes peruanos. Este hallazgo subraya la importancia de estructuras de alerta temprana basadas en información climática y satelital, particularmente en ecosistemas altoandinos donde la estacionalidad marca patrones críticos de riesgo.

Los impactos ecosistémicos derivados de los incendios han sido identificados en estudios como el de Roman et al. (2024), que documentaron efectos fisicoquímicos en suelos y demoras de hasta cuatro años para la recuperación de biomasa en pastizales de Cusco. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de investigar la severidad del fuego como un paso clave para comprender la degradación ecológica y orientar estrategias de restauración adaptadas al contexto andino.

## Materiales y métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, ya que se basó en la obtención, procesamiento y análisis de datos satelitales numéricos con el fin de caracterizar la recurrencia y severidad de los incendios forestales. Este enfoque permitió medir de manera objetiva los cambios espectrales asociados al impacto del fuego y generar indicadores comparables en distintos momentos del periodo 2015–2024. Asimismo, el estudio adoptó un propósito descriptivo-explicativo, puesto que buscó describir la distribución espacial y temporal de los incendios y explicar los niveles de severidad obtenidos a partir del análisis multiespectral (Boschetti et al, 2019). De manera complementaria, la investigación se enmarcó dentro del tipo aplicada, debido a que sus resultados estuvieron orientados a la gestión del riesgo y la planificación territorial, generando conocimiento útil para entidades vinculadas al manejo del fuego en ecosistemas andinos.

El diseño metodológico fue no experimental y longitudinal retrospectivo, dado que se sustentó en registros históricos captados por sensores satelitales durante el periodo 2015–2024. No se manipuló ninguna variable; por el contrario, se observaron los patrones espacio-temporales del fuego tal como ocurrieron, lo que permitió reconstruir tendencias, identificar zonas afectadas y analizar variaciones interanuales. Este diseño adoptó además un carácter geoespacial, ya que integró datos satelitales en plataformas SIG y generó productos cartográficos derivados (Claverie et al, 2018). Las operaciones de recorte, mosaico, clasificación espectral y modelamiento espacial se realizaron en entornos especializados, permitiendo estructurar un análisis espacial continuo y coherente con la dinámica territorial de los incendios.

La muestra quedó conformada por los puntos de calor detectados por los sensores MODIS y VIIRS dentro del área delimitada alrededor del conjunto glaciar más extenso del sur del Cusco (USGS, 2024). Estos registros representaron evidencia directa de actividad térmica y permitieron identificar la ocurrencia anual de incendios forestales. Asimismo, la muestra incluyó las escenas Landsat 8 utilizadas para calcular los índices NBR y  $d$ NBR en ventanas preincendio y postincendio (Coaguila et al, 2025). La muestra espacial se definió mediante un buffer de 20 km alrededor de los glaciares seleccionados, de donde se extrajeron exclusivamente los registros satelitales asociados a incendios. Su selección respondió a criterios de calidad atmosférica, fecha cercana al evento y mínima nubosidad, garantizando la consistencia radiométrica de los datos. El  $d$ NBR se calculó restando el NBR postincendio del NBR preincendio:

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

Donde:

NBR\_pre: índice NBR calculado antes del incendio

NBR\_post: índice NBR calculado después del incendio

NIR: banda del infrarrojo cercano

SWIR: banda del infrarrojo de onda corta

Los materiales utilizados incluyeron imágenes satelitales Landsat 8 Collection 2 Level 2 procesadas mediante ArcGIS y QGIS, así como los productos MODIS y VIIRS para caracterizar la recurrencia de incendios. También se emplearon capas vectoriales de límites administrativos, inventarios oficiales de glaciares y modelos digitales de terreno para complementar el análisis espacial. El procesamiento se apoyó en equipos informáticos con capacidad para operaciones geoespaciales y en software especializado, particularmente QGIS para recorte, vectorización y elaboración de mapas finales. Adicionalmente, se utilizó Google Earth Engine en su entorno JavaScript para calcular índices espectrales, generar mosaicos y clasificar la severidad. Este conjunto de herramientas permitió integrar, depurar y analizar grandes volúmenes de información geoespacial de forma eficiente.

## Resultados y discusión

### Delimitación del área de estudio con alta frecuencia de incendios forestales

La delimitación del área de estudio con alta frecuencia de incendios forestales en el departamento de Cusco se obtuvo a partir de la integración y el tratamiento sistemático de información cartográfica y satelital en un entorno de sistemas de información geográfica. Para ello, se compilaron inicialmente capas vectoriales de límites administrativos (departamentos y provincias), el inventario de glaciares y los registros de puntos de calor de los sensores MODIS y VIIRS correspondientes al período 2015–2024, los cuales fueron importados, depurados y recortados al ámbito departamental utilizando el software QGIS. Sobre esta base, se identificaron los glaciares presentes en la región y se reconocieron dos grandes conjuntos glaciares, seleccionándose para el análisis aquel de mayor extensión ubicado en el sector sur del departamento. En torno a estos glaciares de interés se generó un buffer de 20 km que, al intersectarse con el límite político-administrativo de Cusco, dio lugar a un polígono continuo que define el área de estudio; sobre dicho polígono se recortó finalmente la capa de puntos de calor MODIS y VIIRS, concentrando así la atención en la zona con mayor recurrencia de incendios forestales. La configuración espacial de esta delimitación se presenta en la Figura 1.

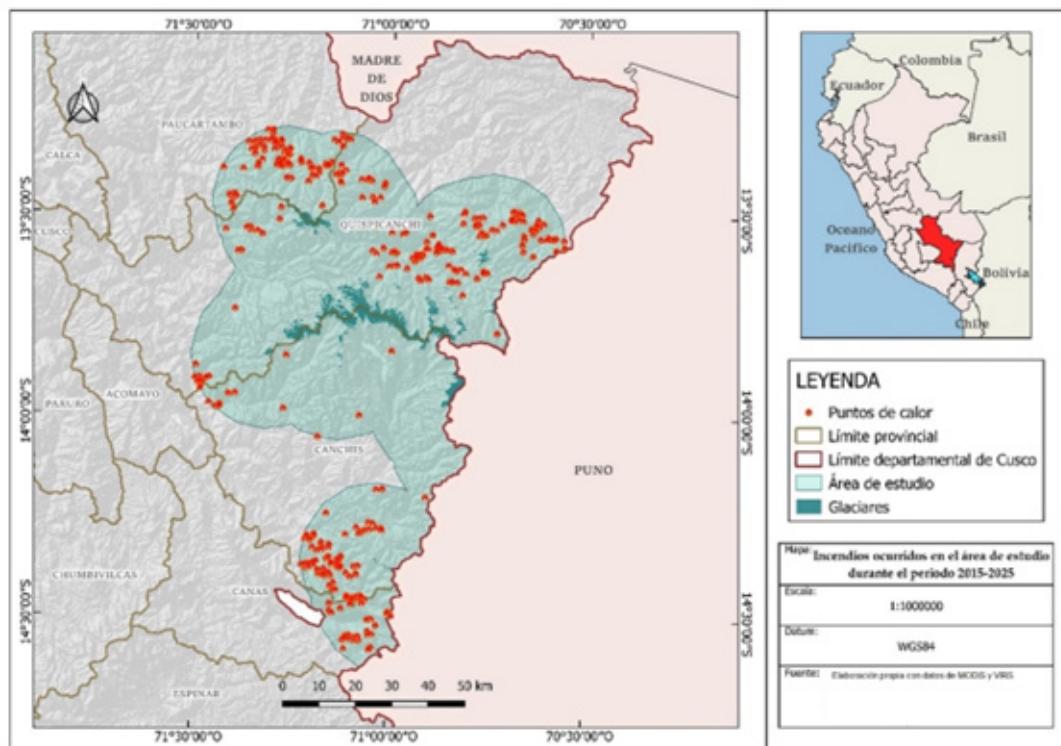
A partir de la delimitación descrita, la base de puntos de calor se sometió a un proceso de clasificación temporal orientado a identificar la frecuencia interanual de los incendios dentro del área de estudio. Para ello, a cada registro satelital se le asignó el año correspondiente a su fecha de adquisición, generando un nuevo campo que permitió agrupar y sintetizar los eventos de fuego por períodos anuales y facilitar su análisis comparativo. Esta recodificación se complementó con procedimientos de ordenamiento y simbolización temática en QGIS, mediante los cuales se elaboraron representaciones cartográficas que muestran la distribución espacial de los focos para cada año sobre el polígono definido en torno a los glaciares seleccionados. Como resultado, se obtuvo un primer conjunto de mapas que permiten visualizar con claridad las zonas donde los incendios forestales se repiten de manera sistemática a lo largo de la serie analizada, confirmando que el área delimitada concentra ecosistemas glaciares altamente sensibles y expuestos a una dinámica persistente de perturbación vinculada al uso del fuego en los entornos altoandinos.

Desde una perspectiva ecológica y de gestión del riesgo, la decisión de focalizar el análisis en el conjunto de glaciares de mayor extensión en el sector sur de Cusco responde a la doble condición de vulnerabilidad y exposición que caracteriza a estos ecosistemas. Por un lado, los glaciares son sistemas sumamente frágiles frente al cambio climático, cuyo retroceso acelerado se relaciona, entre otros factores, con la deposición de hollín y cenizas procedentes de incendios forestales cercanos, que alteran el albedo de la superficie nival y favorecen una mayor absorción de energía. Por otro lado, la concentración de focos de calor dentro del buffer

de 20 km indica que los incendios no se distribuyen de forma aleatoria en el territorio, sino que tienden a ocurrir en entornos de influencia directa sobre las masas glaciares, aumentando el riesgo de impactos acumulativos sobre la criósfera andina y los servicios ecosistémicos asociados. Esta relación justifica la pertinencia de la delimitación propuesta como base para los análisis posteriores de severidad y dinámica espacio-temporal. El análisis cartográfico derivado de la intersección entre el área de estudio y los registros MODIS y VIIRS muestra que la recurrencia de incendios se organiza en torno a ciertos corredores territoriales donde el fuego se repite en múltiples años del período 2015–2024. Aunque este apartado se centra en la delimitación más que en la cuantificación detallada, la lectura integrada de los mapas anuales revela que existen sectores que actúan como núcleos de ignición, donde convergen condiciones biofísicas y antrópicas propicias para la ocurrencia del fuego. Estas zonas recurrentes se localizan preferentemente en las franjas de transición entre los glaciares y sus piedemontes altoandinos, lo que sugiere la influencia de prácticas de quema de pastos, ampliación de áreas de cultivo o manejo del paisaje rural que, al repetirse año tras año, configuran una geografía del riesgo estrechamente vinculada a la presencia de los glaciares. Estos corredores y núcleos de ignición pueden observarse de forma sintética en la Figura 1.

La delimitación obtenida no solo tiene implicancias metodológicas para la construcción de los mapas, sino también implicancias prácticas para la gestión del riesgo de desastres y la planificación ambiental. Al acotar el análisis a un espacio donde confluyen altas tasas de incendios y la presencia de glaciares, se configura una unidad territorial prioritaria que puede ser utilizada por las autoridades sectoriales y los gobiernos subnacionales como referencia para el diseño de estrategias de prevención, vigilancia y respuesta frente al fuego. Asimismo, la delimitación facilita la articulación con otros insumos de planificación, como zonificaciones ecológicas y económicas o áreas naturales protegidas, permitiendo contrastar si las zonas de mayor presión ígnea coinciden o no con áreas de especial interés para la conservación y la seguridad hídrica.

Figura 1: Delimitación del área de estudio con alta frecuencia de incendios forestales en el sur del departamento de Cusco



La delimitación espacial obtenida para identificar las áreas con mayor frecuencia de incendios forestales en Cusco coincide con la evidencia internacional que subraya la importancia de caracterizar adecuadamente la distribución del fuego en territorios ecológicamente sensibles. En este sentido, los patrones identificados alrededor del conjunto de glaciares de mayor extensión en el sector sur del departamento muestran que los focos de calor se concentran en zonas que actúan como corredores de ignición persistente. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Miranda et al. (2022), quienes demostraron que el análisis histórico de cicatrizes de fuego permite reconstruir regímenes espaciales donde los incendios tienden a repetirse por condiciones biofísicas y antrópicas particulares. Asimismo, los resultados refuerzan la pertinencia de utilizar buffers y recortes territoriales específicos para focalizar el análisis, como se realizó en QGIS para la reconstrucción de áreas quemadas en Chile. Esto respalda la validez metodológica del área de estudio

delimitada en torno a los glaciares cusqueños, al permitir identificar núcleos recurrentes de perturbación con clara influencia sobre ecosistemas frágiles.

A la luz de los hallazgos, la proximidad entre los focos de calor y los glaciares resalta la vulnerabilidad de la criósfera ante los procesos de quema en entornos altoandinos, especialmente porque la deposición de cenizas y hollín puede acelerar el derretimiento glaciar al reducir el albedo superficial. Este vínculo también ha sido documentado en investigaciones sobre la recuperación de la vegetación post-incendio, como la de Maxwald et al. (2022), quienes evidenciaron que los efectos del fuego varían según la severidad y la capacidad de regeneración del ecosistema. Aunque el presente análisis se centró en la delimitación espacial de incendios recurrentes más que en evaluar su severidad, la concentración de focos dentro del buffer de 20 km sugiere la posibilidad de impactos diferenciales sobre los ecosistemas altoandinos, en línea con lo que indican Howe et al. (2022) respecto a la importancia de contar con sensores de alta resolución, como Sentinel-2, para caracterizar adecuadamente la intensidad espacial del fuego. Esta conexión enfatiza que, para futuras etapas del estudio, será necesario complementar la delimitación con métricas de severidad que permitan estimar de manera más precisa el impacto sobre los glaciares y su entorno inmediato.

#### Evaluación de severidad por teledetección de los incendios en los ecosistemas andinos

La evaluación de la severidad de los incendios en los ecosistemas andinos del área de estudio se realizó mediante teledetección, utilizando imágenes satelitales Landsat 8 Collection 2 Level 2 procesadas en la plataforma Google Earth Engine, en coherencia con la delimitación espacial previamente establecida para el área de estudio. A partir de esta delimitación se definieron dos ventanas temporales: un periodo preincendio, que representa las condiciones de la superficie antes del evento de fuego, y un periodo postincendio, que refleja los cambios espectrales posteriores asociados a la combustión de la vegetación y a la alteración del suelo. Esta estructura temporal permitió comparar de forma directa el estado de los ecosistemas altoandinos antes y después del incendio y constituyó la base para el cálculo de índices espectrales sensibles al daño causado por el fuego, cuya distribución espacial se sintetiza en la Figura 2.

En una primera fase, las escenas Landsat 8 seleccionadas para los periodos preincendio y postincendio se sometieron a un proceso de depuración y corrección orientado a garantizar la coherencia radiométrica y la eliminación de píxeles no válidos. Para ello se empleó la banda de calidad QA\_PIXEL, mediante la cual se enmascararon sistemáticamente nubes, sombras de nubes, nieve y otros artefactos que podrían distorsionar la señal espectral, de modo que se conservaran únicamente aquellos píxeles con condiciones atmosféricas adecuadas. De manera complementaria, las bandas de reflectancia de superficie fueron escaladas para obtener valores físicamente consistentes, asegurando que las diferencias observadas entre el periodo previo y el posterior al incendio respondan principalmente a cambios en la cubierta terrestre y no a variaciones instrumentales o atmosféricas. Este preprocesamiento resulta especialmente relevante en ecosistemas andinos, donde la presencia frecuente de nubosidad, nieve y fuertes contrastes topográficos puede afectar de forma significativa la calidad de la información satelital si no se aplica una depuración rigurosa.

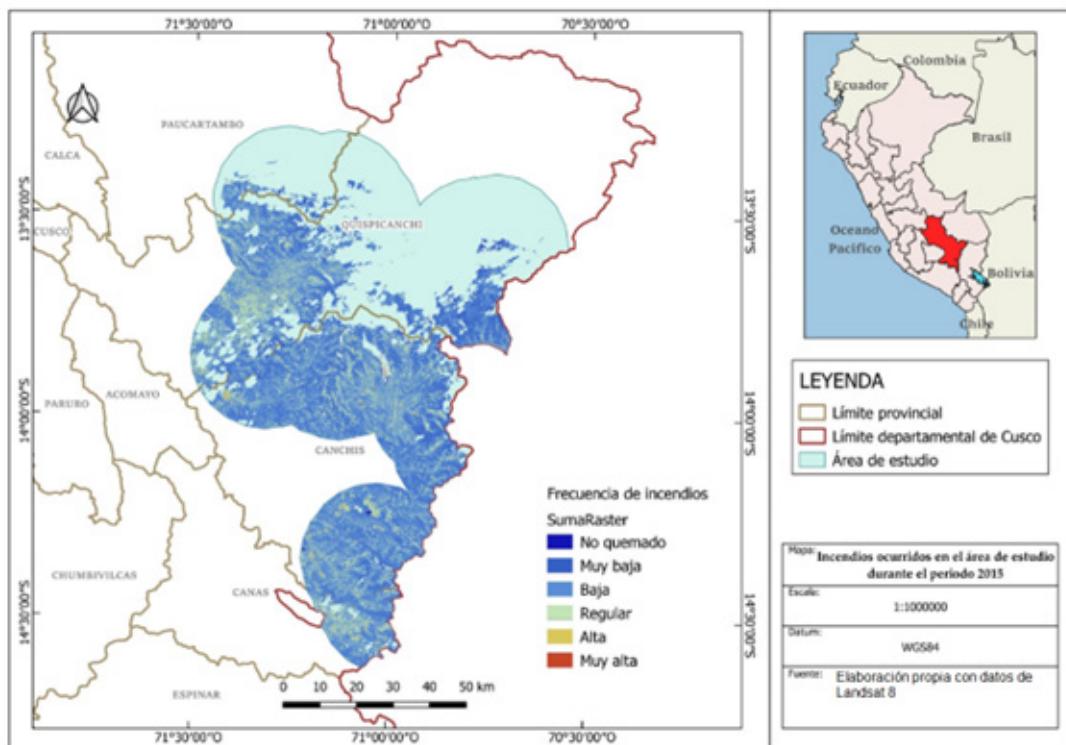
Considerando que el área de estudio se encuentra cubierta por dos órbitas contiguas del satélite (path/row 003/070 y 003/069), se procedió a la construcción de mosaicos multiórbita tanto para el periodo preincendio como para el postincendio. En cada caso se identificó, en primer lugar, la imagen con menor nubosidad correspondiente a la órbita principal y, en segundo término, se seleccionó una imagen de la órbita secundaria con fecha lo más cercana posible. Ambas escenas fueron combinadas en un mosaico continuo y recortadas al polígono del área de estudio, garantizando una cobertura espacial completa sin zonas vacías ni discontinuidades en los sectores limítrofes de las órbitas. Este procedimiento aseguró la consistencia temporal y espacial de los datos, condición indispensable para que la comparación de los índices espectrales refleje con precisión los efectos del fuego sobre los distintos tipos de cobertura presentes en los ecosistemas altoandinos.

Sobre los mosaicos preincendio y postincendio se calculó el índice NBR (Normalized Burn Ratio), que combina información del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta para resaltar las diferencias entre vegetación sana, vegetación dañada y superficies quemadas. A partir de estos valores se derivó el índice dNBR, definido como la diferencia entre el NBR previo y el NBR posterior al incendio, de modo que los valores positivos más altos indican una mayor pérdida de biomasa y, por tanto, una severidad superior del evento. Con el fin de facilitar la interpretación y mejorar la legibilidad de los resultados, el dNBR fue multiplicado por un factor de 1000, obteniéndose una escala numérica más manejable en la que los gradientes de severidad pueden distinguirse con mayor claridad, tanto en los análisis estadísticos como en las representaciones cartográficas. El índice dNBR continuo se clasificó posteriormente en categorías de severidad, distinguiéndose las clases de no quemado, baja severidad, severidad moderada-baja, severidad moderada-alta, alta severidad y severidad extrema. Esta clasificación permitió diferenciar desde áreas ligeramente afectadas hasta sectores donde la

alteración de la cobertura vegetal y del suelo fue profunda. En el proceso también se identificaron rangos de valores negativos asociados a posibles procesos de rebrote o incremento de vigor de la vegetación, aunque el foco principal del análisis se centró en las clases de severidad positivas vinculadas al impacto directo del incendio. El resultado de esta clasificación se materializó en un mapa de severidad que traduce el continuo espectral en unidades discretas fácilmente interpretables desde la perspectiva de la gestión del territorio.

A partir del mapa de dNBR clasificado se cuantificó la superficie afectada por cada categoría de severidad dentro del área de estudio, obteniendo tanto hectáreas absolutas como porcentajes relativos por clase. Este ejercicio permitió distinguir la proporción de ecosistemas andinos sometidos a daño leve frente a aquellos sometidos a daño moderado o intenso, así como estimar la extensión total del área quemada. Si bien los valores numéricos específicos se presentan en tablas complementarias, la visualización conjunta de las clases en la Figura 2 evidencia la coexistencia de parches de alta y muy alta severidad insertos en una matriz más amplia de severidad baja y moderada, lo que sugiere un patrón de incendio heterogéneo, con zonas de combustión completa alternando con sectores donde el fuego se comportó de manera más superficial. Este mosaico de severidades es característico de muchos incendios en paisajes andinos, donde la topografía, la carga de combustible y las prácticas locales de manejo influyen en la dinámica del fuego.

Figura 2: Severidad de los incendios forestales en los ecosistemas andinos del área de estudio



La metodología aplicada para evaluar la severidad de los incendios en los ecosistemas andinos del área de estudio, basada en imágenes Landsat 8 y la generación de períodos preincendio y postincendio, es coherente con las aproximaciones utilizadas en investigaciones recientes de regiones altoandinas. El uso de índices espectrales sensibles al daño, como NBR o dNBR, constituye un estándar de evaluación ampliamente validado en estudios latinoamericanos, como el de González et al. (2024), quienes demostraron la eficacia de estos índices para identificar gradientes de daño y estimar la recuperación de la vegetación mediante análisis multitemporal. La correspondencia entre la estructura temporal adoptada en este estudio y las estrategias aplicadas por González et al. permite afirmar que la delimitación pre/postincendio es adecuada para captar los cambios inducidos por el fuego en la puna y otros ecosistemas altoandinos, donde la fenología vegetal presenta marcadas variaciones estacionales que requieren ser controladas mediante ventanas temporales comparables.

El proceso de depuración radiométrica y la eliminación de nubes, sombras y nieve mediante la banda QA\_PIXEL fue un paso crítico para garantizar la calidad de los datos, especialmente considerando la elevada nubosidad y las condiciones atmosféricas variables en zonas de montaña. Este énfasis en el preprocesamiento concuerda con estudios nacionales como el de Añamuro et al. (2020), quienes también emplearon Landsat 8 para caracterizar incendios en pajonales andinos y enfatizaron la necesidad de eliminar artefactos atmosféricos para evitar sesgos en la interpretación de los índices espectrales. De forma similar, Zubieta et al. (2023) evidenciaron las limitaciones de los productos de focos de calor MODIS y VIIRS en áreas andinas, señalando

que su precisión depende fuertemente de la calidad radiométrica y de la visibilidad de la superficie. Ello subraya que la depuración sistemática empleada en este trabajo no solo es metodológicamente sólida, sino indispensable para evitar errores de comisión u omisión en la evaluación de la severidad del fuego.

La construcción de mosaicos multiórbita para completar la cobertura del área de estudio refuerza la robustez del enfoque aplicado, pues garantiza continuidad espacial en regiones donde la geometría orbital puede generar vacíos o solapamientos entre escenas contiguas. Este procedimiento cobra particular relevancia en paisajes montañosos irregulares, donde la variabilidad topográfica puede producir diferencias en la reflectancia si las imágenes no son seleccionadas con fechas próximas. La consistencia espacio-temporal lograda permite que los índices espectrales reflejen con mayor fidelidad los efectos reales del fuego sobre la cobertura vegetal, aspecto también resaltado en investigaciones como la de Aronés et al. (2024), quienes reportaron recurrencias de incendios en franjas altoandinas de Ayacucho y subrayaron que una caracterización espacial precisa es esencial para identificar patrones de severidad asociados a prácticas antrópicas, como la quema de rastrojos o el manejo ganadero tradicional.

#### Caracterización espacio-temporal de los incendios forestales en la gestión del riesgo

La caracterización espacio-temporal de los incendios forestales en el área de estudio se llevó a cabo a partir de la misma base de puntos de calor MODIS y VIIRS utilizada en la delimitación y en la evaluación de severidad, pero reorganizada con un enfoque explícito de recurrencia temporal y concentración espacial del fuego. A partir de la delimitación espacial del área de estudio se estructuró una serie interanual para el periodo 2015–2024, de modo que cada registro de punto de calor quedó asociado a su año de ocurrencia y a su localización dentro del polígono de análisis. Esta organización permitió construir indicadores de frecuencia de incendios en el tiempo y proyectarlos cartográficamente, generando un mapa sintético en el que se representan los sectores del territorio donde los incendios son esporádicos frente a aquellos en los que el fuego se repite reiteradamente, tal como se resume en la Figura 3.

En una primera etapa, la base de puntos de calor se agrupó por año y se generaron capas anuales de incendios para todo el periodo de estudio. A partir de estas capas se definió una malla de análisis sobre el área de estudio y se contabilizó, para cada celda, el número de años en los que se registró al menos un punto de calor. De esta manera se obtuvo un índice de recurrencia interanual que toma valores bajos en aquellas celdas donde el fuego se presenta en uno o pocos años, y valores altos en aquellas donde los incendios aparecen de forma casi constante a lo largo de la década. Este índice se reclasificó en rangos que permiten distinguir, de manera operativa, zonas de baja, media y alta recurrencia, lo que facilita la lectura del mapa y su posterior uso en procesos de planificación y gestión del riesgo.

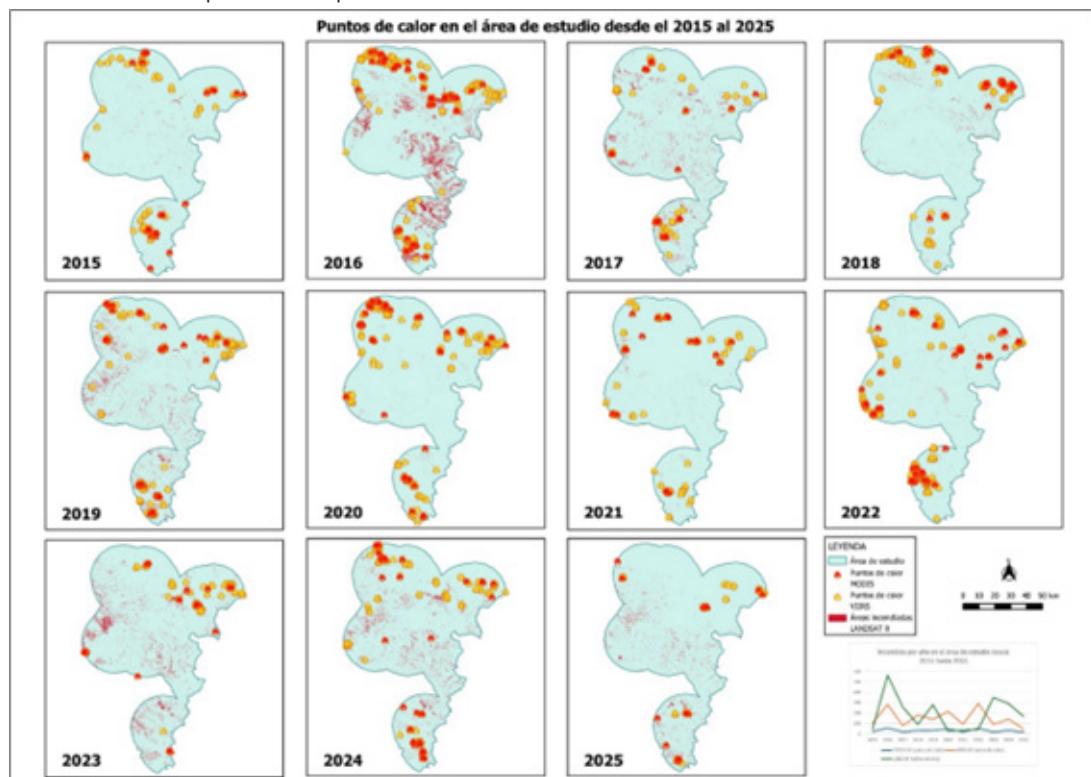
En una segunda etapa, la información de recurrencia temporal se integró con los resultados de severidad derivados del dNBR, de modo que cada celda de la malla pudiera caracterizarse no solo por la frecuencia de incendios, sino también por el nivel de daño asociado a los eventos registrados. La superposición de ambas dimensiones permitió identificar combinaciones críticas, como áreas con alta recurrencia y alta severidad potencial, que se interpretan como núcleos de riesgo particularmente relevantes desde la perspectiva de la gestión de desastres. De manera complementaria, se reconocieron sectores con alta recurrencia, pero severidad predominantemente baja, donde el fuego cumple un papel más recurrente pero menos destructivo, así como zonas con baja recurrencia y alta severidad, que corresponderían a eventos menos frecuentes, pero con impactos más intensos sobre la cobertura vegetal y el suelo.

El patrón resultante muestra que los incendios de alta recurrencia se concentran principalmente en corredores altoandinos del sur de Cusco, próximos a los piedemontes glaciares y a las áreas de transición hacia las zonas de pastos y matorrales. En estos corredores, el número de años con presencia de fuego es significativamente superior al de otras partes del territorio, lo que sugiere la existencia de prácticas recurrentes de quema vinculadas al manejo de la cobertura vegetal o a la preparación de terrenos para actividades agropecuarias. En contraste, hacia los extremos del área de estudio y en ciertos sectores de relieve más abrupto o con menor presencia de combustible, la recurrencia disminuye, configurando un gradiente espacial que distingue núcleos de incendios sistemáticos y zonas de ocurrencia más esporádica.

Desde la perspectiva de la gestión del riesgo, esta organización espacio-temporal del fuego permite diferenciar entre áreas donde los incendios pueden considerarse fenómenos más bien excepcionales y aquellas donde constituyen un componente estructural del paisaje y del uso del territorio. En los sectores de alta recurrencia y severidad moderada o alta, la probabilidad de afectación repetida de la cobertura vegetal y de los suelos es mayor, lo que incrementa el riesgo de procesos de degradación acumulativa, reducción de la capacidad de regulación hídrica y aumento de la susceptibilidad a la erosión. Estos espacios se perfilan, por tanto, como zonas prioritarias para intervenciones de prevención, vigilancia temprana y restauración ecológica, mientras

que en las áreas de menor recurrencia puede ser suficiente una estrategia de monitoreo y respuesta focalizada ante eventos puntuales.

Figura 3: Caracterización espacio-temporal de los incendios forestales en el área de estudio



La caracterización espacio-temporal de los incendios forestales realizada en este estudio, basada en el análisis interanual de puntos de calor MODIS y VIIRS, muestra patrones persistentes de recurrencia en sectores altoandinos de Cusco que coinciden con lo descrito por la literatura internacional en contextos de incendios recurrentes. La organización de los datos en una serie temporal 2015–2024 permitió distinguir claramente áreas donde el fuego es esporádico frente a zonas donde aparece casi cada año, configurando un régimen de fuego que es fundamental para la gestión del riesgo. Este enfoque metodológico se alinea con las recomendaciones planteadas por Howe et al. (2022), quienes subrayan la importancia de contar con información multitemporal y espacialmente detallada para comprender la complejidad del fuego y sus impactos. Aunque este estudio utilizó productos de focos de calor y no imágenes Sentinel de alta resolución, los patrones de recurrencia observados guardan coherencia con la necesidad de análisis de mayor detalle espacial en futuras investigaciones, especialmente en áreas donde la estructura del paisaje condiciona la propagación del fuego.

El cruce entre la recurrencia temporal y las métricas de severidad derivadas del dNBR permitió identificar zonas críticas donde incendios frecuentes coinciden con niveles relativamente altos de daño. Esta relación aporta evidencia valiosa para la gestión del riesgo, ya que permite distinguir sectores donde el fuego actúa como perturbación recurrente de baja severidad, posiblemente asociada a quemas controladas o prácticas ganaderas, frente a áreas donde eventos menos frecuentes generan impactos más intensos sobre la vegetación y el suelo. Estos resultados dialogan con los hallazgos de Roman et al. (2024), quienes documentaron que los incendios en pastizales andinos generan cambios fisicoquímicos inmediatos en el suelo, alteran la dinámica de nutrientes y afectan la tasa de regeneración vegetal, pudiendo tardar hasta cuatro años en recuperar la biomasa previa. La coincidencia entre zonas de alta recurrencia y áreas sensibles desde el punto de vista ecológico subraya la necesidad de considerar tanto los ciclos de regeneración como la capacidad de carga de los ecosistemas al diseñar estrategias locales de manejo del fuego.

El patrón espacial identificado también debe analizarse en el marco de los impactos ecológicos amplios de los incendios, los cuales van más allá de la pérdida vegetal directa e incluyen alteraciones de largo plazo en la estructura del ecosistema, erosión del suelo y emisiones significativas de carbono. El PNUMA (2022) advierte que los incendios repetitivos pueden convertir pastizales y bosques secundarios en fuentes netas de carbono, contribuyendo a ciclos de retroalimentación climática que exacerbán la sequedad y, por ende, la probabilidad de nuevos incendios. Jones et al. (2024) complementan esta perspectiva al identificar que los eventos extremos de fuego suelen estar asociados a condiciones meteorológicas anómalas y a paisajes que han acumulado combustible durante múltiples años. La presencia de corredores de alta recurrencia identificados en este

estudio concuerda con estas observaciones globales, sugiriendo que el área de estudio presenta un régimen de fuego fortalecido por factores biofísicos, climáticos y antrópicos que requieren una intervención preventiva sostenida.

## CONCLUSIONES

La delimitación del área de estudio, basada en la integración de registros satelitales MODIS y VIIRS, el inventario de glaciares y los límites administrativos, permitió identificar con precisión la zona del Cusco donde los incendios forestales presentan mayor recurrencia y evidenció una concentración significativa en corredores altoandinos cercanos a los glaciares. A partir de esta delimitación, la evaluación de la severidad entre 2015 y 2024 mediante imágenes Landsat 8 y el índice dNBR permitió reconocer patrones espaciales heterogéneos, con parches de alta intensidad dentro de una matriz predominantemente moderada. La caracterización espacial y temporal del fuego reveló tendencias claras en recurrencia, estacionalidad y distribución territorial, demostrando que la combinación de teledetección, plataformas interoperables y herramientas SIG constituye una base sólida para orientar acciones de prevención, monitoreo y gestión del riesgo en ecosistemas andinos altamente vulnerables.

## Referencias bibliográficas

- Añamuro, H., Larico, C., Ruiz, C., Monteza, O., & Quiñonez, J. (2020). Análisis de incendios forestales en pajonales andinos utilizando sistemas de información geográfica y teledetección, Macari – Puno. Deleted Journal, 8(2), 30–37. <https://doi.org/10.56636/ceprosimad.v8i2.96>
- Aronés, A., Badia, A., Nadal, J., & Bonnesoeur, V. (2024). Incendios forestales en ecosistemas de la puna húmeda en los Andes de Ayacucho, Perú. Investigaciones Regionales- Journal of Regional Research, 59, 127–147. <https://doi.org/10.38191/iirr-jorr.24.014>
- Boschetti, L., Roy, D. P., Giglio, L., Huang, H., Zubkova, M., & Humber, M. L. (2019). Global validation of the Collection 6 MODIS burned area product. *Remote Sensing of Environment*, 235, 111490. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111490> <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32440029/>
- Carrión, V., Correa, L., Malo, H., Ruáles, J., Tumbaco, A., Pisco, M., Panchi, N., Álvarez, L., Benítez, Á., & Loján, J. (2024). Exploring the ethnobiological practices of fire in three natural regions of Ecuador, through the integration of traditional knowledge and scientific approaches. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s13002-024-00699-4>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2021). Escenario de riesgo por incendios forestales de la región Cusco. SIGRID/CENEPRED. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/10472> sigrid.cenepred.gob.pe
- Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E., Roger, J.-C., Skakun, S. V., & Justice, C. (2018). The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*, 219, 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>
- Coaguila, L., Mataix-Solera, J. M., Nina, S., García-Carmona, M., & Salazar, E. T. (2025). Soil degradation evidence following a wildfire in Arequipa's Andean region, Peru. *Spanish Journal of Soil Science*, 15, 13983. <https://www.frontierspartnerships.org/journals/spanish-journal-of-soil-science/articles/10.3389/sjss.2025.13983> full Frontiers Publishing Partnerships
- CONIDA – Agencia Espacial del Perú. (2024). CONIDA refuerza monitoreo satelital ante incendios forestales. <https://andina.pe/agencia/noticia-conida-agencia-espacial-del-peru-refuerza-monitoreo-satelital-ante-incendios-forestales-1001441.aspx> Andina
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Humber, M. L., & Justice, C. O. (2018). The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*, 217, 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>
- González, F., Morante, F., González, A., Bravo, L., Benavidez, C., & Tedim, F. (2024). Assessment of Forest Fire Severity for a Management Conceptual Model: Case Study in Vilcabamba, Ecuador. *Forests*, 15(12), 2210–2210. <https://doi.org/10.3390/f15122210>
- Howe, A., Parks, S., Harvey, B., Saberi, S., Lutz, J., & Yocom, L. (2022). Comparing Sentinel-2 and Landsat 8 for Burn Severity Mapping in Western North America. *Remote Sensing*, 14(20), 5249. <https://doi.org/10.3390/rs14205249>
- Infobae Perú. (2024, 16 de septiembre). Perú en llamas: mapas de actividad y focos de calor; regiones afectadas. <https://www.infobae.com/peru/2024/09/15/peru-en-llamas-mira-los-mapas-de-actividad-de-incendios->

- forestales-y-los-10-mil-de-focos-de-calor-por-region/ infobae
- IPCC. (2023). AR6 Synthesis Report—Full Volume. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_FullVolume.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf)
- Keeley, J. E., & Pausas, J. G. (2022). Evolutionary ecology of fire. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 53, 203–226. <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-ecolsys-102320-095612>
- Maxwald, M., Immitzer, M., Rauch, H. P., & Preti, F. (2022). Analyzing Fire Severity and Post-Fire Vegetation Recovery in the Temperate Andes Using Earth Observation Data. *Fire*, 5(6), 211. <https://doi.org/10.3390/fire5060211>
- Miranda, A., Mentler, R., Moletto-Lobos, I., Alfaro, G., Aliaga, L., Balbontín, D., Barraza, M., Baumbach, S., Calderón, P., Cárdenas, F., Castillo, I., Contreras, G., de la Barra, F., Galleguillos, M., González, M. E., Hormazábal, C., Lara, A., Mancilla, I., Muñoz, F., & Oyarce, C. (2022). The Landscape Fire Scars Database: mapping historical burned area and fire severity in Chile. *Earth System Science Data*, 14(8), 3599–3613. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3599-2022>
- Prudencio, F., Yerson Ccanchi, Saavedra, M., Zubieta, R., Sulca, J., Reupo, J., & Alarco, G. (2021). Potential conditions for fire occurrence in vegetation in the Peruvian Andes. *International Journal of Wildland Fire*, 30(11), 836–849. <https://doi.org/10.1071/wf21029>
- Roman, M., Zubieta, R., Yerson Ccanchi, Martínez, A., Paucar, Y., Alvarez, S., Loayza, J., & Ayala, F. (2024). Seasonal Effects of Wildfires on the Physical and Chemical Properties of Soil in Andean Grassland Ecosystems in Cusco, Peru: Pending Challenges. *Fire*, 7(7), 259–259. <https://doi.org/10.3390/fire7070259>
- USGS. (2024). Landsat Collection 2—Surface Reflectance & Surface Temperature (Level-2). U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2>
- Zubieta, R., Ccanchi, Y., & Liza, R. (2023). Performance of heat spots obtained from satellite datasets to represent burned areas in Andean ecosystems of Cusco, Peru. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, 32, 101020–101020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101020>
- Declaración de conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.
- Declaración de contribución de los autores/as utilizando la Taxonomía CRediT:**
- Lizbeth Carol Cruz Ledesma y Fray Masias Cruz- Reyes: investigación, redacción y metodología.
- Declaración de aprobación por el Comité de Ética:** Los autores declaran que la investigación fue aprobada por el Comité de Ética de la institución responsable, en tanto la misma implicó a seres humanos
- Declaración de originalidad del manuscrito:** Los autores confirman que este texto no ha sido publicado con anterioridad, ni ha sido enviado a otra revista para su publicación.