

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
AMBIENTAL



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN

“EVALUACIÓN DE LA SEVERIDAD Y RECUPERACIÓN
VEGETAL POSTINCENDIO UTILIZANDO IMÁGENES DE
SATÉLITE EN LA REGIÓN CAJAMARCA”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
FORESTAL Y AMBIENTAL

AUTOR:

- **Bach. Jefferson Anthony Cubas Sanchez**

ASESORA:

- **Mg. Candy Lisbeth Ocaña Zúñiga**

LINEA DE INVESTIGACIÓN:

- **Mitigación del cambio climático**

JAÉN – PERÚ, SETIEMBRE, 2023

NOMBRE DEL TRABAJO

**Informe final de tesis_Jefferson Anthony
Cubas Sánchez.pdf**

RECuento DE PALABRAS

9538 Words

RECuento DE CARACTERES

53178 Characters

RECuento DE PÁGINAS

56 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

5.3MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 18, 2023 10:09 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 18, 2023 10:10 AM GMT-5

● **7% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 3% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 15 palabras)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Dr. Christiana Eloya Apaza Pancha
RESPONSABLE DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ley de Creación N° 29304

Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo N° 002-2018-SUNEDU/CD

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 22 de Setiembre del año 2023, siendo las 10:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente : Dr. Juan Manuel Caceres Roman
Secretario : M.Sc. Guo F. Maudragon Aguirre
Vocal : Dr. Segundo Sanchez Tello, para evaluar la Sustentación del Informe Final.

- () Trabajo de Investigación
(X) Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: Evolución de la prevención y recuperación vegetal post-incendio utilizando imágenes de satélites en la región Cajamarca



Presentado por estudiante/egresado o Bachiller Jefferson Anthony Cuba Sanchez de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

- (X) Aprobar () Desaprobar (X) Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

- a) Excelente 18, 19, 20 ()
b) Muy bueno 16, 17 ()
c) Bueno 14, 15 (15)
d) Regular 13 ()
e) Desaprobado 12 ó menos ()

Siendo las 11:00 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Handwritten signatures for Presidente, Secretario, and Vocal.

ÍNDICE

RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
I. INTRODUCCIÓN	10
II. MATERIAL Y MÉTODOS	12
2.1. Objeto de estudio	12
2.2. Ubicación del área de estudio	12
2.3. Materiales y equipos	14
2.4. Población	15
2.5. Muestra	15
2.6. Muestreo	15
2.7. Métodos	15
III. RESULTADOS	26
3.1. Identificación de las áreas afectadas por los incendios forestales en la región Cajamarca.	26
3.2. Determinación del nivel de severidad en incendios forestales.	28
3.3. Verificación de los indicadores de regeneración natural postincendio forestal	32
3.4. Mapa de severidad de área quemada para las zonas de estudio	36
IV. DISCUSIÓN	39
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
DEDICATORIA	48
ANEXOS	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales, instrumentos y equipos utilizados en la investigación.	14
Tabla 2. Focos de calor Modis y Viirs descargados del geoservidor FIRMS.	18
Tabla 3. Clasificación de la severidad.	21
Tabla 4. Reclasificación de la severidad.	22
Tabla 5. Fechas de descarga de las imágenes Sentinel 2 empleadas para cada incendio.	24
Tabla 6. Clasificación NDVI según tipo de vegetación.	24
Tabla 7. Niveles de severidad por incendio.	28
Tabla 8. Comparación del incendio Huasmín entre valores NDVI, de octubre 2020 (durante), diciembre 2020 (post 1) y mayo 2021 (post 2).	33
Tabla 9. Comparación del incendio San Felipe entre valores NDVI, de noviembre 2020 (durante), febrero 2021 (post 1) y mayo 2021 (post 2).	35
Tabla 10. Valores estadísticos del NDVI para las áreas de estudio en diferentes tiempos.	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.	13
Figura 2. Flujograma del proceso de identificación de incendios y determinación del nivel de severidad.....	16
Figura 3. Selección de conglomerados según criterios empleados.	27
Figura 4. Porcentaje de severidad de los 8 incendios evaluados.	29
Figura 5. Mapa de nivel de severidad de los incendios forestales en estudio.	30
Figura 6. Índice NBR pre incendio y post incendio; índice dNBR severidad durante el incendio.	31
Figura 7. Calidad de vegetación en el incendio Huasmín para los tiempos durante, post 1 y post 2.....	32
Figura 8. Calidad de vegetación en el incendio San Felipe para los tiempos durante, post 1 y post 2.	34
Figura 9. Mapa de severidad del incendio Huasmín.	37
Figura 10. Mapa de severidad del incendio San Felipe.....	38

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Capacitación del equipo investigador.	49
Anexo 2. Reunión del equipo investigador con representantes del SERFOR.	49
Anexo 3. Recopilación y procesamiento de datos cartográficos.	50
Anexo 4. Identificación de incendio a través de la ortofoto.	50
Anexo 5. Ejecución del script en el GEE para la descarga de imágenes sentinel 2.	51
Anexo 6. Aplicación de simbología y clasificación de los valores dNBR.	51
Anexo 7. Utilización del plugin área quemada para expresar el nivel de severidad según clasificación.	52
Anexo 8. Fotografía postincendio San Felipe.	52
Anexo 9. Fotografía postincendio Huasmín.	53
Anexo 10. Fotografía postincendio Pucará.	53
Anexo 11. Fotografía postincendio San Juan.	54
Anexo 12. Fotografía postincendio Jesús.	54
Anexo 13. Fotografía postincendio Miracosta.	55
Anexo 14. Fotografía postincendio Pomahuaca.	55
Anexo 15. Fotografía postincendio Querocotillo.	56
Anexo 16. Equipo investigador verificando los incendios in situ.	56
Anexo 17. Recolección de datos según nivel de severidad del incendio.	57
Anexo 18. Identificación de vegetación quemada.	57

RESUMEN

Evaluar la severidad del fuego después de incendios forestales permite identificar cambios que comprometen la capacidad natural del recrecimiento de la vegetación y planificar de mejor manera la gestión postincendio. En este trabajo se evaluó la severidad y recuperación vegetal postincendio utilizando imágenes satelitales de la región Cajamarca. Mediante el uso de focos de calor descargados de FIRMS se obtuvo conglomerados que cumplieran criterios: superficie >100 hectáreas, intensidad calórica >100 FRP y presencia de arbolado. Posteriormente, se descargó imágenes para los índices dNBR y NDVI, se determinó niveles de severidad extrema, alta, media y baja para el dNBR, y valores NDVI para los tiempos: durante, post 1 y post 2. Los resultados muestran variados niveles de severidad en el territorio evaluado: 27.2% baja, 27.6% media, 9.9% alta y 1.5% extrema, señalando una prevalencia de severidad media a baja. Durante los incendios Huasmín y San Felipe, los niveles NDVI fueron similares (0.34 y 0.38); sin embargo, tras seis meses, aumentaron (0.57 y 0.71) mostrando una mejora considerable de la vegetación. Esto resalta al dNBR y NDVI como indicadores que demuestran el impacto y el recrecimiento de la vegetación, tras el suceso de un incendio forestal.

Palabras clave: Focos de calor, Conglomerados, Sentinel 2, dNBR y NDVI.

ABSTRACT

Evaluating fire severity after forest fires allows to identify changes that compromise the natural regrowth capacity of vegetation and to better plan post-fire management. In this work, the severity and post-fire vegetation recovery was evaluated using satellite images of the Cajamarca region. Using hot spots downloaded from FIRMS, clusters were obtained that met the following criteria: area >100 hectares, heat intensity >100 FRP and presence of trees. Subsequently, images were downloaded for the dNBR and NDVI indices, extreme, high, medium and low severity levels were determined for the dNBR, and NDVI values for the times: during, post 1 and post 2. The results show varied severity levels in the evaluated territory: 27.2% low, 27.6% medium, 9.9% high and 1.5% extreme, indicating a prevalence of medium to low severity. During the Huasmin and San Felipe fires, NDVI levels were similar (0.34 and 0.38); however, after six months, they increased (0.57 and 0.71) showing a considerable improvement of the vegetation. This highlights dNBR and NDVI as indicators that demonstrate the impact and regrowth of vegetation after a forest fire event.

Key words: Hot spots, Clusters, Sentinel 2, dNBR and NDVI.

I. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales ocurren debido a la existencia de una fuente de fuego, que puede ser originada tanto de manera natural como provocada por acciones humanas, y constituyen una importante razón detrás del deterioro del medio ambiente. Distintos elementos ambientales, como las características de la vegetación, las condiciones climáticas y la topografía del terreno son considerados por Dentoni y Muñoz (2012) como condicionantes para la propagación del fuego. No obstante, los incendios están relacionados principalmente a las actividades antrópicas como; agricultura, ganadería y el desarrollo urbano (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2010).

Para Caraveo (2013), los incendios representan uno de los principales peligros que los bosques enfrentan, ya que aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero y causan daños a las funciones y capacidades de los ecosistemas, generando alteraciones en la vegetación circundante. Sin embargo, la intensidad con la que el fuego se manifiesta durante un incendio forestal puede variar, lo que conlleva a que el impacto en el ecosistema sea diverso, mostrando distintos niveles de severidad de daño (Botella y Fernández, 2017).

El nivel de severidad es un concepto descriptivo que engloba las alteraciones físicas, químicas y biológicas que experimenta un ecosistema como consecuencia de la acción del fuego (White et al., 1996). Así mismo, una severidad elevada se relaciona con una baja capacidad de recuperación de la vegetación y con factores que contribuyen a su deterioro y a cambios en su estado natural (Flores et al., 2021). En general, la severidad del fuego guarda relación directa con los procesos de regeneración de la vegetación que ocurren después del incendio, dado que, cuanto más intenso sea el fuego, más prolongado será el período de recuperación de la vegetación (Caraveo, 2013).

Los procesos de recuperación vegetal después de un incendio pueden variar significativamente en distintos lugares y momentos, lo que hace difícil establecer patrones o modelos (Naveh, 1990). Se podría decir que la capacidad de regeneración vegetal es uno de los indicadores más significativos para evaluar la recuperación de los ecosistemas afectados por incendios. Este

proceso de recuperación está fuertemente influenciado por las características del suelo y el tipo de clima presente en la zona (Caraveo, 2013).

Una de las técnicas más utilizadas para predecir el recrecimiento de la vegetación y monitorear la severidad de los incendios es la teledetección. Esta técnica ofrece información espectral sensible que permite diferenciar claramente las áreas afectadas por el fuego de otras áreas con cobertura vegetal (Chuvieco, 2001). Combinar la teledetección con Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha proporcionado datos cruciales para un mayor entendimiento del comportamiento de la vegetación y su recuperación después de un incendio. Además, las técnicas de teledetección han facilitado el estudio de los procesos de regeneración vegetal tras los efectos del fuego, empleando información espectral de la vegetación (Díaz y Pons, 2001).

La evaluación de la severidad y recuperación de la vegetación mediante teledetección es de vital importancia, ya que proporciona una cartografía esencial para la planificación de acciones posteriores al incendio. Estas medidas incluyen la posibilidad de repoblaciones, seguimiento y monitoreo del proceso de regeneración de la vegetación, así como la protección del suelo contra potenciales erosiones, entre otras acciones.

Debido a la escasez de estudios en Perú que evalúen la severidad del fuego y la regeneración de la vegetación después de incendios, esta investigación busca a través de la teledetección describir la severidad del fuego en varias áreas afectadas en la región Cajamarca. Además, pretende contribuir al restablecimiento y mejora de las zonas dañadas por los incendios, al tiempo que evalúa el comportamiento de los incendios en esta parte del territorio peruano. Los objetivos fueron:

- Identificar las áreas afectadas por incendios forestales en la región Cajamarca.
- Determinar el nivel de severidad en incendios forestales.
- Verificar indicadores de regeneración natural postincendio forestal.
- Elaborar el mapa de severidad de área quemada para la zona de estudio.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Objeto de estudio

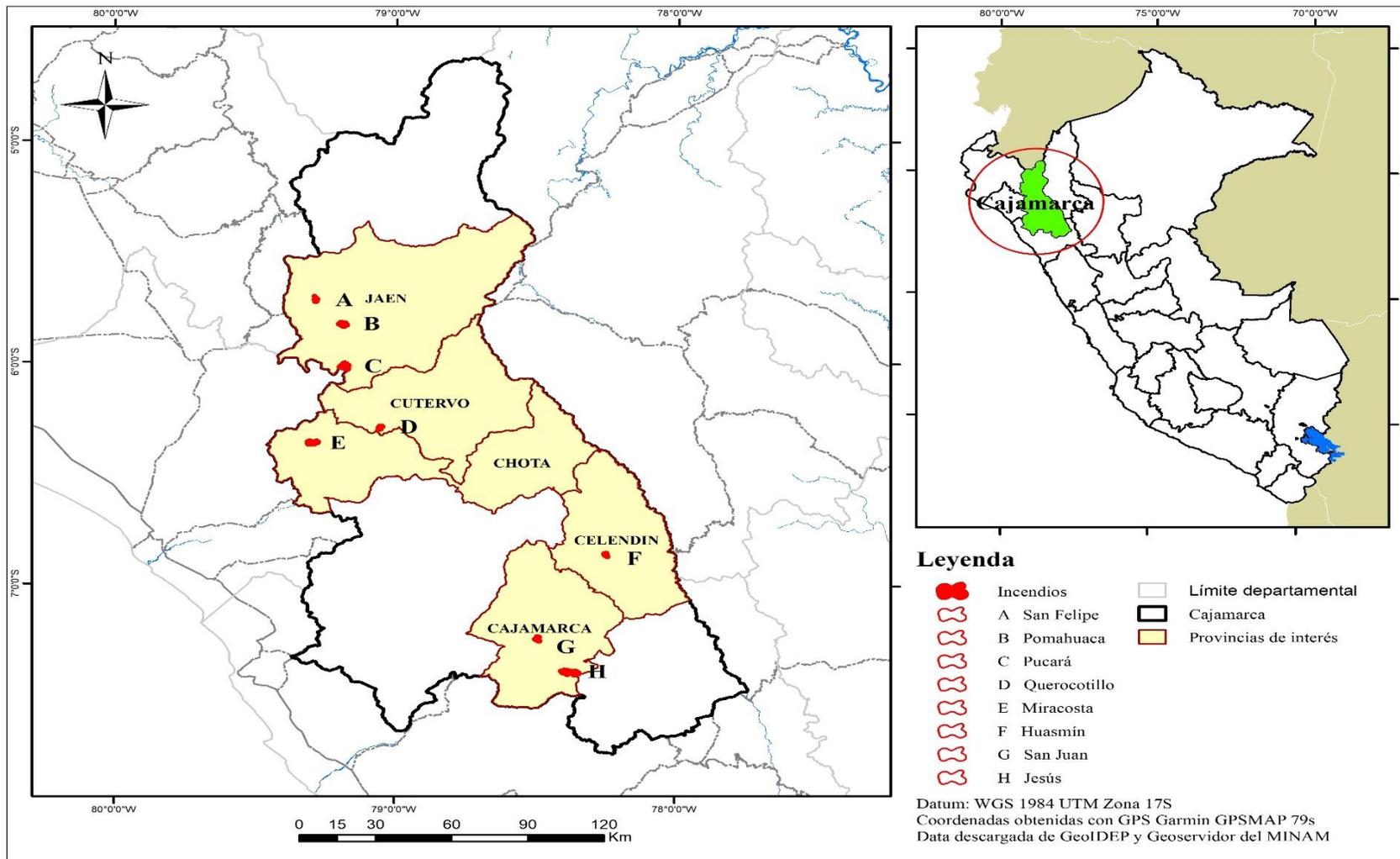
Este estudio, evaluó la severidad de los incendios identificados en la región Cajamarca, cartografiados de forma precisa utilizando imágenes de satélite Sentinel 2, a través de la comparación de los valores de clasificación de severidad obtenidos con el índice dNBR. Además, se verificó indicadores de recuperación vegetal postincendio utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para conocer el comportamiento de la vegetación con el paso del tiempo en las áreas afectadas con diferente severidad de fuego.

2.2. Ubicación del área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el departamento de Cajamarca, ubicado en la parte septentrional del territorio peruano. Específicamente, se enfocó en las provincias de Jaén, Cutervo, Chota, Celendín y Cajamarca. El departamento limita al norte con la República de Ecuador, al este con el departamento de Amazonas, al sur con el departamento de La Libertad y al oeste con los departamentos de Piura y Lambayeque. Su área abarca 33 317.54 km², albergando aproximadamente 1 341 012 habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2017). Cajamarca tiene un clima variado, teniendo una temperatura promedio anual es de 14.7°C, con variaciones desde 8°C hasta 24.7°C, con una humedad relativa promedio de 72%, y con precipitaciones que varían de 380 a 1200 mm por año. Además, Cajamarca presenta un relieve muy accidentado debido a que su territorio es atravesado por la cordillera de los andes (Dirección General Parlamentaria, 2019).

Figura 1

Localización del área de estudio.



2.3. Materiales y equipos

Tabla 1

Materiales, instrumentos y equipos utilizados en la investigación.

Actividades	Materiales, instrumentos y equipos
Anotación de datos	Lapiceros
	Laptop (HP Intel(R) Core (TM) i5-7200U, RAM 8GB, sistema operativo Windows 10)
	Papel bond A4 80 gr
	Lápices
	Memoria USB de 32 GB
	Libreta de notas
	Tablero
Registro de información del sitio	GPS (GARMIN MAP 64S)
	Pilas AAA
	Cámara fotográfica (Nikon COOLPIX P1000)
	Impresora láser electrofotográfica MFC L8900CDW, Brother
Material cartográfico	Base de datos FIRMS de la Nasa (https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov)
	Base de GeoIDEP (https://www.geoidep.gob.pe/servicios-idep/geoportales)
	Geoservidor MINAM (geoservidor.minam.gob.pe)
	Imágenes Satelitales Sentinel 2
Software	Microsoft Windows 10
	Microsoft office 2019
	QGis 3.16.11
	ArcGis 10.8
	R versión 3.3.0 y RStudio 4.3.1
Colección de datos y procesamiento de muestras	Establecimiento de umbrales para índices satelitales.
	Mapeo de la severidad a partir del índice dNBR.
	Determinación de índices de verdor de la vegetación NDVI.

2.4.Población

La población estuvo constituida por 32 incendios forestales ocurridos durante los años 2020 y 2021 en el ámbito territorial de la región Cajamarca.

2.5.Muestra

Conformada por los incendios forestales localizados en San Felipe y Huasmín con superficie de 171 ha y 190 ha respectivamente e intensidad calórica mayor a 100 Frecuencia Radiativa del Fuego (FRP).

2.6.Muestreo

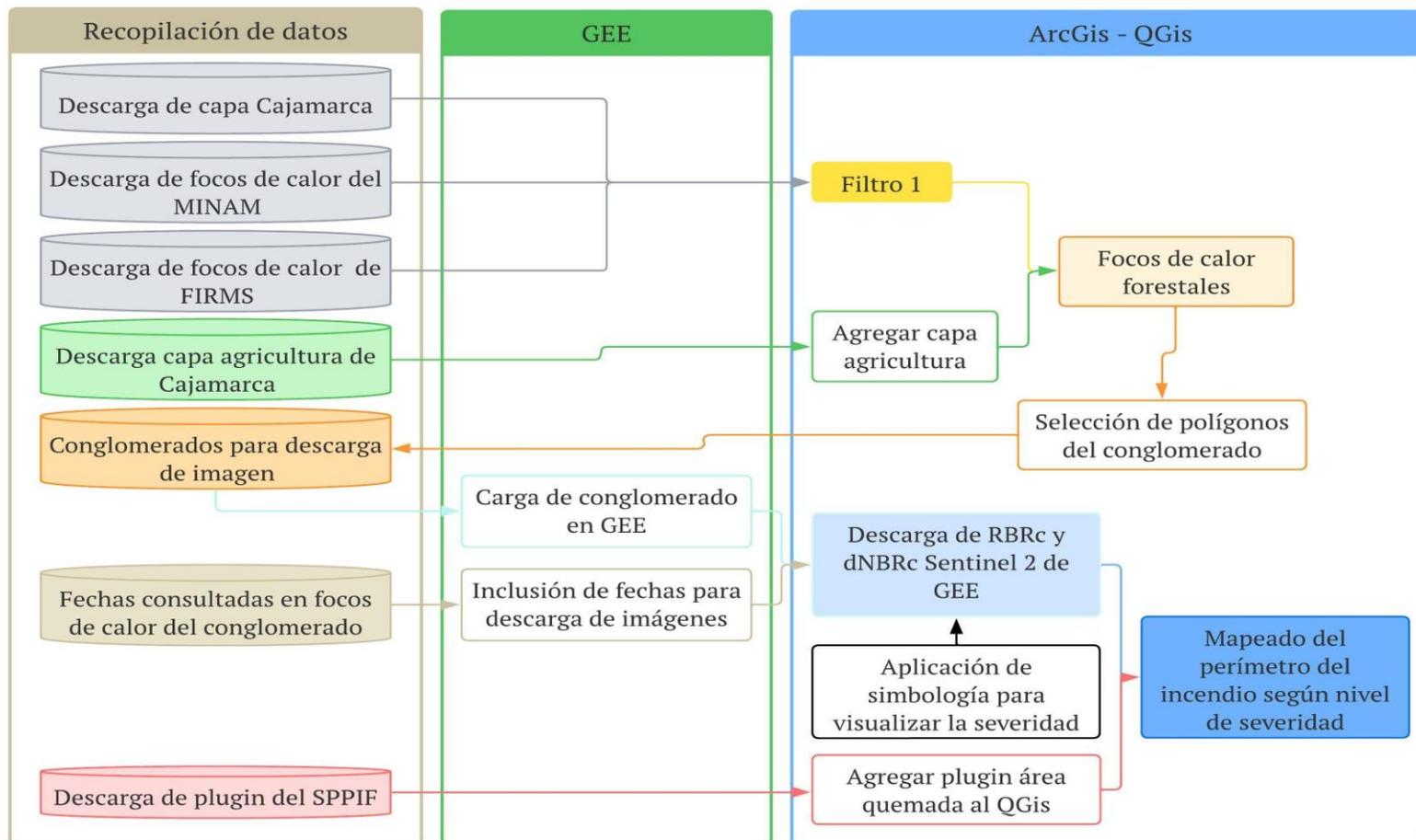
De los 32 incendios localizados en el departamento de Cajamarca se seleccionaron 8 con mayor extensión. Cada uno de los 8 incendios seleccionados fueron visitados *in situ*, verificando criterios como: presencia de arbolado, accesibilidad (topografía y cuestiones sociales) e indicios del paso del fuego. Por último, se seleccionaron por conveniencia dos incendios con mayor superficie forestal y rastros de incendio (soflamado de copa, regeneración de la vegetación, rebrote y cenizas)

2.7.Métodos

Para evaluar la severidad y la recuperación vegetal postincendio en la región Cajamarca, se realizó procedimientos de descarga de focos de calor (FC) y elaboración de conglomerados de focos de calor (CFC) a partir de los cuales se identificaron incendios con criterios de tamaño e intensidad calórica. Luego se descargó imágenes Sentinel 2 y se trabajó con la simbología de severidad (baja, media, alta y extrema) para los índices Diferencia Normalizada de Relación de Quemado (dNBR) y Relación de Quemado Normalizada (RBR) (Figura 2), mientras que para evaluar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se clasificó según umbral de rango que va de -1 a 1 (Tabla 6) para los tiempos durante, post 1 y post 2.

Figura 2

Flujograma del proceso de identificación de incendios y determinación del nivel de severidad.



2.7.1. Recopilación de información cartográfica

El proceso se realizó bajo el siguiente esquema:

- a. Se obtuvo la capa del departamento Cajamarca en formato shape del Geoportal del Instituto Geográfico Nacional (GeoIDEP) <https://www.geoidep.gob.pe/servicios-idep/geoportales> (esta plataforma contiene información geográfica relevante, concertada y oficial del territorio nacional). Esta capa permitió seleccionar solo información del área de estudio.
- b. Se utilizó información de focos de calor del Perú para los años 2020 y 2021 descargados de la plataforma de Información sobre Incendios para el Sistema de Gestión de Recursos (FIRMS) <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/create.php> (una plataforma que detecta incendios activos y proporciona su ubicación casi en tiempo real). Esta información sirvió de base en el proceso de selección de incendios forestales ocurridos en la región Cajamarca.
- c. Del geoservidor del Ministerio de Ambiente (GeoMINAM) <https://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/> se obtuvo focos de calor mensuales de incendios forestales suscitados en la región Cajamarca. Estos, permitieron crear un área forestal discriminada de las zonas urbanas, cuerpos de agua y agricultura.
- d. Se empleó el Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México (SPPIF) <http://forestales.ujed.mx/incendios2/#> para la descarga del Plugin de Área Quemada para mapeo del perímetro del incendio a partir de imágenes de Satélite Sentinel 2 compatible con QGis 3.16.11 Se utilizó esta plataforma puesto que, en América Latina, México es el país que cuenta con mayor desarrollo en cuanto a herramientas de apoyo a la toma de decisiones para el manejo de incendios forestales.

2.7.2. Identificación de las áreas afectadas por incendios forestales

a. Selección de focos de calor dentro de áreas forestales

La tabla 2 muestra los focos de calor Modis y Viirs para los años 2020 y 2021, que fueron intersecados con el polígono de la región Cajamarca y los focos de calor forestales del MINAM, para obtener la capa del filtro 1 caracterizada por contener focos de calor forestales según el MINAM.

Tabla 2

Focos de calor Modis y Viirs descargados del geoservidor FIRMS.

Id	Instrumento	Año
fire_nrt_M-C61_199225	Modis	2021
fire_archive_M-C61_199225	Modis	2020
fire_nrt_J1V-C2_199226	Viirs	2020
fire_nrt_V1_199227	Viirs	2021
fire_archive_V1_199227	Viirs	2020

Se realizó un segundo filtro utilizando la capa de agricultura de la región Cajamarca y la capa obtenida del filtro 1, que fueron intersecados para obtener focos de calor de áreas agrícolas. Luego, se realizó una diferencia entre la capa del filtro 1 con la capa de focos agrícolas, de modo que se obtuvo la capa del filtro 2 correspondiente a focos de calor forestales de la región Cajamarca.

Posteriormente la capa del filtro 2 fue reproyectada al sistema de coordenadas WGS_1984_UTM_Zone_17S, ya que los procesos posteriores requieren de un sistema de coordenadas en metros.

b. Selección de los polígonos del conglomerado de focos de calor (CFC)

En este proceso se utilizó el shape del filtro 2, al que se le aplicó criterios de tamaño e intensidad calórica para obtener la capa de conglomerados de focos de calor forestales intensos y de gran tamaño.

- **Tamaño.** Este criterio permitió agrupar los focos de calor y estimar los perímetros de los incendios forestales mayores a 100 ha ocurridos en la región.
- **Intensidad calórica.** Este criterio permitió seleccionar focos de calor con Potencia Radiativa del Fuego (FRP) normalizado en MW/km². Se empleó la fórmula:

$$FRP(n) = FRP / (SCAN * TRACK) \quad \text{Ec.1.}$$

Donde:

FRP(n) = Frecuencia Radiativa del Fuego normalizado (MW/km²).

FRP = Frecuencia Radiativa del Fuego (MW/pixel).

SCAN = técnica de escaneo perpendicular del satélite en km.

TRACK = trayectoria orbital de muestreo del satélite en km.

Se utilizó la herramienta *Kernel Density* con un radio de búsqueda de 1500 m para el sensor Viirs, con la finalidad de obtener valores más altos de la intensidad calórica según el tamaño de los incendios. De esta manera, se seleccionaron solo aquellos incendios mayores a 100 FRP.

Como proceso final para la obtención de los polígonos del conglomerado de focos de calor (CFC) se realizó una selección por localización para las capas de incendios mayores a 100 ha y los polígonos con FRP mayor o igual a 100.

2.7.3. Determinación del nivel de severidad en incendios forestales

2.7.3.1. Selección de conglomerados a descargar y consulta de fechas.

- Los incendios mayores a 100 ha y con intensidad calórica mayor a 100 FRP fueron sometidos a un proceso de selección empleando criterios de inclusión y exclusión.
- Las fechas pre y post del incendio fueron consultadas en los focos de calor forestales para identificar el primer y último registro observados dentro del conglomerado.
- Para la búsqueda de imágenes se tuvo en consideración un día antes a la fecha de inicio y un día después a la fecha final del incendio (Briones et al., 2021).

2.7.3.2. Procesos en Google Earth Engine (GEE)

a. Carga del conglomerado en GEE.

Para la carga del conglomerado al GEE se empleó las extensiones (cpg, dbf, prj, shp y shx) y excluyó el archivo qmd. Luego se importó el conglomerado cargado al código script donde fue expresado como una geometría para identificar el área de descarga de imágenes.

b. Inclusión de fechas para descarga de imágenes.

Se reemplazó en el código script las fechas de inicio y fin para los momentos pre incendio y post incendio. La fecha de búsqueda se realizó con una ventana de tiempo de un mes antes de la fecha inicio del incendio y un mes después de la fecha fin del incendio.

c. Descarga de índices RBR y dNBR.

Los índices RBR y dNBR representan la severidad del incendio con corrección fenológica. Para su descarga primeramente se creó una cuenta en Google Drive, donde se habilitó una carpeta con el nombre incendios. Se corrió el código de GEE, se visualizó los archivos creados y se realizó la descarga directamente a la carpeta incendios de Google drive.

2.7.3.3. Aplicación de simbología

Se cargó los índices RBR y dNBR al ArcGis 10.8 y posteriormente se clasificó según la simbología modificada para la zona de estudio con base en los archivos disponibles de la sección área quemada del SPPIF. La rampa de color de la simbología establece colores: amarillo, que representa daño bajo; naranja, daño medio; rojo, daño alto; y negro, daño extremo (Briones et al., 2021).

2.7.3.4. Reclasificación y verificación de la severidad

La clasificación de la severidad estuvo sujeta a los valores dNBR establecidos por Key y Benson (2006) (Tabla 3).

Tabla 3

Clasificación de la severidad.

Severidad	Valores de clasificación
Sin quemar	< 99
Baja	100 - 269
Media	270 - 439
Alta	440 - 659
Extrema	> 660

Nota. Key y Benson (2006).

Sin embargo, se realizó un ajuste a los valores dNBR puesto que para el área de estudio las zonas sin quemar presentan valores de clasificación menores a 67, y las zonas con severidad extrema mantienen valores por encima de los 590 (Tabla 4).

Tabla 4

Reclasificación de la severidad.

Severidad	Valores de clasificación
Sin quemar	< 67
Baja	67 - 197
Media	197 - 394
Alta	394 - 590
Extrema	> 590

Una vez reclasificado los valores dNBR se verificó a través de la ortofoto las zonas donde la intensidad del fuego afectó al ecosistema para luego verificar *in situ* la severidad sobre el componente vegetal.

2.7.3.5.Fase de campo

a. Organización del trabajo

En esta etapa se planificó e identificó los factores limitantes de acceso y seguridad personal, de acuerdo al área de trabajo. Algunas de las limitantes identificadas fueron las siguientes:

- Accesibilidad (disponibilidad de caminos, topografía del área y cuestiones sociales).
- Condiciones meteorológicas (temperatura y precipitaciones).

Para poder acceder a las áreas de incendios identificados, se dio conocimiento a las autoridades del lugar donde se suscitó el incendio a cerca del trabajo que se iba a realizar, los días y personas encargadas de la investigación.

b. Verificación del daño en campo

La detección de incendios mediante imágenes satelitales permitió una pronta intervención en las áreas afectadas, verificar y realizar un análisis expedito de las extensas zonas de manera objetiva, económica y homogénea. Esto facilitó la caracterización general rápida del área incendiada, incluyendo el cálculo del riesgo y la previsión de los efectos adversos postincendio. Además, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de la magnitud y dirección del fuego para obtener una comprensión general de su impacto.

Se realizó visitas de campo a los ocho incendios seleccionados en fase de gabinete con finalidad de constatar *in situ* la ocurrencia e identificar las zonas afectadas para clasificarlas según nivel de daño. Estas áreas de interés se sometieron a una comparación con el mapa de severidad previamente establecido.

2.7.4. Verificación de indicadores de regeneración natural postincendio forestal.

Para evaluar la recuperación vegetal se elaboró un código script en la plataforma de GEE utilizando la fórmula NDVI establecida por Rouse et al. (1973) (Ec. 2), y posterior descarga de imágenes Sentinel 2 para los tiempos durante el incendio, postincendio 1 y postincendio 2 (Tabla 5). La selección de fechas postincendio mantuvo como referencia 2 meses y 6 meses después de ocurrido el incendio, debido a la presencia de nubosidad en el área de estudio se buscaron imágenes limpias cercanas a las fechas de referencia.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en una escala de -1 a 1.

NIR = luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano.

RED = luz reflejada en el rango rojo del espectro.

Tabla 5*Fechas de descarga de las imágenes Sentinel 2 empleadas para cada incendio.*

Incendio	Ocurrencia del incendio	Ventana Durante- incendio	Ventana post- incendio 1	Ventana post- incendio 2
San Felipe	01/11/2020 - 02/11/2020	01/11/2020- 10/11/2020	16/02/2021 - 16/04/2021	22/05/2021- 22/06/2021
Huasmín	26/08/2020 - 3/11/2020	10/10/2020- 10/11/2020	25/12/2020 - 25/02/2021	24/05/2021- 24/06/2021

Además, con el propósito de interpretar los cambios de cobertura vegetal y analizar su calidad, se reclasificó dentro del software ArcGis 10.8 los valores NDVI de cada una de las imágenes con base a la clasificación dada por Filicetti et al. (2018) (Tabla 6).

Posteriormente, se verificó el área representativa para cada valor NDVI durante los tres tiempos mencionados, y se obtuvo un panorama general del comportamiento que presentó la vegetación durante y después del incendio forestal. La comparación de los valores del NDVI durante con post 1 y durante con post 2, permitieron verificar la tendencia del recrecimiento de la vegetación postincendio en función de los valores NDVI asignados.

Tabla 6*Clasificación NDVI según tipo de vegetación.*

Clase	Tipo de vegetación
-1 – 0	Vegetación escasa o suelo desnudo.
0 – 0.33	Vegetación con algún tipo de deficiencia.
0.33 – 0.66	Vegetación moderadamente sana.
0.66 – 1	Vegetación muy sana.

Nota. Filicetti et al. (2018).

2.7.5. Elaborar el mapa de severidad de área quemada.

Se realizó a partir de la identificación de incendios para los años 2020 y 2021 y las clasificaciones de severidad ajustadas a la región Cajamarca según los umbrales (<66, 66-197, 197-394, 394-590 y >590). Las clasificaciones estuvieron sujetas a criterios de interpretación en función al Plug-in Área quemada desarrollado por Briones et al. (2021) y en base a la observación *in situ*. Esto permitió recoger toda la variabilidad de daño existente en los incendios. Logrando distinguir las siguientes severidades: sin quemar, baja, media, alta y extrema.

III. RESULTADOS

3.1. Identificación de las áreas afectadas por los incendios forestales en la región Cajamarca.

3.1.1. Selección de focos de calor forestales

La contabilidad de los focos de calor obtenidos para todo el Perú fue de 366 060 entre los sensores Modis y Viirs; de los cuales, la región Cajamarca reportó 9077 con ocurrencia en zonas de bosque primario, bosque secundario, pajonales, zonas agrícolas y pastos. Estos, fueron filtrados con la capa forestal del MINAM y se obtuvo 4949, que luego fueron filtrados con la capa de agricultura de la región Cajamarca de manera que se obtuvo 1795 focos de calor agrícolas. La diferencia entre estos y los 4949 resulta 3154 focos de calor, donde 210 corresponden a Modis y 2944 a Viirs.

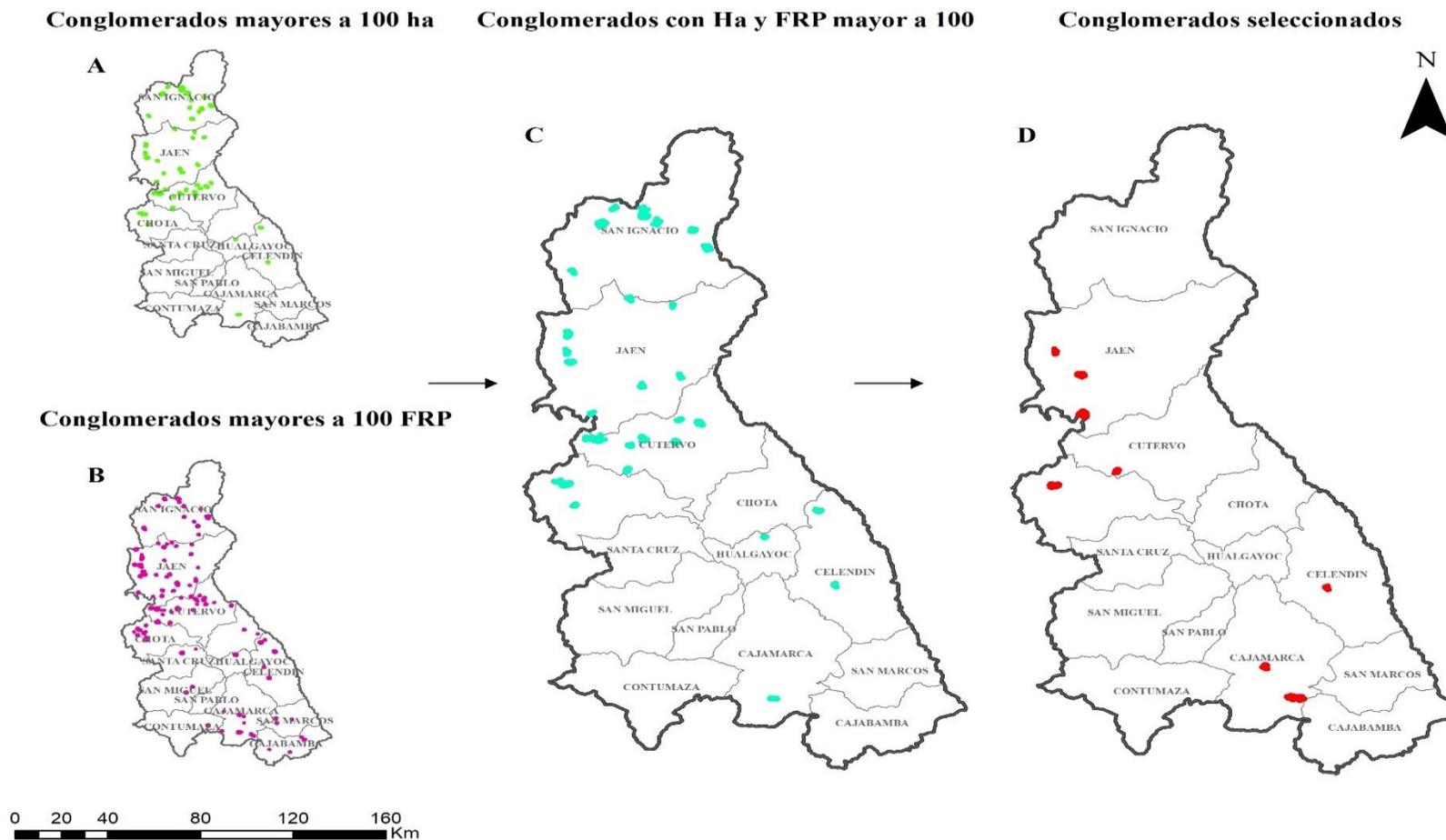
3.1.2. Selección de conglomerados de incendios

Del proceso de 3154 focos de calor forestales se obtuvieron 351 conglomerados con polígonos > 0 ha hasta 743 ha, equivalente a 17 251 ha en todo el territorio de Cajamarca. Del total de conglomerados el 13.8 % superaron las 100 ha, los conglomerados de 50 a 99 ha conformaron el 14.5 % y los conglomerados menores a 50 ha comprendieron el 71.7 %.

Los conglomerados mayores a 100 ha (Figura 3A) ascendieron a 48, mientras que los conglomerados con FRP mayor a 100 (Figura 3B) fue de 101. De la fusión de estos se obtuvo 32 conglomerados (Figura 3C), de los cuales se seleccionaron 8 (Figura 3D) considerando criterios de presencia de arbolado, accesibilidad (topografía y cuestiones sociales) e indicios del paso del fuego: San Felipe, Pucará, Pomahuaca, Miracosta, Huasmín, San Juan, Jesús y Querocotillo (Tabla 7).

Figura 3

Selección de conglomerados según criterios empleados.



3.2.Determinación del nivel de severidad en incendios forestales.

De las localidades afectadas, el incendio Jesús presentó la mayor extensión con 743 hectáreas, y la severidad media predominó en esta localidad. San Felipe y Huasmín también sufrieron impactos significativos, con 171 y 190 hectáreas afectadas respectivamente. En contraste, Pucará y Querocotillo fueron las localidades con menor superficie afectada (108 y 133 hectáreas respectivamente), y presentaron niveles bajos de severidad (Tabla 7).

Tabla 7

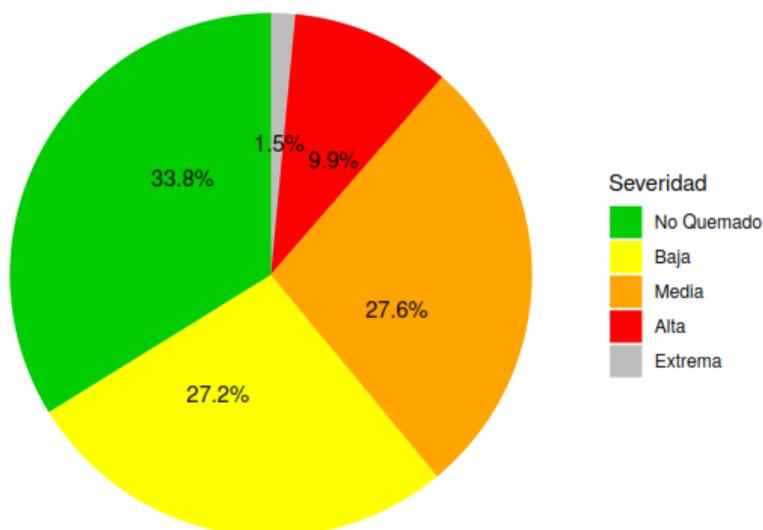
Niveles de severidad por incendio.

Incendio	Área total	Severidad				
	Ha	No quemada (ha)	Baja (ha)	Media (ha)	Alta (ha)	Extrema (ha)
San Felipe	171	90	25	30	16	10
Huasmín	190	31	44	74	35	6
Jesús	743	199	230	278	35.96	0.04
Miracosta	428	271	96	43	16	2
Pomahuaca	436	114	137	125	49	11
Pucará	108	31	56	20	1	0
Querocotillo	133	51	30	28	21	3
San Juan	200	27	37	66	65	5
Total	2409	814	655	664	238.96	37.04

Las áreas afectadas por los incendios se distribuyeron en diferentes niveles de severidad: 37.04 ha (1.5%) correspondió a severidad extrema, 238.96 ha (9.9%) a severidad alta, 664 ha (27.6%) a severidad media y 655 ha (27.2%) a severidad baja. Además, se identificó que el 33.8% (814 ha) del área total no ha sido afectada por los incendios y se mantuvo en condiciones no quemadas (Figura 4).

Figura 4

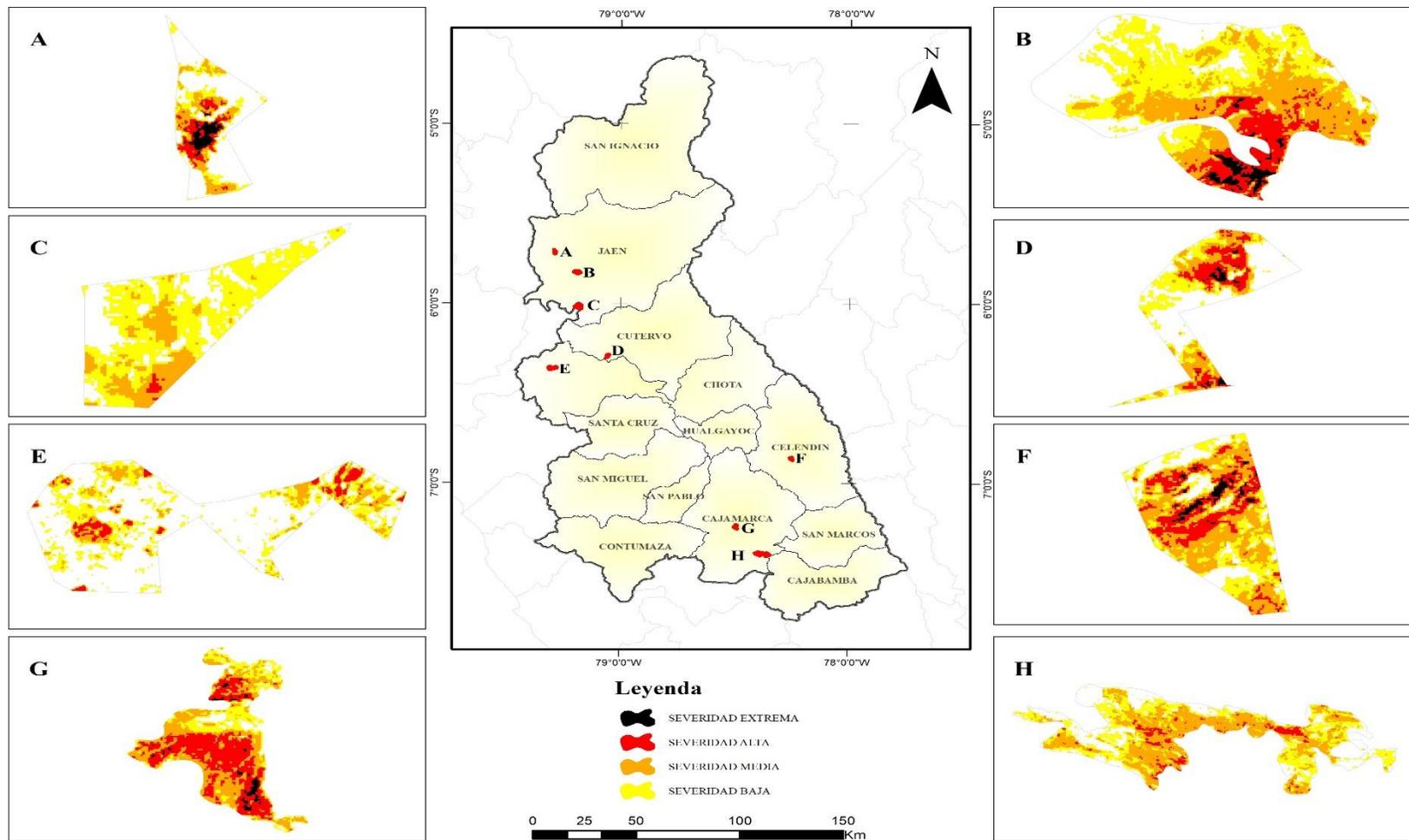
Porcentaje de severidad de los 8 incendios evaluados.



La Figura 5 ofrece una representación visual de las áreas afectadas por incendios y su severidad en las localidades de: San Felipe (A), Pomahuaca (B), Pucará (C), Querocotillo (D), Miracosta (E), Huasmín (F), San Juan (G) y Jesús (H), asociada a una simbología de colores (amarillo, anaranjado, rojo y negro) que refleja niveles de severidad (baja, media, alta y extrema). En los incendios Jesús y Pomahuaca, se observó una extensa área de baja severidad (230 ha y 137 ha), evidenciada por tonalidades amarillas. Por otro lado, los incendios Pucará, Miracosta y Querocotillo presentaron áreas de severidad extrema de 0 ha, 2 ha y 3 ha respectivamente, siendo los de menor impacto en este nivel. San Felipe y Huasmín, por su parte, registraron áreas más extensas de severidad extrema (10 y 6 ha), demostrando la mayor afectación en este nivel. Además, se destaca que el incendio Miracosta presentó una considerable proporción de áreas no quemadas (63.32%).

Figura 5

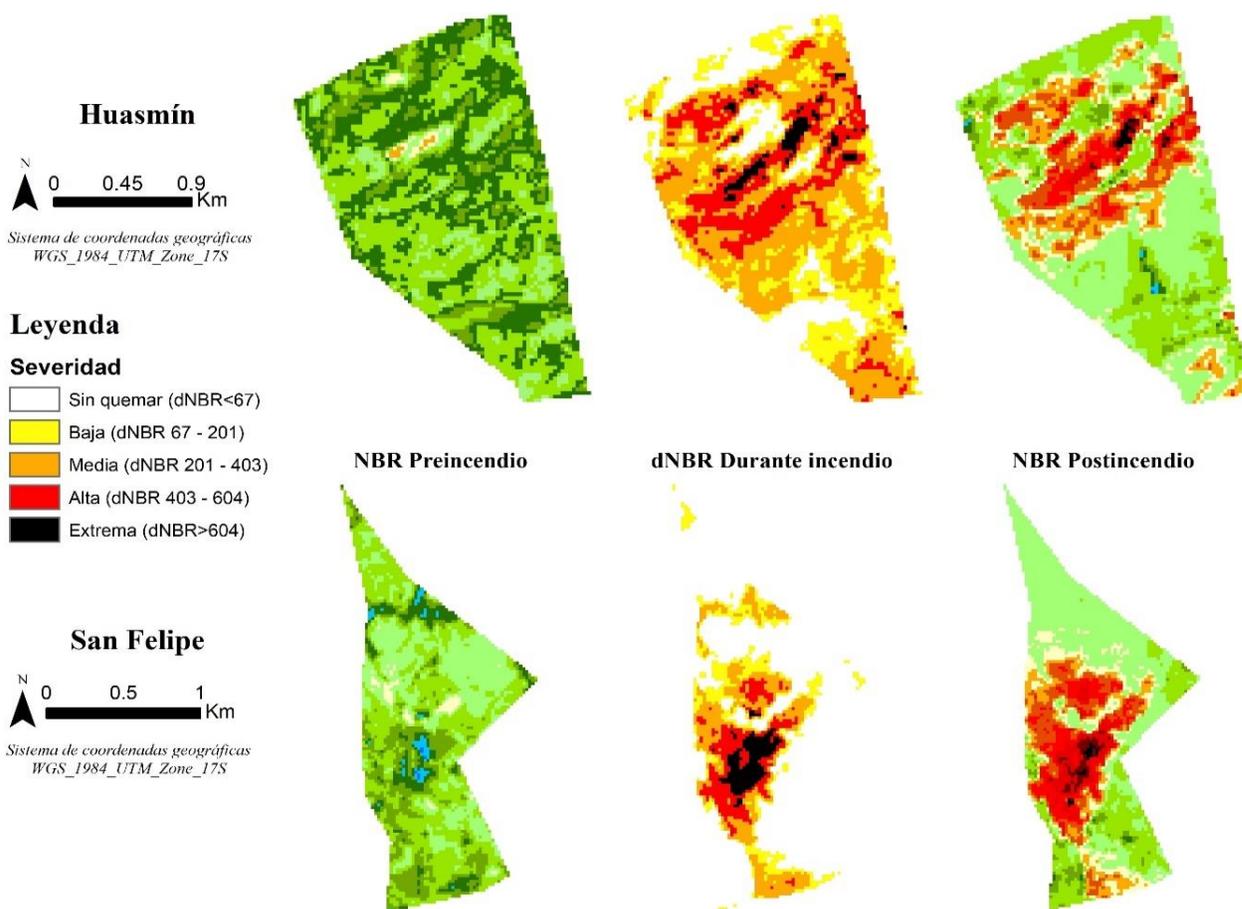
Mapa de nivel de severidad de los incendios forestales en estudio.



El estudio de NBR y dNBR en imágenes de antes, durante y después para los incendios Huasmín y San Felipe, reveló diferencias significativas en la distribución de la afectación provocada por los incendios. En San Felipe, mediante la clasificación de las áreas quemadas se delimitó el área afectada para cada uno de los niveles de severidad: 10 ha del área presentó daños de severidad extrema, 16 ha severidad alta, 30 ha severidad media, 25 ha severidad baja y 90 ha no mostró signos de quemaduras, en un área total de 171 ha; Por otro lado, en Huasmín se observó las siguientes áreas: 6 ha experimentó severidad extrema, 35 ha severidad alta, 74 ha severidad media, 44 ha severidad baja y 31 ha no presentó quemaduras, en una extensión total de 190 ha (Figura 6).

Figura 6

Índice NBR pre incendio y post incendio; índice dNBR severidad durante el incendio.



3.3.Verificación de los indicadores de regeneración natural postincendio forestal

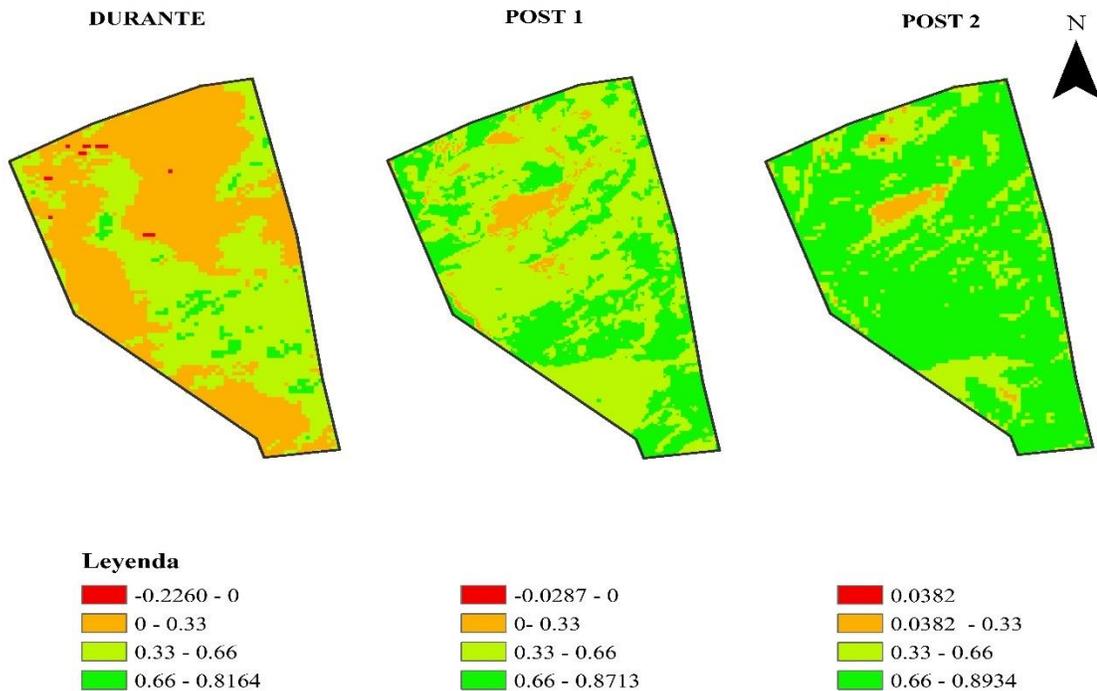
3.3.1. Valores NDVI para el incendio Huasmín

Durante el incendio la vegetación de clase muy sana alcanzó un valor máximo del NDVI de 0.8164, mientras que la vegetación moderadamente sana mostró un NDVI cercano al umbral de 0.66. Por su parte, la vegetación con algún tipo de deficiencia presentó un valor NDVI cercano a 0.33; mientras que, la vegetación escasa tuvo el valor NDVI de -0.2260, reflejo directo del incendio que afectó un área de 190 ha.

Comparando los períodos durante y post 1, se destacaron cambios en los valores de NDVI, donde la vegetación de clase muy sana experimentó un aumento de NDVI, pasando de 0.8164 a 0.8713. Sin embargo, el NDVI alcanzó su valor más alto de 0.8934 en el tiempo post 2, indicando una calidad mejorada de la vegetación en comparación con otros momentos (Figura 7).

Figura 7

Calidad de vegetación en el incendio Huasmín para los tiempos durante, post 1 y post 2.



Durante el incendio, se observó una distribución de la vegetación de acuerdo a su estado de salud. La vegetación de clase muy sana abarcó 3.090% del área, mientras que la vegetación moderadamente sana ocupó 42.235%. Aquella con algún tipo de deficiencia representó el 54.461%, y la vegetación escasa el 0.214% del total. Estos porcentajes se basaron en un área de 190 ha afectadas por el incendio.

Al comparar los tiempos durante y post 1, se evidenció aumento de 29.375% en la vegetación muy sana; así mismo, la vegetación moderadamente sana aumentó en 20.421 %. Al aumentar la vegetación muy sana y moderadamente sana, disminuyó en un 49.588 % el área de vegetación con algún tipo de deficiencia y en 0.209 % la vegetación escasa. Para el post 2, la vegetación muy sana ocupó un 76.995 % del área total de la zona de estudio. Esto representó un aumento significativo del 73.905% en comparación al período durante y un incremento del 44.53% en relación al período post 1. La vegetación con algún tipo de deficiencia fue la más representativa, al reducirse en un 52.048 % con respecto al tiempo

Tabla 8

Comparación del incendio Huasmín entre valores NDVI, de octubre 2020 (durante), diciembre 2020 (post 1) y mayo 2021 (post 2).

Índice espectral	Umbral de rango		Fecha de la imagen					
			Durante (10/10/2020)		Post 1 (25/12/2020)		Post 2 (24/05/2021)	
	mín.	máx.	Área					
		ha	%	ha	%	ha	%	
NDVI	-1	0	0.40	0.214	0.01	0.005	0.03	0.014
	0	0.33	103.11	54.461	9.24	4.873	4.57	2.413
	0.33	0.66	79.96	42.235	118.85	62.656	38.97	20.578
	0.66	1	5.85	3.090	61.58	32.465	145.82	76.995

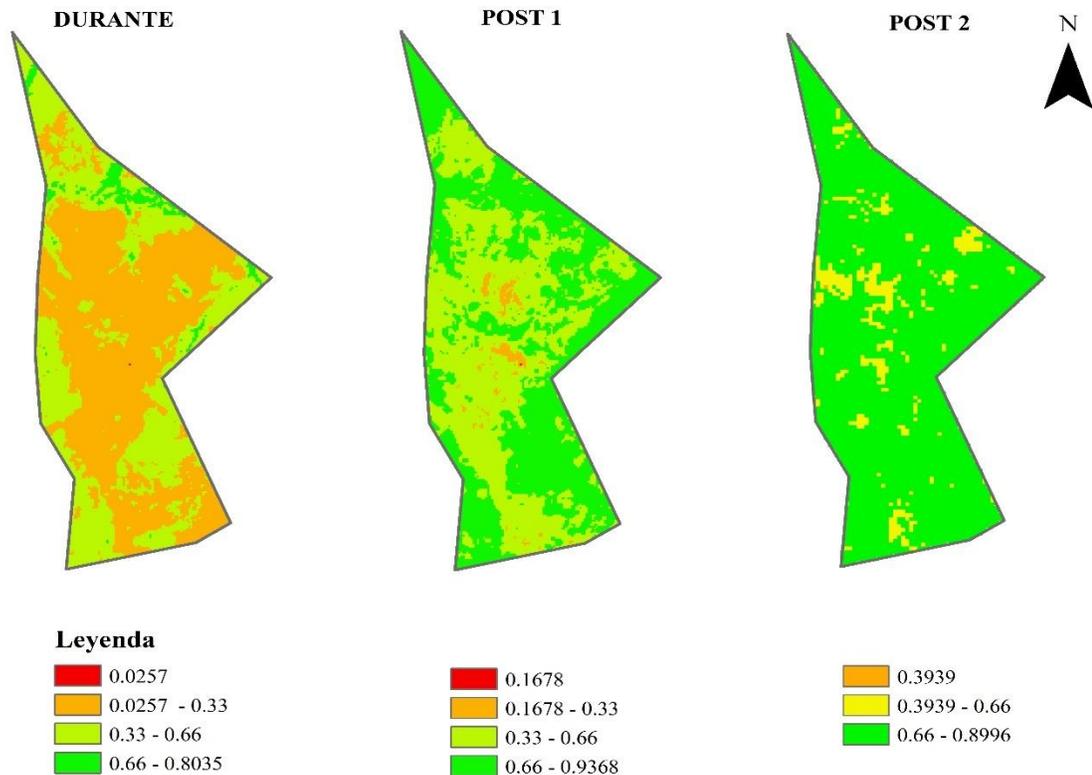
3.3.2. Valores NDVI para el incendio San Felipe.

Durante el incendio la vegetación de clase muy sana alcanzó un valor máximo del NDVI de 0.8035, mientras que la vegetación moderadamente sana mostró un NDVI cercano al umbral de 0.66. Por su parte, la vegetación con algún tipo de deficiencia presentó un valor NDVI cercano a 0.33; mientras que, la vegetación escasa tuvo el valor NDVI de 0.0257, reflejo directo del incendio que afectó un área de 171 ha.

Comparando los períodos durante y post 2, se destacaron cambios en los valores de NDVI, donde la vegetación de clase muy sana experimentó un aumento de NDVI, pasando de 0.8035 a 0.8997. Sin embargo, el NDVI alcanzó su valor más alto de 0.9368 en el tiempo post 1, indicando una calidad mejorada de la vegetación en comparación con otros momentos (Figura 8).

Figura 8

Calidad de vegetación en el incendio San Felipe para los tiempos durante, post 1 y post 2.



Durante el incendio, se observó una distribución de la vegetación de acuerdo a su estado de salud. La vegetación de clase muy sana ocupó el 3.251% del área, mientras que la vegetación moderadamente sana ocupó el 39.174%. Aquella con algún tipo de deficiencia representó el 57.571%, y la vegetación escasa representó el 0.004% del total. Estos porcentajes se basaron en un área de 171 ha afectadas por el incendio.

Al comparar los tiempos durante y post 1, se evidenció aumento de 45.251% en la vegetación muy sana; así mismo, la vegetación moderadamente sana aumentó en 10.57 %. Al aumentar la vegetación muy sana y moderadamente sana, disminuyó en un 55.842 % el área de vegetación con algún tipo de deficiencia mientras que la vegetación escasa se mantuvo en 0.004 %. Para el post 2, la vegetación muy sana ocupó el 91.390% del área total de la zona de estudio. Esto representó un aumento significativo del 88.139% en comparación al período durante y un incremento del 42.867% en relación al período post 1. La vegetación con algún tipo de deficiencia fue la más representativa, al reducirse en un 57.556% con respecto al tiempo del incendio (Tabla 9).

Tabla 9

Comparación del incendio San Felipe entre valores NDVI, de noviembre 2020 (durante), febrero 2021 (post 1) y mayo 2021 (post 2).

Índice espectral	Umbral de rango		Fecha de la imagen					
			Durante (01/11/2020)		Post 1 (16/02/2021)		Post 2 (22/05/2021)	
	mín.	máx.	Área					
		ha	%	ha	%	ha	%	
NDVI	-1	0	0.01	0.004	0.0068	0.004	0.00	0.000
	0	0.33	98.59	57.571	2.96	1.729	0.0256	0.015
	0.33	0.66	67.09	39.174	85.21	49.744	14.70	8.595
	0.66	1	5.5674	3.251	83.12	48.523	156.26	91.390

3.3.3. Variación del NDVI para los incendios Huasmín y San Felipe

La Tabla 10 muestra que la media del NDVI durante el incendio fue muy similar para Huasmín (0.38) como San Felipe (0.34). Sin embargo, para los tiempos post 1 y post 2, la media presentó claras diferencias, siendo San Felipe quien aumentó de manera significativa a 0.61 y 0.71 respectivamente; mientras que Huasmín llegó a 0.50 y 0.57.

El coeficiente de variación (CV) del NDVI durante correspondiente a cada incendio fue el más alto respecto a los tiempos post 1 y post 2 mostrando el 62.85% para San Felipe y el 89.60% para Huasmín, seguido por el CV post 1, para cada incendio (38.46% y 53.23% respectivamente). Por su parte, la tasa de variación (TV) del NDVI post 2 mostró un considerable aumento en los incendios San Felipe y Huasmín (85.37% y 65.41% respectivamente) con respecto a la TV post 1 (58.94% y 47.71%). En tanto, para los tiempos post 1 y post 2 ambos parámetros mostraron relación inversa, mientras la TV aumenta, el CV se reduce después del incendio.

Tabla 10

Valores estadísticos del NDVI para las áreas de estudio en diferentes tiempos.

Tiempo	Incendio							
	San Felipe				Huasmín			
	Media	DE	TV	CV	Media	DE	TV	CV
Durante	0.38	0.24		62.85	0.34	0.31		89.60
Post 1	0.61	0.23	58.94	38.46	0.50	0.27	47.71	53.23
Post 2	0.71	0.15	85.37	21.40	0.57	0.27	65.41	47.53

Nota. Desviación estándar (DE), tasa de variación (TV), coeficiente de variación (CV)

3.4. Mapa de severidad de área quemada para las zonas de estudio

Figura 9

Mapa de severidad del incendio Huasmín.

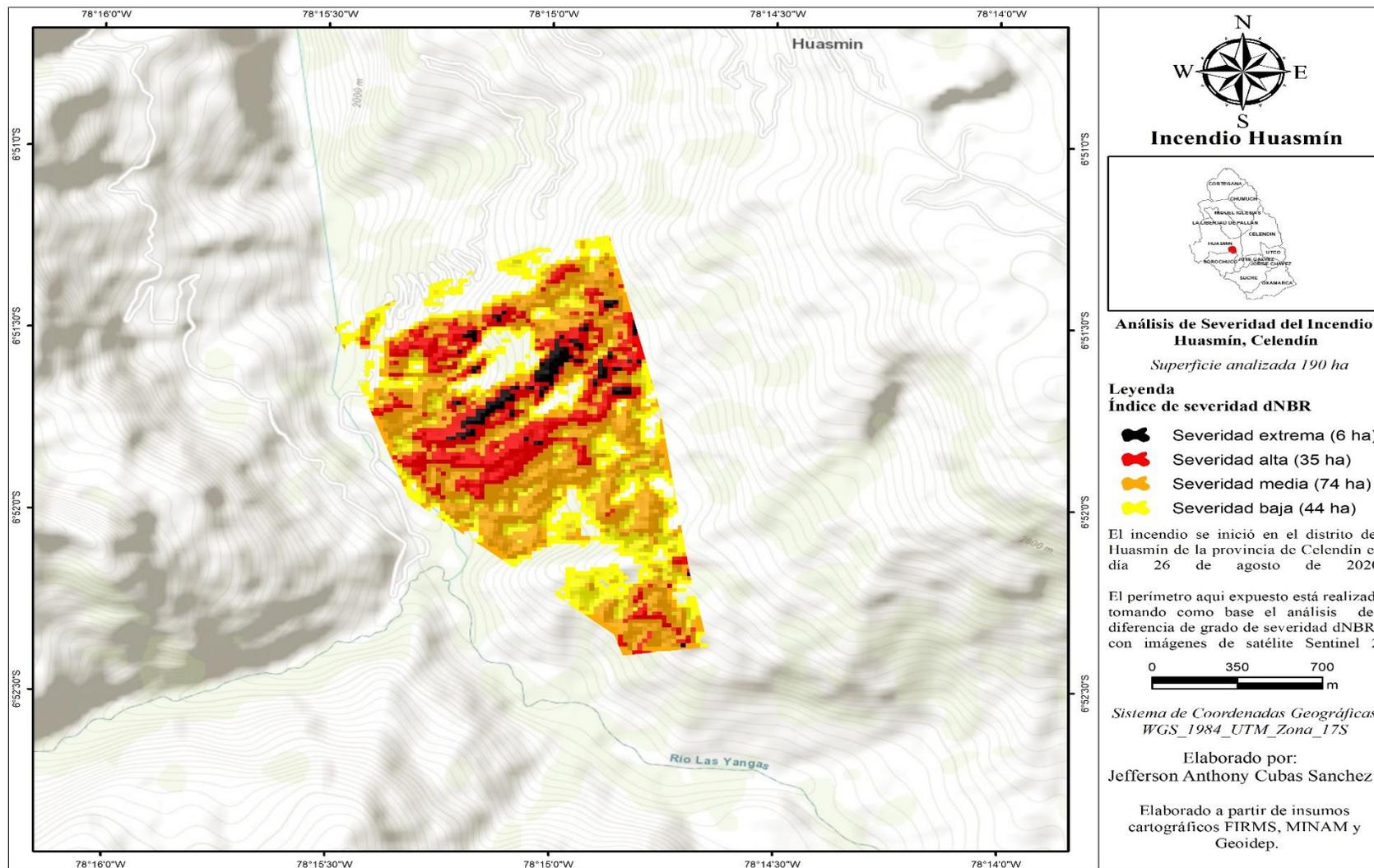
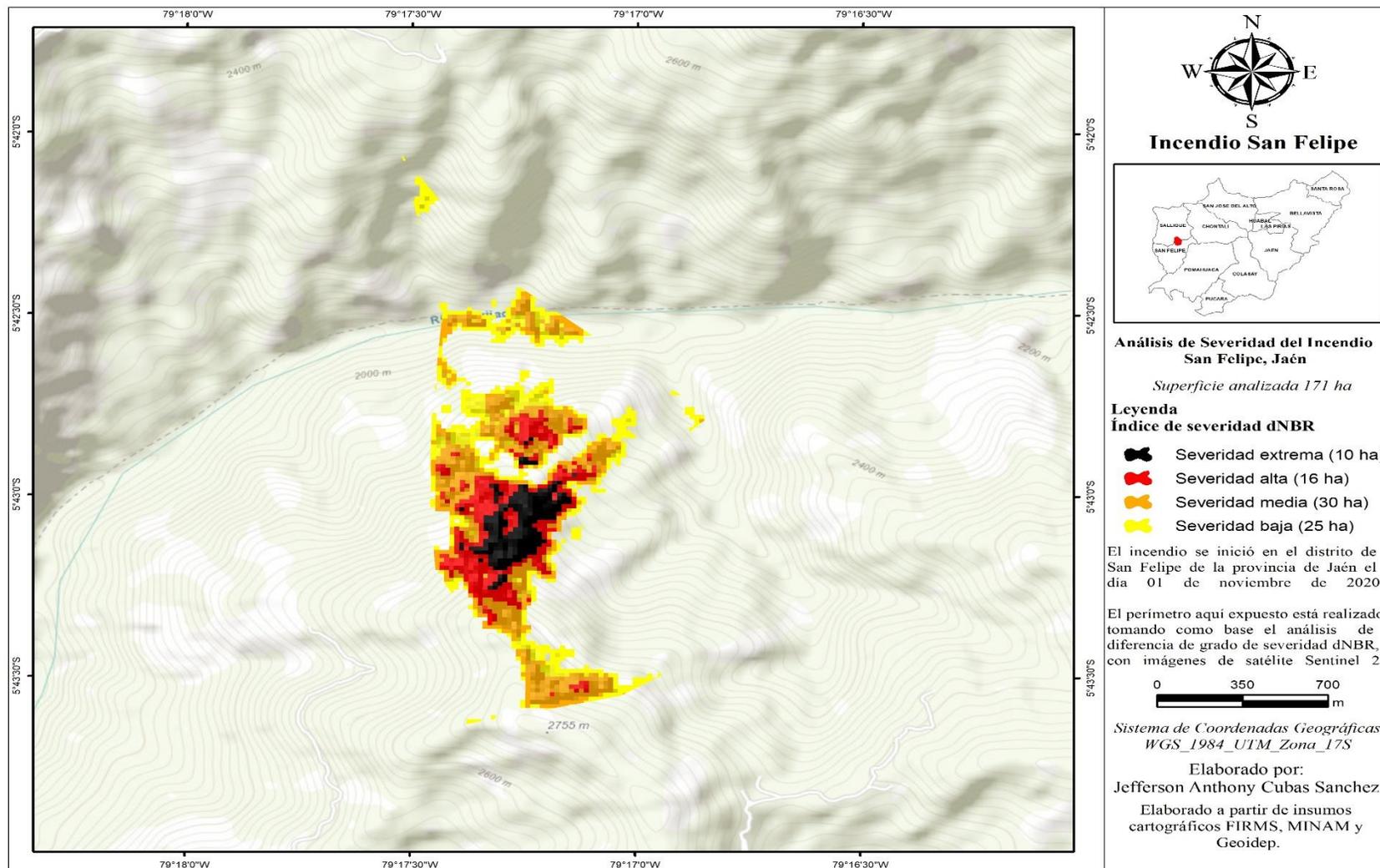


Figura 10

Mapa de severidad del incendio San Felipe.



IV. DISCUSIÓN

Evaluar la severidad y recuperación vegetal postincendio incorporó información cartográfica de focos de calor e imágenes satelitales Sentinel 2 que constituyeron la base en la identificación y selección de incendios forestales logrando visualizar su distribución espacial y su extensión dentro del territorio de Cajamarca. Añamuro et al. (2020) mencionaron que existen diversas herramientas basadas en sistemas de información geográfica, útiles para cartografiar áreas quemadas, e identificar la severidad y la regeneración vegetal. El mapeo de la severidad del área quemada por incendio forestal ofrece datos que contribuyen a una representación más clara de las áreas afectadas, asistiendo así a profesionales en el ámbito forestal a tener una comprensión más precisa.

Seleccionar incendios forestales constituyó elegir conglomerados mayores a 100 hectáreas y con FRP mayor a 100, ambos criterios proporcionaron perspectivas complementarias para la identificación de grandes incendios con alto riesgo y potenciales puntos críticos. Para Gómez et al. (2017) la categorización de grandes incendios forestales corresponde a superficies mayores a 500 hectáreas. No obstante, en el marco de esta investigación, se designó como grandes incendios a aquellos que excedieron las 100 hectáreas, en vista de que las áreas afectadas en su mayoría se encontraron por debajo del umbral de 500 hectáreas. Esta adaptación del criterio se justifica a fin de adecuar la definición a las particularidades de la región de estudio. Estos incendios, aunque más pequeños en extensión, pueden ser igualmente dañinos para áreas específicas y fragmentar hábitats, lo que afecta la conectividad y la capacidad de recuperación de los ecosistemas.

En relación al índice dNBR los valores de umbrales que separan las clasificaciones obtenidas en el estudio fueron (<67, 197, 394, 590 y >590) notablemente inferior a los propuestos por Key y Benson (2006) (<99, 269, 439, 659, >660). Las variaciones podrían estar considerablemente influenciados por características de los distintos ecosistemas, lo que hace que su aplicación a diferentes lugares sea problemática.

En relación con el nivel de severidad se observó que de los 8 incendios tanto Pucará como Jesús presentaron poca severidad extrema (0-0.04 ha); sin embargo, en San Felipe y

Pomahuaca fue relativamente mayor (10-11 ha). Además, los 8 incendios evaluados mostraron un panorama de la severidad semejante correspondiéndose con un nivel de severidad del fuego de media a baja. Para Fernández et al. (2019) estos resultados podrían ser consecuencia de la relación de los diferentes ecosistemas encontrados, y su grado de madurez estructural con sus respectivos regímenes de incendios; así pues, en Pucará y Pomahuaca predominan los bosques secos, con temperaturas altas que podría relacionarse con los diferentes niveles de severidad. Por otro lado, Miracosta y Querocotillo presentan matorrales y temperaturas bajas. Mientras que, en San Felipe, Huasmín, San Juan y Jesús predominan áreas forestales (*Pinus patula*, *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus saligna*), matorrales y pajonales; según Robas et al. (2016) en este tipo de vegetación la severidad llega a valores altos. Por su parte Suquilanda (2020) menciona que la presencia de plantaciones de pino y eucalipto aumentan la severidad de fuego.

En esta investigación, se ha destacado la importancia del NDVI como un indicador ampliamente utilizado para evaluar el estado y calidad de la vegetación. La conducta de este indicador se ve afectada por múltiples factores, como las condiciones climáticas del área de estudio, el tipo de vegetación e incluso la temperatura (Capador et al., 2021). Al analizar el NDVI de los incendios Huasmín y San Felipe, para los tiempos post 1 y post 2 se observó que la cubierta vegetal se encuentra en constante regeneración y en buen estado, ya que el índice reveló las medias del NDVI postincendio entre 0.5 y 0.7. En las investigaciones realizadas por Spadoni et al. (2020) y Vlassova et al. (2017) se registraron valores de medias similares entre 0.6 y 0.7 dentro de ecosistemas montañosos. Lo que sugiere que la vegetación que caracteriza las áreas estudiadas corresponde a ecosistemas boscosos que presentan una regeneración destacada.

Por otro lado, los valores NDVI reflejaron la dinámica de recuperación de la vegetación después de un incendio forestal. Al comparar los diferentes momentos, se destacó que la vegetación muy sana se recuperó de manera más significativa; mientras que, la vegetación con algún tipo de deficiencia se redujo, mostrando una mejora considerable. Vales et al. (2020) enfatizan la utilidad de los resultados en decisiones urgentes, seguimiento y planificación de restauración, para priorizar acciones futuras.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La selección de focos de calor forestales mediante filtros y comparaciones con capas geoespaciales destacó que Cajamarca alberga 3154 de los 366 060 identificados en el Perú. Estos permitieron identificar 32 conglomerados según criterios de tamaño e intensidad calórica. Luego, fueron seleccionados 8 conglomerados bajo criterios de accesibilidad, presencia de arbolado y rastro de incendio; priorizando las zonas de: San Felipe, Pucará, Pomahuaca, Miracosta, Querocotillo, Huasmín, San Juan y Jesús.
- La evaluación de la severidad de los ocho incendios en Cajamarca, que abarcaron un total de 2409 ha, subraya la importancia de comprender la dinámica de los incendios en la región. Pues, las áreas afectadas muestran que el 33.8% de territorio permanece no quemado, mientras que el 9.9% presenta severidad alta, el 27.6% severidad media, el 27.2% severidad baja y el 1.5% severidad extrema. A pesar de la considerable extensión afectada, se mantuvo un nivel de severidad de media a baja. Destacando la necesidad de estrategias de prevención y manejo adaptadas a estos patrones variables de incendios forestales.
- Los análisis de los incendios de San Felipe y Huasmín revelan tendencias notables en la recuperación de la vegetación. Durante el incendio, San Felipe exhibió un NDVI promedio de 0.38, mientras que Huasmín mostró un NDVI de 0.34, destacando una diferencia significativa. En el período postincendio, San Felipe experimentó un incremento a un NDVI promedio de 0.61 en el post 1 y 0.71 en el post 2, con tasas de variación (TV) del 58.94% y 85.37%, respectivamente. En contraste, Huasmín aumentó a un NDVI promedio de 0.50 en el post 1 y 0.57 en el post 2, con TV del 47.71% y 65.41%. Estos resultados indican que, a pesar de una respuesta positiva en ambos sitios, San Felipe mantuvo valores de NDVI más altos y una variabilidad más pronunciada, subrayando las diferencias en la recuperación de la vegetación entre estos dos lugares.

- Este estudio presenta una nueva aproximación metodológica que combina insumos cartográficos de focos de calor reportados por FIRMS y MINAM para identificar conglomerados de focos de calor inmersos en zonas forestales y evaluar la severidad sujeta a una calibración de los valores dNBR con imágenes de satélite Sentinel 2. Los valores ajustados para el área de estudio expresan al área sin quemar < 67 y el área con severidad extrema > 590 , mostrando diferencias significativas entre las categorías de severidad. Los resultados expresados en un mapa de severidades para cada incendio, confirman que la metodología es una herramienta efectiva que permite identificar incendios y cartografiar la severidad.

5.2. Recomendaciones

- Debido a las dificultades por nubosidad de las imágenes, se recomienda a los futuros investigadores efectuar una búsqueda con una ventana de tiempo de un mes, y si la nubosidad persiste aumentar la ventana a dos meses. De esta manera, se obtendrá imágenes limpias que permitirán un excelente análisis y una mejor verificación en campo. Además, evaluar el uso potencial de las imágenes provenientes de Radar de Apertura Sintética, tecnología LiDAR y drones para el monitoreo de la vegetación.
- Al SERFOR revisar y adaptar los valores de umbrales del índice dNBR para una clasificación más precisa de las severidades de incendio en el contexto específico de la región estudiada. Esto implica considerar las particularidades de los ecosistemas locales y factores ambientales relevantes. La consulta con expertos en incendios forestales y ecología de la región puede proporcionar información valiosa para ajustar los umbrales de manera que reflejen con mayor precisión las severidades de fuego y la vulnerabilidad real del área. Esta adaptación mejorará la capacidad de identificar zonas afectadas y permitirá una evaluación más confiable y efectiva de la gravedad de los incendios en el entorno estudiado.

- Los resultados obtenidos, que destacan una recuperación más notable en áreas con vegetación sana, respaldan la importancia de implementar medidas de manejo dirigidas específicamente a mejorar las condiciones de la vegetación afectada. Por ello, se recomienda a las dependencias de gobierno realizar un monitoreo continuo y detallado de la dinámica de recuperación de la vegetación después de incendios forestales, utilizando los valores del Índice de NDVI como indicador clave. Con el objetivo de promover una restauración y conservación efectiva a largo plazo, se sugiere instrumentar medidas para la recuperación de la cubierta vegetal con algún tipo de deficiencia.

- Para evaluar con precisión la severidad de los incendios y aumentar la adecuación de las estrategias para la cuantificación de daños, se recomienda a los futuros investigadores replicar la metodología a otros ecosistemas y regímenes de incendios forestales considerando otras técnicas espaciales de detección como LiDAR y monitoreo con drones.

- En la presente investigación, se logró establecer relaciones mediante la observación de imágenes satelitales y etapas de verificación de campo del área donde ocurrió el incendio. Se sugiere a futuras investigaciones relacionar el NDVI con visitas de campo para verificar tanto las alteraciones estructurales como los cambios en la composición de la vegetación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Añamuro, L. H. H., Larico, M. C. J., Ruiz, V. C. E., Monteza, R. O. M., & Quiñonez, C. J. (2020). Análisis de incendios forestales en pajonales andinos utilizando sistemas de información geográfica y teledetección, Macari - Puno. *REVISTA EL CEPROSIMAD*, 08(2), 30–37. <https://doi.org/https://doi.org/10.56636/ceprosimad.v8i2.96>
- Botella, M. M. A., & Fernández, M. A. (2017). Estudio de la severidad post-incendio en la Comunidad Valenciana comparando los índices dNBR, RdNBR y RBR a partir de imágenes landsat 8. *REVISTA DE TELEDETECCIÓN*, 2017(49 Special Issue), 33–47. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7095>
- Briones-Herrera, C. I., Silva, C. A. I., Vega-Nieva, D. J., & Briseño, R. J. (2021). *Manual de usuario de las herramientas de mapeo de área quemada y severidad de incendios forestales a partir de imágenes Sentinel*. <http://forestales.ujed.mx/incendios2/>
- Capador, A. Y. E., González, A. G. P., & Suarez, D. P. A. (2021). Análisis de la cobertura vegetal en incendios forestales mediante índices espectrales: caso de estudio Cerros Orientales (Bogotá, Colombia). *Avances: Investigación En Ingeniería*, 18(1), 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6931>
- Caraveo, C. L. A. (2013). *Evaluación de la recuperación vegetal en áreas con distinta severidad de fuego usando teledetección: caso de estudio, Municipio de Ocampo, Coahuila*. [Universidad Autónoma de Ciudad Juárez]. https://lc.cx/y_QvW4
- Chuvieco, E. (2001). Fundamentos de teledetección espacial. In S. A. EDICIONES RIALP (Ed.), (*Fundamentals of remote sensing from space* (Segunda ed)). <https://lc.cx/wwzQcO>
- Comisión Nacional Forestal. (2010). *Incendios forestales Guía práctica para comunicadores* (Efecto Mar, Vol. 3).
- Dentoni, M. del C., & Muñoz, M. M. (2012). *Informe Técnico N° 1. Sistemas de Evaluación de Peligro de Incendios*. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ambiente-itn1_pnmf.pdf
- Dirección General Parlamentaria. (2019). *Carpeta Georeferencial región Cajamarca Perú*.

<https://www.congreso.gob.pe/Docs/DGP/GestionInformacionEstadistica/files/i-06-cajamarca.pdf>

- Díaz-Delgado, R., & Pons, X. (2001). Spatial patterns of forest fires in Catalonia (NE of Spain) along the period 1975–1995. *Forest Ecology and Management*, 147(1), 67–74. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(00\)00434-5](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(00)00434-5)
- Fernández-García, V., Beltrán, M. D., Pinto, P. R., Fernández-Guisuraga, J. M., & Calvo, L. (2019). Uso de técnicas de teledetección para determinar la relación entre la historia de incendios y la severidad del fuego. *Teledetección. Hacia Una Visión Global Del Cambio Climático.*, August 2021, 135–138.
- Filicetti, A. T., Lapointe, R. A., & Nielsen, S. E. (2018). Effects of fire severity and woody debris on tree regeneration for exploratory well pads in jack pine (*Pinus banksiana*) forests. *Forests*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/F12101330>
- Flores, R. A. G., Flores, G. J. G., González, E. D. R., Gallegos, R. A., Zarazúa, V. P., & Mena, M. S. (2021). Comparative analysis of spectral indices to locate and size levels of severity of forest fires. *Investigaciones Geográficas*, 106, 1–21. <https://doi.org/10.14350/ig.60396>
- Gómez-Sánchez, E., De las Heras, J., Borja, L., & Moya, D. (2017). Ajuste de metodologías para evaluar severidad de quemado en zonas semiáridas (SE peninsular): Incendio donceles 2012. *Revista de Teledeteccion*, 49(1133–0953), 103–113. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7121>
- INEI. (2017). *Perú: Crecimiento y distribución de la población, 2017*. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1530/libro.pdf
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods. *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR, 164 RMRS-GTR*. https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_series/rmrs/gtr/rmrs_gtr164/rmrs_gtr164_13_land_assess.pdf
- Naveh, Z. (1990). Fire in the Mediterranean - A Landscape ecological perspective. *FIRE IN ECOSYSTEMS DYNAMICS*, 3, 1–20.

- Robas, C., Nieto, A., & Schnabel, S. (2016). Tecnologías de la Información Geográfica en el Análisis Espacial. In Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible y Planificación Territorial de la Universidad de Extremadura (Ed.), *Nieto Masot, A.*
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Well, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *Remote Sensing Center*, 24(1), 24–26. <https://doi.org/10.1021/jf60203a024>
- Spadoni, G. L., Cavalli, A., Congedo, L., & Munafò, M. (2020). Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20(100419). <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100419>
- Suquilanda, C. C. P. (2020). *Estimación del grado de severidad causada por un incendio sobre una cobertura forestal en el sector de Iruquis (Azuay), utilizando técnicas de teledetección* (Vol. 21, Issue 1) [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34445>
- Vales, J. J., Pino, I., Granado, L., Prieto, R., Méndez, E., Rodríguez, M., Giménez de Azcárate, F., Ortega, E., & Moreira, J. M. (2020). Cartografía de la afección y recuperación vegetal del incendio de Las Peñuelas en Moguer (Huelva) con imágenes satelitales. Año 2017. *Revista de Teledetección*, 57, 79. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13082>
- Vlassova, L., Rosero, T. P., & Montorio, L. R. (2016). Variabilidad espacio-temporal de la temperatura de superficie en ecosistemas de dehesa estimada mediante imágenes Landsat TM: el papel del arbolado. *Geographicalia*, 69–86. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2016681582
- White, J. D., Ryan, K. C., Key, C. C., & Running, S. W. (1996). Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 6(3), 125–136. <https://doi.org/10.1071/WF9960125>

AGRADECIMIENTO

A mi familia, por su amor, paciencia y apoyo incondicional mantenido en todo este proceso de formación que me permitió lograr una de las metas propuestas.

A la Universidad Nacional de Jaén por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y permitirme salir adelante en mi vida, así como a los maestros de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental por compartir sus conocimientos y sabiduría conmigo.

En especial a la Ing. Candy Lisbeth Ocaña Zúñiga por su empeño y dedicación en la investigación, además por su liderazgo y dirección en cada parte de la elaboración de esta tesis.

A mis compañeros por su solidaridad y compromiso a lo largo de la carrera, por esos momentos vividos dentro y fuera de la universidad y por estar allí siempre apoyándonos.

¡GRACIAS

DEDICATORIA

A mis padres por convertirme en todo lo que soy y lo que he conseguido, por su motivación, por su apoyo, y por su dedicación en mi educación académica y la vida.

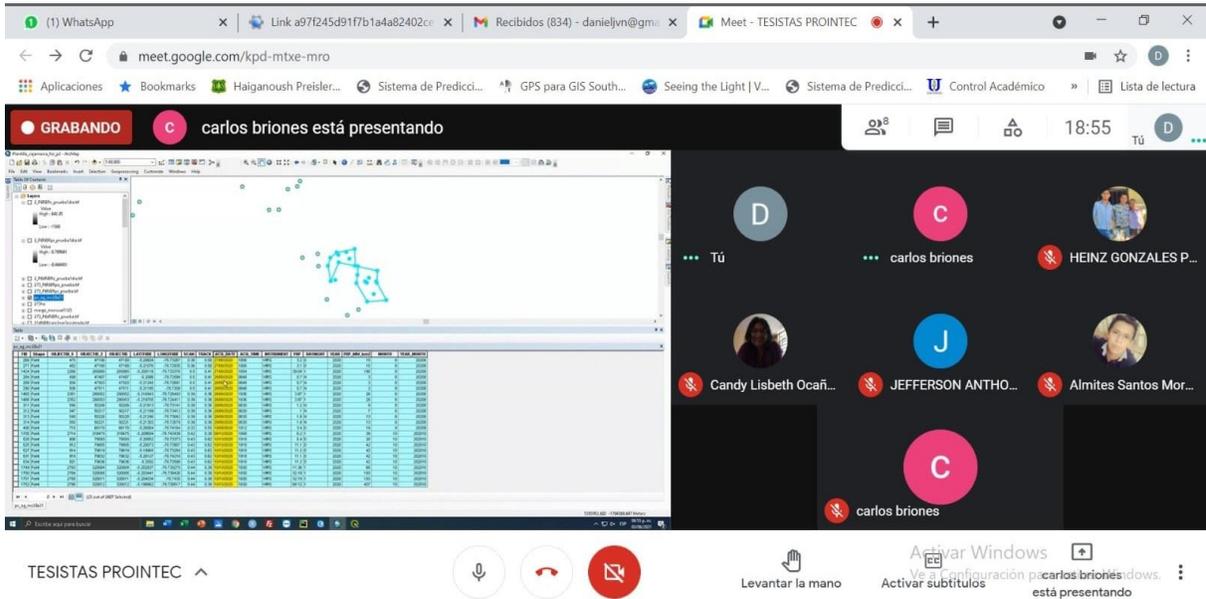
A mis hermanas y familiares por impulsarme a seguir adelante y brindarme su apoyo durante este largo camino a través de su cariño y amor.

Jefferson Anthony Cubas Sánchez

ANEXOS

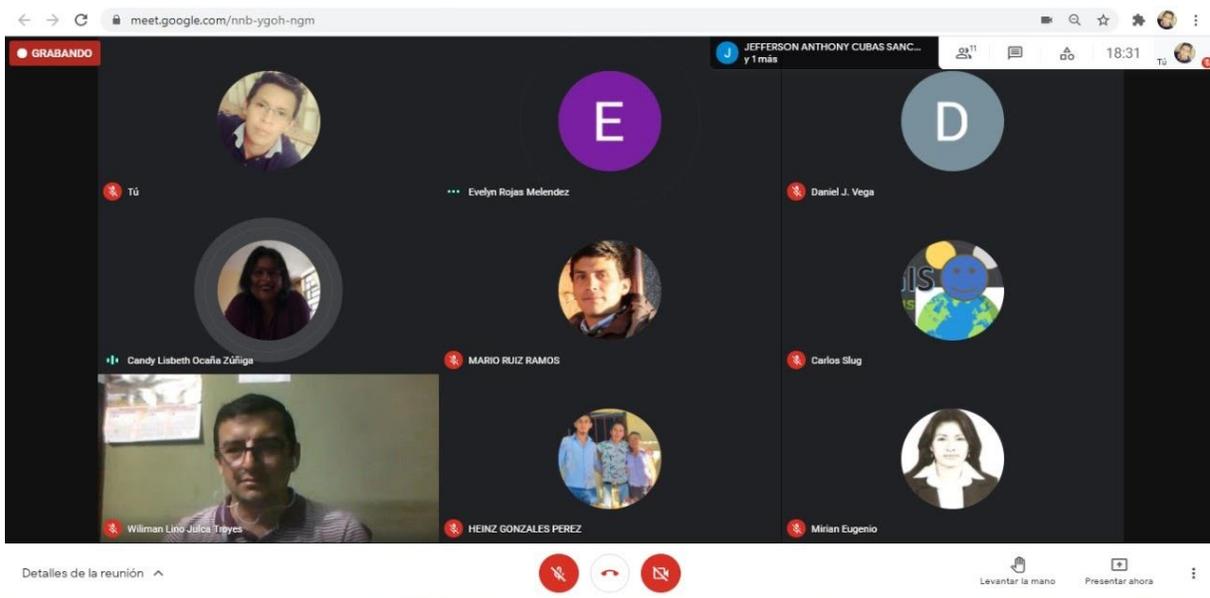
Anexo 1

Capacitación del equipo investigador.



Anexo 2

Reunión del equipo investigador con representantes del SERFOR.



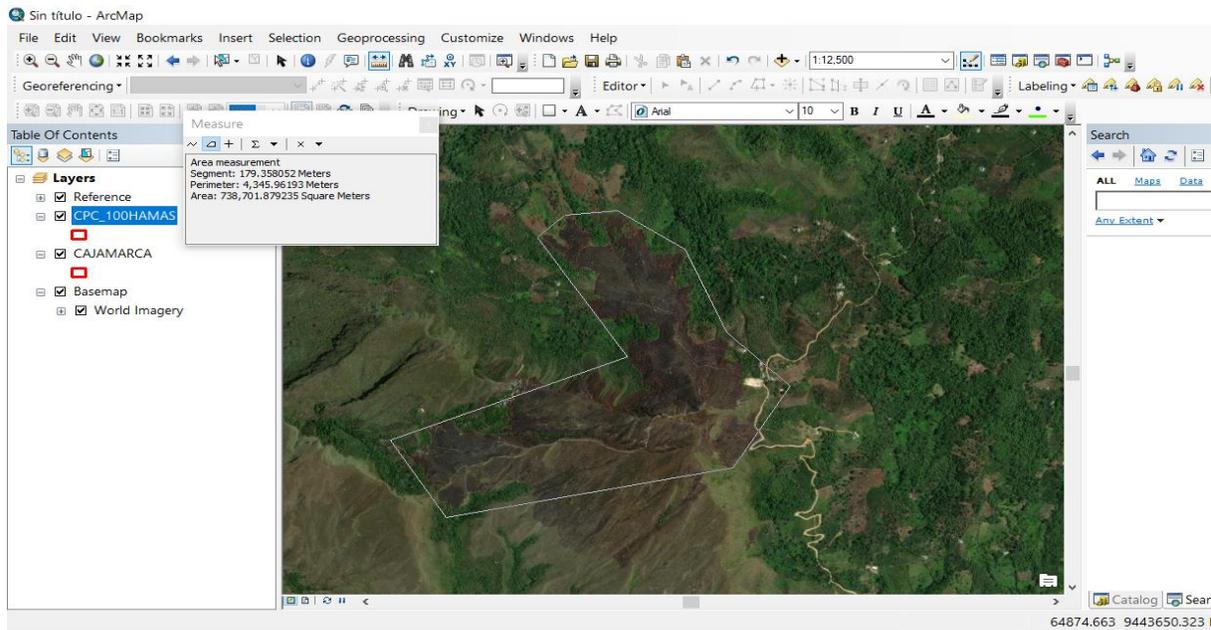
Anexo 3

Recopilación y procesamiento de datos cartográficos.



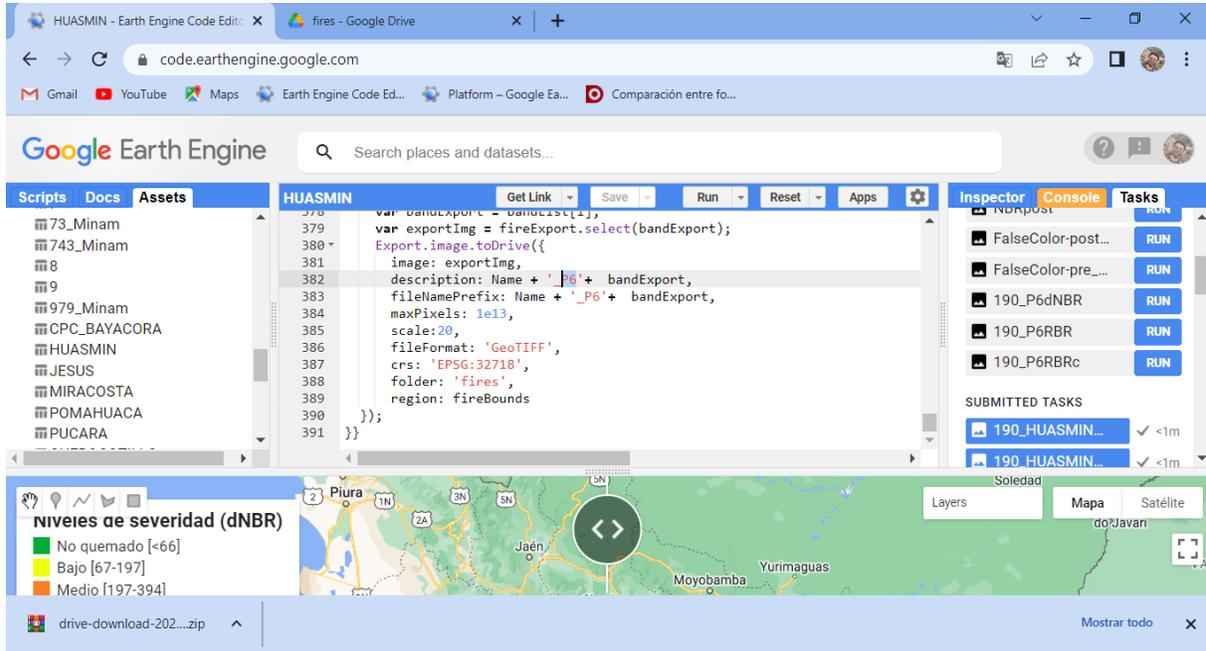
Anexo 4

Identificación de incendio a través de la ortofoto.



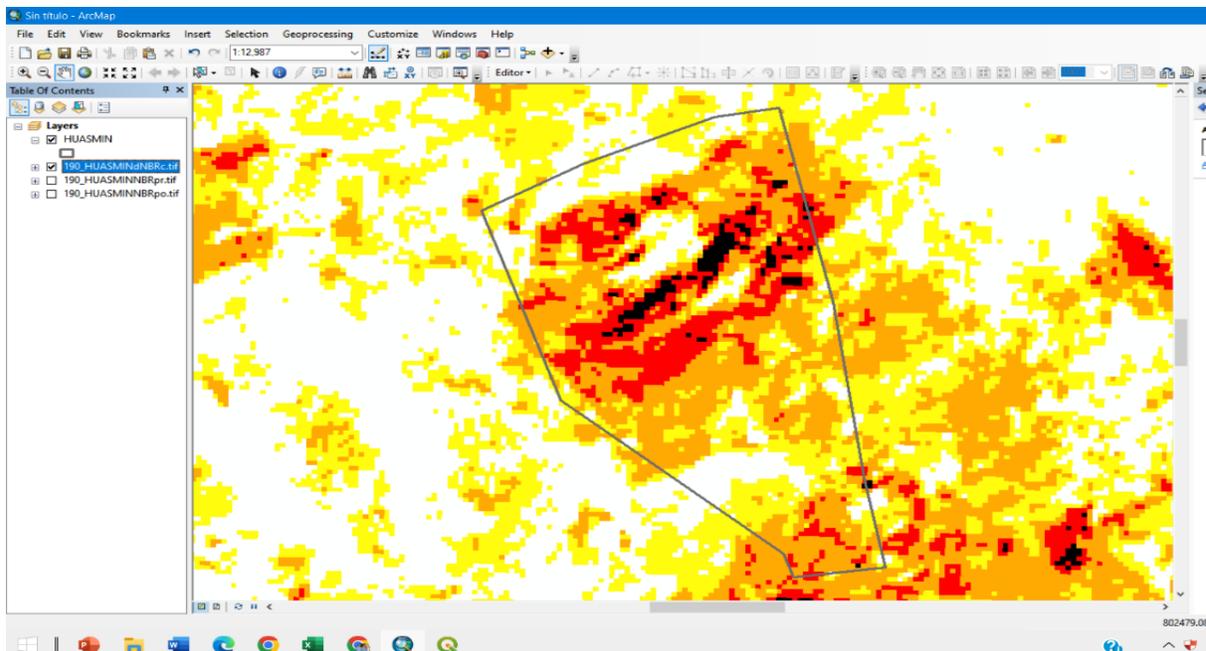
Anexo 5

Ejecución del script en el GEE para la descarga de imágenes sentinel 2.



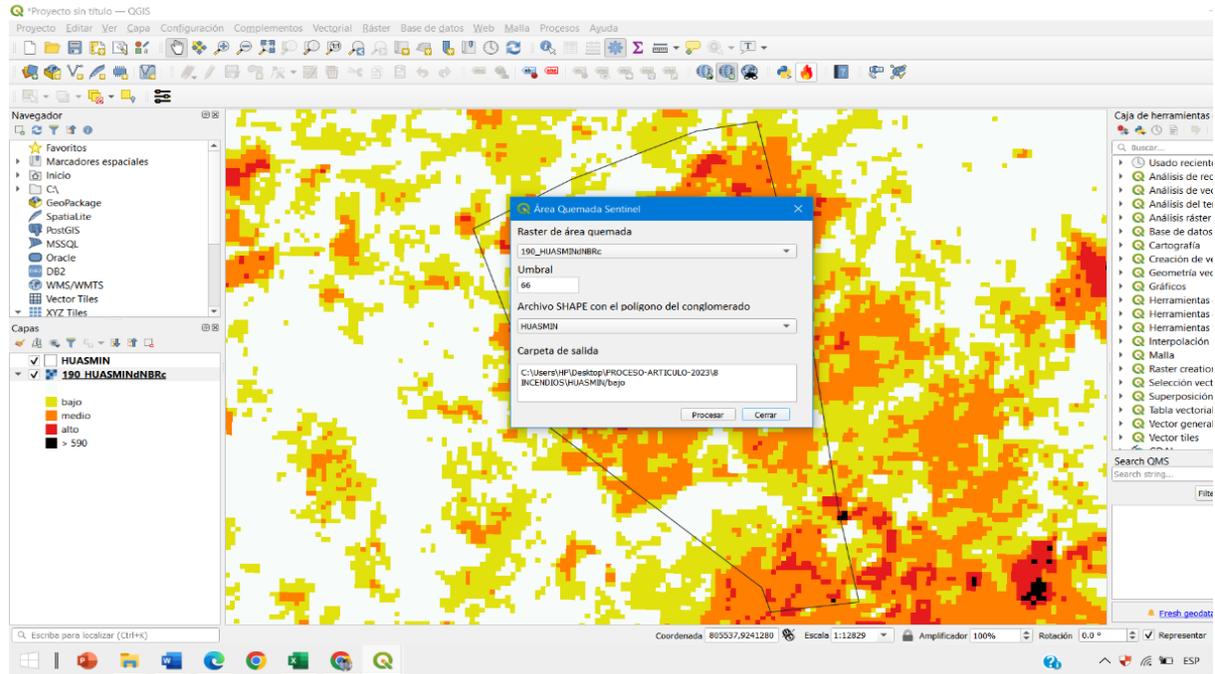
Anexo 6

Aplicación de simbología y clasificación de los valores dNBR.



Anexo 7

Utilización del plugin área quemada para expresar el nivel de severidad según clasificación.



Anexo 8

Fotografía postincendio San Felipe.



Anexo 9

Fotografía postincendio Huasmín.



Anexo 10

Fotografía postincendio Pucará.



Anexo 11

Fotografía postincendio San Juan.



Anexo 12

Fotografía postincendio Jesús.



Anexo 13

Fotografía postincendio Miracosta.



Anexo 14

Fotografía postincendio Pomahuaca.



Anexo 15

Fotografía postincendio Querocotillo.



Anexo 16

Equipo investigador verificando los incendios in situ.



Anexo 17

Recolección de datos según nivel de severidad del incendio.



Anexo 18

Identificación de vegetación quemada.

