FadARA
Facultad de la Armada

SEDE EDUCATIVA UNIVERSITARIA
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

UNDEF
Universidad de la Defensa Nacional



Licenciatura en Cartografía

Tesina de Licenciatura

Análisis de imágenes satelitales para determinar la recuperación vegetal debido al incendio forestal de enero 2023 en La Higuera, Provincia de Córdoba

Alumno: Técnico Universitario Cartógrafo Carolina Noemí Aguilera Pérez
Director de Tesina: Agrimensor Marisa Ferreira
Codirector de Tesina: Agrimensor Hugo Daniel Scilletta
Director de Carrera: Licenciado Humberto Capecci

JUNIO – 2025

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a los profesores que me acompañaron a lo largo de mi carrera. Su comprensión, apoyo y motivación han sido fundamentales para que pudiera continuar y completar este desafío académico.

También quiero agradecer a mis compañeros, quienes con sus risas y debates hicieron de esta etapa una experiencia mucho más amena y enriquecedora.

Finalmente, a mi familia, y en especial a mi mamá, por su amor incondicional, su apoyo constante y su presencia en cada paso de este camino.

RESUMEN

La presente investigación resaltó la importancia del valor de la cartografía temática y multitemporal como herramienta clave para analizar la regeneración vegetal posterior a incendios forestales. En este caso, se evaluó la recuperación de la cobertura vegetal afectada por el incendio ocurrido en enero de 2023 en La Higuera, provincia de Córdoba (Argentina), que afectó una superficie de 142 hectáreas cubiertas por matorrales, arbustos y monte nativo.

Se emplearon imágenes satelitales Sentinel-2 (nivel de procesamiento L2A) y se calcularon índices multiespectrales, tales como el NDVI y el NBR, el dNDVI y el dNBR, para detectar el daño y observar la dinámica de recuperación. La metodología combinó técnicas de análisis espacial, estadísticos descriptivos y representación cartográfica multitemporal, permitiendo caracterizar el área afectada, clasificar la severidad del daño y dar seguimiento a los procesos de regeneración. Se utilizó el software libre QGIS, permitiendo una integración eficiente con los sistemas de información geográficos.

Además, la elaboración de mapas temáticos facilitó la interpretación visualmente de los cambios observados a través del tiempo. Estos mapas, basados en los índices de teledetección, proporcionaron una comprensión espacial detallada del estado de la vegetación, la severidad del daño y los patrones de recuperación.

Asimismo, se busca establecer una estructura de datos organizada y escalable que permita la incorporación futura de nueva información, y que pueda ser utilizada por diversos tipos de usuarios. Entre ellos se incluyen organismos gubernamentales como la Secretaría de Gestión de Riesgo de Córdoba, la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), así como municipios, organizaciones ambientales, entre otros.

En conclusión, el trabajo destaca la relevancia de la Cartografía y la utilidad de la Teledetección en el análisis de impactos ambientales, brindando información espacial clave para la gestión del territorio, la prevención de riesgos y la planificación de estrategias de restauración.

ABSTRACT

This research highlighted the importance of thematic and multi-temporal cartography as a key tool for analyzing vegetation regeneration after forest fires. In this case, we evaluated the recovery of vegetation cover affected by the fire that occurred in January 2023 in La Higuera, Córdoba province (Argentina), which impacted an área of 142 hectares covered by scrubland, bushes, and native forest.

We used Sentinel-2 satellite images (L2A processing level) and calculated multispectral indices, such as NDVI and NBR, along with dNDVI and dNBR, to detect damage and observe recovery dynamics. The methodology combined spatial analysis techniques, descriptive statistics, and multi-temporal cartographic representation, allowing us to characterize the affected área, classify damage severity, and monitor regeneration processes. We used the free software QGIS, enabling efficient integration with geographic information systems.

Furthermore, the creation of thematic maps visually facilitated the interpretation of observed changes over time. These maps, based on remote sensing indices, provided a detailed spatial understanding of vegetation status, damage severity, and recovery patterns.

We also aim to establish an organized and scalable data structure that allows for the future incorporation of new information and can be used by various types of users. These include government agencies such as the Secretary of Risk Management of Córdoba, the National Commission of Space Activities (CONAE), the National Institute of Agricultural Technology (INTA), as well as municipalities, environmental organizations, among others.

In conclusion, this work emphasizes the relevance of cartography and the utility of remote sensing in analyzing environmental impacts, providing key spatial information for territory management, risk prevention, and restoration strategy planning.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS 2
RESUMEN....3
ABSTRACT 4

CAPÍTULO 1....9
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS 9
1.1 Introducción 9
1.2 Objetivos 11

CAPÍTULO 2....12
ÁREA DE ESTUDIO....12
2.1 Ubicación 12
2.2 Vegetación 13
2.3 Características topográficas....14
2.4 Características climáticas 17
2.5 Características antropológicas....17

CAPÍTULO 3....19
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA....19
3.1 Teledetección....19
3.1.1 Elementos que conforman un sistema de teledetección 20
3.2 Satélites y sensores....20
3.2.1 Características generales 21
3.3 Imágenes satelitales 23
3.4 Índices multiespectrales....24
3.4.1 Índice NDVI....24
3.4.2 Índice NBR....25
3.4.3 Índice diferenciados 25
3.5 Proyecciones cartográficas....26
3.6 Sistema de información geográfica....27

CAPÍTULO 4....29
DATOS 29
4.1 Características de imágenes Sentinel....29
4.2 Datos principales 31

4.3 Datos secundarios 33
4.4 Software empleado 34

CAPÍTULO 5....35
METODOLOGÍA....35
5.1 Flujo de trabajo 35
5.2 Problemática 36
5.3 Análisis de requerimientos 36
5.4 Compilación y análisis de antecedentes 37
5.5 Adquisición de Imágenes satelitales 38
5.6 Procesamiento de datos 39
5.7 Análisis....41
5.7.1 Análisis del área previa al incendio 41
5.7.2 Delimitar el área quemada 42
5.7.3 Evaluar la severidad del incendio....42
5.7.4 Análisis multitemporal de la evolución del estado de la vegetación 42
5.8 Generación Cartográfica 44
5.9 Sistema de información geográfico 45

CAPÍTULO 6....46
RESULTADOS 46
6.1 Análisis Pre-incendio....46
6.2 Delimitación del área afectada por el incendio....46
6.3 Análisis Post-incendio 49
6.3.1 Evaluación de la severidad del incendio 51
6.3.2 Recuperación Vegetal (12 y 24 meses) 56

CAPÍTULO 7....57
CONCLUSIÓN....57

CAPÍTULO 8....59
REFERENCIAS 59
8.1 Referencias web 61

CAPÍTULO 9....63
ANEXO 63
9.1 Abreviaturas 63

9.2 Procedimientos 66
9.2.1 Nomenclatura de descarga 66
9.2.2 Descarga de imágenes 66
9.2.3 Preparación.....67
9.3 Tablas 69
9.4 Mapas 72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.2. Cobertura vegetal del área de estudio. Elaboración propia..... 14

Figura 2.3. Modelo Digital de Terreno (MDT) del área de estudio. Elaboración propia a partir del MDT del IGN, con resolución espacial de 30 m..... 16

Figura 2.4. Topografía del área de estudio representada mediante curvas de nivel. Elaboración propia. 16

Figura 3.1. Bandas del espectro electromagnético. Fuente: Programa de capacitación en teledetección aplicada de la NASA..... 19

Figura 3.2. Satélites de la NASA. Fuente: Satélites, sensores y modelos de sistemas terrestres de la NASA usados para la gestión de recursos hídricos..... 21

Figura 4.1. Configuración orbital de los dos satélites Sentinel-2. Fuente: www.sentiwiki.copernicus.eu.. 29

Figura 4.2. Representación esquemática de las bandas espectrales del Sentinel-2. Fuente ESA..... 31

Figura 5.1. Esquema del flujo metodológico. Elaboración propia..... 35

Figura 5.2. Vista general del sitio de descarga de Copernicus EU. Fuente: https://browser.dataspace... 38

Figura 5.3. Herramienta Calculadora Ráster del software QGIS. Imagen de elaboración propia..... 41

Figura 6.1. Clasificación de la cobertura vegetal por medio de diferentes índices espectrales. A la izquierda NDVI y a la derecha NBR. Elaboración propia..... 46

Figura 6.2. Comparativa de la detección del área afectada por el incendio forestal por medio de diferentes índices espectrales.A la izquierda NDVI y a la derecha NBR. Elaboración propia. 47

Figura 6.3. Delimitación del área afectada por el incendio forestal mediante el análisis de los índices dNDVI (a la izquierda) y dNBR (a la derechaa). Elaboración propia..... 48

*Figura 6.4. Superficie del área afectada por el incendio. **A** Superficie obtenida de IDECOR. **B** Superficie calculada por medio de los índices. **C** Comparación superpuesta de ambas áreas. Elaboración propia. 48*

Figura 6.5. Evolución temporal de los índices espectrales (NDVI, NBR, dNDVI, dNBR) entre diciembre de 2022 y enero de 2025. Elaboración propia. 51

Figura 6.6. Índices espectrales NDVI, NBR respectivamente (superior) e índices diferenciados de severidad/recuperación -dNDVI, dNBR- (inferior), correspondientes a la etapa de Recuperación temprana (07/05/2023). Nota: Los índices dNDVI y dNBR fueron calculados tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022. Elaboración propia. 52

Figura 6.7. Índices espectrales NDVI, NBR respectivamente (superior) e índices diferenciados de severidad/recuperación -dNDVI, dNBR- (inferior), correspondientes a la etapa de Recuperación intermedia (19/09/2023). Nota: Los índices dNDVI y dNBR fueron calculados tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022. Elaboración propia. 53

Figura 6.8. Índices espectrales NDVI, NBR respectivamente (superior) e índices diferenciados de severidad/recuperación -dNDVI, dNBR- (inferior), correspondientes a la etapa de Recuperación tardía (17/01/2024). Nota: Los índices dNDVI y dNBR fueron calculados tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022. Elaboración propia. 54

Figura 6.9. Índices espectrales NDVI, NBR respectivamente (superior) e índices diferenciados de severidad/recuperación -dNDVI, dNBR- (inferior), correspondientes a la etapa de Recuperación a largo

plazo (06/01/2025)). Nota: Los índices dNDVI y dNBR fueron calculados tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022. Elaboración propia. 55
Figura 9.1. Formato de descarga Sentinel 2. Elaboración propia. 66
Figura 9.2. Paquete de datos del Sentinel2 L2A. Fuente: https://browser.dataspace. 67
Figura 9.3. Formato de descarga de las bandas electromagnéticas del Sentinel 2. Elaboración propia. . 67
Figura 9.4. Carga de las imágenes en el software para su reproyección. Elaboración propia. 68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Bandas espectrales del Sentinel-2. Fuente Dávila (2023). 30
Tabla 4.2. Imágenes satelitales empleadas. Elaboración propia. 33
Tabla 5.1. Clasificación de clase indices ecpectrales para cobertura vegetal. Fuente Aquino et al. (2012). 43
Tabla 5.2. Clasificación de clase dNBR. Fuente https://un-spider.org/es/node/10959. 43
Tabla 5.3. Clasificación de clase dNDVI. Fuente Chuvieco et al. (2010). 43
Tabla 6.1. Extección del área afectada por el incendio forestal. Elaboración propia. 48
Tabla 6.2. Estadísticas descriptivas para la delimitación del área en estudio. Elaboración propia. 49
Tabla 6.3. Selección de imágenes para cuantificar datos. Elaboración propia. 49
Tabla 9.3.1. Estadísticas del NDVI. Elaboración propia. 69
Tabla 9.3.2. Estadísticas del NBR. Elaboración propia. 70
Tabla 9.3.3. Estadísticas del dNDVI. Elaboración propia. 70
Tabla 9.3.4. Estadísticas del dNBR. Elaboración propia. 71

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1. Cálculo NDVI. Fuente Ashraf et al. (2015) 24
Ecuación 3.2. Calulo NBR. Fuente United Nations Office for Outer Space Affairs. 25
Ecuación 3.3. Cálculo dNDVI. Fuente McKenna et al. (2018) 26
Ecuación 3.4. Cálculo dNBR. Fuente McKenna et al. (2018) 26

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Los incendios forestales tienen un impacto significativo que trascienden las fronteras locales, extendiéndose a niveles regionales y globales. Esto se debe a su capacidad para arrasar vastas extensiones de terreno en poco tiempo, la destrucción de la flora y la fauna, la contaminación del aire (Mateos et al., 2019). Sumado la amenaza para la seguridad y el bienestar de las poblaciones cercanas.

Su origen se encuentra principalmente en acciones humanas, ya sea por descuidos o de forma intencional, aunque también pueden ser desencadenados por factores climáticos. Sin embargo, su combustión, propagación y duración están influenciados por diversos factores ambientales y antropogénicos, como condiciones meteorológicas, topográficas, características del material combustible y la presencia de vías que actúen como calles cortafuego (Di Bella et al., 2008).

En Córdoba, los incendios forestales son recurrentes debido a una combinación de condiciones climáticas adversas, como sequías y altas temperaturas, así como actividades humanas irresponsables, ya sean quemas no controladas, negligencia en el manejo de fuegos, entre otros. Durante el año 2023, la provincia de Córdoba registró 446 incendios forestales que impactaron en un total de 40.803 hectáreas (Infraestructura de datos espaciales de la provincia de Córdoba -IDECOR-, 2024). Este fenómeno no es aislado, ya que el año anterior, 2022, también experimentó un número similar de incendios, aunque con una superficie quemada significativamente mayor (81.544 hectáreas).

Ante este escenario, la provincia ha desarrollado esfuerzos institucionales para el monitoreo y evaluación de incendios, como el trabajo coordinado de la Mesa Técnica de Áreas Quemadas, coordinada por la Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil, con participación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y otros organismos. Estas acciones han contribuido a la cuantificación de los daños y a la

identificación de patrones espaciales y áreas críticas, proporcionando información relevante para la gestión y el monitoreo de los incendios forestales.

En este escenario, resulta necesario contar con una estrategia que permita informar y mejorar las acciones de prevención y respuesta ante incendios forestales, desde un enfoque multidisciplinario que considere tanto los factores naturales como los humanos en la gestión de este fenómeno. Para ello, es indispensable contar con cartografía que permita visualizar de forma rápida y sencilla los daños generados por el incendio forestal, así como poder monitorear la trayectoria del proceso de recuperación.

El presente trabajo, integra herramientas de procesamiento digital de imágenes, cálculo de índices espectrales, análisis multitemporal y representación cartográfica temática. Para ello, se utilizaron datos satelitales y software de procesamiento de libre acceso, lo que promueve la replicabilidad del estudio y fomenta el uso de herramientas abiertas en el ámbito académico y técnico.

La información generada, además de tener valor científico y técnico, puede ser integrada en un sistema de información geográfica (SIG). Esto busca establecer una estructura de datos organizada y escalable, para su aplicación en la toma de decisiones por parte de organismos públicos, profesionales en la gestión ambiental, docentes, estudiantes, y cualquier persona interesada en la problemática de los incendios forestales y la regeneración de la vegetación.

En este contexto, la teledetección se presenta como una herramienta fundamental para evaluar la severidad y monitorear la dinámica de la regeneración vegetal en distintas escalas espaciales y temporales. Numerosos estudios han demostrado su eficacia, como los realizados por Di Bella et al. (2008) y Salinero Chuvieco (2009), quienes destacan su utilidad en táreas de prevención, seguimiento y evaluación de incendios. Asimismo, Salinero Chuvieco et al. (2007) desarrollaron un modelo de peligro de incendios forestales a partir de la integración de datos satelitales y sistemas de información geográfica (SIG). Las imágenes proporcionadas por los satélites facilitan el monitoreo detallado de las zonas afectadas, permitiendo identificar áreas prioritarias para la restauración ecológica (Salinero Chuvieco, 2020; Castillo et al., 2023). Por su parte, el análisis de la recuperación post-incendio se basa en series temporales de imágenes

satelitales, las cuales permiten identificar patrones de regeneración y evaluar la influencia de factores como la topografía y el clima. Un ejemplo de ello es el estudio de la Puente García (2017), quien utilizó imágenes MODIS para analizar el proceso de regeneración vegetal en la región de Cantabria, España.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es generar cartografía temática a partir de los resultados obtenidos del análisis multitemporal de imágenes satelitales, mediante la elaboración de mapas de severidad del incendio y de recuperación de la cobertura vegetal. Asimismo, se busca integrar los productos cartográficos y las capas de información geoespacial generadas en un SIG, con el propósito de representar, organizar, visualizar y analizar espacialmente el proceso de recuperación de la cobertura vegetal tras el incendio forestal ocurrido en enero de 2023 en la zona de La Higuera, provincia de Córdoba.

Los objetivos secundarios son:

1. Obtener imágenes satelitales multitemporales Sentinel-2 que representen el estado de la cobertura vegetal antes del incendio, inmediatamente después del evento y durante el proceso de recuperación, hasta 24 meses posteriores al incendio. Las características técnicas y los criterios de selección de las imágenes utilizadas se detallan en el capítulo 4, ítem 4.2 Datos principales.

2. Calcular y analizar índices espectrales (NDVI, NBR, dNDVI y dNBR) que permitan cuantificar la extensión de los daños causados, el grado de severidad y el ritmo de recuperación de la cobertura vegetal.

3. Clasificar los valores obtenidos en categorías temáticas, con el fin de facilitar la interpretación espacial de los datos.

4. Desarrollar un análisis multitemporal que permita visualizar la evolución espacio-temporal del proceso de regeneración vegetal en el área de estudio.

CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación

El área de estudio abarca una extensión de 1,42 km² (142 ha) y se localiza en el departamento de Cruz del Eje, provincia de Córdoba, Argentina. La extensión afectada limita al norte con una zona rural dominada por matorrales y arbustos, al este con la ruta provincial 15, al sur con la localidad de La Higuera, y al oeste con el río Salsacate (Figura 2.1).

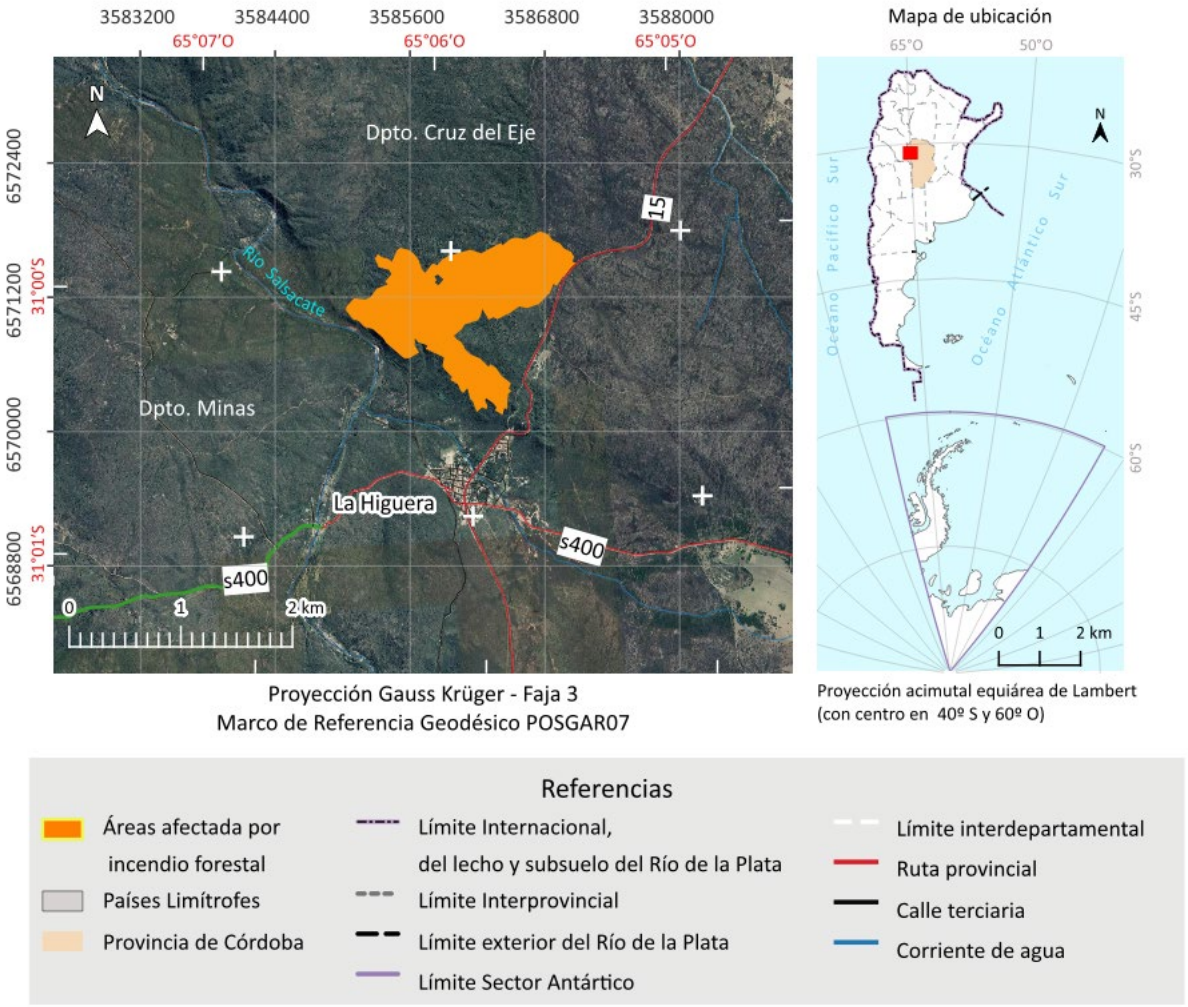


Figura 2.1. Área de estudio afectada por incendio forestal en enero de 2023. Elaboración propia.

Esta área es de gran relevancia ecológica, ya que forma parte de la Cuenca Hidrográfica Salinas Grandes, desempeñando un papel significativo en la dinámica hídrica y en la conservación de la biodiversidad (Castillo et al., 2023). Asimismo, sus características

topográficas y ambientales condicionan la distribución de la vegetación y pueden influir en la dinámica y propagación de los incendios, así como en los procesos erosivos posteriores al fuego. En particular, el área de estudio presenta una altitud media de 644 metros y una pendiente media de 6,9 %, variables que, junto con las características de la cobertura vegetal y las condiciones ambientales, constituyen elementos relevantes para comprender la respuesta del territorio frente al incendio y su posterior recuperación (Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil/IDECOR, 2023).

En los apartados siguientes se profundizará en estas características, considerando aquellos factores que permiten describir las condiciones del área de estudio y analizar su posible influencia sobre la respuesta de la vegetación durante el período posterior al incendio.

2.2 Vegetación

La vegetación del área afectada se compone principalmente de formaciones de matorral y arbustal (53%) y comunidades de monte (47%), tal como se observa en la Figura 2.2. Ambas clases de cobertura presentan una diferenciación estructural significativa (Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil -SGRCCyPC, 2023). El primero incluye aquellas coberturas naturales de especies leñosas que no alcanzan los umbrales para ser consideradas monte. Por otro lado, los segundos se caracterizan por la presencia de especies arbóreas (nativas o exóticas) que alcanzan umbrales de 5 m de altura mínima y cubren el 20 % del área con sus copas (Mapa de Cobertura y Uso de Suelo de la Provincia de Córdoba, 2022).

El matorral y arbustal, típicos de zonas semiáridas, juegan un papel crucial en la retención del suelo y la prevención de la erosión. Estas formas vegetales son especialmente vulnerables a los incendios debido a su alta inflamabilidad y su capacidad limitada para regenerarse rápidamente tras eventos de fuego recurrentes (Castillo et al., 2023). Las especies más representativas incluyen el algarrobo (*Prosopis spp.*), el chañar (*Geoffroea decorticans*), y diversas especies de cactáceas, todas ellas adaptadas a las condiciones de estrés hídrico de la región.

El monte, por su parte, está compuesto por especies arbóreas como el quebracho colorado (*Schinopsis lorentzii*), el algarrobo negro y el molle (*Schinus areira*) (Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil, 2023). Aunque este tipo de vegetación tiene una mayor capacidad de recuperación, se ve afectada por actividades humanas como la agricultura, la ganadería, y la explotación forestal, lo que ha provocado una disminución de su densidad y su distribución en la región.

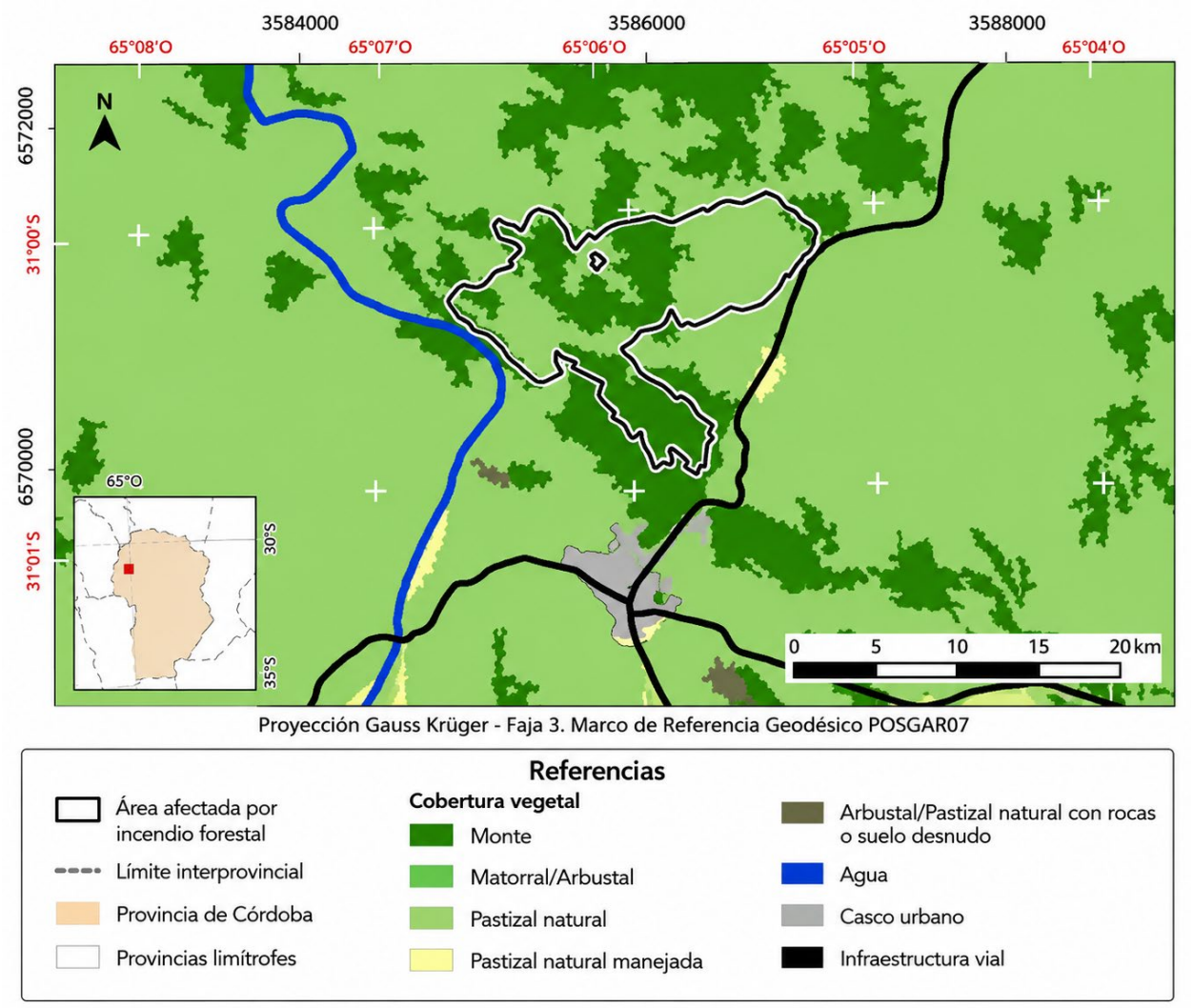


Figura 2.2. Cobertura vegetal del área de estudio. Elaboración propia.

2.3 Características topográficas

El área de estudio presenta una altitud media de 644 m sobre el nivel del mar, valor calculado a partir del Modelo Digital de Terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con una resolución espacial de 30 m. Este modelo permite representar la elevación del terreno a partir de datos altimétricos y constituye una herramienta para la

caracterización de las condiciones topográficas del área. En la Figura 2.3 se presenta el Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado, en el cual se representa la configuración del relieve del área de estudio.

La topografía del área presenta una pendiente media de 6,9 %, de acuerdo con los datos obtenidos de IDECOR. Este valor caracteriza al área como un relieve predominantemente suave a ligeramente inclinado. La distribución espacial de las variaciones del relieve puede apreciarse mediante las curvas de nivel representadas en la Figura 2.4, las cuales permiten identificar los cambios de elevación y la configuración topográfica de la zona.

La pendiente constituye una variable relevante para la caracterización del área de estudio, debido a su relación con el escurrimiento superficial, los procesos erosivos y la propagación del fuego. En áreas afectadas por incendios, la pérdida de cobertura vegetal puede reducir la protección del suelo frente al impacto de las precipitaciones y favorecer el escurrimiento superficial y los procesos erosivos posteriores al fuego (Castillo et al., 2023). Asimismo, las características topográficas pueden influir en el comportamiento y propagación del fuego, aunque su efecto depende también de otras variables, como las condiciones meteorológicas, la cobertura vegetal y la dirección e intensidad del viento (Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil, 2023).

La caracterización de la altitud, la pendiente y la configuración del relieve permite establecer el contexto físico del área de estudio y constituye un antecedente para interpretar posteriormente las diferencias observadas en la severidad del incendio y en la recuperación de la cobertura vegetal.

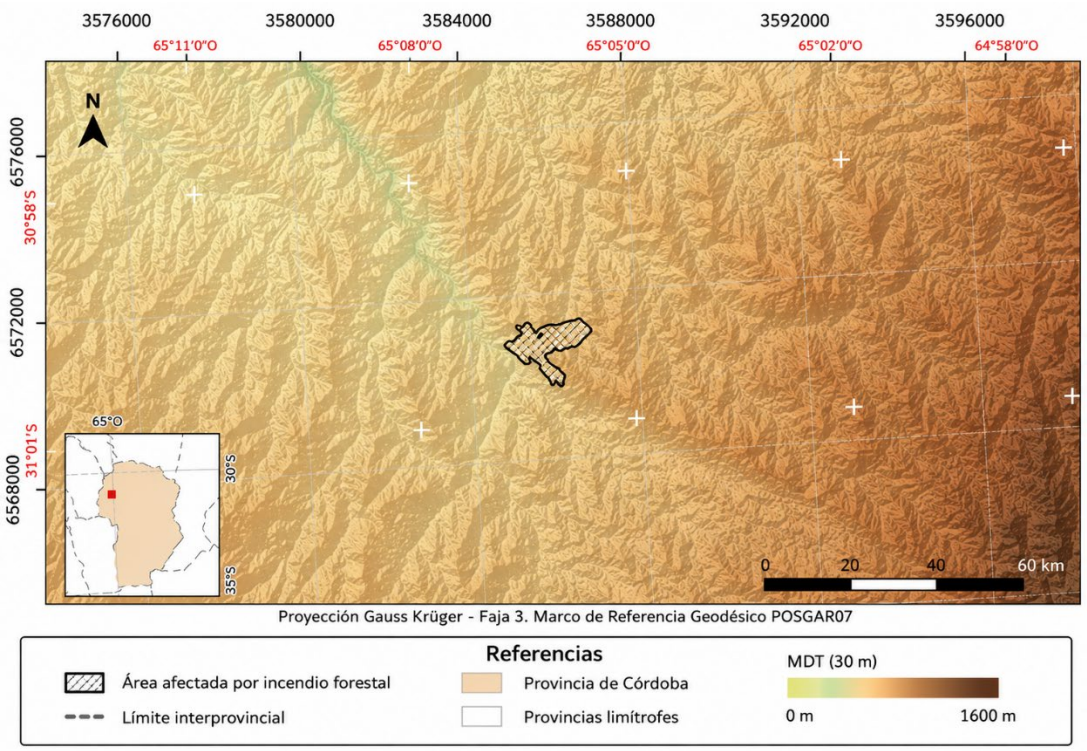


Figura 2.3. Modelo Digital de Terreno (MDT) del área de estudio. Elaboración propia a partir del MDT del IGN, con resolución espacial de 30 m.

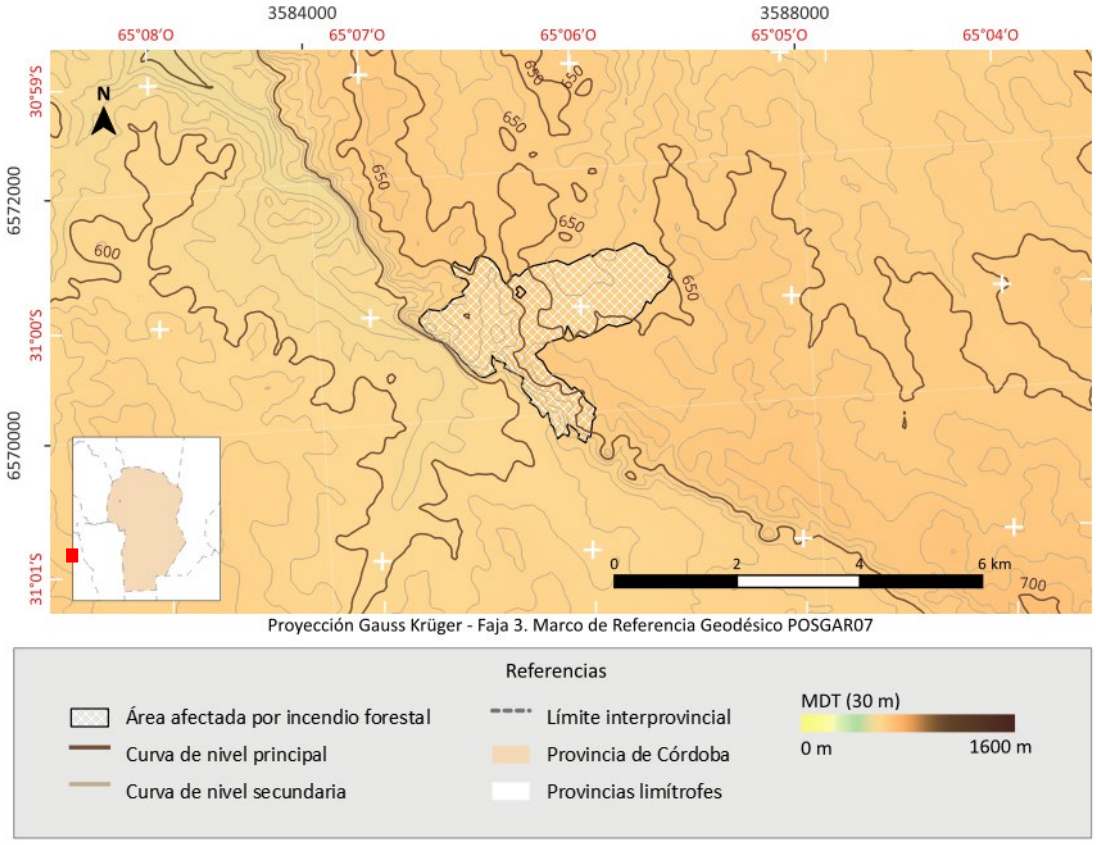


Figura 2.4. Topografía del área de estudio representada mediante curvas de nivel. Elaboración propia.

2.4 Características climáticas

El clima de la región es cálido templado a subtropical, con una temperatura media anual de 17.4 °C, presentando variaciones entre 16 °C en el noreste y 19 °C en el noroeste y este. La precipitación media anual es de 790 mm, concentrada principalmente entre los meses de octubre y mayo, lo que coincide con la temporada de crecimiento de la vegetación (Castillo et al., 2023).

Durante el invierno, la región experimenta una marcada estación seca, lo que aumenta el riesgo de incendios forestales debido a la acumulación de material combustible seco, como ramas caídas y pastizales secos (Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil, 2023). El régimen de vientos predominante en la región, en combinación con las altas temperaturas durante el verano, pueden intensificar la extensión y severidad de los incendios forestales.
Es importante mencionar que, durante el primer trimestre de 2023, se registraron condiciones de sequía leve a moderada en gran parte del territorio occidental y central de la provincia, con anomalías negativas de precipitaciones que alcanzaron déficits de entre 50 mm y 100 mm. Además, las temperaturas registraron un aumento de entre (1 y 2) °C respecto a la media histórica para el mismo período (Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil, 2023).

2.5 Características antropológicas

El área de estudio se encuentra en una región que ha sido históricamente afectada por actividades humanas, como la agricultura y la ganadería extensiva, que han contribuido a la fragmentación de la vegetación natural (Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil, 2023). La expansión de cultivos, en particular de olivo y la tala de árboles nativos, ha reducido la resiliencia del ecosistema frente a los incendios forestales. Estos procesos están en línea con lo descrito por Cattáneo et al. (2015), quienes señalaron que las actividades agrícolas en los espacios rurales de Córdoba han dejado huellas no solo en el paisaje físico, sino también en los ecosistemas locales, alterando su capacidad de recuperación frente a disturbios como los incendios.

La proximidad de La Higuera y otras localidades rurales también ha aumentado la presión sobre los recursos naturales de la región, lo que, a su vez, ha incrementado el riesgo de incendios debido a la acumulación de material combustible y la alteración de los ecosistemas locales (Castillo et al., 2023). En este sentido, cobra especial relevancia destacar que el límite sur del área del disturbio colinda directamente con el ejido urbano de la localidad de La Higuera, ubicándose las viviendas y las estructuras comunitarias a una distancia inferior a 1 km del perímetro quemado. Asimismo, el límite este se encuentra flanqueado por la Ruta Provincial 15, un corredor vial clave de la región como se observa en la Figura 2.1.

El área afectada está dentro de la Zona 2 de Riesgo de Incendio, clasificada como de riesgo moderado según la Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil, (2023). Esta categoría responde a una combinación de factores como el clima seco y las actividades humanas. Durante los meses de verano, el riesgo de incendios aumenta considerablemente, fenómeno que se ve agravado por la falta de manejo y gestión adecuada de los bosques y de la vegetación nativa. Esta situación resalta la necesidad de contar con herramientas eficaces para la evaluación y monitoreo de áreas vulnerables, tanto para mitigar el impacto de los incendios como para planificar acciones de restauración posteriores.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Teledetección

La Teledetección, también conocida como detección o percepción remota, se ha consolidado como una herramienta clave para la gestión ambiental. Según la NASA –del inglés, National Aeronautics and Space Administration- (2023), los fundamentos de la teledetección se basan en la observación remota de la Tierra, mediante sensores instalados en plataformas espaciales, que registran la radiación reflejada o emitida desde su superficie. Esta técnica permite monitorear cambios en el entorno de manera continua y a gran escala. Su capacidad para detectar diferentes bandas del espectro electromagnético (Figura 3.1) proporciona datos precisos y detallados sobre la vegetación, el suelo, la atmósfera y otros elementos.

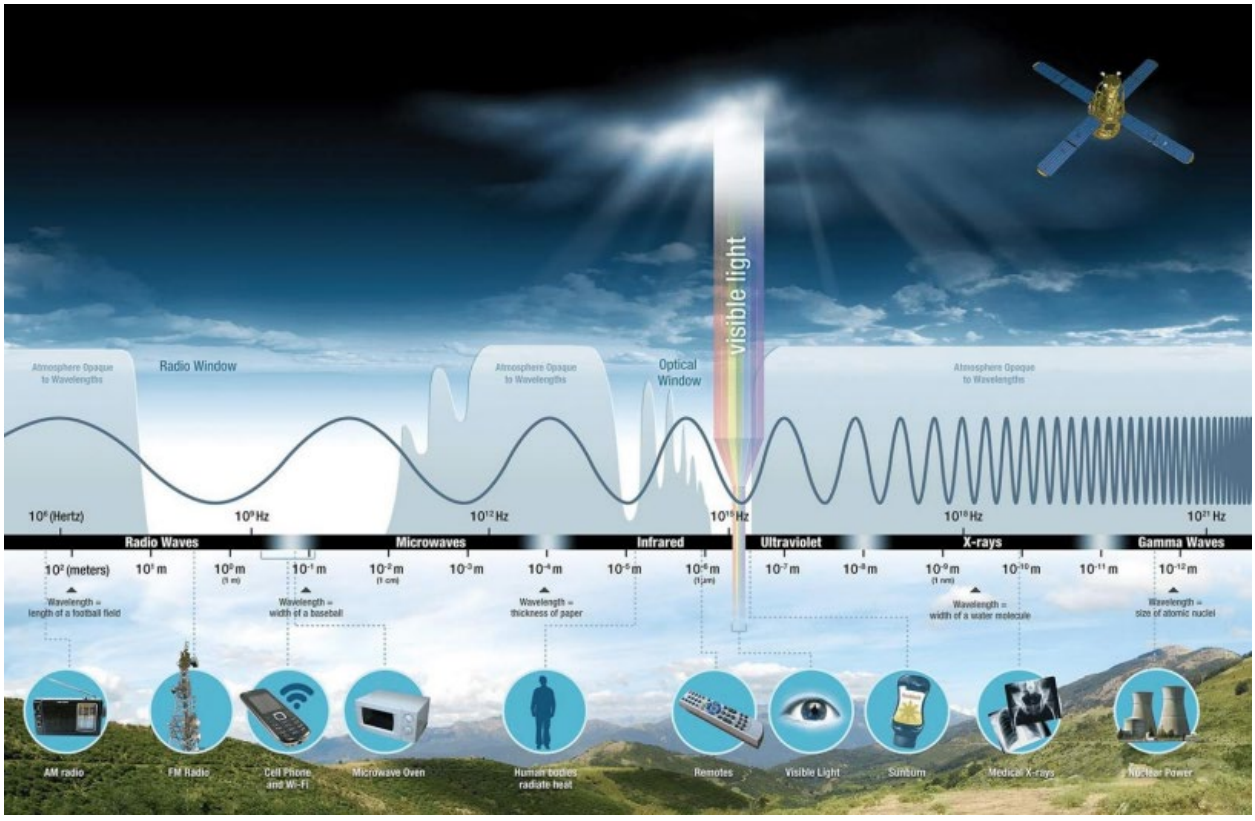


Figura 3.1. Bandas del espectro electromagnético. Fuente: Programa de capacitación en teledetección aplicada de la NASA.

A su vez, el avance en la tecnología de sensores ha posibilitado la obtención de imágenes de alta resolución, que, combinadas con modelos matemáticos y datos históricos, facilitan la identificación de patrones de cambio en el paisaje (NASA, 2023; Salinero Chuvieco, 2020). Esto resulta particularmente útil en la gestión de incendios forestales, Salinero Chuvieco (2009) resalta que los sensores remotos, diseñados específicamente para la detección de fuego, tienen la capacidad de captar y analizar la energía térmica y radiación electromagnética emitida por los mismos en diversas longitudes de onda.

3.1.1 Elementos que conforman un sistema de teledetección

Los componentes de un sistema de teledetección (Cabezas Martin, 2020) son:

1. **Fuente de energía:** Es el origen del flujo energético detectado por el sensor.
2. **Cubierta terrestre:** Comprende las distintas coberturas terrestres como vegetación, suelo, agua, etcétera.
3. **Sistema sensor:** Consiste en el sensor y la plataforma que lo sostiene. Su función es captar la energía de las cubiertas terrestres, codificarla y enviarla al sistema de recepción.
4. **Sistema de recepción-comercialización:** Recibe la información del sensor, la graba en un formato adecuado, realiza correcciones necesarias y distribuye los datos.
5. **Intérprete:** Se encarga de convertir los datos en información temática.
6. **Usuario final:** Analiza el documento resultante de la interpretación y determina las consecuencias que se derivan de dicha información.

3.2 Satélites y sensores

Se entiende por satélite, en este caso artificial, a un objeto que orbita alrededor de otro cuerpo en el espacio, mientras que los sensores son dispositivos especializados que capturan información sobre la Tierra o el espacio exterior. Ambos están en constante evolución, ya que dependen del desarrollo tecnológico de la época.

Desde el lanzamiento de los primeros satélites, como el Earth Resources Technology Satellite (ERTS), más tarde conocido como Landsat (del programa Landsat de los Estados Unidos), se han sumado otras misiones de diferentes países y agencias espaciales, como las series SPOT (Francia), MOS y JERS (Japón), IRS (India), y los Sentinels, desarrollados en el marco del programa Copernicus de la Unión Europea (Figura 3.2).

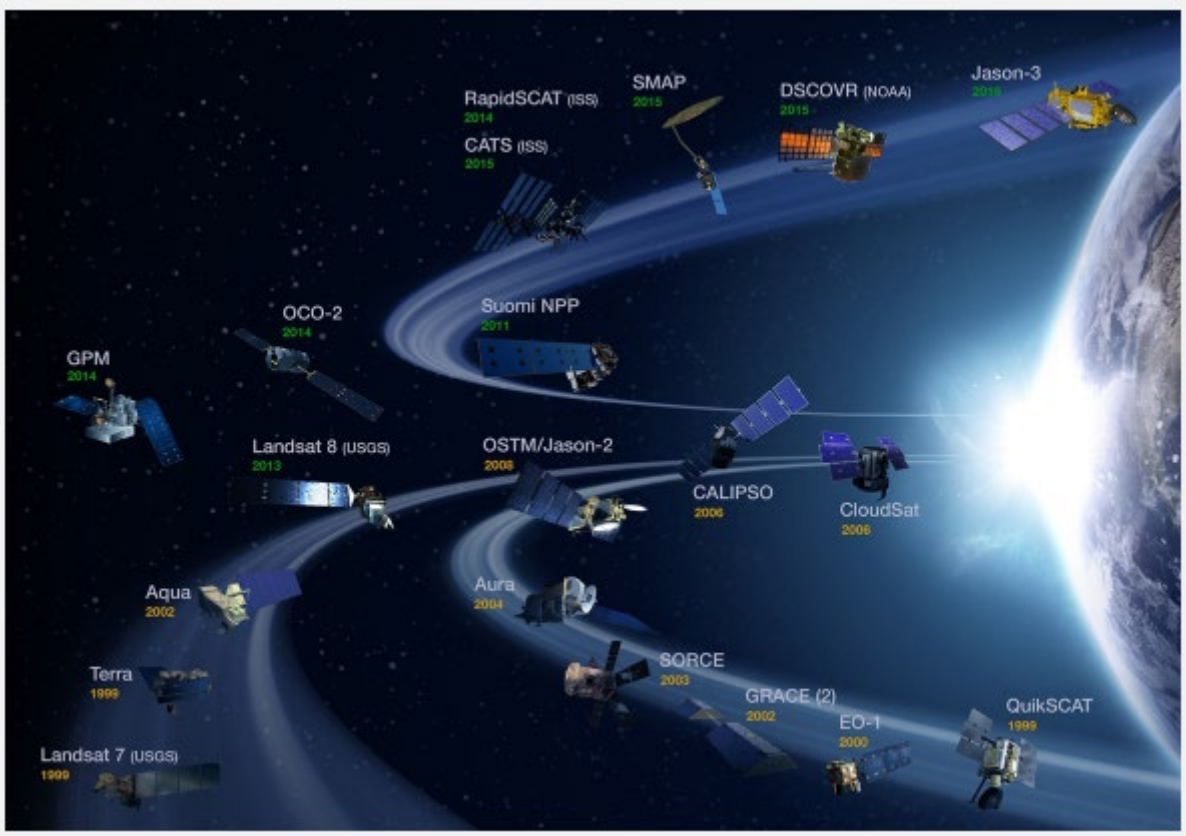


Figura 3.2. Satélites de la NASA. Fuente: Satélites, sensores y modelos de sistemas terrestres de la NASA usados para la gestión de recursos hídricos.

3.2.1 Características generales

Los satélites pueden ser:

A. **Heliosincrónicos:** Describen órbitas casi polares, desplazándose en dirección norte-sur o sur-norte y pasando por los polos o cerca de ellos. Una característica fundamental de este tipo de órbita es que el satélite pasa sobre una determinada zona aproximadamente a la misma hora solar local en cada ciclo orbital,

manteniendo condiciones de iluminación relativamente similares entre las diferentes adquisiciones.

B. **Geoestacionarios:** Orbitan en el mismo sentido de rotación y velocidad angular que la Tierra, situándose sobre el ecuador, por lo que permanecen aparentemente fijos sobre un mismo punto de la superficie terrestre. Esta característica permite la observación continua de una misma región.

Además, pueden operar de dos maneras:

A. **Pasiva:** Utiliza una fuente externa, como el Sol, que emite radiación electromagnética que interactúa con la atmósfera y la superficie terrestre, reflejándose hacia el sensor.

B. **Activa:** La fuente de energía se encuentra en la misma plataforma, emitiendo un pulso que interactúa con la superficie antes de ser recibido y procesado nuevamente.

La capacidad de discriminar información detallada en un objeto detectado se realiza en 4 dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia), que definen cuatro tipos de resolución (Bava, 2003). Estas son:

A. **Resolución espacial:** Este término se refiere al objeto más pequeño que puede distinguirse en la imagen (tamaño de píxel). La resolución depende de la configuración de la órbita del satélite y el diseño del sensor. Diferentes sensores tienen diferentes resoluciones espaciales.

B. **Resolución espectral:** Indica el número y ancho de las bandas espectrales en las que un sensor capta la energía reflejada de la superficie terrestre.

C. **Resolución radiométrica:** También conocida como resolución dinámica, se refiere a la capacidad del sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Se indica por el número de niveles de gris; la mayoría de los sistemas ofrecen 256 niveles por píxel (8 bits).

D. **Resolución temporal:** Se define como la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre, es decir, cada cuánto tiempo el satélite pasa por la misma zona. Esta resolución depende de características de la órbita, como altura, velocidad e inclinación, así como del diseño del sensor.

Cada satélite lleva uno o más sensores o instrumentos con canales espectrales específicos de observación y dependiendo de las características que posean van a tener múltiples aplicaciones en áreas como la meteorología, el mapeo del suelo, la calidad del aire entre otras.

Para esta investigación se utilizaron imágenes satelitales de la misión Sentinel-2, con resolución espacial alta y resolución temporal de 5 días. En el capítulo 4, ítem 4.2 Datos principales se detallan las imágenes utilizadas con sus características.

3.3 Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales son representaciones visuales, obtenidas por los satélites artificiales que capturan información de la superficie terrestre en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Su interpretación se realiza mediante la observación de características como la forma, el tamaño, la textura, el brillo y el color de los objetos.

Según Dávila (2023), el procesamiento de las imágenes satelitales es esencial para su correcta interpretación y análisis. La aplicación de algoritmos en este desarrollo permite extraer información útil. Este proceso incluye la corrección geométrica, que eliminan errores generados por la rotación y la curvatura del planeta, y las correcciones radiométricas, que remueven errores originados por componentes atmosféricos o defectos de los instrumentos. Estas correcciones son clave para garantizar la precisión de los análisis.

La unidad mínima de información en una imagen es el píxel, su valor está dado por los niveles digitales (DN, del inglés Digital Number). Asociado a cada DN que conforma la matriz de datos de la imagen, se encuentran los niveles de visualización (NV), que son los valores de grises con los que se representan los pixeles de la imagen en la pantalla (Bava, 2003). Las imágenes que tiene una sola banda, se visualizan en blanco y negro,

mientras que las multiespectrales se visualizan en tres bandas a la vez, estas son: rojo, verde y azul (RGB -del inglés, Red, Green, Blue-). Al realizar diferentes combinaciones de bandas se pueden resaltar distintas coberturas del terreno.

3.4 Índices multiespectrales

Los índices multiespectrales son combinaciones matemáticas de los valores de reflectancia obtenidos en diferentes bandas del espectro electromagnético, con el objetivo de resaltar ciertas características de la superficie terrestre. Estos índices son esenciales para inferir parámetros biofísicos como el estado de salud de la vegetación, contenido de agua y monitoreo ambiental (Salinero Chuvieco, 2009; Guasone et al., 2022; Skrypnychuk Untilov, 2015).

Después de un incendio, se pueden detectar dos señales distintas en el terreno, una corresponde a la superficie recién quemada, y la otra es el resultado de la pérdida de masa forestal a causa del fuego (Cabeza Martin, 2020). Estos patrones de daño pueden caracterizarse utilizando diferentes índices espectrales que permiten identificar zonas quemadas y monitorizar el proceso de regeneración de la vegetación. Entre los índices más comunes se encuentran el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, del inglés Normalized Difference Vegetation Index) y el Índice de Calcinación Normalizado (NBR, del inglés Normalized Burn Ratio), que permiten diferenciar áreas de vegetación saludable de zonas afectadas por el fuego.

3.4.1 Índice NDVI

El NDVI se centra en el contraste entre el rojo y el infrarrojo cercano (NIR), proporcionando información sobre la salud de la vegetación y su actividad fotosintética (Ashraf et al., 2015).

Se calcula empleando la ecuación 3.1:

$$\mathbf{NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)} \qquad \textit{(Ecuación 3.1)}$$

Donde Red = banda roja, NIR = banda del infrarrojo cercano.

Su rango numérico oscila entre -1 y 1. Los valores negativos están asociados a zonas de agua y nieve, los valores próximos a 0 (-0,1 a 0,1) representan suelo desnudo o con escasa vegetación, los valores bajos y positivos representan arbustos y pastizales (aproximadamente de 0,2 a 0,4). De aquí en adelante se puede identificar presencia de vegetación más frondosa asociada a mayor actividad fotosintética.

3.4.2 Índice NBR

El NBR usa bandas NIR y SWIR (infrarrojo de onda corta) para detectar las áreas quemadas, resaltando el contraste entre la vegetación sana y las zonas calcinadas. Esta diferencia permite identificar con precisión el grado de afectación causado por un incendio, siendo una herramienta clave para la evaluación del impacto y la delimitación de áreas críticas (United Nations Office for Outer Space Affaire, s. f.).

Se calcula empleando la ecuación 3.2:

$$\mathbf{NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)} \qquad \textit{(Ecuación 3.2)}$$

Donde NIR = banda del infrarrojo cercano; SWIR = banda del infrarrojo de onda corta.

Sus valores están comprendidos entre -1 y 1. Donde los valores negativos corresponden a zonas afectadas por el fuego mientras que valores positivos representan zonas sanas o en fase de regeneración si previamente ha existido un incendio.

3.4.3 Índice diferenciados

La utilidad del NDVI y el NBR se potencia mediante el cálculo de índices derivados, como el dNDVI (diferencia del índice de vegetación de diferencia normalizada) y dNBR (diferencia del índice de calcinación normalizada), los cuales se calculan a partir de la diferencia entre los valores obtenidos antes y después del incendio, permitiendo cuantificar el cambio absoluto en la cobertura vegetal causado por el fuego (McKenna et al., 2018). Su principal utilidad radica en que brindan una medida directa de la severidad del daño, al evidenciar la pérdida de vegetación y su magnitud. El dNDVI es útil para

detectar reducciones en la actividad fotosintética, mientras que el dNBR se especializa en identificar zonas severamente quemadas.

Se calculan empleando las ecuaciones 3.3 y 3.4:

$$\mathbf{dNDVI = antesNDVI - posteriorNDVI} \qquad \textit{(Ecuación 3.3)}$$

$$\mathbf{dNBR = antesNBR - posteriorNBR} \qquad \textit{(Ecuación 3.4)}$$

El NDVI y el NBR presentan un rango teórico de valores comprendido entre −1 y 1. Al calcular sus respectivos índices diferenciales, dNDVI y dNBR, mediante la diferencia entre los valores obtenidos antes y después del incendio, el rango teórico se extiende de −2 a 2, (Key et al., 2006). Los valores positivos indican una disminución del NBR posterior al incendio respecto de la condición previa, mientras que valores positivos de mayor magnitud generalmente se asocian con una mayor afectación de la vegetación y, por consiguiente, con una mayor severidad del incendio. Los valores cercanos a cero representan cambios reducidos entre ambas fechas, mientras que los valores negativos pueden asociarse con un aumento de la vegetación o procesos de recuperación.

3.5 Proyecciones cartográficas

Una proyección cartográfica se define como un sistema matemático que permite representar la superficie curva de la Tierra sobre un plano, con el fin de plasmar en dos dimensiones una superficie tridimensional. Cada tipo de proyección conlleva una cierta distorsión en áreas, formas, distancias o direcciones. La selección de la proyección depende de la aplicación, la extensión geográfica del área de estudio y las características que se deseen preservar (Asociación Cartográfica Internacional -ICA-, 2016).

Las imágenes satelitales pueden estar referenciadas en diferentes sistemas de proyecciones, dependiendo de su fuente. Una de la más utilizadas es la Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), la cual es una proyección cilíndrica conforme, lo que significa que preserva los ángulos que forman dos líneas imaginarias en la superficie terrestre. Otra opción común es el sistema de coordenadas geográficas, qué

utiliza el datum WGS84 (del inglés, World Geodetic System 1984), y es ampliamente empleado como referencia global en sistemas de navegación.

Sin embargo, aunque las imágenes satelitales suelen tener proyecciones predeterminadas, se las puede reproyectar a sistemas más adecuados para cada caso de estudio. Por ejemplo, Castillo et al. (2023) utilizaron la proyección UTM para analizar la extensión de los incendios en áreas específicas de Córdoba.

En este estudio se utiliza la proyección Gauss-Krüger, que es el sistema oficial de la República Argentina para la cartografía a nivel nacional. Esta es una proyección cilíndrica conforme, transversal y tangente, que al igual que la UTM preserva los ángulos y las formas locales, permitiendo una representación adecuada del territorio a nivel local. La elección de este sistema responde a la necesidad de integración con otras bases de datos geográficas y facilita la producción de cartografía temática integrada en sistemas de información geográfica. Esto último es fundamental para la gestión ambiental, el ordenamiento territorial y la toma de decisiones por parte de autoridades y profesionales interesados en las dinámicas post-incendio.

3.6 Sistema de información geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un conjunto integrado de hardware, software, datos, procedimientos y recursos humanos destinado a la captura, almacenamiento, gestión, análisis y representación de información georreferenciada. Estos sistemas permiten analizar relaciones entre variables geográficas y generar información de apoyo para la toma de decisiones en ámbitos como la planificación territorial, la gestión ambiental, el monitoreo de cambios en el territorio, entre otros.

Los SIG integran datos espaciales y herramientas de análisis que facilitan la generación de conocimiento a partir de la relación entre distintos elementos del espacio geográfico (Olaya, 2014). La información geográfica puede representarse principalmente mediante dos modelos de datos: vectorial y ráster. El modelo vectorial representa entidades discretas mediante primitivas geométricas, como puntos, líneas y polígonos, mientras que el modelo ráster divide el espacio en una malla regular de celdas (píxeles), donde

cada celda almacena un valor asociado a una determinada variable, como la temperatura o la elevación.

En el presente trabajo, los Sistemas de Información Geográfica constituyen una herramienta fundamental para el procesamiento y análisis de la información espacial. A través del software SIG se realizaron táreas de gestión de imágenes satelitales, cálculo de índices espectrales, análisis de datos ráster, integración de información vectorial y generación de cartografía temática. Asimismo, estas herramientas permitieron trabajar con distintos sistemas de referencia y proyecciones cartográficas, facilitando la integración de las diferentes fuentes de información utilizadas para evaluar la severidad del incendio y la recuperación de la cobertura vegetal en el área de estudio.

CAPÍTULO 4

DATOS

El presente proyecto emplea imágenes multiespectrales de alta resolución, obtenidas de los satélites Sentinel-2 L2A (Tabla 4.2), pertenecientes al programa Copernicus, iniciativa de observación de la Tierra de la Unión Europea (EU, del inglés European Union) desarrollada en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA). Las imágenes fueron descargadas gratuitamente a través de la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem (Copernicus Browser).[1]

4.1 Características de imágenes Sentinel

Sentinel es el nombre de los satélites del programa Copernicus que se identifican con los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6, teniendo cada uno características diferentes y capacidades especializadas en los diversos aspectos del monitoreo terrestre y atmosférico (Dávila, 2023).

Sentinel-2, en particular, se dedica a la observación terrestre, principalmente para el monitoreo de la vegetación, cuerpos de agua y cambios en el uso del suelo. La misión está compuesta por dos satélites, Sentinel-2A y Sentinel-2B, que operan en la misma órbita heliosincrónica y se encuentran separados 180° entre sí a lo largo de la órbita (Figura 4.1).

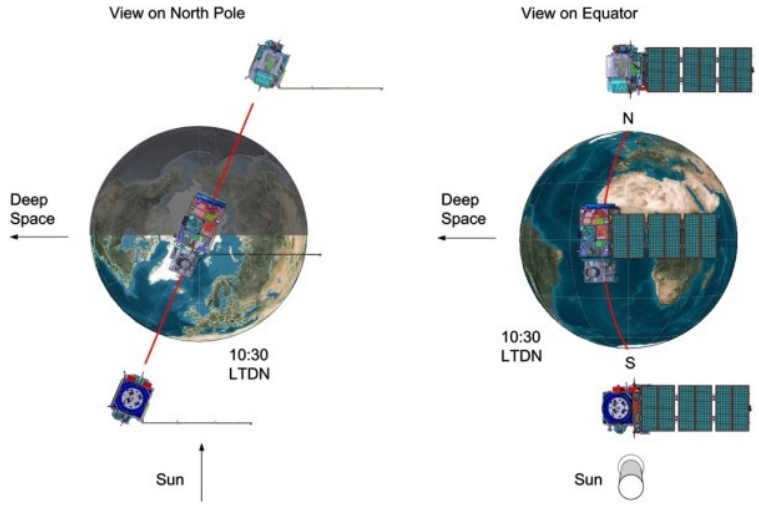


Figura 4.1. Configuración orbital de los dos satélites Sentinel-2. Fuente: www.sentiwiki.copernicus.eu.

[1] https://browser.dataspace.copernicus.eu

Estos satélites proporcionan datos de observación terrestre, que abarcan desde la latitud 56°S hasta 84°N, con una órbita sincrónica al Sol a una altitud de 786 km y un tiempo de revisita global de aproximadamente cinco días (Dávila, 2023).

Sentinel-2 emplea un sensor de imágenes multiespectrales (MSI), que permite obtener datos en trece bandas (Tabla 4.1), abarcando un ancho de barrido de 290 km. La resolución espacial de las bandas es variable: cuatro de ellas presentan una resolución de 10 m, seis de 20 m y tres alcanzan los 60 m (Figura 4.2).

N° de banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución espacial (m)	Descripción
1	443	20	60	Ultra azul (costa y aerosol)
2	490	65	10	Azul
3	560	35	10	Verde
4	665	30	10	Rojo
5	705	15	20	Borde rojo de la vegetación
6	740	15	20	Borde rojo de la vegetación
7	783	20	20	Borde rojo de la vegetación
8	842	115	10	Infrarrojo cercano
8A	865	20	20	Infrarrojo cercano
9	945	20	60	Vapor de agua
10	1380	30	60	Infrarrojo de onda corta - Cirrus
11	1610	90	20	Infrarrojo de onda corta
12	2190	180	20	Infrarrojo de onda corta

Tabla 4.1. Bandas espectrales del Sentinel-2. Fuente Dávila (2023).

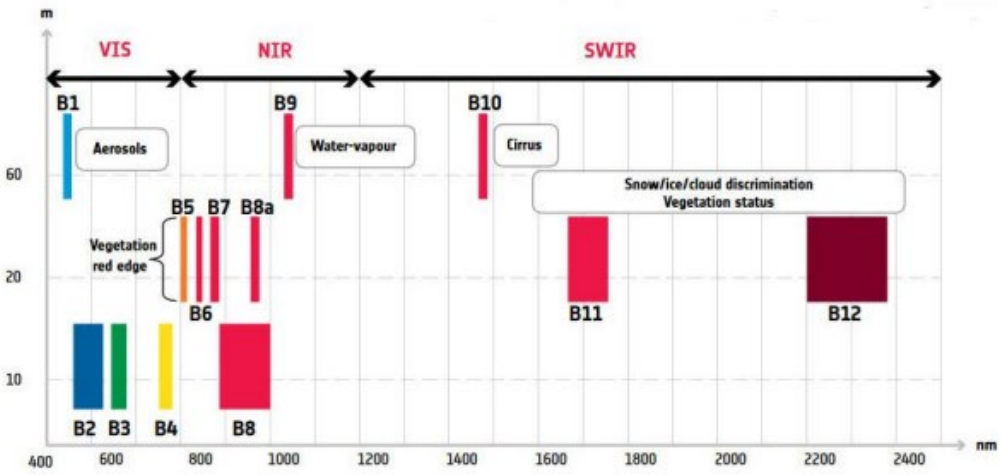


Figura 4.2. Representación esquemática de las bandas espectrales del Sentinel-2. Fuente ESA.

Los datos se distribuyen en grillas de 100 km² correspondientes al nivel de procesamiento L1C. A su vez, las imágenes pueden verse afectadas por la atmósfera, por lo cual, la ESA proporciona el software Sen2Cor, que aplica correcciones atmosféricas a los datos de Sentinel-2 L1C, obteniendo así el producto Sentinel-2 L2A.

Por ende, las imágenes Sentinel-2 L2A se distribuyen con correcciones geométricas y atmosféricas, lo que elimina la necesidad de aplicar procesos adicionales.

4.2 Datos principales

Las imágenes utilizadas presentan las siguientes características:

- Sistema de coordenadas: Coordenadas geográficas con Datum WGS84, según la configuración de descarga seleccionada (véase capítulo 9, ítem 9.2.2 Descarga de imágenes).
- Formato: TIFF (16 bits).
- Resolución: Alta (2500 x 1562) píxeles / *(1405 x 878) píxeles.
- Cobertura de nubes: Se estableció un umbral máximo de cobertura de nubosidad durante el proceso de búsqueda. Posteriormente, se realizó una revisión visual de cada escena para verificar que el área de estudio estuviera libre de nubes o sombras que pudieran afectar el cálculo de los índices espectrales.

Fecha	Cobertura de nubes (%)	Descripción
18-12-2022	20	Pre-incendio

02-01-2023	20	Post-incendio
22-01-2023	20	Post-incendio
16-02-2023	20	Post-incendio
08-03-2023	20	Post-incendio
27-04-2023	30	Post-incendio
07-05-2023	20	Post-incendio
16-06-2023	20	Post-incendio
26-07-2023	20	Post-incendio
15-08-2023	20	Post-incendio
19-09-2023	20	Post-incendio
09-10-2023	20	Post-incendio
13-11-2023	20	Post-incendio
08-12-2023	20	Post-incendio
17-01-2024	20	Post-incendio (1 año aprox.)
16-02-2024	20	Post-incendio
12-03-2024	20	Post-incendio
16-04-2024	20	Post-incendio
11-05-2024	20	Post-incendio
10-06-2024	20	Post-incendio
15-07-2024	20	Post-incendio
14-08-2024	20	Post-incendio
18-09-2024	20	Post-incendio
18-10-2024	20	Post-incendio
22-11-2024	20	Post-incendio

* 22-12-2024	20	Post-incendio
* 06-01-2025	20	Post-incendio (2 año aprox.)

Tabla 4.2. Imágenes satelitales empleadas. Elaboración propia.

La nomenclatura utilizada en los archivos descargados es de carácter descriptivo, facilitando su identificación, organización y posterior procesamiento dentro del entorno SIG, los cuales se detallan en el anexo 9.2 Procedimientos ítem 9.2.1. Nomenclatura de descarga.

4.3 Datos secundarios

Para la generación del sistema de información geográfica, se compilaron datos vectoriales y raster provenientes de los geoportales del Instituto Geográfico Nacional[2] (IGN) y de IDECOR[3]. Estos fueron descargados en formatos estándar, como *.shp (shapefile) para datos vectoriales y *.tiff (GeoTIFF) para datos ráster.

1. Datos descargados del IGN:
   - ❖ Provincia
   - ❖ Países limítrofes
   - ❖ Límite Internacional
   - ❖ Límite del lecho y subsuelo del Río de La Plata
   - ❖ Límite exterior del Río de La Plata
   - ❖ Límite interdepartamental o de partido
   - ❖ Vial provincial
   - ❖ Vial terciaria
   - ❖ Corriente de agua perenne
   - ❖ MDT (30 m)

2. Datos descargados de IDECOR:
   - ❖ Áreas afectadas por incendios 2023

[2] https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG

[3] http://idecor-ws.mapascordoba.gob.ar/geoserver/idecor/wfs

- Cobertura de suelo 2020-2021

4.4 Software empleado

QGIS, también conocido como Quantum GIS, es un software libre y de código abierto, específico para operar como un sistema de información geográfica (SIG). Permite a los usuarios visualizar, editar y analizar datos geoespaciales en múltiples formatos, con una interfaz intuitiva y personalizable. Fue desarrollado inicialmente por Gary Sherman en 2002 en la Universidad de Alaska (Quintanilla, 2024), y está en constante evolución gracias a una comunidad activa que aportan mejoras constantes y nuevas funcionalidades.

Una característica destacada de QGIS es el uso de complementos (plugins), lo que amplía sus capacidades. A través de estos complementos, el software puede integrarse fácilmente con servicios web geoespaciales (WMS, WFS, WMTS), acceder a bases de datos espaciales como PostGIS, y ejecutar procesamientos avanzados mediante bibliotecas externas como GDAL, GRASS, entre otras. Esto convierte a QGIS en una herramienta poderosa, flexible y altamente adaptable a diferentes necesidades.

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA

5.1 Flujo de trabajo

Para el desarrollo de este trabajo se implementó un flujo metodológico compuesto de ocho etapas, las cuales se describen a continuación y se representan esquemáticamente en la Figura 5.1.

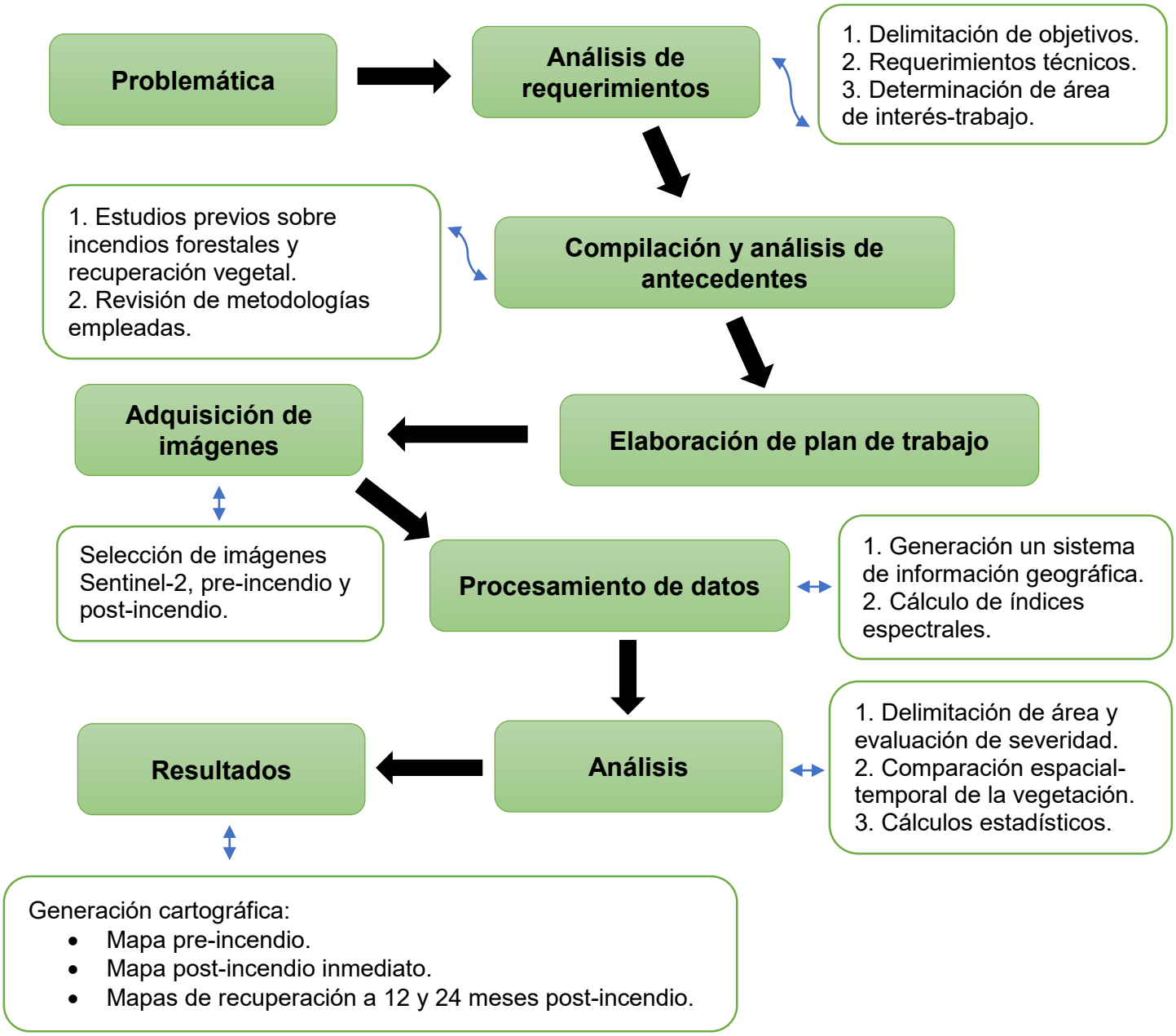


Figura 5.1. Esquema del flujo metodológico. Elaboración propia.

5.2 Problemática

Los incendios forestales son una problemática ambiental recurrente, particularmente en la provincia de Córdoba, donde su frecuencia e impacto justifican la necesidad de contar con herramientas eficaces para el monitoreo y la recuperación del territorio afectado. En este contexto, resulta fundamental evaluar los procesos de regeneración post-incendio, a fin de comprender la dinámica de recuperación de la cobertura vegetal. El objetivo es generar información cartográfica detallada, la cual constituye un insumo clave para la planificación e implementación de acciones de restauración ambiental y mitigación del riesgo.

5.3 Análisis de requerimientos

Antes de iniciar el proyecto, se llevó a cabo un análisis de requerimientos, que constituye una etapa fundamental en la planificación metodológica, la cual permite definir qué se busca analizar, por qué, cómo y con qué herramientas. Esta etapa orienta todas las decisiones posteriores en cuanto a la selección de datos, procesamiento y análisis.

Para alcanzar el objetivo se establecieron objetivos intermedios:

- Obtener imágenes satelitales multitemporales que representen el estado de la vegetación antes, inmediatamente después, y durante el proceso de recuperación (hasta 24 meses post-incendio).

- Calcular índices espectrales (NDVI, NBR, dNDVI y dNBR), clasificarlos según categorías preestablecidas para evaluar niveles de afectación y recuperación.

- Análisis multitemporal que permita visualizar espacial y temporalmente la evolución de la vegetación.

- Generar cartografía temática como producto final que integre los resultados del análisis.

Del análisis de estos objetivos, se derivan necesidades técnicas:

- Adquisición de imágenes satelitales pre-incendio, post-incendio inmediato y durante el proceso de recuperación (hasta 24 meses posteriores), con baja nubosidad.

- Disponer de Cobertura total de la zona afectada (imágenes con resolución espacial igual o menor a 20 metros, con bandas espectrales necesarias para el cálculo de índices de vegetación (banda roja, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta).

- Utilizar Datos de libre disponibilidad.

5.4 Compilación y análisis de antecedentes

En una primera etapa, se realiza una búsqueda de antecedentes, los cuales incluyen artículos académicos, informes técnicos y documentos de organismos especializados, lo que implica una revisión de estudios previos sobre incendios forestales, los impactos que tuvieron y las técnicas utilizadas para el análisis.

Entre los principales antecedentes, destacan estudios sobre el NDVI (Aquino et al., 2012), la comparación de métodos de detección de cambios (Ashraf et al., 2015). También se revisaron trabajos sobre incendios en Córdoba (Castillo et al., 2023) y análisis de severidad con Sentinel-2 y Landsat 8 (Cabezas Martín, 2020). Se consideraron aportes sobre procesamiento digital de imágenes de Copernicus (Dávila, 2023) y teledetección (Di Bella et al., 2008). Además, se incluyeron revisiones técnicas sobre incendios y teledetección (Salinero Chuvieco, 2007, 2009, 2020).

A su vez, se incorporaron documentos institucionales como el Mapa de Cobertura y Uso de Suelo de Córdoba (IDECOR, 2020-2021), reportes de la Secretaría de Gestión de Riesgo Climático de Córdoba (2023), y recursos de la NASA, entre otros.

Esta revisión permitió identificar metodologías aplicadas, establecer criterios de selección de imágenes y definir los índices espectrales más adecuados.

En una segunda etapa se elabora un procedimiento de trabajo, el cual incluyó la selección de fechas claves, el diseño del flujo de trabajo, la organización de los datos, y la definición de las métricas y herramientas necesarias para el análisis.

5.5 Adquisición de Imágenes satelitales

Para llevar adelante el análisis, se utilizaron imágenes satelitales descargadas desde la página web de Copernicus EU[4] (Figura 5.2), que permite la consulta, visualización y descarga de imágenes de las misiones Sentinel.

Copernicus tiene a disposición información generada por diversas misiones, principalmente Sentinel-1 -útil para detección de cambios estructurales-, Sentinel-2 -empleadas en análisis de vegetación, uso del suelo y monitoreo ambiental-, Sentinel-3 y Sentinel-5 -orientadas a monitoreo oceánico, atmosférico y climático-.

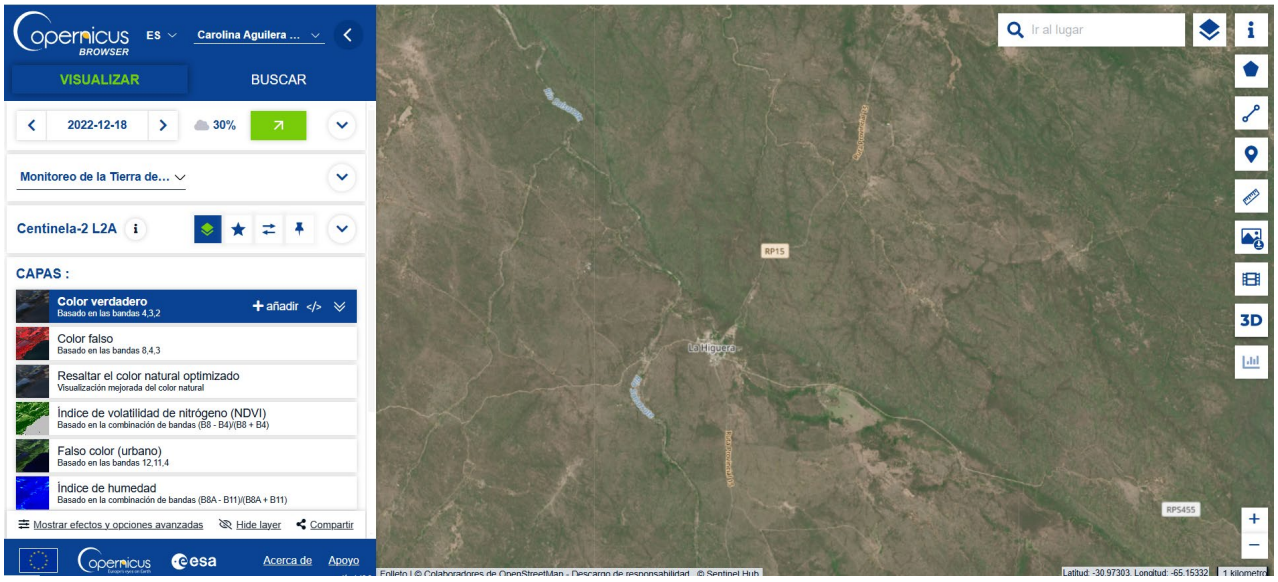


Figura 5.2. Vista general del sitio de descarga de Copernicus EU. Fuente: https://browser.dataspace.

Para este estudio se seleccionaron imágenes de la misión Sentinel-2, debido a que ofrece alta resolución espacial (hasta 10 metros), amplia resolución espectral (13 bandas espectrales, que incluyen bandas en el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, las cuales son necesarias para el cálculo de los índices espectrales utilizados), una revisita frecuente (disponibles cada 5 días), lo cual permite una adecuada selección

[4] https://browser.dataspace.copernicus.eu

temporal para realizar un análisis comparativo, y acceso gratuito, lo que asegura la sostenibilidad del monitoreo.

La búsqueda se realizó mediante filtros por fecha, área geográfica y bajo porcentaje de nubosidad. Se descargaron productos nivel 2A (procesados con corrección atmosférica), lo que facilitó el cálculo directo de índices sin necesidad de procesamiento adicional. El proceso de descarga se detalla en el anexo 9.3 Procedimientos ítem 9.3.1. Descarga de imágenes.

La plataforma ofrece dos modalidades de descarga. En una primera opción se descarga el paquete completo de datos (incluye todas las bandas espectrales, metadatos y configuración por defecto, cuyo tamaño aproximado del archivo es de 1 GB). En la segunda modalidad se descargan individualmente las bandas espectrales (permite seleccionar de forma personalizada las bandas, elegir el sistema de referencia espacial y la resolución, cuyo tamaño aproximado del conjunto de bandas es de 75 MB). Para el presente análisis se optó por la descarga selectiva de bandas específicas, ya que el cálculo de índices como NDVI, NBR, dNDVI y dNBR requiere la combinación de ciertas longitudes de onda (banda roja, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta). Esta elección facilitó la organización de los datos y optimizó el espacio de almacenamiento y el procesamiento posterior. Las bandas utilizadas y su combinación se detallan en el Capítulo 4 (ver Figura 4.1).

5.6 Procesamiento de datos

Una vez obtenidas todas las bandas necesarias correspondientes a las fechas seleccionadas, se prepararon los datos para el análisis, tal como se detalla en el anexo 9.2 Procedimientos ítem 9.2.3. Preparación.

Con la finalidad de optimizar el análisis y reducir el tamaño de los archivos, se realizó un recorte de las imágenes satelitales ajustado a la zona de estudio. Para ello, se utilizó la capa correspondiente al polígono del área quemada (IDECOR 2023), a partir de la cual se generó un centroide -representa el punto central de dicha geometría-. Sobre este punto se construyó un buffer de 10 km de radio. Todas las imágenes fueron recortadas utilizando esta capa buffer, lo que facilitó el posterior cálculo de los distintos índices.

A. Cálculo de índices

1. NDVI, se aplica la ecuación 3.1

$$NDVI=(B8-B4) / (B8+B4)$$

dónde: B8 es el valor de la banda del infrarrojo cercano (NIR); B4 es el valor de la banda roja (Red).

2. NBR, se aplica la ecuación 3.2

$$NBR=(B8-B12) / (B8+B12)$$

dónde: B8 es el valor de la banda del infrarrojo cercano (NIR); B12: Banda de infrarrojo de onda corta (SWIR).

3. dNDVI**,** se aplica la ecuación 3.3

$$dNDVI = antesNDVI – posteriorNDVI$$

dónde: antesNDVI y posteriorNDVI corresponden a los valores antes y después del incendio

4. dNBR, se aplica la ecuación 3.4

$$dNBR = antesNBR – posteriorNBR$$

dónde: antesNBR y posteriorNBR corresponden a los valores antes y después del incendio.

Para su realización se empleó la herramienta “Calculadora Ráster”, del software QGIS, como se observa en la Figura 5.3.

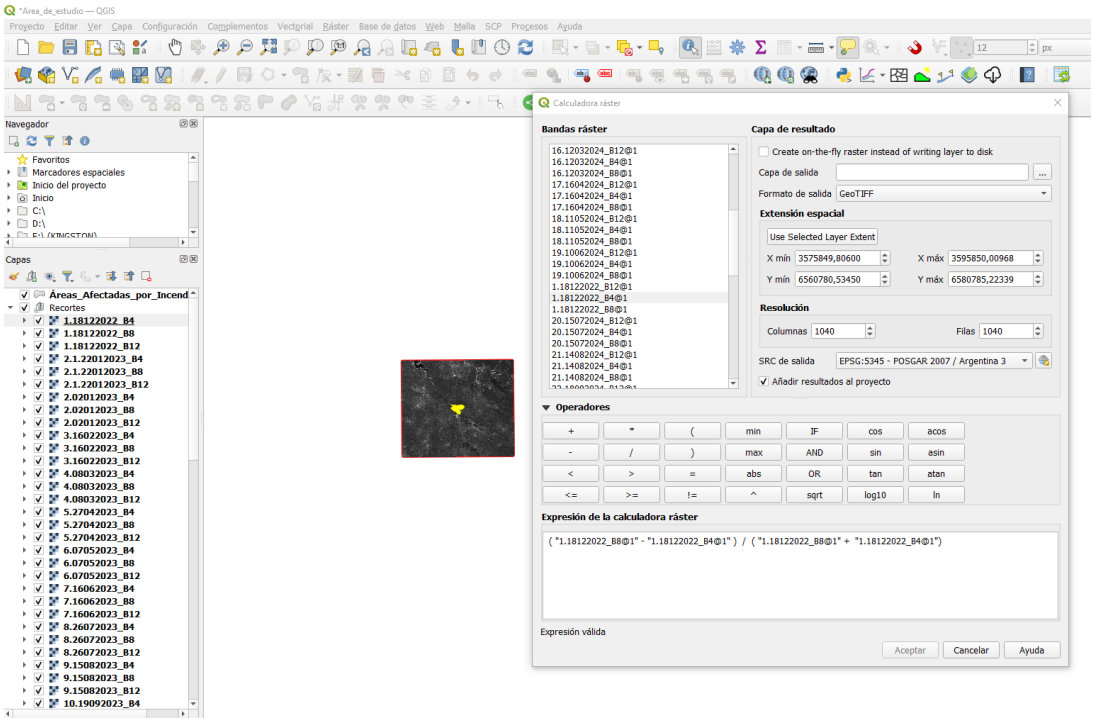


Figura 5.3. Herramienta Calculadora Ráster del software QGIS. Imagen de elaboración propia.

5.7 Análisis

En esta etapa se permite interpretar y comprender los procesos del cambio en la cobertura vegetal como consecuencia del incendio forestal. Para ello, los índices espectrales generados, permitieron analizar el comportamiento de la cobertura vegetal en el área de estudio, su respuesta a los factores ambientales y su dinámica de recuperación a lo largo del tiempo.

A continuación, se detallan las diferentes etapas analíticas llevadas a cabo en el estudio.

5.7.1 Análisis del área previa al incendio

La evaluación del área previa al incendio permitió establecer una base sobre el estado de la cobertura vegetal. A partir del estudio de las imágenes satelitales correspondientes a diciembre del año 2022, se calcularon valores de NDVI y NBR que reflejaban la condición de vegetación fotosintéticamente activa y su estado. Esta información fue esencial para comparar los cambios posteriores, comprender la magnitud del daño y contextualizar la dinámica de recuperación. La cartografía generada en esta etapa sirvió

como referencia espacial para evaluar las alteraciones sufridas en el área, ver mapa “Mapa de vegetación en La Higuera, 2022” del anexo 9 ítem 9.4 Mapas.

5.7.2 Delimitar el área quemada

Se realizó mediante la comparación de los índices espectrales NBR, dNDVI y dNBR. Estos índices permitieron detectar de manera precisa las zonas donde se registraron pérdidas en la vegetación. El resultado se representó en un mapa temático que delimita la zona quemada, siendo fundamental para cuantificar la superficie afectada, ver mapa “Mapa de severidad de daños producidos por incendio forestal en La Higuera, enero 2023” del anexo 9 ítem 9.4 Mapas.

5.7.3 Evaluar la severidad del incendio

La severidad se evaluó a través de la clasificación de los valores de dNDVI y dNBR en rangos específicos, permitiendo asignar distintos niveles de daño, desde zonas sin afectar hasta áreas con severidad alta. Esto permitió comprender la heterogeneidad del impacto del fuego.

5.7.4 Análisis multitemporal de la evolución del estado de la vegetación

El análisis multitemporal se basó en la comparación de imágenes satelitales adquiridas entre 2022 y 2025, permitiendo monitorear la evolución de la vegetación a lo largo del tiempo. Mediante de la observación de los valores de las métricas de los diferentes índices, en distintas fechas, se identificaron patrones de recuperación, estancamiento o regresión. Este permitió visualizar los cambios y cuantificar su magnitud y distribución, ver mapas de recuperación en el anexo 9 ítem 9.4 Mapas.

Para lograr estos objetivos, las imágenes satelitales fueron sometidas a procedimientos de segmentación y clasificación.

Para el NDVI y el NBR, se aplicó una clasificación de seis clases, siguiendo la metodología establecida por Aquino et al. (2012), que permite categorizar la densidad de la vegetación de acuerdo con los valores del índice (-1 a 1). Tabla 5.1.

Clasificación	Clase
NDVI / NBR ≤ 0	Suelo desnudo/agua
0 < NDVI / NBR ≤ 0,2	Vegetación muy baja
0,2 < NDVI / NBR ≤ 0,4	Vegetación baja
0 ,4 < NDVI / NBR ≤ 0,6	Vegetación moderadamente baja
0,6 < NDVI / NBR ≤ 0,8	Vegetación moderadamente alta
0,8 < NDVI / NBR ≤ 1	Vegetación alta

Tabla 5.1. Clasificación de clase índices ecpectrales para cobertura vegetal. Fuente Aquino et al. (2012).

En cuanto al dNBR se usan siete clases, siguiendo los rangos de valor propuestos por la United States Geological Survey (USGS), los cuales se detallan en la Tabla 5.2:

Clasificación	Clase
dNBR < - 0,25	Alto crecimiento de vegetación posterior al fuego
- 0,25 < dNBR ≤ - 0,1	Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego
- 0,1< dNBR ≤ 0,1	Zonas estables o sin quemar
0 ,1 < dNBR ≤ 0,27	Zonas quemadas con gravedad baja
0,27 < dNBR ≤ 0,44	Zonas quemadas con gravedad moderada-baja
0,44 < dNBR ≤ 0,66	Zonas quemadas con gravedad moderada-alta
dNBR > 0,66	Zonas quemadas con gravedad alta

Tabla 5.2. Clasificación de clase dNBR. Fuente https://un-spider.org/es/node/10959.

Para el caso del dNDVI se establecieron 5 clases, tomando como referencia Chuvieco et al. (2010), ver Tabla 5.3.

Clasificación	Clase
dNDVI ≤ -0,2	Vegetación sin cambio
-0,1 < dNDVI < 0	Sin regeneración
0 < dNDVI ≤ 0,1	Recuperación baja
0,1 < dNDVI ≤ 0,2	Recuperación moderada
dNDVI > 0,2	Recuperación alta

Tabla 5.3. Clasificación de clase dNDVI. Fuente Chuvieco et al. (2010).

5.8 Generación Cartográfica

La elaboración de mapas temáticos fue fundamental para la interpretación visual y el análisis de los procesos de regeneración vinculados al incendio. Estos productos, derivados de índices de teledetección, permiten una comprensión espacial detallada de la condición de la vegetación, la severidad del daño y los patrones de recuperación.
El “Mapa de vegetación en La Higuera, 2022”, se generó utilizando el NDVI, correspondiente al período pre-incendio (18 de diciembre del 2022), representa la condición de la cobertura vegetal activa a la fecha, permitiendo identificar las zonas con actividad fotosintética antes del evento. Por su parte, el “Mapa de severidad de daños producidos por incendio forestal en La Higuera, enero 2023”, se produjo usando el NBR, a partir de datos post-incendio inmediato (22 de enero del 2023), refleja la severidad del daño ocasionado, destacando las áreas con mayor pérdida de biomasa.

Asimismo, se desarrollaron dos mapas adicionales de recuperación de la vegetación mediante el índice dNDVI, correspondientes a los 12 y 24 meses posteriores al incendio, con el propósito de evaluar de forma comparativa los cambios en la cobertura vegetal y el grado de regeneración del área afectada.

Todos los mapas fueron diseñados en formato A4 en disposición apaisada, permitiendo una visualización más eficiente del área de estudio. Para ello, se empleó la proyección Gauss-Krüger, Faja 3, cuyo marco de referencia es POSGAR 2007, el sistema oficial en Argentina Permitiendo en este caso, una representación adecuada a nivel regional.

En todos los mapas se incorporó el límite del área afectada, para identificar la ubicación de los resultados y facilitar su interpretación.

Además, para una mayor compatibilidad con otras fuentes cartográficas y plataformas, los mapas incluyen dos sistemas de coordenadas: las coordenadas planas rectangulares (sistema métrico) de la proyección Gauss-Krüger y el sistema geográfico (latitud/longitud) en coordenadas sexagesimales.
Cada mapa incluye una escala gráfica, la cual permite medir distancias de manera directa, una leyenda con simbología diferenciada según la clasificación de clases preestablecidas para cada índice y una breve descripción sobre la procedencia de los

datos, especificando la fuente de las imágenes satelitales (Sentinel-2 L2A) y la fecha de adquisición correspondiente.

Este diseño cartográfico busca garantizar claridad visual, precisión espacial y adecuación técnica.

Los productos cartográficos mencionados se encuentran disponibles en el capítulo 9. Anexo, ítem 9.4 Mapas, e incluyen:

- Mapa 1: NDVI pre-incendio con delimitación de la zona afectada y detalle de la cobertura vegetal.
- Mapa 2: NBR post-incendio con delimitación de la zona afectada y severidad de daño.
- Mapa 3: dNDVI a los 12 meses post-incendio, mostrando las primeras fases de regeneración.
- Mapa 4: dNDVI a los 24 meses post-incendio, permitiendo observar la evolución a largo plazo.

5.9 Sistema de información geográfico

La implementación de un sistema de información geográfico fue esencial para la integración y el análisis de la información geoespacial. El SIG permitió combinar las imágenes satelitales, las capas vectoriales, las capas raster y los resultados del análisis en un entorno común de trabajo, facilitando la generación de productos cartográficos.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 Análisis Pre-incendio

El incendio forestal comenzó el 2 de enero del 2023, por ende, el análisis pre-incendio se realizó con una imagen satelital capturada el 18 de diciembre del 2022. Esta evaluación se basó en los índices NDVI y NBR (Figura 6.1), los cuales reflejan áreas con vegetación baja a moderadamente alta. En concordancia con las características de la cobertura vegetal del área de estudio.

Los valores de NDVI oscilaron entre 0 y 0,6, con predominancia en el rango de 0,2 a 0,4. Esto indica vegetación de densidad baja a moderada, aunque exhibe una actividad fotosintética saludable. Simultáneamente, los valores del NBR se ubicaron entre -0,1 y 0,5, lo que sugiere un bajo grado de susceptibilidad a la combustión previa al incendio. Entre ambos índices, el NBR se mostró como el indicador más representativo para caracterizar las condiciones pre-incendio del área de estudio, proporcionando información valiosa sobre la vulnerabilidad del terreno a eventos de fuego.

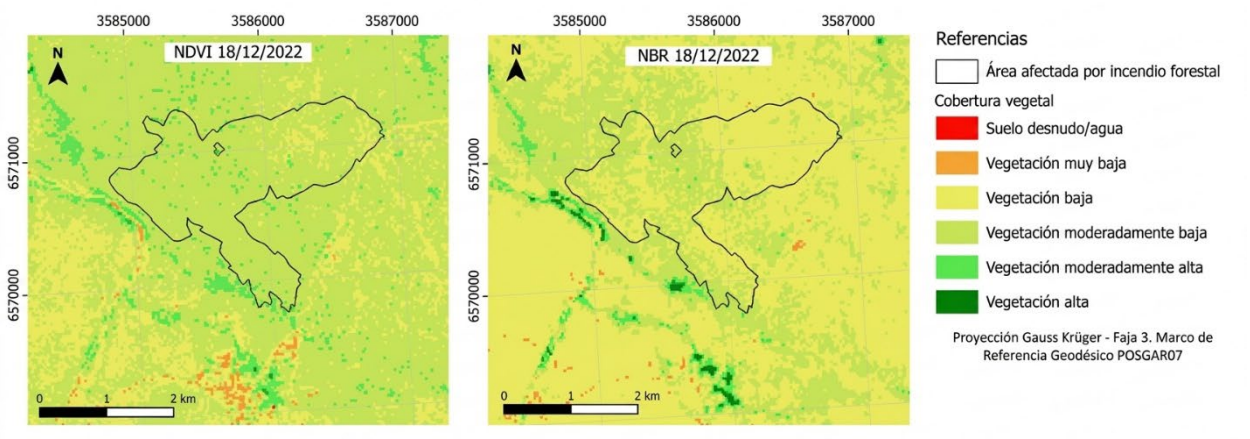


Figura 6.1. Clasificación de la cobertura vegetal por medio de diferentes índices espectrales. A la izquierda NDVI y a la derecha NBR. Elaboración propia.

6.2 Delimitación del área afectada por el incendio

La delimitación del perímetro del área quemada se logró mediante el análisis de índices espectrales. En una primera aproximación se realizó una comparación entre el NDVI y

el NBR (Figura 6.2). Para ello se utilizó una imagen satelital posterior al incendio en una fecha relativamente cercana (22 de enero del 2023).

El NDVI caracterizó eficazmente la distribución espacial y la magnitud de la pérdida de vegetación, mientras que el NBR detecto las áreas más severamente afectadas por el incendio.

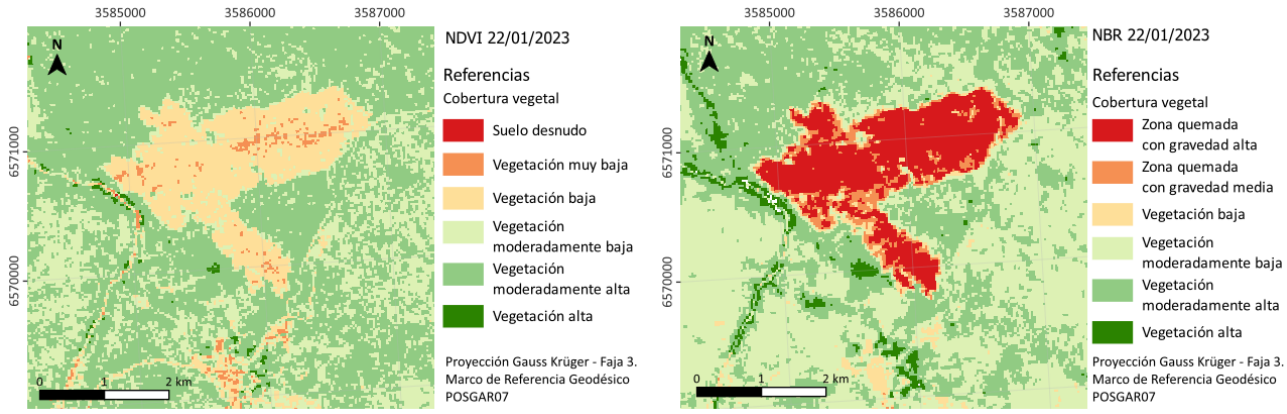


Figura 6.2. Comparativa de la detección del área afectada por el incendio forestal por medio de diferentes índices espectrales. A la izquierda NDVI y a la derecha NBR. Elaboración propia.

Posteriormente, se emplearon los índices dNDVI y dNBR para obtener una delimitación más precisa del impacto. Ambos casos permiten identificar cambios significativos en la cobertura vegetal entre las condiciones previas y posteriores al incendio.

El dNDVI presenta valores negativos en zonas donde no hubo cambios, mientras que sus valores positivos indican una pérdida de vegetación; en cambio los valores positivos del dNBR reflejan zonas quemadas con diferentes niveles de severidad (Figura 6.3). Estos análisis posibilitaron la delimitación exacta del área afectada por el incendio, mostrando gran concordancia con los datos de referencia descargados del IDECOR (Figura 6.4).

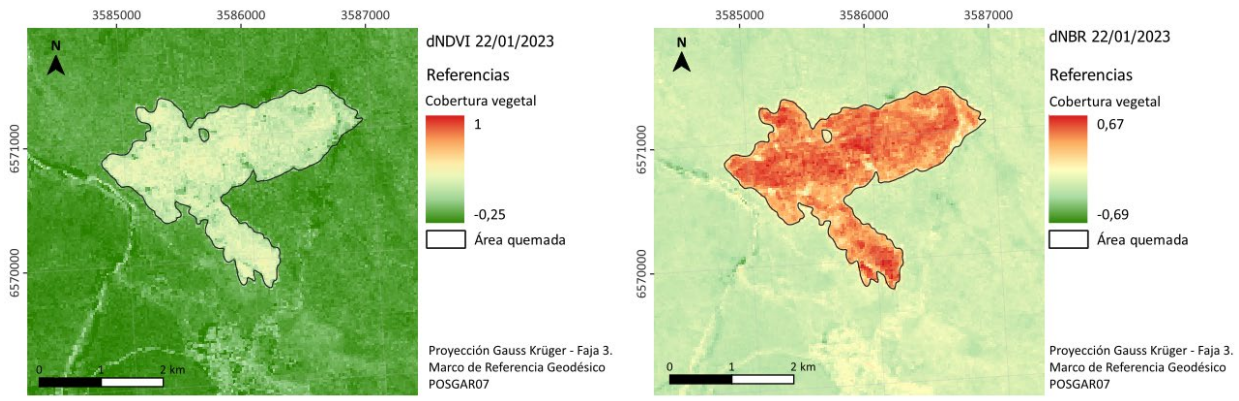


Figura 6.3. Delimitación del área afectada por el incendio forestal mediante el análisis de los índices dNDVI (a la izquierda) y dNBR (a la derecha). Elaboración propia.

La comparación de la superficie entre el área calculada mediante los índices (dNDVI, dNBR) y la reportada por IDECOR muestra una diferencia mínima entre ambas (Tabla 6.1). La diferencia absoluta respecto al dNDVI es de 0,6 ha, mientras que para el dNBR es de 0,5 ha (Tabla 6.2). Estos valores representan discrepancias marginales y demuestran una alta concordancia entre ambos índices espectrales y la cartografía oficial de referencia, validando la precisión metodológica del presente estudio para la delimitación espacial del disturbio.

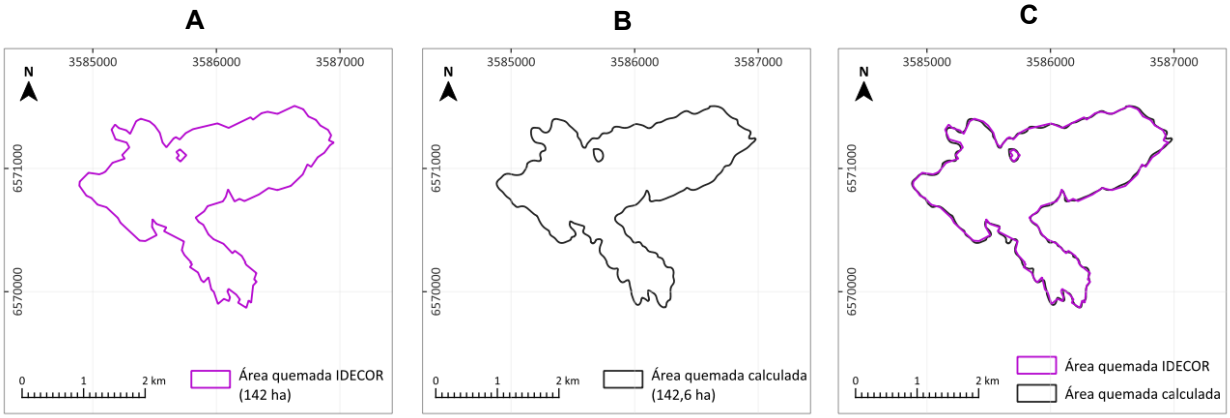


*Figura 6.4. Superficie del área afectada por el incendio. **A** Superficie obtenida de IDECOR. **B** Superficie calculada por medio de los índices. **C** Comparación superpuesta de ambas áreas. Elaboración propia.*

Dato obtenido	Superficie (ha)
IDECOR	142
dNDVI	142,6
dNBR	142,5

Tabla 6.1. Extensión del área afectada por el incendio forestal. Elaboración propia.

Diferencia (IDECOR- dNDVI)	0,6 ha
Diferencia (IDECOR- dNBR)	0,5 ha

Tabla 6.2. Estadísticas descriptivas para la delimitación del área en estudio. Elaboración propia.

6.3 Análisis Post-incendio

El análisis de la severidad del incendio y la trayectoria de recuperación vegetal se realizó mediante la evaluación de los índices espectrales antes mencionados. Para ello se utilizaron datos recopilados en diversos momentos post-incendio. A su vez, la cuantificación de los cambios se realizó mediante el uso de análisis estadísticos, lo que permitió determinar con precisión la magnitud del impacto del fuego y la evolución de la regeneración vegetal a lo largo del tiempo.

Se seleccionaron imágenes representativas en diferentes momentos temporales, como se detalla en la Tabla 6.3.

Época	Fecha	Propósito
Pre-incendio	18/12/2022	Base para comparar cambios
Post-incendio inmediato	22/01/2023	Evaluar el impacto del fuego
Recuperación temprana 1	08/03/2023	Primeros signos de regeneración
Recuperación temprana 2	07/05/2023	Seguimiento de la regeneración
Recuperación intermedia 1	26/07/2023	Evaluación de la recuperación
Recuperación intermedia 2	19/09/2023	Seguimiento de la recuperación
Recuperación tardía 1	13/11/2023	Evaluación de la recuperación
Recuperación tardía 2	17/01/2024	Seguimiento de la recuperación
Recuperación a largo plazo 1	16/04/2024	Evaluar recuperación a largo plazo
Recuperación a largo plazo 2	18/10/2024	Seguimiento de la recuperación a largo plazo
Recuperación a largo plazo 3	06/01/2025	Seguimiento de la recuperación a largo plazo

Tabla 6.3. Selección de imágenes para cuantificar datos. Elaboración propia.

Se calcularon los siguientes estadísticos descriptivos:

- **Media:** Representa el valor promedio del índice en cada imagen, proporcionando una estimación general del estado de la vegetación.

- **Mediana:** Indica el valor central de los datos, reduciendo el efecto de valores atípicos o extremos.

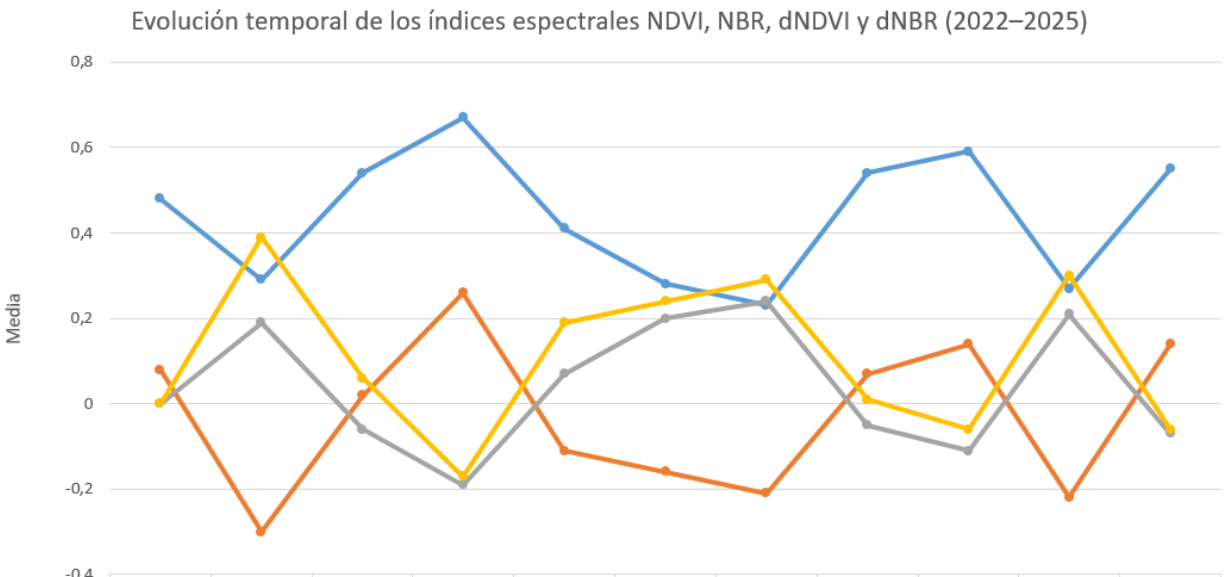
- **Desviación estándar (Des. Est.):** Evalúa la dispersión de los valores, reflejando la heterogeneidad del área afectada.

- **Varianza:** Mide la variabilidad dentro del área de estudio, permitiendo identificar zonas con recuperación más homogénea o irregular.

- **Mínimo y máximo:** Indican los valores extremos del índice en cada imagen.

A continuación, se muestra de manera gráfica (Figura 6.5) la evolución temporal de los índices espectrales (NDVI, NBR, dNDVI, dNBR) entre diciembre de 2022 y enero de 2025. El gráfico representa los valores promedio (media) para cada índice en las fechas seleccionadas de la tabla 6.3. Cabe destacar que los índices diferenciales (dNDVI y dNBR) se calcularon restando los valores de reflectancia de cada fecha posterior al fuego a los valores de la imagen de referencia pre-incendio, fijada el 18 de diciembre de 2022.

Para más detalle sobre valores mínimos, máximos, desviación estándar y varianza, consultar el capítulo 9. Anexo, ítem 9.3 Tablas.



	18/12/2022	22/1/2023	8/3/2023	7/5/2023	26/7/2023	19/9/20223	13/11/2023	17/1/2024	16/4/2024	18/10/2024	6/1/2025
NDVI	0,48	0,29	0,54	0,67	0,41	0,28	0,23	0,54	0,59	0,27	0,55
NBR	0,08	-0,3	0,02	0,26	-0,11	-0,16	-0,21	0,07	0,14	-0,22	0,14
dNDVI	0	0,19	-0,06	-0,19	0,07	0,2	0,24	-0,05	-0,11	0,21	-0,07
dNBR	0	0,39	0,06	-0,17	0,19	0,24	0,29	0,009	-0,06	0,3	-0,06

Figura 6.5. Evolución temporal de los índices espectrales (NDVI, NBR, dNDVI, dNBR) entre diciembre de 2022 y enero de 2025. Elaboración propia.

6.3.1 Evaluación de la severidad del incendio

Tal como se observa en los mapas de la Figura 6.1, los datos obtenidos en la fase anterior al incendio (18/12/2022), se puede inferir una cobertura vegetal saludable (NDVI medio 0,48), y una condición estable con un bajo riesgo de incendios (NBR medio 0,08).

En la época post-incendio inmediato (22/01/2023), se observa una drástica disminución del NDVI (0,29), señalando una pérdida significativa de biomasa fotosintéticamente activa. Mientras que el NBR experimentó una caída pronunciada a -0,3, confirmando una alta severidad (Figura 6.2). En esta fase, la desviación estándar (que mide la variabilidad interna de los valores de los píxeles dentro del perímetro del área quemada) alcanzó su valor máximo en esta fase, registrando 0,09 para el NDVI y 0,14 para el NBR, lo que evidencia una alta heterogeneidad en el grado de afectación del fuego sobre el área estudiada. Esta condición se reafirma al analizar los mapas de los índices diferenciales (Figura 6.3), donde se registró un dNDVI medio de 0,19 -con valores máximos de 0,50 en los sectores con mayor pérdida de cobertura vegetal- y un dNBR medio de 0,39, los cuales cuantifican la severidad del daño.

En la fase de recuperación temprana (08/03/2023 – 07/05/2023), se detecta un incremento progresivo en los valores medios de NDVI, aumentando de 0,54 en marzo a 0,67 en mayo, lo que señala el inicio activo de la regeneración vegetal post-incendio. De manera congruente, el NBR mostró una tendencia ascendente, pasando de 0,02 a 0,26 en el mismo período, reforzando la observación de un restablecimiento temprano de la cobertura. Esta dinámica se corrobora mediante el análisis de los índices diferenciados: el dNDVI registró valores medios de -0,06 en marzo y de -0,19 en mayo, mientras que el dNBR disminuyó a 0,06 en marzo y alcanzó -0,17 en mayo. La transición de estos indicadores hacia valores negativos confirma la atenuación paulatina de la severidad del daño y una recuperación fotosintética que superó temporalmente los niveles de la línea de base pre-incendio. La distribución espacial de estos cuatro índices para el momento de mayor vigor de esta etapa se ilustra en la Figura 6.6

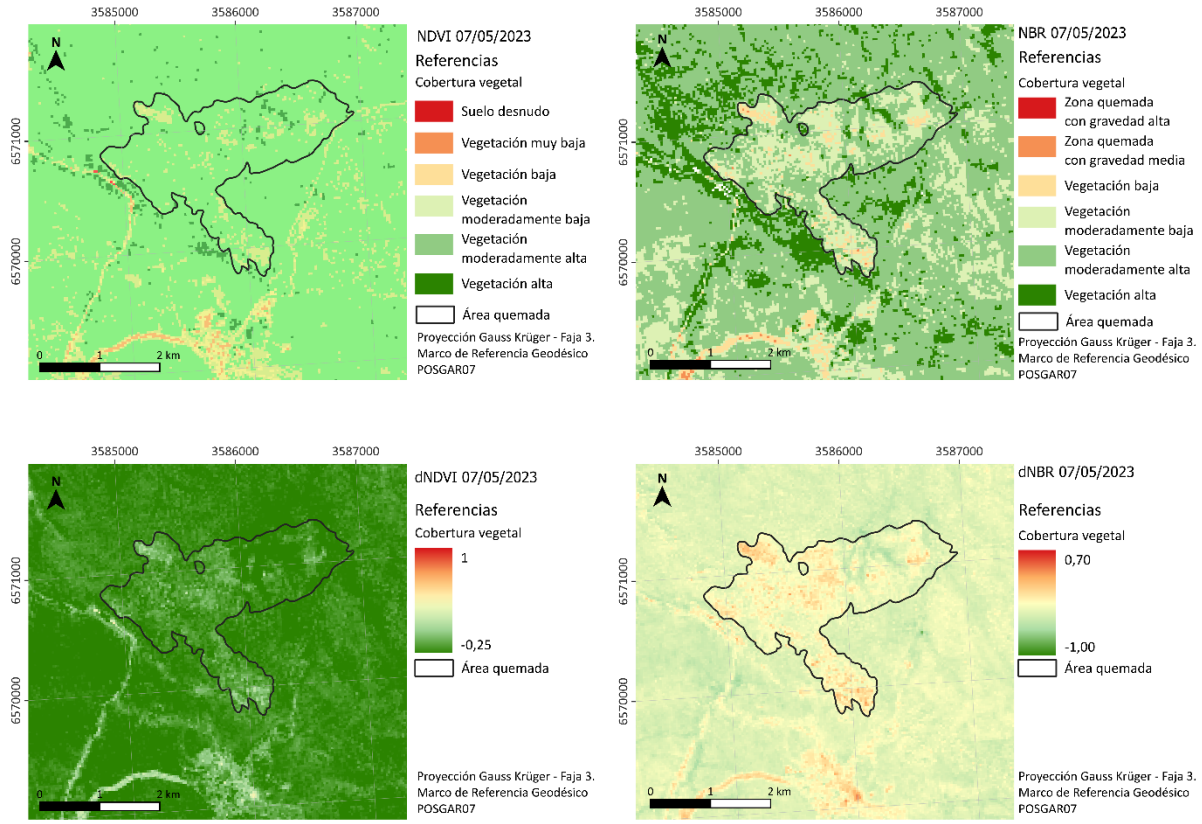


Figura 6.6. Índices espectrales NDVI, NBR respectivamente (superior) e índices diferenciados de severidad/recuperación -dNDVI, dNBR- (inferior), correspondientes a la etapa de Recuperación temprana (07/05/2023). Nota: Los índices dNDVI y dNBR fueron calculados tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022. Elaboración propia.

Durante la fase intermedia de recuperación (26/07/2023 – 19/09/2023), se registró una disminución temporal en los valores medios de NDVI (0,41 en julio y 0,28 en septiembre) y de NBR (-0,11 y -0,16, respectivamente). Esta retracción en los indicadores de vigor fotosintético no responde a una degradación secundaria del área quemada, sino a la conjunción de factores estacionales, caracterizados por el estrés hídrico invernal y la caducidad foliar propia de las especies del matorral y monte serrano. Por su parte, los índices diferenciados mostraron un incremento progresivo: el dNDVI pasó de 0,07 en julio a 0,20 en septiembre, mientras que el dNBR registró valores medios positivos de 0,19 y 0,24. Estos valores reflejan un nivel de afectación moderado generalizado, aunque el registro de valores máximos puntuales de dNBR de hasta 0,67 en julio evidencia la persistencia de parches localizados con daño severo no recuperado. La caracterización espacial de este periodo de déficit estacional se representa en la Figura 6.7.

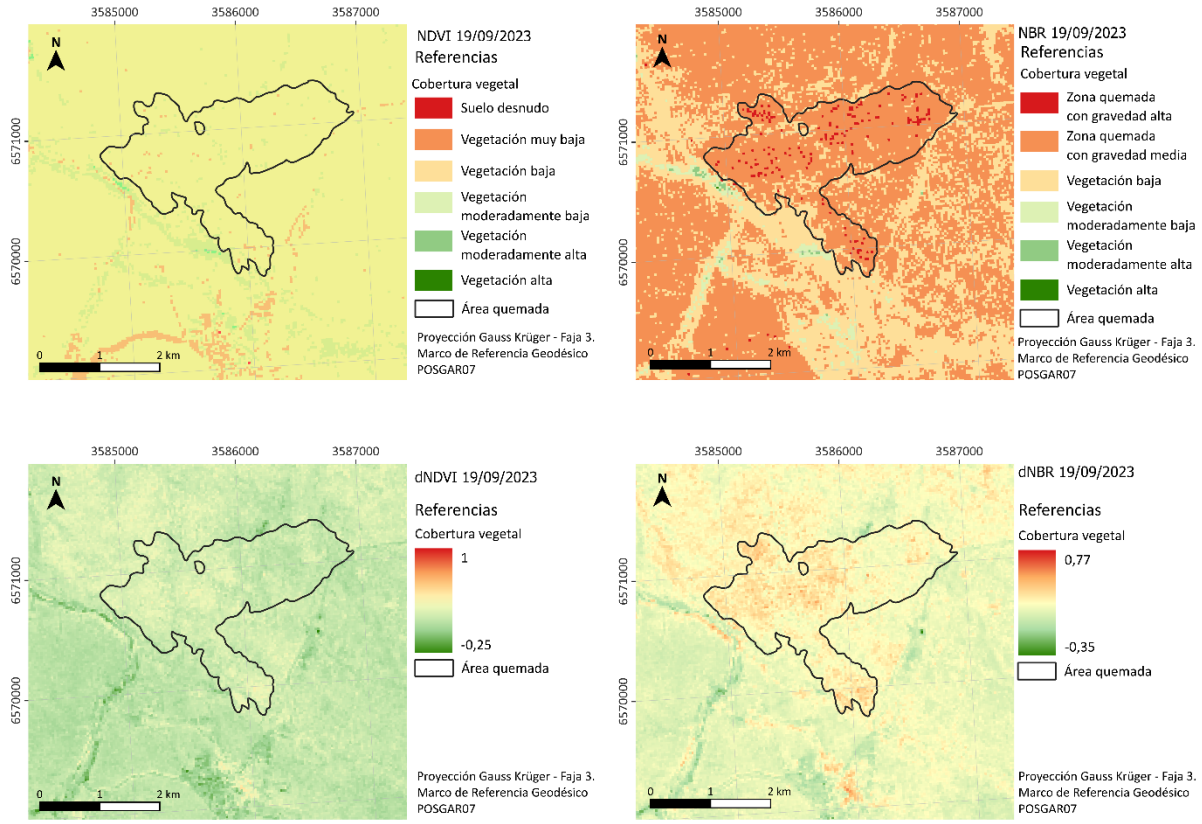


Figura 6.7. Índices espectrales NDVI, NBR respectivamente (superior) e índices diferenciados de severidad/recuperación -dNDVI, dNBR- (inferior), correspondientes a la etapa de Recuperación intermedia (19/09/2023). Nota: Los índices dNDVI y dNBR fueron calculados tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022. Elaboración propia.

En la fase de recuperación tardía (13/11/2023 – 17/01/2024), la cobertura vegetal mostró una transición acentuada entre el cierre de la estación seca y el pico estival. En noviembre de 2023, el NDVI medio se mantuvo en valores bajos (0,23) y el NBR registró -0,21, acompañados por un dNDVI de 0,24 y un dNBR de 0,29, reflejando la persistencia de un déficit hídrico y severidad residual antes del periodo estival. Sin embargo, hacia enero de 2024 (al cumplirse 12 meses del evento), se evidenció un restablecimiento significativo de la actividad fotosintética, alcanzando un NDVI medio de 0,54 y un NBR de 0,07. Esta tendencia positiva se confirmó con el dNDVI, que cayó a valores negativos (-0,05), y el dNBR, que disminuyó a 0,009, consolidando la tendencia hacia la estabilización y regeneración del ecosistema al año del disturbio. La caracterización espacial de este hito de recuperación a los 12 meses se ilustra en la Figura 6.8

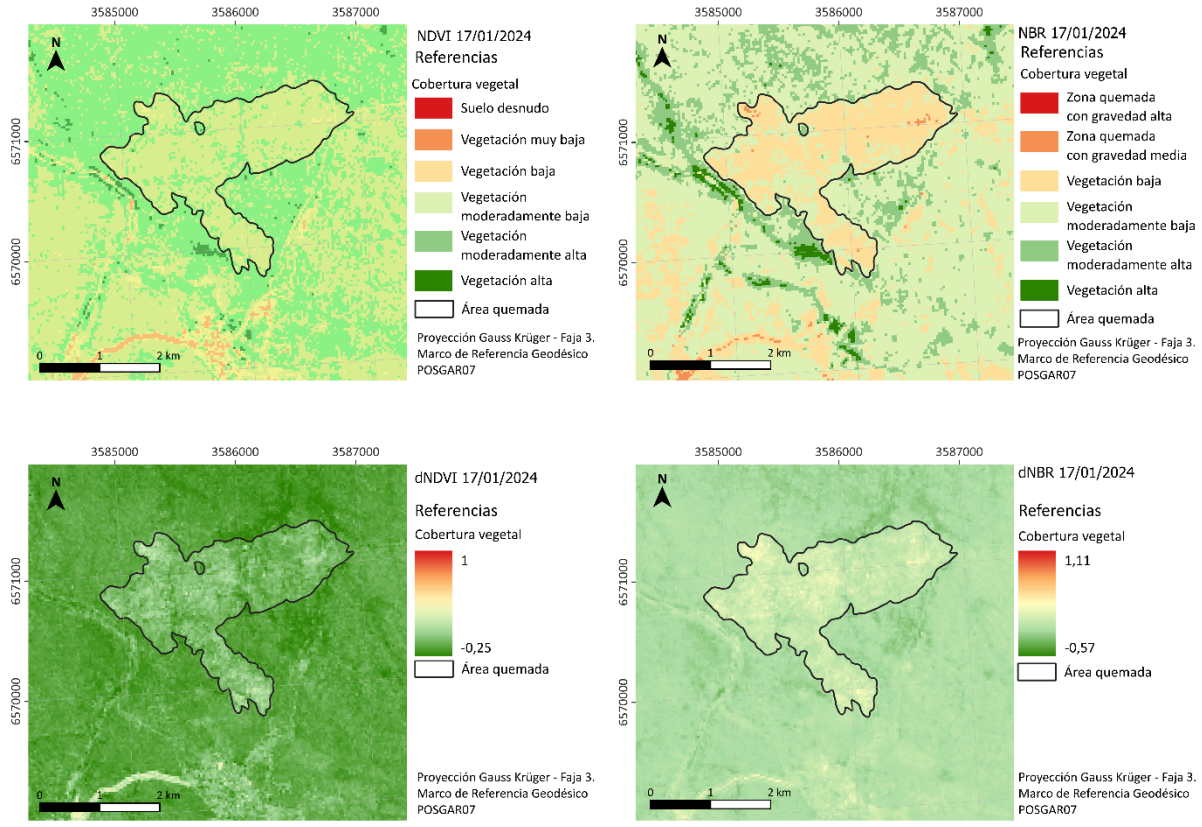


Figura 6.8. Índices espectrales NDVI, NBR respectivamente (superior) e índices diferenciados de severidad/recuperación -dNDVI, dNBR- (inferior), correspondientes a la etapa de Recuperación tardía (17/01/2024). Nota: Los índices dNDVI y dNBR fueron calculados tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022. Elaboración propia.

En la fase de recuperación a largo plazo (16/04/2024 – 06/01/2025), la vegetación consolidó su tendencia hacia la estabilización fotosintética al cumplirse dos años del

evento. En abril de 2024, el NDVI medio alcanzó 0,59 y el NBR 0,14, registrando un dNDVI medio de -0,11 y un dNBR de -0,06, lo que confirmó una importante regeneración estival. Posteriormente, en octubre de 2024 se observó un descenso temporal en el vigor vegetal (NDVI medio de 0,27, dNDVI de 0,21 y dNBR de 0,30), comportamiento derivado de la sequía y el estrés hídrico estacional propio del cierre de la época seca. Hacia el cierre del monitoreo en enero de 2025 (24 meses post-incendio), los indicadores retornaron a niveles saludables, registrando un NDVI medio de 0,55 y un NBR de 0,14. Los valores medios negativos en los índices diferenciados (dNDVI de -0,07 y dNBR de -0,06) demuestran que, en términos generales, la cobertura fotosintética logró igualar o superar la línea de base previa al fuego (18/12/2022). No obstante, la persistencia de valores máximos positivos en dNDVI (0,27) y dNBR (0,16) evidencia la existencia de sectores heterogéneos localizados que aún sostienen un déficit de cobertura o regeneración incompleta. La caracterización espacial del estado final del área afectada a los 24 meses se ilustra en la Figura 6.9.

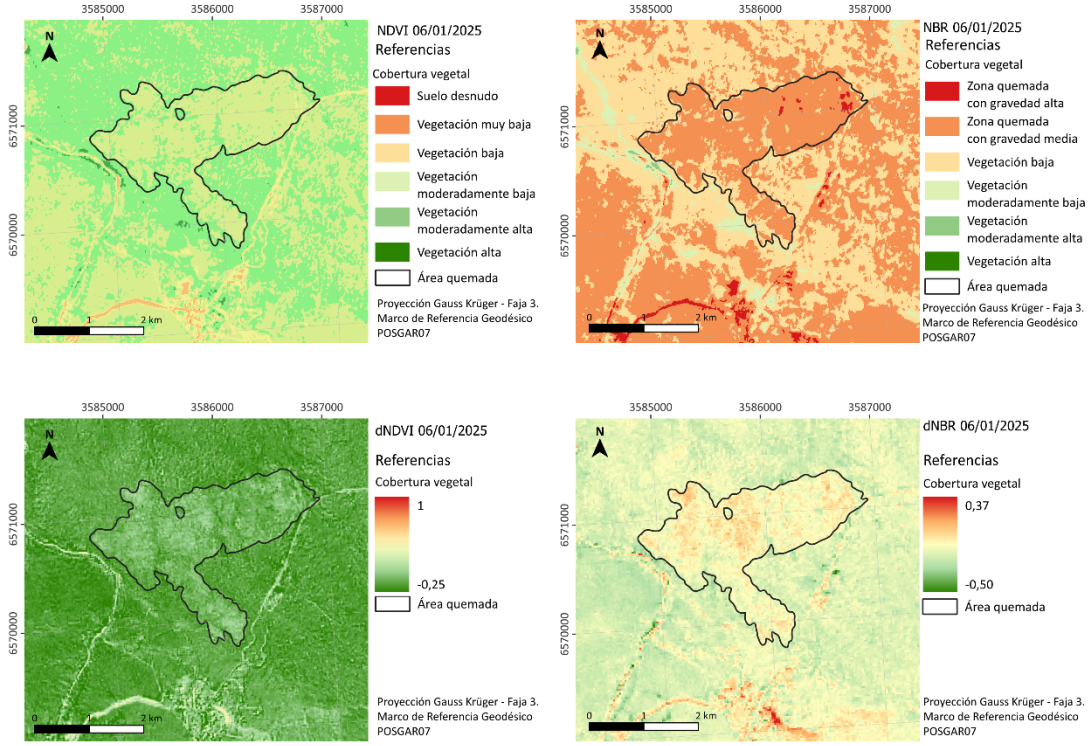


Figura 6.9. Índices espectrales NDVI, NBR respectivamente (superior) e índices diferenciados de severidad/recuperación -dNDVI, dNBR- (inferior), correspondientes a la etapa de Recuperación a largo plazo (06/01/2025)). Nota: Los índices dNDVI y dNBR fueron calculados tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022. Elaboración propia.

6.3.2 Recuperación Vegetal (12 y 24 meses)

Los resultados obtenidos a partir de los índices espectrales evidencian una recuperación progresiva de la cobertura vegetal durante el período de estudio. A los 12 meses del incendio, la respuesta de la vegetación fue espacialmente heterogénea, observándose sectores con una recuperación significativa junto con áreas que aún presentaban valores asociados a una menor actividad fotosintética.

A los 24 meses, los índices NDVI y NBR muestran una tendencia general hacia la estabilización de las condiciones de la cobertura vegetal, alcanzando valores comparables a los registrados antes del incendio. Estos resultados sugieren que gran parte del área afectada experimentó una recuperación funcional de su actividad fotosintética. Sin embargo, la persistencia de sectores puntuales con valores diferenciales positivos indica que la recuperación no fue uniforme en toda el área de estudio. Esta heterogeneidad espacial podría estar asociada a diferencias en la severidad del incendio, las condiciones topográficas, las características de la vegetación preexistente o la disponibilidad hídrica. Si bien el análisis detallado de estos factores excede los objetivos de la presente investigación, su evaluación constituye una línea de trabajo relevante para futuros estudios orientados a comprender los procesos de regeneración post-incendio en la región.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIÓN

El presente estudio permitió demostrar el valor de la cartografía temática y multitemporal como herramienta para el análisis de la regeneración vegetal posterior a incendios forestales. A partir del procesamiento y análisis de imágenes satelitales, fue posible caracterizar y cuantificar la severidad del daño causado, por el incendio ocurrido en enero de 2023 en La Higuera (Córdoba, Argentina), así como la recuperación vegetal en los 24 meses posteriores.

La implementación de los índices espectrales NDVI, NBR, dNDVI y dNBR, permitió delimitar el área quemada, clasificar la severidad del daño y generar mapas temáticos que representan con claridad los distintos grados de afectación y recuperación del terreno. A su vez es importante resaltar la necesidad de utilizar múltiples índices complementarios para obtener una visión más integral y precisa de los procesos ecológicos posteriores al incendio. La integración de estos productos en un entorno SIG fortaleció su valor como soporte técnico para la planificación territorial y ambiental.

La representación cartográfica ha demostrado ser una herramienta eficaz para identificar áreas con actividad fotosintética temprana (utilizando NDVI), también aporta una visión espacial más certera de la severidad del daño y del estado estructural de la vegetación afectada (usando NBR). La integración de ambos índices mediante técnicas de análisis espacial, en un sistema de información geográfica, permitió generar mapas que delimitan con mayor detalle zonas con distintos niveles de recuperación post-incendio, desde sectores con regeneración activa hasta áreas con signos de degradación persistente.

El enfoque cartográfico no solo aportó una dimensión visual, sino que constituyó una herramienta concreta para la toma de decisiones fundamentadas en evidencia espacial, especialmente útil para organismos gubernamentales, y profesionales del sector. La base cartográfica generada es actualizable y escalable, sentando las bases para futuros monitoreos, acciones de restauración ecológica y estrategias de mitigación del riesgo.

Asimismo, los mapas evidenciaron una marcada heterogeneidad espacial en los patrones de recuperación. Esta variabilidad fue cuantificada mediante métricas estadísticas como media, mediana, desviación estándar y varianza, lo que permitió respaldar los patrones observados de forma objetiva. Dichos patrones de recuperación podrían estar influenciados por factores como el tipo de cobertura vegetal original, la intensidad del fuego, la topografía local o las condiciones microclimáticas; este análisis complementario no fue abordado en el presente trabajo, pero podría desarrollarse en estudios futuros utilizando la base de información geoespacial ya generada.

A los 24 meses del evento, la cartografía temática basada en dNDVI mostró tendencias hacia la estabilización de la cobertura vegetal en ciertas áreas, mientras que otras mantuvieron deficiencias notorias. Esto pone de manifiesto que la recuperación post-incendio no es lineal ni uniforme, y que es necesario un monitoreo continuo para guiar decisiones eficaces en materia de restauración ecológica.

En este contexto, esta investigación reafirma el rol de la cartografía —apoyada en sensores remotos, análisis espacial y software libre— como una herramienta fundamental para la gestión de ecosistemas perturbados por incendios. Por su capacidad para ofrecer información espacial precisa y actualizada, facilitando el monitoreo a gran escala, la detección visual de cambios en el tiempo y el apoyo a la toma de decisiones basadas en evidencia espacial.

CAPÍTULO 8

REFERENCIAS

Aquino, C.M.S., Oliveira, J.G.B. (2012). Estudio de la dinámica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el núcleo São Raimundo Nonato-PI. GEOUSP - Espacio y Tiempo, (31), pp. 157-168.

Ashraf, M., Nawaz, R. (2015). A Comparison of Change Detection Analyses Using Different Band Algebras for Baraila Wetland with Nasa's Multitemporal Landsat Dataset. Journal of Geographic Information System, (7), pp. 1-19. doi:10.4236/jgis.2015.71001

Asociación Cartográfica Internacional (2016). La mujer en la cartografía: Celebrando el año internacional del mapa. https://icaci.org/files/documents/wom/09_IMY_WoM_es.pdf

Bava, F. (2003). Procesamiento digital de imágenes satelitales para la cartografía náutica fluvial en Argentina.

Cabezas Martin, G. (2020). Análisis de la severidad del incendio forestal en el Parque Nacional Sierra La Macarena usando Landsat 8 y Sentinel-2. Caso de estudio 2018.

Castillo, H., Baldassini, P. (2023). Teledetección aplicada al análisis de los impactos ecosistémicos generados por los incendios del año 2020 en la provincia de Córdoba, Argentina, e identificación de áreas prioritarias de restauración. Investigaciones Geográficas, (80), pp. 81-105. https://doi.org/10.14198/INGEO.23754.

Cattáneo, R., Izeta, A. D., Costa, T. (2015). Cruz del Eje. El patrimonio arqueológico de los espacios rurales de la provincia de Córdoba (2a ed., pp 109-111). Universidad Nacional de Córdoba.

Dávila, M. (2023). Algoritmos para el procesamiento de imágenes utilizando satélites del programa Copernicus de la Unión Europea. Corporación Universitaria Minuto de Dios. https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-633-8

De la Puente García, L. (2017). Las posibilidades de la teledetección para la gestión de los incendios forestales en Cantabria: recuperación vegetal post fuego a partir de MODIS.

Di Bella, C.M., Posse, G., Beget, M.E., Fischer, M.A., Mari, N., Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. Ecosistemas, 17(3), pp. 39-52.

Guasone, M.V., Roncoroni, L. (2022). Estudio mediante técnicas de teledetección de los incendios forestales ocurridos en las islas del Delta del Paraná durante el año 2020.

Key, C.H., Benson, N.C. (2006). Landscape Assessment (LA): Sampling and Analysis Methods. En D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson, S. Sutherland y L.J. Gangi (Eds.), FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD.

Mapa de Cobertura y Uso de Suelo de la Provincia de Córdoba 2020-2021. Infraestructura de Datos Espaciales de Córdoba (IDECOR), 2022. https://www.idecor.gob.ar/wp-content/uploads/2022/06/INFORME-Mapa-de-Coberturas-y-usos-del-Suelo-2020-21-1.pdf

Mateos, D., Martínez, A., García, R. (2019). Impacto de los incendios forestales en la calidad del aire: un análisis global. Journal of Environmental Science, 45(4), pp. 567-583.

McKenna, P., Phinn, S., Erskine, P. D. (2018). Fire severity and vegetation recovery on mine site rehabilitation using WorldView-3 imagery. Remote Sensing, 10(7), pp. 1044. https://doi.org/10.3390/rs10071044

Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica.

Pastrana, A.A. (2017). Análisis de los cambios en la estructura del paisaje por incendios forestales por medio de la teledetección.

Quintanilla, P.H. (2024). Técnicas geográficas aplicadas al estudio de los emplazamientos militares en la Frontera Sur de la Provincia de Buenos Aires durante los Siglos XVIII y XIX.

Salinero Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Martín, M.P., Vilar, L., Martínez, J., Padrón, D., Martín, S., Salas, J. (2007). Generación de un Modelo de Peligro de Incendios Forestales mediante Teledetección y SIG. TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional. Ed. Martin.

Salinero Chuvieco, E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp), 103(1), pp.173-181.

Salinero Chuvieco, E. (2020). Revisión histórica y perspectivas de futuro de la Teledetección: desde el ERTS hasta los Sentinels. Revista Mapping, 29(200), pp. 30-32.

Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil (SGRCCyPC) (2023). Áreas Afectadas por Incendios Forestales 2023 en la provincia de Córdoba, Argentina. Reporte Primer Trimestre.

Skrypnychuk Untilov, I. (2015). Análisis de la severidad y la regeneración vegetal mediante imágenes de satélite en el incendio de Sierra de Luna.

8.1 Referencias web

Copernicus. (s.f.). Copernicus Data Space Ecosystem Browser. Última vista 23/6/2025. https://browser.dataspace.copernicus.eu

Infraestructura de datos espaciales de la provincia de Córdoba -IDECOR- (28 de febrero, 2024). Incendios forestales en 2023: estos son los datos oficiales del mapeo provincial. https://www.idecor.gob.ar/incendios-forestales-en-2023-estos-son-los-datos-oficiales-del-mapeo-provincial/ Última vista 23/6/2025.

Instituto Geográfico Nacional
https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG

NASA. (2023). Fundamentals of Remote Sensing. NASA Earth Science Division. Última consulta septiembre 2024. Última vista 23/6/2025.
Chrome-Extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2022-11/Fundamentals_of_RS_Edited_SC.pdf

NASA. (s.f.). Satélites, sensores y modelos de sistemas terrestres de la NASA usados para la gestión de recursos hídricos. Última vista 23/6/2025.
https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/span-Session2B.pdf

United Nations Office for Outer Space Affairs. (s.f.). UN-SPIDER Knowledge Portal. Última consulta octubre 2024. Última vista 23/6/2025. https://un-spider.org/es/node/10959

Secretaria de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofe, y Protección Civil/ IDECOR. Última vista 23/6/2025. https://mapascordoba.gob.ar/viewer/mapa/412

SentiWiki (s.f.). Última vista 23/6/2025. https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission

CAPÍTULO 9

ANEXO

9.1 Abreviaturas

CONAE: Comisión Nacional de Actividades Espaciales.

DN: Niveles digitales (del inglés Digital Number).

dNDVI: Índice diferenciado del índice de vegetación de diferencia normalizada.

dNBR: Índice diferenciado del índice de calcinación normalizado.

ERTS: Satélite de tecnología para recursos terrestres (del inglés Earth Resources Technology Satellite).

ESA: Agencia Espacial Europea.

EU: Unión Europea (del inglés European Union).

ICA: Asociación Cartográfica Internacional.

IDECOR: Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba.

IGN: Instituto Geográfico Nacional.

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

IRS: Satélites de Teledetección de la India (del inglés, Indian Remote Sensing).

JERS: Satélite japonés de recursos terrestres (del inglés, Japan Earth Resources Satellite).

Landsat: Satélite para el monitoreo de los recursos terrestres (su nombre proviene de la combinación de las palabras en inglés Land que significa tierra y Sat de satélite).

MDT: Modelo digital de terreno.

MOS: Satélite de observación marina (del inglés, Marine Observation Satellite).

MSI: Sensor de imágenes multiespectrales.

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (del inglés National Aeronautics and Space Administration).

NBR: Índice de Calcinación Normalizado (del inglés Normalized Burn Ratio).

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (del inglés Normalized Difference Vegetation Index).

NIR: Banda del espectro electromagnético que corresponde al infrarrojo cercano.

N.S.: Sin fecha.

NV: Niveles de visualización.

RGB: Bandas del espectro electromagnético que corresponden al rojo, verde y azul (del inglés, Red, Green, Blue).

SGRCCyPC: Secretaría de Gestión de Riesgo Climático, Catástrofes y Protección Civil.

SIG / GIS: Sistema de información geográfica / Geographical Information System.

SPOT: Satélite para la observación de la Tierra (del francés, Satellite Pour l'Observation de la Terre).

SWIR: Banda del espectro electromagnético que corresponde al infrarrojo de onda corta.

USGS: Servicio Geológico de Estados Unidos (del inglés United States Geological Survey).

UTM: Proyección Universal Transversa Mercator (del inglés Universal Transverse Mercator).

WGS84: Sistema Geodésico Mundial 1984 (del inglés World Geodetic System 1984).

9.2 Procedimientos

9.2.1 Nomenclatura de descarga

Su nomenclatura se organiza de la siguiente manera (Figura 4.1):

YYYY-MM-DD-HHMM_YYYY-MM-DD-HHMM_MMM_XXX_Bxx

2022-12-18-00:00_2022-12-18-23:59_Sentinel-2_L2A_B01

Los componentes del nombre de archivo son:

YYYY-MM-DD-HHMM: Fecha (año-mes-día) y rango horario (00:00-23:59) de la detección de la toma de datos.

MMM: Identificador de la misión.

XXX: Nivel de producto.

Bxx: Banda espectral.

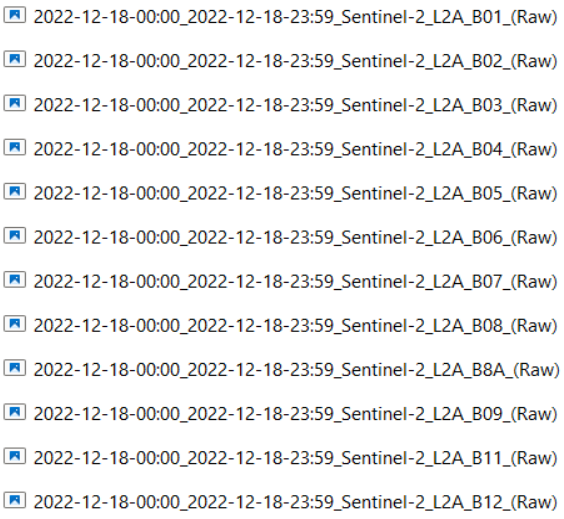


Figura 9.1. Formato de descarga Sentinel 2. Elaboración propia.

9.2.2 Descarga de imágenes

El proceso de descarga se realizó de la siguiente manera:

1. Registrarse en la plataforma.
2. Ubicar la zona geográfica.
3. Elegir los parámetros:
   - Imágenes Sentinel-2 L2A.
   - Cobertura de nubosidad menor o igual al 20%.
   - Rango temporal.
4. Filtrado y selección de imágenes.

5. Descarga: Se puede realizar de dos formas diferentes:
   - El paquete completo de datos, peso aproximado 1GB (Figura 9.1), el cual presenta características por defecto, como el tipo de proyección -UTM zone 20S-.
   - Descargar las bandas electromagnéticas –tamaño aproximado 75 MB-, en cuyo caso se puede seleccionar el sistema de referencia, el tipo de formato y resolución espacial.



Figura 9.2. Paquete de datos del Sentinel2 L2A. Fuente: https://browser.dataspace.

Se descargan en formato *.zip (Figura 9.2), con la siguiente nomenclatura:

N.MMM_XXX_DDMMYYYY

1.Centinel_2_L2A_18122022

Los componentes del nombre de archivo son:

N: Numero que ordena las imágenes desde la fecha más antigua hasta la más recientes.

MMM: Identificador de la misión.

XXX: Nivel de producto.

DDMMYYYY: Fecha (día-mes-año) de la detección de la toma de datos.

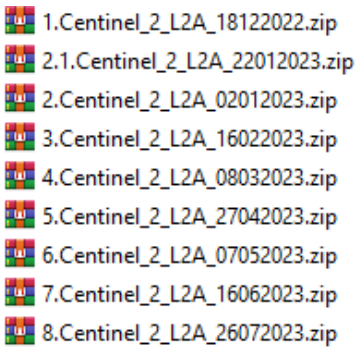


Figura 9.3. Formato de descarga de las bandas electromagnéticas del Sentinel 2. Elaboración propia.

9.2.3 Preparación

El proceso de preparación se realizó de la siguiente manera:

B. Cargar las bandas a utilizar (son de las resoluciones de 10 m y 20 m, la resolución de 60 m no es necesaria) y se proyectan del sistema de coordenadas geográfico con datum WGS84 a la proyección Gauss-Krüger Faja 3 (Figura 9.3).

C. Se realiza una transformación en las dimensiones de las bandas de resolución de 10 m para que tengan la misma dimensión que las bandas de resolución de 20 m.

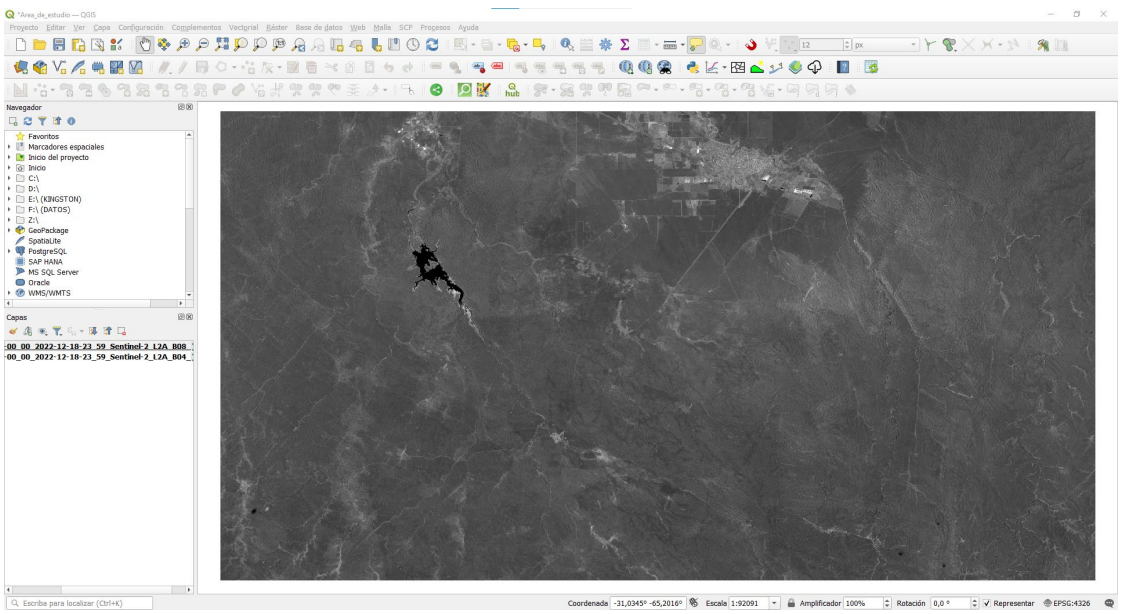


Figura 9.4. Carga de las imágenes en el software para su reproyección. Elaboración propia.

9.3 Tablas

Los estadísticos para NDVI y NBR se presentan en la Tabla 9.3.1 y Tabla 9.3.2, respectivamente.

Índice	Fecha	Media	Mediana	Des. Est.	Min	Max	Varianza
NDVI	18/12/2022	0,48	0,48	0,05	0,28	0,69	0,003
NDVI	22/1/2023	0,29	0,26	0,09	0,15	0,73	0,008
NDVI	8/3/2023	0,54	0,55	0,08	0,25	0,79	0,007
NDVI	7/5/2023	0,67	0,68	0,06	0,34	0,87	0,004
NDVI	26/7/2023	0,41	0,39	0,08	0,20	0,76	0,007
NDVI	19/9/2023	0,28	0,27	0,05	0,17	0,58	0,002
NDVI	13/11/2023	0,23	0,23	0,04	0,14	0,53	0,001
NDVI	17/1/2024	0,54	0,53	0,06	0,28	0,81	0,004
NDVI	16/4/2024	0,59	0,59	0,06	0,36	0,80	0,003
NDVI	18/10/2024	0,27	0,27	0,03	0,08	0,47	0,00009
NDVI	6/1/2025	0,55	0,55	0,05	0,29	0,81	0,003

Tabla 9.3.1. Estadísticas del NDVI. Elaboración propia.

Índice	Fecha	Media	Mediana	Des. Est.	Min.	Max.	Varianza
NBR	18/12/2022	0,08	0,06	0,06	-0,09	0,3	0,003
NBR	22/1/2023	-0,3	-0,33	0,14	-0,54	0,34	0,021
NBR	8/3/2023	0,02	0,02	0,13	-0,38	0,47	0,018
NBR	7/5/2023	0,26	0,26	0,1	-0,16	0,55	0,01
NBR	26/7/2023	-0,11	-0,13	0,11	-0,45	0,38	0,013
NBR	19/9/2023	-0,16	-0,17	0,05	-0,36	0,09	0,003
NBR	13/11/2023	-0,21	-0,22	0,04	-0,37	0,09	0,001

NBR	17/1/2024	0,07	0,06	0,07	-0,19	0,36	0,05
NBR	16/4/2024	0,14	0,14	0,07	-0,13	0,45	0,005
NBR	18/10/2024	-0,22	-0,22	0,03	-0,35	-0,05	0,001
NBR	6/1/2025	0,14	0,13	0,06	-0,09	0,42	0,004

Tabla 9.3.2. Estadísticas del NBR. Elaboración propia.

Para los índices diferenciados (dNDVI, dNBR), se tomó como fecha anterior al incendio forestal el 18/12/2022, mientras que la fecha posterior es la señalada en las tablas. Los estadísticos se presentan en la Tabla 9.3.3 y Tabla 9.3.4 respectivamente.

Índice	**Fecha posterior**	**Media**	**Mediana**	**Des. Est.**	**Min.**	**Max.**	**Varianza**
dNDVI	22/1/2023	0,19	0,2	0,09	-0,34	0,5	0,009
dNDVI	8/3/2023	-0,06	-0,06	0,1	-0,4	0,34	0,011
dNDVI	7/5/2023	-0,19	-0,19	0,08	-0,43	0,16	0,006
dNDVI	26/7/2023	0,07	0,06	0,07	-0,17	0,35	0,005
dNDVI	19/9/2023	0,2	0,2	0,05	0,01	0,44	0,003
dNDVI	13/11/2023	0,24	0,25	0,06	-0,05	0,46	0,004
dNDVI	17/1/2024	-0,05	-0,05	0,06	-0,24	0,23	0,004
dNDVI	16/4/2024	-0,11	-0,11	0,06	-0,31	0,13	0,003
dNDVI	18/10/2024	0,21	0,21	0,05	-0,02	0,43	0,002
dNDVI	6/1/2025	-0,07	-0,07	0,06	-0,32	0,27	0,003

Tabla 9.3.3. Estadísticas del dNDVI. Elaboración propia.

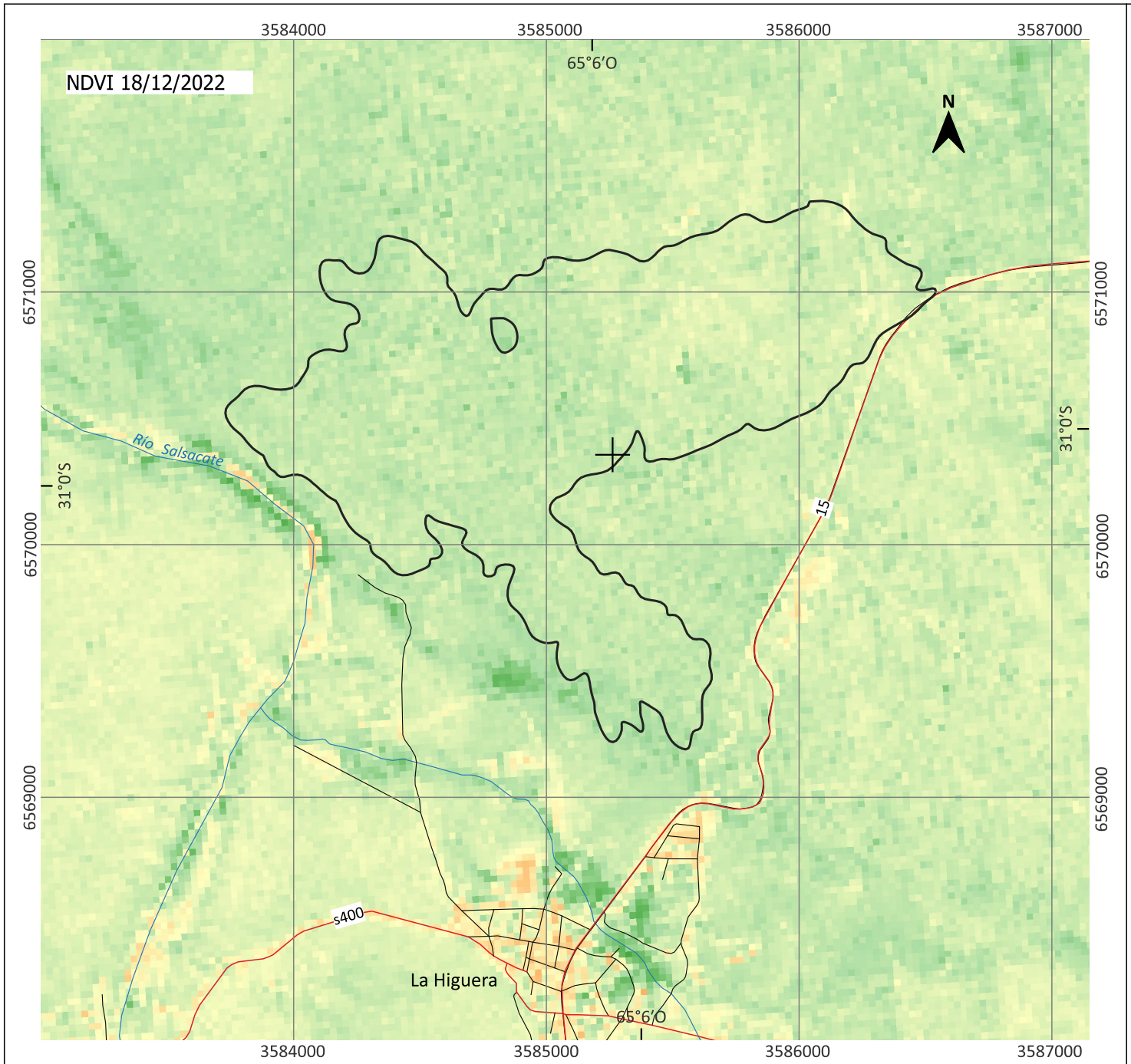
Índice	**Fecha posterior**	**Media**	**Mediana**	**Des. Est.**	**Min**	**Max**	**Varianza**
dNBR	22/1/2023	0,39	0,41	0,13	-0,27	0,75	0,018
dNBR	8/3/2023	0,06	0,06	0,15	-0,47	0,58	0,02
dNBR	7/5/2023	-0,17	-0,18	0,12	-0,57	0,32	0,01

dNBR	26/7/2023	0,19	0,2	0,09	-0,19	0,67	0,009
dNBR	19/9/2023	0,24	0,23	0,06	0,04	0,56	0,004
dNBR	13/11/2023	0,29	0,29	0,06	-0,004	0,53	0,004
dNBR	17/1/2024	0,009	0,004	0,07	-0,25	0,32	0,005
dNBR	16/4/2024	-0,06	-0,07	0,07	-0,31	0,29	0,005
dNBR	18/10/2024	0,3	0,3	0,06	0,06	0,58	0,003
dNBR	6/1/2025	-0,06	0,06	0,06	-0,27	0,16	0,004

Tabla 9.3.4. Estadísticas del dNBR. Elaboración propia.

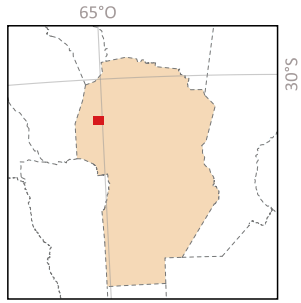
9.4 Mapas

Página en blanco



Mapa de vegetación en La Higuera, 2022

Ubicación geográfica



Referencias

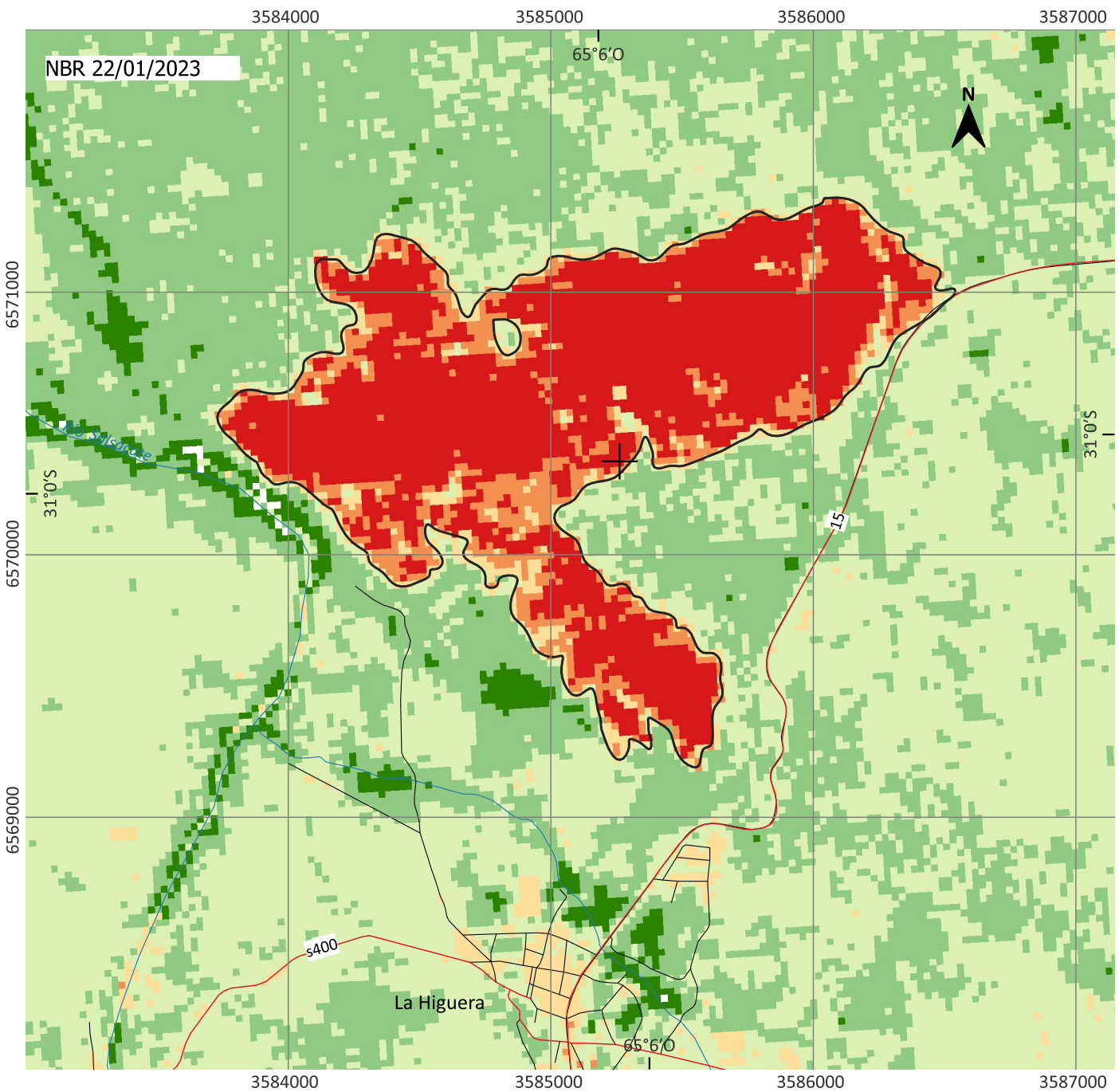
Cobertura vegetal

- Suelo desnudo/agua
- Vegetación muy baja
- Vegetación baja
- Vegetación moderadamente baja
- Vegetación moderadamente alta
- Vegetación alta
- Límite del área afectada por el incendio
- Límite interprovincial
- Provincia de Córdoba
- Provincias limítrofes

Análisis realizado a partir de imágenes Sentinel-2 Nivel 2A, mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

250 0 250 500 m

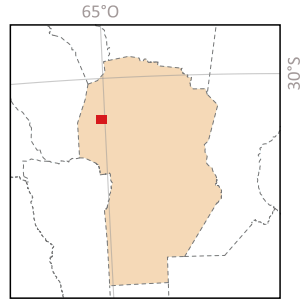
Proyección Gauss Krüger - Faja 3.
Marco de Referencia Geodésico POSGAR07



Mapa de severidad de daños producidos por el incendio forestal en La Higuera, enero 2023.

Superficie afectada: 142,5 ha

Ubicación geográfica



Referencias

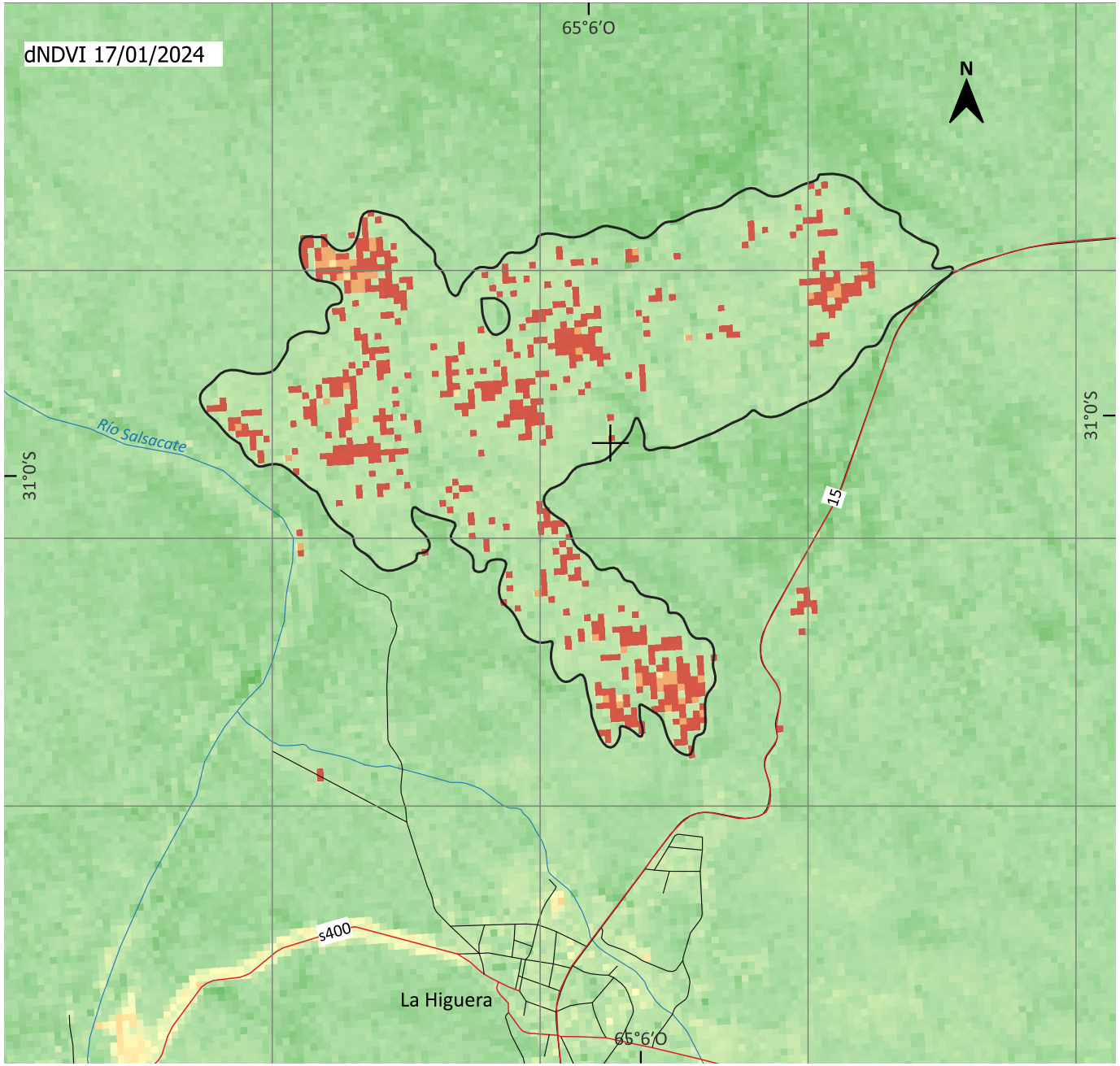
Cobertura vegetal

- Zona quemada con gravedad alta
- Zona quemada con gravedad media
- Vegetación baja
- Vegetación moderadamente baja
- Vegetación moderadamente alta
- Vegetación alta
- Límite del área afectada por el incendio
- Límite interprovincial
- Provincia de Córdoba
- Provincias limítrofes

Análisis realizado a partir de imágenes Sentinel-2 Nivel 2A, mediante el cálculo del Índice de Calcinación Normalizado (NBR).

250 0 250 500 m

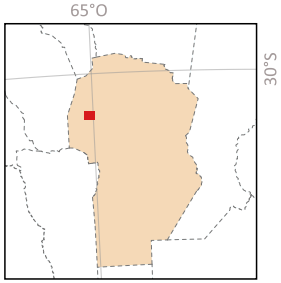
Proyección Gauss Krüger - Faja 3.
Marco de Referencia Geodésico POSGAR07



Mapa de recuperacion de daños a 12 meses

Superficie afectada: 142,5 ha
Superficie recuperada 117,5 ha
Superficie en recuperación: 25 ha

Ubicación geográfica



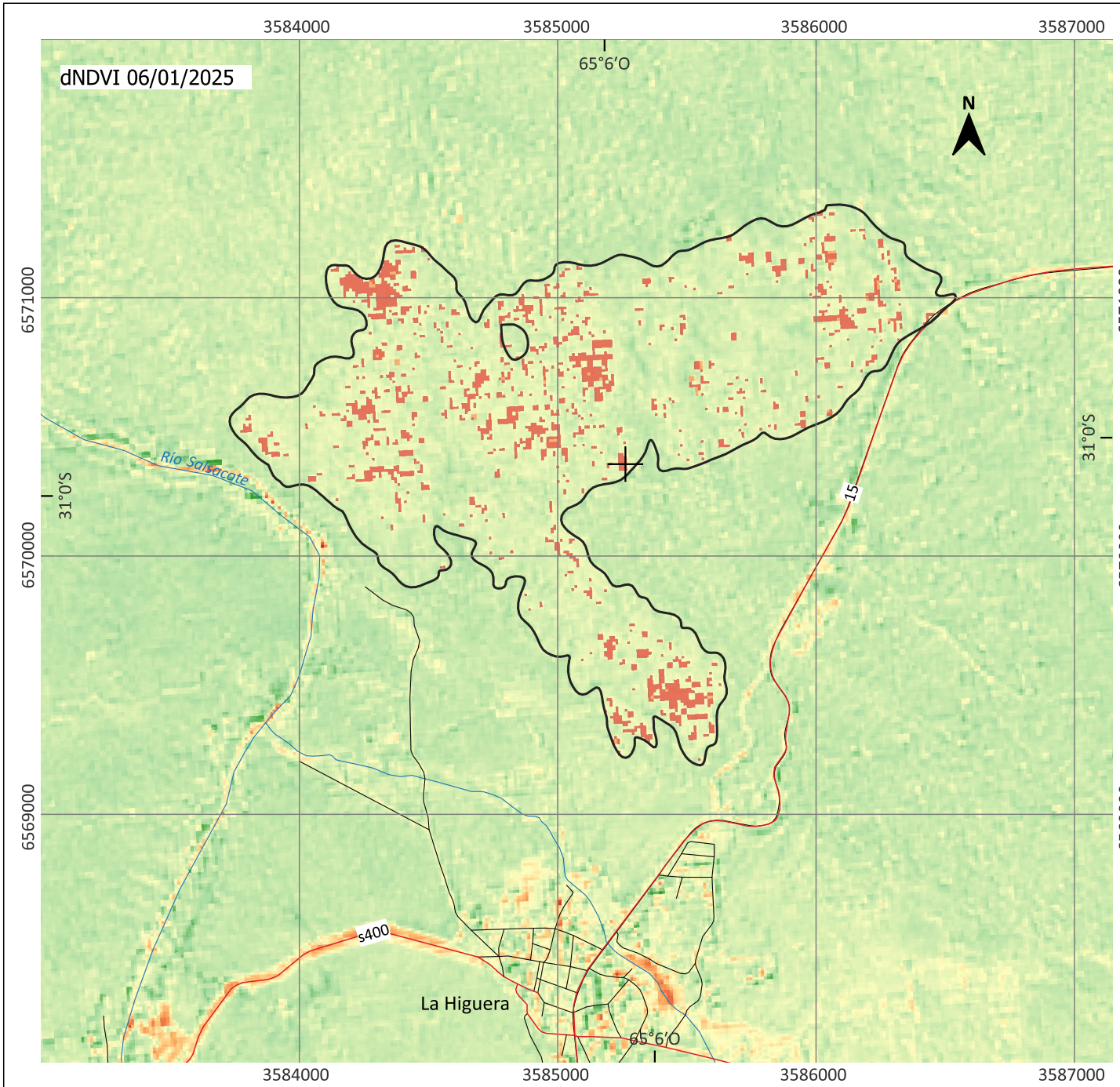
Referencias

Cobertura vegetal
- Zona quemada con gravedad alta
- Zona quemada con gravedad media
- Baja recuperación
- Recuperación moderadamente baja
- Recuperación moderadamente alta
- Alta recuperación
- Límite del área afectada por el incendio
- Límite interprovincial
- Provincia de Córdoba
- Provincias limítrofes

Análisis realizado a partir de imágenes Sentinel-2 Nivel 2A, mediante el cálculo del Índice diferenciado correspondiente al índice de vegetación de diferencia normalizad (dNDVI), tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022.

250 0 250 500 m

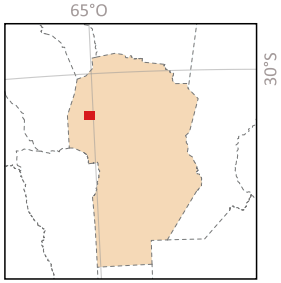
Proyección Gauss Krüger - Faja 3.
Marco de Referencia Geodésico POSGAR07



Mapa de recuperacion de daños a 24 meses

Superficie afectada: 142,5 ha
Superficie recuperada 123,5 ha
Superficie en recuperación: 19 ha

Ubicación geográfica



Referencias

Cobertura vegetal

- Zona quemada con gravedad alta
- Zona quemada con gravedad media
- Baja recuperación
- Recuperación moderadamente baja
- Recuperación moderadamente alta
- Alta recuperación
- Límite del área afectada por el incendio
- Límite interprovincial
- Provincia de Córdoba
- Provincias limítrofes

Análisis realizado a partir de imágenes Sentinel-2 Nivel 2A, mediante el cálculo del Índice diferenciado correspondiente al índice de vegetación de diferencia normalizad (dNDVI), tomando como línea de base de referencia la escena pre-incendio del 18/12/2022.

250 0 250 500 m

Proyección Gauss Krüger - Faja 3.
Marco de Referencia Geodésico POSGAR07