

1. Introducción

La Teledetección es una disciplina que permite obtener información sobre la superficie terrestre sin necesidad de contacto físico directo, mediante el análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos. Esta información es captada por sensores ubicados en plataformas como satélites, aeronaves, drones o estaciones terrestres.

Desde una perspectiva amplia, la Teledetección incluye un conjunto de técnicas destinadas a observar y cuantificar características del suelo, la vegetación, el agua, y otros elementos del entorno natural o construido. Los sensores pueden ser pasivos (figura 1), cuando dependen de fuentes naturales como la radiación solar, o activos, cuando generan su propia energía, como ocurre con los sistemas radar o LiDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging).

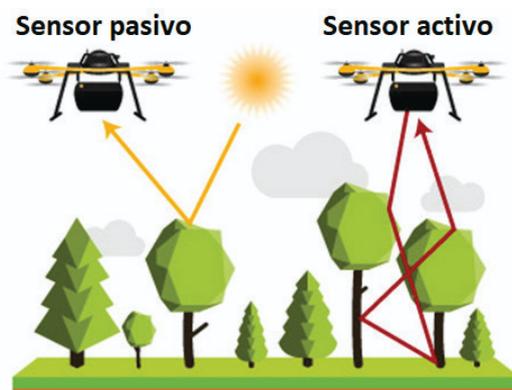


Figura 1. Sensor pasivo y sensor activo (Adaptado de:

<https://www.yellowscan.com/es/knowledge/how-does-lidar-work/>)

Los datos obtenidos se procesan para generar imágenes o mapas temáticos, útiles en múltiples escalas espaciales y temporales. En el ámbito agrícola, por ejemplo, la Teledetección se ha consolidado como una herramienta clave para la gestión eficiente de cultivos, la evaluación del estado nutricional de las plantas, el monitoreo del riego, la detección temprana de plagas y enfermedades, y la estimación de rendimientos (figura 2).



Figura 2. Dron DJI PH4 Multiespectral (<https://ag.dji.com/es/p4-multispectral>)

La Teledetección no debe confundirse con la fotogrametría, disciplina centrada en la obtención de información geométrica precisa a partir de imágenes. La

fotogrametría se enfoca en la medición y reconstrucción tridimensional de objetos, mientras que la Teledetección se orienta al análisis espectral y a la caracterización de patrones sobre la superficie terrestre.

Un sistema de Teledetección permite captar información en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético (figura 3), lo cual es fundamental para identificar y clasificar los distintos tipos de cobertura terrestre.

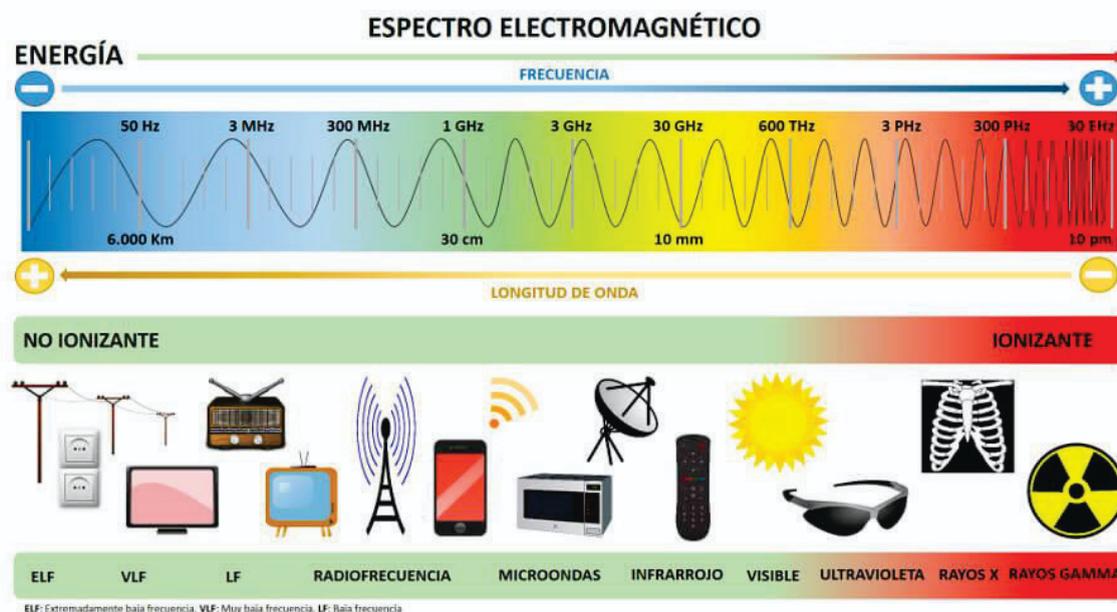


Figura 3. Espectro electromagnético

(<https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/campos-electromagneticos>)

Para captar dicha información, el sistema de Teledetección incluye diversos componentes: una fuente de energía (natural o artificial), una plataforma portadora (satélites o drones), sensores especializados (multiespectrales e hiperespectrales, figura 4), y un sistema de recepción y procesamiento de datos.

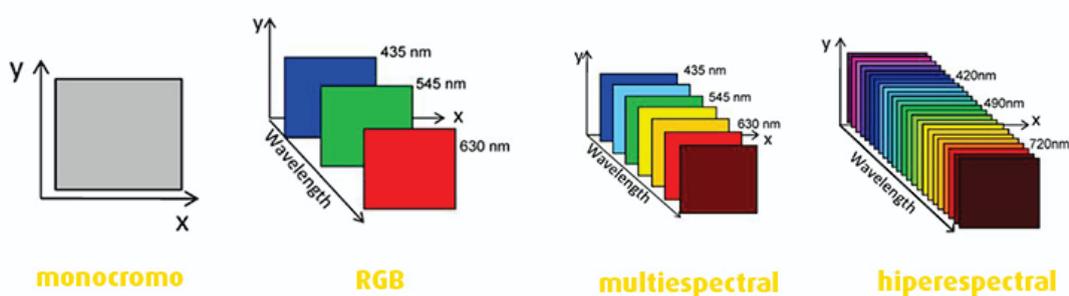


Figura 4. Cobertura de bandas de imágenes monocromo, RGB, multiespectrales e hiperespectrales

(<https://bcnvision.es/blog-vision-artificial/camaras-hiperespectrales/>)

Por último, los productos visuales se obtienen como resultado tras el procesamiento de los datos recogidos por los sistemas de Teledetección, incluyendo correcciones radiométricas y atmosféricas, así como técnicas de clasificación e interpretación.

2. Imágenes satélite

En el contexto de la agricultura moderna y de precisión, las imágenes satelitales se han convertido en herramientas fundamentales para la observación, análisis y gestión de los cultivos y recursos naturales. Estas imágenes permiten monitorear grandes extensiones de terreno con gran frecuencia y nivel de detalle. Los satélites de observación terrestre capturan datos multiespectrales en distintas resoluciones espaciales, temporales y espectrales, facilitando el análisis de variables como la cobertura vegetal, el estrés hídrico, el uso del suelo y el desarrollo de los cultivos.

Entre las plataformas más relevantes y utilizadas en agricultura destacan los programas Landsat y Sentinel, cuyos datos son gratuitos, de acceso abierto y ampliamente validados por la comunidad científica.

2.1. Imágenes Landsat

El programa Landsat, desarrollado por la NASA y operado junto con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), es el proyecto de observación terrestre más longevo del mundo (figura 5). Desde 1972, sus satélites han proporcionado un archivo histórico para el estudio del cambio en la superficie terrestre, incluyendo el uso agrícola, la deforestación, la disponibilidad de agua y la salud del suelo y la vegetación.

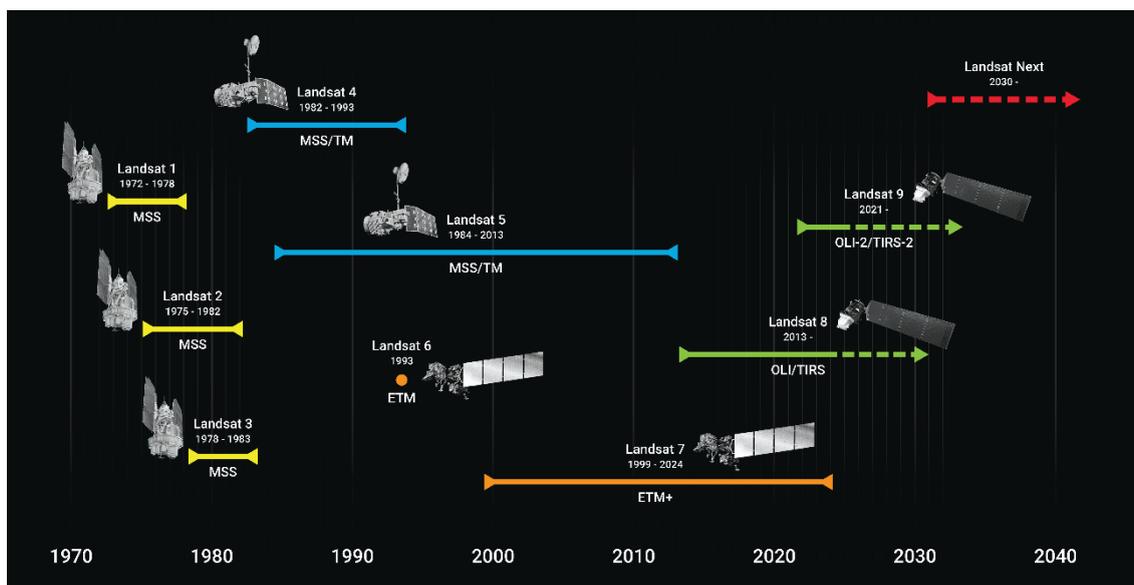


Figura 5. Evolución histórica de programa Landsat, desde 1972 a la actualidad
(<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/timeline/>)

El lanzamiento del Landsat 1 en 1972 marcó un hito en la observación de la Tierra al introducir el uso de sensores multiespectrales. Este satélite fue pionero en la captura de imágenes con fines agrícolas, forestales y de gestión ambiental, ofreciendo una resolución espacial de 80 metros. A este primer esfuerzo le siguieron los satélites Landsat 2 y Landsat 3, lanzados entre 1975 y 1978. Ambos mantuvieron los sensores multiespectrales de imagen y RBV (Return Beam Vidicon) de video.

El verdadero salto tecnológico llegó con Landsat 4 (1982) y Landsat 5 (1984), que incorporaron el sensor Thematic Mapper (TM). Este sensor introdujo nuevas bandas espectrales, incluidas en el infrarrojo térmico, y mejoró significativamente la resolución espacial a 30 metros. De todos, Landsat 5 destacó especialmente por su longevidad, ya que operó durante casi tres décadas, convirtiéndose en uno de los satélites más duraderos jamás lanzados.

Más tarde, en 1993, el intento de lanzar el Landsat 6 resultó fallido. Sin embargo, el programa se retomó con éxito en 1999 con el lanzamiento del Landsat 7, que incorporó el sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM+), que añadió una banda pancromática con resolución de 15 metros y mejoró notablemente la calidad geométrica de las imágenes del sensor ETM.

La octava misión del programa, Landsat 8 (figura 6.a), fue lanzada en 2013 y supuso una mejora significativa al incorporar dos sensores modernos: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). Estos sensores introdujeron nuevas bandas espectrales diseñadas para el análisis de aerosoles atmosféricos, la calidad del agua y la temperatura de la superficie terrestre, ampliando considerablemente el potencial analítico del sistema.

Finalmente, en 2021 fue lanzado el Landsat 9 (figura 6.b), equipado con los sensores OLI-2 y TIRS-2, este satélite mejora la precisión de calibración y la capacidad de captura de datos, asegurando la continuidad del legado Landsat en estudios de largo plazo relacionados con el cambio climático, el uso del suelo y la gestión ambiental global.

Los satélites Landsat actuales capturan imágenes multiespectrales y térmicas con una resolución espacial media (30 m), lo que los hace ideales para estudios regionales. Gracias a su frecuencia de revisita de 16 días y su cobertura global, ofrecen información actualizada y comparativa para detectar cambios a lo largo del tiempo.

La próxima generación del programa Landsat, Landsat Next, busca mejorar aún más la resolución espacial, espectral y temporal. Esta evolución ampliará las posibilidades de análisis agrícola, integrando más bandas y mayor frecuencia de observación, elementos clave para una agricultura basada en datos.

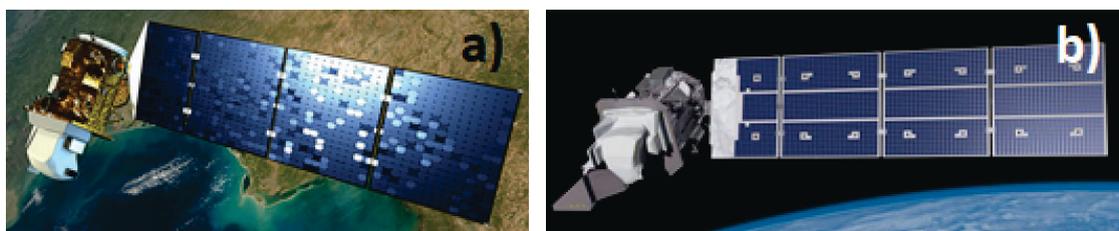


Figura 6. Satélites Landsat 8 (a) y Landsat 9 (b)
(<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/>)

2.2. Imágenes Sentinel

El programa Copernicus es el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA). Está conformado por una serie de misiones satelitales diseñadas para proporcionar datos continuos y de alta calidad sobre distintos aspectos del medio ambiente terrestre, oceánico y atmosférico. Cada familia Sentinel (figura 7) cumple funciones específicas mediante diferentes tipos de sensores. Sentinel-1, con radar de apertura sintética (SAR), permite observar la superficie terrestre independientemente de las condiciones meteorológicas o de luz. Sentinel-3, equipado con sensores ópticos y de altimetría, se orienta al estudio de los océanos y el cambio climático global. Por otro lado, Sentinel-5P, junto con los futuros Sentinel-4 y Sentinel-5, están dedicados a la vigilancia de la composición atmosférica.

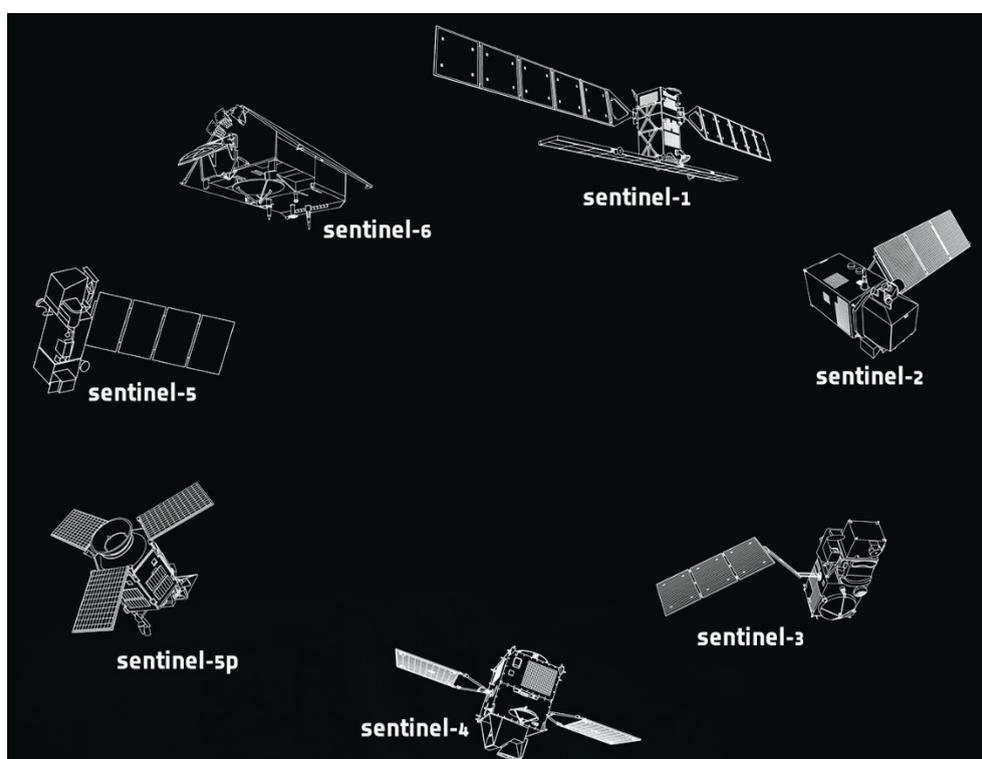


Figura 7. Satélites del programa Copernicus

(https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions)

Entre las familias Sentinel, destacan los satélites Sentinel-2, debido a que sus sensores ópticos multiespectrales de alta resolución están especialmente diseñados para el monitoreo detallado de la cobertura terrestre, la vegetación y el uso del suelo, siendo particularmente relevantes para aplicaciones en agricultura, medio ambiente y planificación territorial.

Una de las principales ventajas de los satélites Sentinel-2 es la combinación de alta resolución espacial, frecuencia de observación corta (5 días) y una amplia variedad espectral. Concretamente, su sensor multiespectral cubre 13 bandas, incluyendo bandas para clorofila, contenido de agua y aerosoles, con una franja de cobertura

de 290 km. Esto lo que lo convierte en una herramienta fundamental para la agricultura de precisión, el análisis ambiental y la gestión de recursos naturales.

El primer satélite, Sentinel-2A, fue lanzado en 2015 y comenzó a registrar imágenes multispectrales de 10 m, 20 m y 60 m de resolución, cubriendo toda la superficie terrestre junto al mar cada diez días. Dos años después, en 2017, despegó el segundo satélite idéntico, Sentinel-2B, que junto con Sentinel-2A redujo el intervalo de revisita a cinco días, permitiendo capturar cambios rápidos en los cultivos con mayor frecuencia.

El impulso más reciente llegó con el lanzamiento de Sentinel-2C en 2024, que sustituye gradualmente a Sentinel-2A tras un periodo de observaciones paralelas, reforzando la constelación y mejorando la disponibilidad de imágenes con menos cobertura nubosa, ver figura 8.

Próximamente, Sentinel-2D reemplazará a Sentinel-2B entre 2028 y 2029, y, además, se prevé la misión Sentinel-2 Next Generation, diseñada para garantizar la continuidad de los datos ópticos de alta resolución más allá de 2035.



Figura 8. Satélites de la familia Sentinel-2

(https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Sentinel_2B_-_Dosier_de_Prensa)

2.3. Bandas espectrales de los programas Landsat y Sentinel-2

Tanto la serie de satélites Landsat como el programa Sentinel-2 están equipados con sensores ópticos diseñados para captar distintas regiones del espectro electromagnético, desde la luz visible hasta el infrarrojo térmico. Estos sensores dividen el espectro en lo que se conocen como bandas espectrales, que registran información a distintas longitudes de onda. Esta información es crucial para interpretar fenómenos biofísicos como la salud de la vegetación, la presencia de humedad en el suelo, o la temperatura superficial.

En cuanto a los satélites Landsat, cada nuevo satélite incorpora ampliación en el número de bandas espectrales captadas por sus sensores y su resolución. Destaca que, con Landsat 7 se añadió una banda pancromática (banda 8) de alta resolución y mejoras en la calidad geométrica gracias al sensor ETM+. Luego, Landsat 8 y

Landsat 9 incorporaron los sensores OLI, que capta nueve bandas. y TIRS, que aporta dos bandas térmicas.

Las bandas más comúnmente utilizadas en aplicaciones agrícolas, ambientales y de recursos naturales incluyen:

- Banda 2 (Azul). Con longitudes de onda entre los 0,45 y 0,51 μm . Útil para el análisis de cuerpos de agua y detección de nubes.
- Banda 3 (Verde). Con longitudes de onda entre los 0,53 y 0,59 μm . Se usa en combinación con el rojo y azul para generar imágenes en color natural.
- Banda 4 (Rojo). Con longitudes de onda entre los 0,64 y 0,67 μm . Importante para analizar la cobertura vegetal.
- Banda 5 (NIR). Con longitudes de onda entre los 0,85 y 0,88 μm . Clave para el cálculo del índice NDVI y estudios de biomasa vegetal.
- Bandas 6 y 7 (SWIR 1 y 2). Con longitudes de onda entre los 1,57 y 2,29 μm . Muy sensibles a la humedad del suelo y vegetación, útiles en análisis de sequía y estrés hídrico.
- Bandas 10 y 11 (Térmicas). Con longitudes de onda entre los 10,60 y 12,51 μm . Usadas para detectar anomalías térmicas, evaluar islas de calor urbano o necesidades de riego.

La figura 9 resume la evolución de las bandas espectrales a lo largo de la serie Landsat.

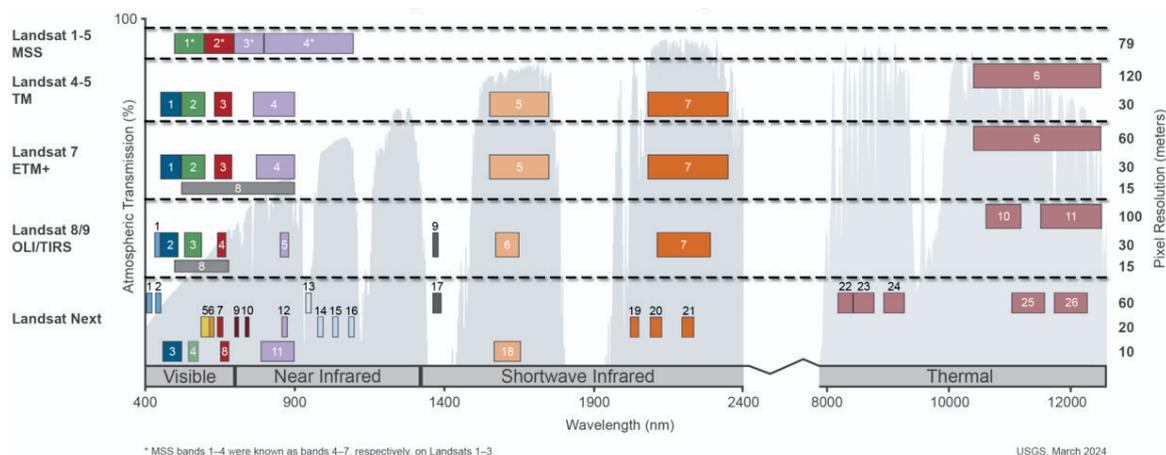


Figura 9. Bandas espectrales de los satélites Landsat desde Landsat 1 hasta Landsat Next (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9>)

Por otro lado, el sistema Sentinel-2 emplea el sensor MSI, que captura información en 13 bandas espectrales. Estas incluyen bandas en el visible (RGB), el infrarrojo cercano y de onda corta, así como bandas diseñadas específicamente para estudiar la vegetación (red-edge) y la atmósfera (vapor de agua, aerosoles). Las bandas principales de Sentinel-2 incluyen:

- Bandas 2, 3 y 4 (Visible: Azul, Verde y Rojo). Cubren el espectro visible, utilizadas para composiciones en color verdadero y estudios visuales básicos.

- Banda 8 (NIR). Con longitud de onda alrededor de los 0,84 μm . De alta resolución (10 m), empleada en el cálculo del NDVI, fundamental para evaluar la salud de la vegetación.
- Bandas 5, 6, 7 y 8A (Red-Edge). Con longitudes de onda entre los 0,705 y 0,865 μm . Estas bandas permiten detectar variaciones sutiles en la vegetación antes de que sean visibles en el espectro tradicional, siendo especialmente valiosas para monitorear el estrés de cultivos.
- Bandas 11 y 12 (SWIR). Con longitudes de onda entre los 1,61 y 2,19 μm . Sensibles al contenido de humedad en el suelo y vegetación, útiles para estimar necesidades hídricas.
- Bandas 1, 9 y 10. Diseñadas para aplicaciones atmosféricas (corrección de aerosoles y detección de vapor de agua). La banda 10 no se utiliza debido a su mala calidad radiométrica.

Una de las grandes ventajas del Sentinel-2 frente a Landsat es su mayor resolución espacial y temporal, con imágenes disponibles cada 5 días, lo que permite una monitorización más frecuente de fenómenos rápidos como el crecimiento de cultivos, incendios o inundaciones. Las figuras 10 a 12 muestran las bandas del sistema Sentinel-2 atendiendo a sus diferentes resoluciones.

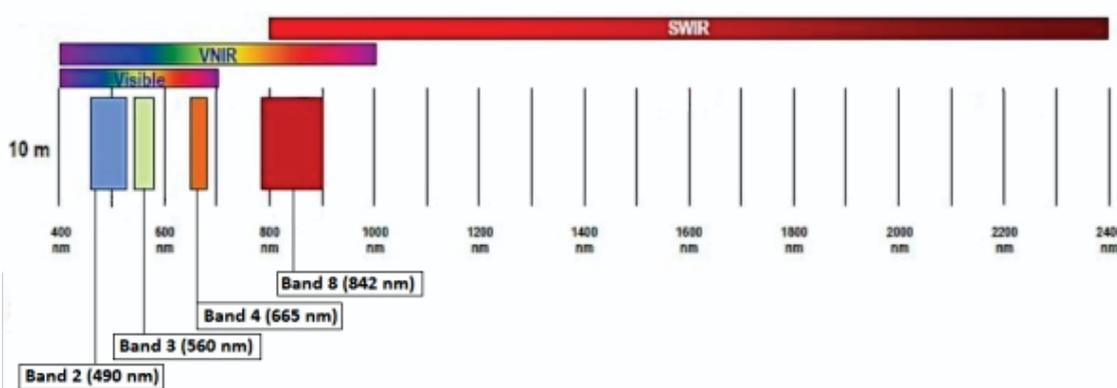


Figura 10. Bandas espectrales del sistema Sentinel-2 con resolución de 10m
<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>

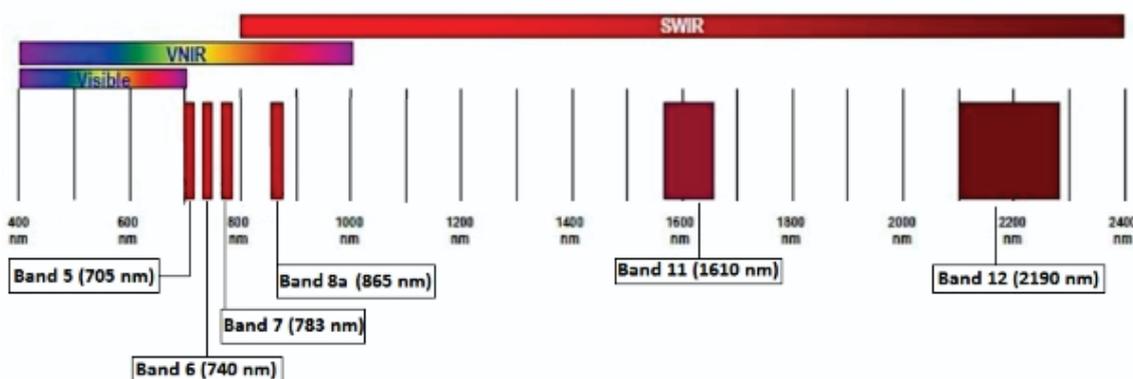


Figura 11. Bandas espectrales del sistema Sentinel-2 con resolución de 20m
<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>

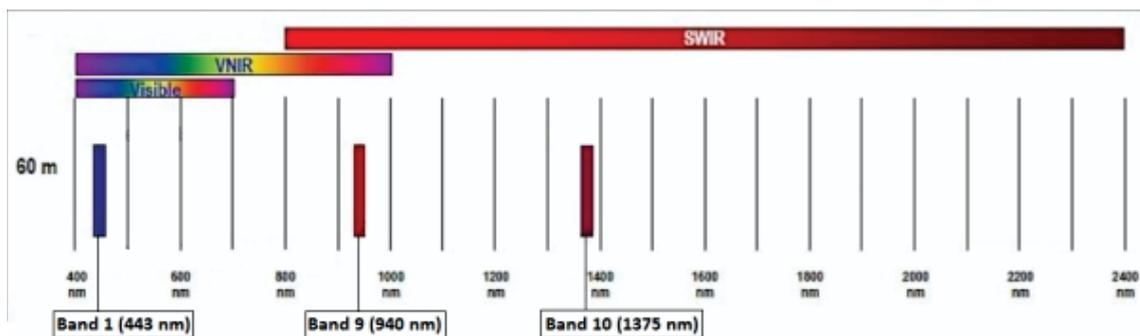


Figura 12. Bandas espectrales del sistema Sentinel-2 con resolución de 60m
 (<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>)

Tanto el programa Landsat como el Sentinel-2 son altamente complementarios. Mientras Landsat ha sido fundamental en el análisis multitemporal de largo plazo (desde los años 70), Sentinel-2 ofrece datos más recientes, pero con una resolución espacial y temporal mejorada. La tabla 1 señala las diferencias entre ambos programas.

Tabla 1. Comparación de características de los sensores Landsat y Sentinel-2

Característica	Landsat 8/9 (OLI/TIRS)	Sentinel-2 (MSI)
Bandas totales	11	13
Resolución espacial	15–30–100 m	10–20–60 m
Cobertura temporal	16 días	5 días
Alcance espectral	Visible a térmico	Visible a SWIR
Bandas red-edge	No	Sí (3 bandas)
Bandas térmicas	Sí (2 bandas)	No

Las distintas bandas espectrales permiten abordar una amplia variedad de estudios. Por un lado, el NIR y las bandas Red-Edge permiten distinguir vegetación sana de estresada mediante índices como el NDVI. Además, las bandas NIR y verde se usan para calcular el NDWI y detectar cuerpos de agua o su humedad.

Por otro lado, las bandas SWIR permiten diferenciar suelos secos de húmedos, así como determinar la composición mineral. Y las bandas térmicas de Landsat son útiles para detectar islas de calor, necesidades de riego o actividad volcánica.

3. Conceptos fundamentales

En el análisis de imágenes satelitales es esencial comprender ciertos conceptos clave que permiten interpretar correctamente la información registrada por los sensores. Entre estos conceptos destacan las firmas espectrales y los índices espectrales, fundamentales para evaluar el estado de la vegetación, detectar cambios ambientales o realizar estudios de uso del suelo.

3.1. Firmas espectrales

Las firmas espectrales representan el patrón característico de reflectancia o emisión de una superficie a lo largo del espectro electromagnético. Cada tipo de cobertura del suelo, ya sea vegetación, agua, suelo desnudo, plástico o construcciones, refleja y absorbe la radiación solar de manera distinta en cada banda del espectro, lo que permite su identificación y clasificación a partir de imágenes multispectrales u hiperespectrales.

Una firma espectral típica se representa mediante un gráfico en el que el eje X corresponde a la longitud de onda (en micrómetros o nanómetros) y el eje Y a la reflectancia. Este gráfico permite observar las diferencias entre materiales según cómo interactúan con la energía solar (figura 13).

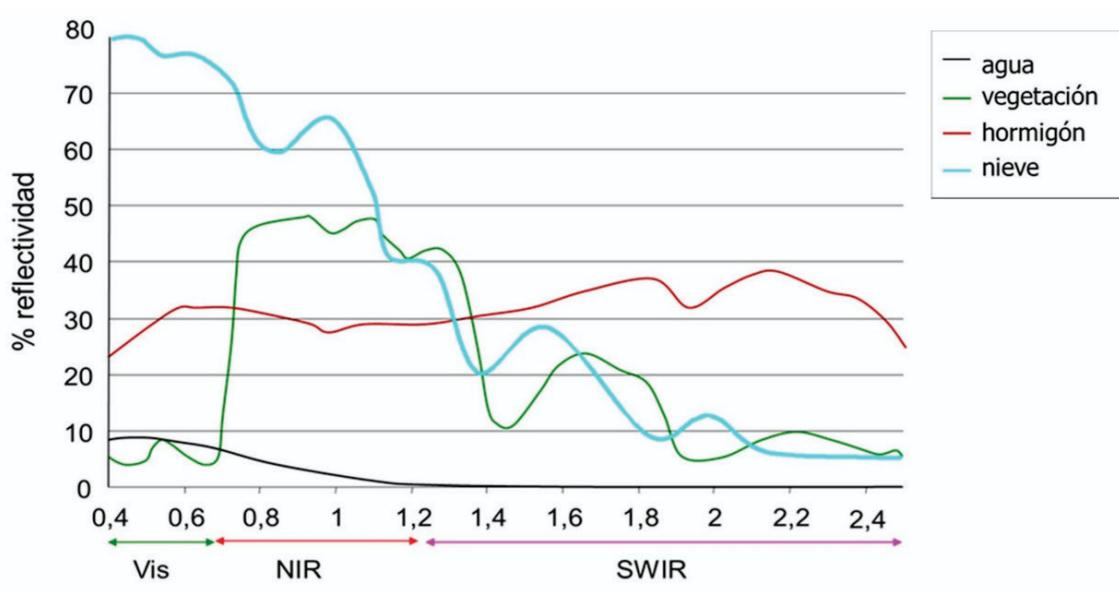


Figura 13. Firmas espectrales del agua, vegetación, hormigón y nieve
(<https://pnt.ign.es/firmas-espectrales>)

Entre las distintas cubiertas del terreno, cada tipo de superficie presenta un comportamiento espectral único que permite su identificación a través de imágenes satelitales. Por ejemplo, la vegetación saludable se caracteriza por absorber gran parte de la radiación en la región del rojo (alrededor de los 660 nanómetros), debido a la presencia de clorofila, mientras que refleja intensamente en el infrarrojo cercano (NIR, en torno a los 850 nanómetros), donde las estructuras internas de las hojas dispersan eficazmente la luz (figuras 14 y 15).

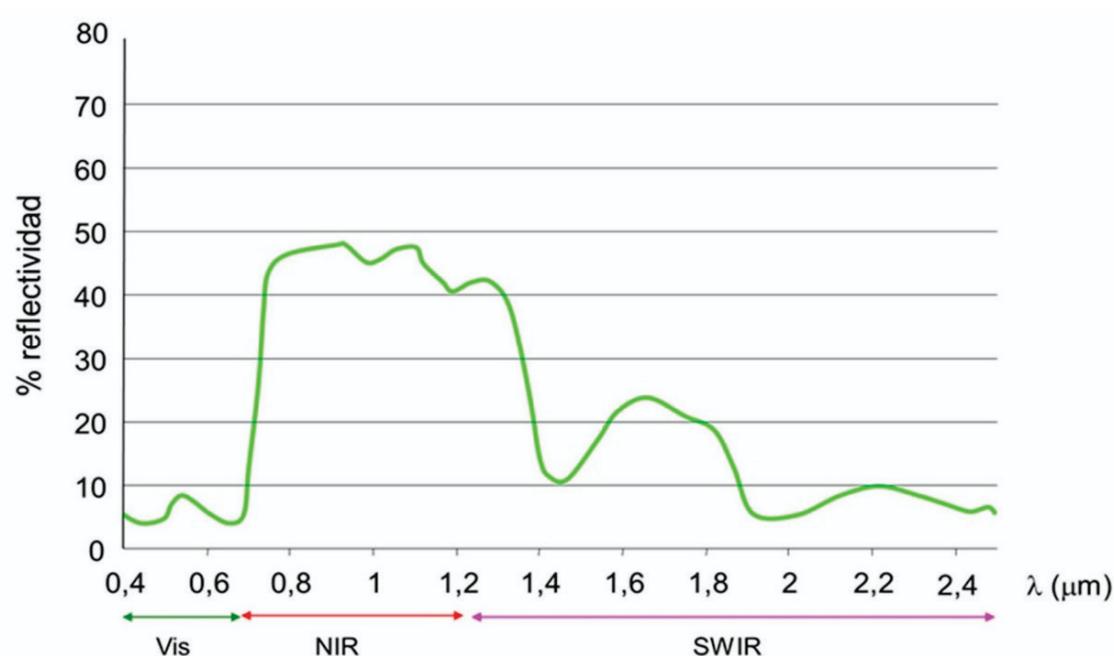


Figura 14. Firma espectral de una cubierta vegetal (<https://pnt.ign.es/firmas-espectrales>)

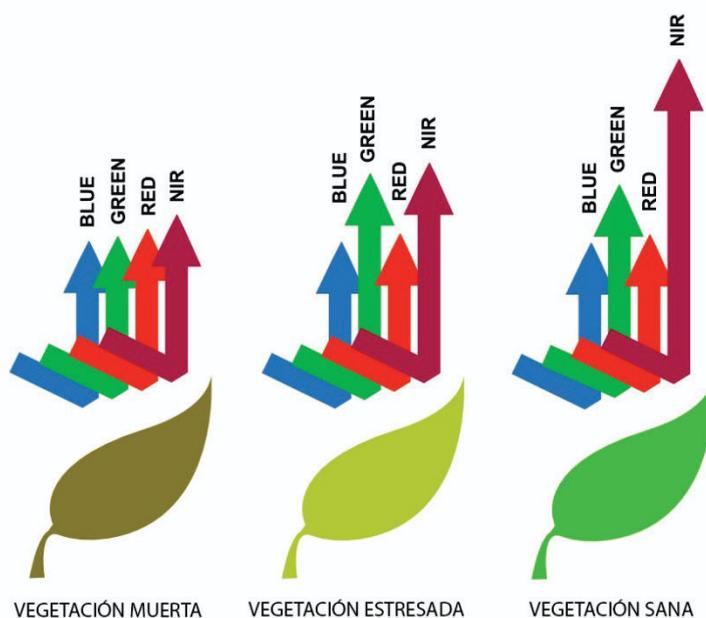


Figura 15. Reflectancia de la vegetación dañada y sana (<https://dstfotografia.com/ndvi/>)

En cambio, cuando la vegetación está estresada, seca o dañada, su firma espectral cambia notablemente. La reflectancia en el rojo tiende a aumentar como consecuencia de la pérdida de clorofila y la del infrarrojo cercano disminuye, al degradarse la estructura interna de las hojas. Esto permite detectar áreas con vegetación en mal estado.

Los suelos desnudos, por su parte, muestran un patrón espectral más uniforme. Su reflectancia suele ser intermedia y aumenta gradualmente desde el espectro

visible hacia el infrarrojo. No obstante, factores como la humedad, la textura o la composición mineral del suelo (ya sea arenoso, arcilloso o limo-arenoso) pueden generar variaciones sutiles en su firma. A diferencia de la vegetación, el suelo no presenta un salto brusco en la reflectancia entre bandas, lo que puede dificultar su distinción en zonas con escasa cobertura vegetal (figura 16).

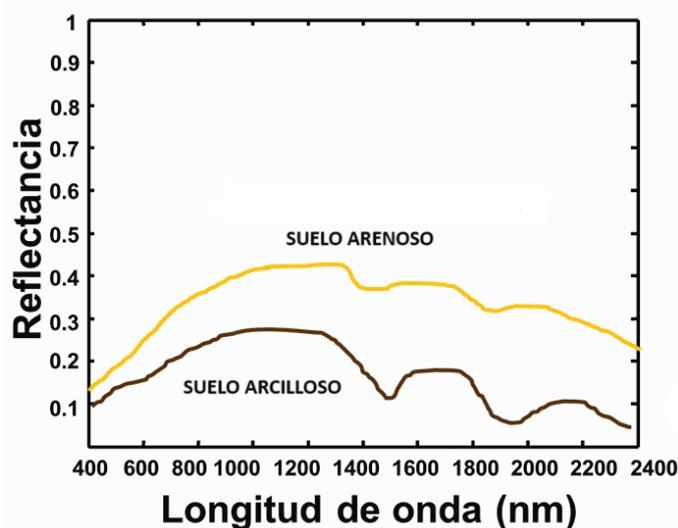


Figura 16. Firmas espectrales del suelo arenoso y arcilloso

(<https://continuemos estudiando.abc.gov.ar/contenido/explorando-la-vegetacion-desde-el-espacio/>)

En el caso de los cuerpos de agua, su comportamiento espectral es claramente diferenciado. El agua absorbe la mayor parte de la radiación tanto en el espectro visible como en el infrarrojo, con valores especialmente bajos en el NIR y en el SWIR, donde prácticamente no refleja luz (figura 17).

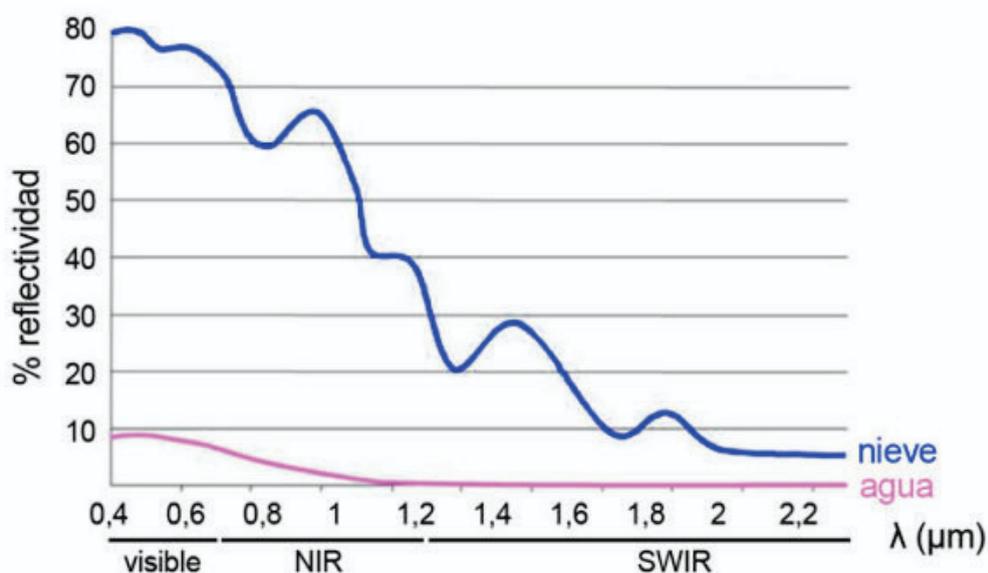


Figura 17. Firmas espectrales agua y la nieve

(<https://www.gisandbeers.com/tecnicas-analisis-masas-de-agua-teledeteccion/>)

Las áreas quemadas también presentan firmas espectrales distintivas. Tras un incendio, la vegetación se ve sustituida por suelos oscuros, cenizas o restos carbonizados, lo que produce un descenso marcado en la reflectancia del NIR y un aumento en el SWIR (figura 18).

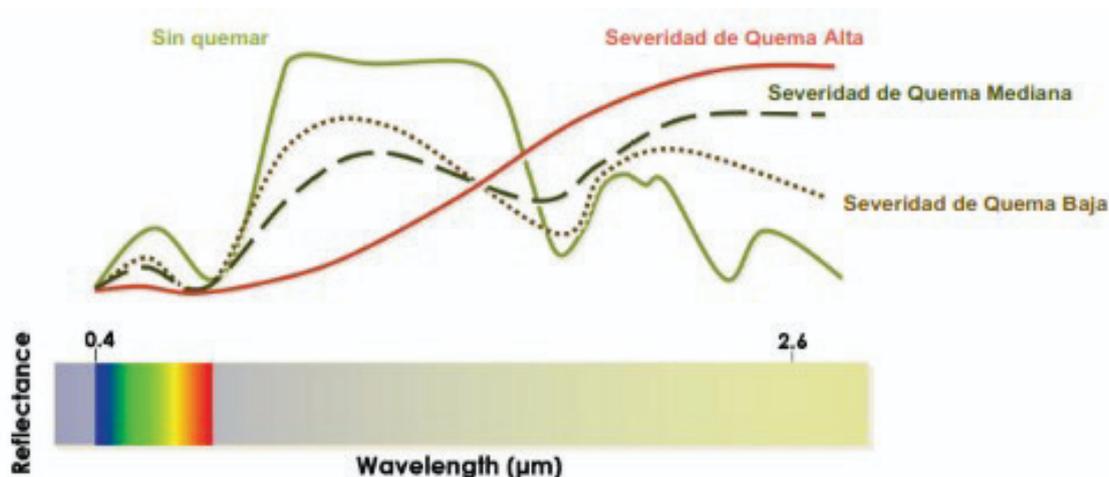


Figura 18. Firmas espectral de área quemada

(<https://angroman.wordpress.com/2022/05/30/deteccion-y-monitoreo-de-incendios-en-la-cuenca-del-amazonas-empleando-sensores-remotos-y-google-earth-engine/>)

3.2. Índices espectrales

Los índices espectrales son expresiones matemáticas que combinan la información de distintas bandas espectrales para destacar fenómenos o propiedades biofísicas específicas, como la salud de la vegetación, la humedad del suelo o los efectos de incendios forestales.

Uno de los indicadores más ampliamente utilizados en Teledetección para evaluar el estado de la vegetación es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Este índice se calcula a partir de la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y la del rojo visible (Red), normalizada por la suma de ambas según la fórmula (1).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

En imágenes obtenidas por sensores satelitales, como Sentinel-2 y Landsat 8/9, estas bandas corresponden a la B8 y B4 en el caso de Sentinel-2, y a las B5 y B4 respectivamente en Landsat. El NDVI genera valores que oscilan entre -1 y +1, y su interpretación permite distinguir distintas condiciones del terreno (figura 19).

- NDVI > 0,5: vegetación densa y saludable,
- NDVI entre 0,2 y 0,5: vegetación escasa o en crecimiento,
- NDVI < 0,2: suelo desnudo, áreas urbanas o vegetación degradada,
- NDVI < 0: presencia de agua o superficies altamente reflectantes como nieve.

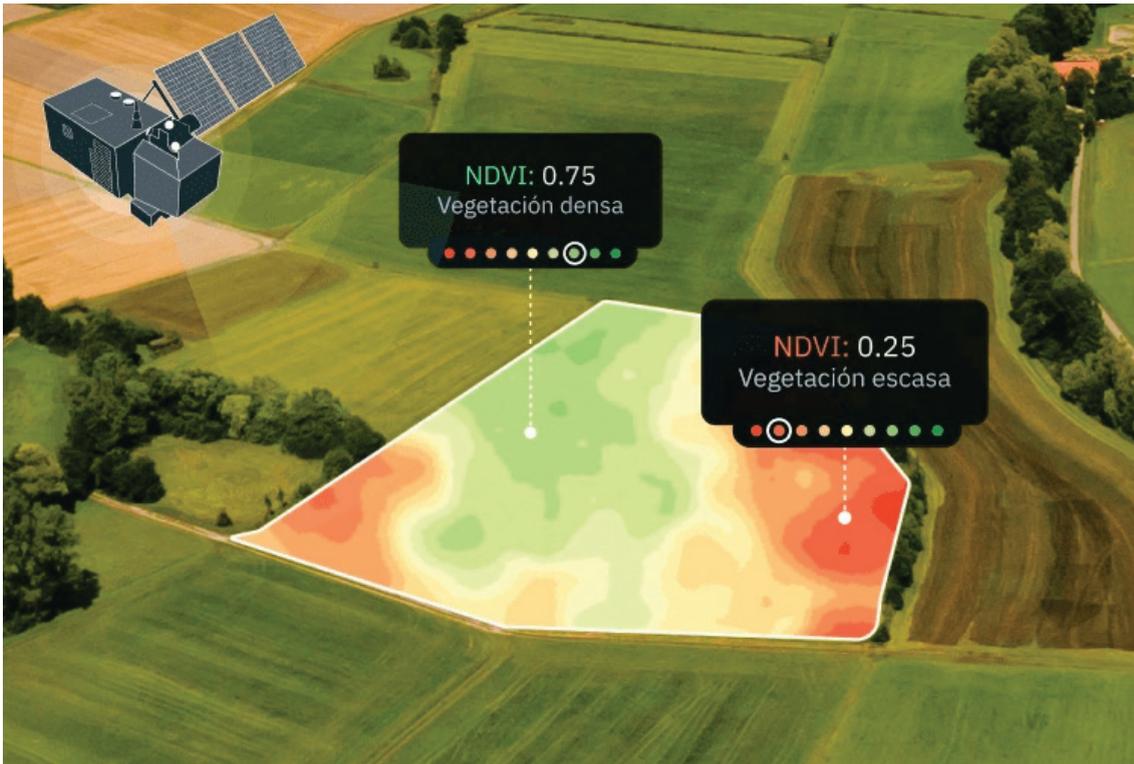


Figura 19. Ejemplo de resultados del NDVI (<https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>)

Por ejemplo, en un cultivo donde la reflectancia del NIR es de 0,7 y la del rojo de 0,2, el NDVI resultante sería 0,56, lo que indicaría una vegetación moderadamente saludable. Este índice es fundamental en aplicaciones agrícolas, monitoreo del estado de los cultivos, detección de estrés hídrico y en la planificación territorial.

Sin embargo, en áreas donde la vegetación es escasa o está en etapas iniciales de crecimiento, el NDVI puede verse fuertemente influenciado por el brillo del suelo. Para corregir esta limitación, se desarrolló el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI, Soil Adjusted Vegetation Index). El SAVI introduce un factor de corrección, denominado L , que atenúa la interferencia del suelo en la señal espectral, especialmente útil en regiones semiáridas o en cultivos incipientes, como se muestra en la ecuación (2).

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} * (1 + L) \quad (2)$$

Dependiendo de la densidad de la vegetación, el valor de L puede ajustarse:

- $L = 1$: vegetación escasa
- $L = 0,5$: vegetación moderada
- $L = 0,25$: vegetación densa

Por ejemplo, si se registran valores de $NIR = 0,6$ y $Red = 0,3$, con un L de 0,5, el valor de SAVI será de 0,321. Este índice ofrece una mejor caracterización del estado

vegetal en paisajes mixtos donde la señal del suelo puede distorsionar los análisis basados únicamente en NDVI. La figura 20 muestra un ejemplo de situaciones donde se recomienda usar el índice NDVI o el SAVI.

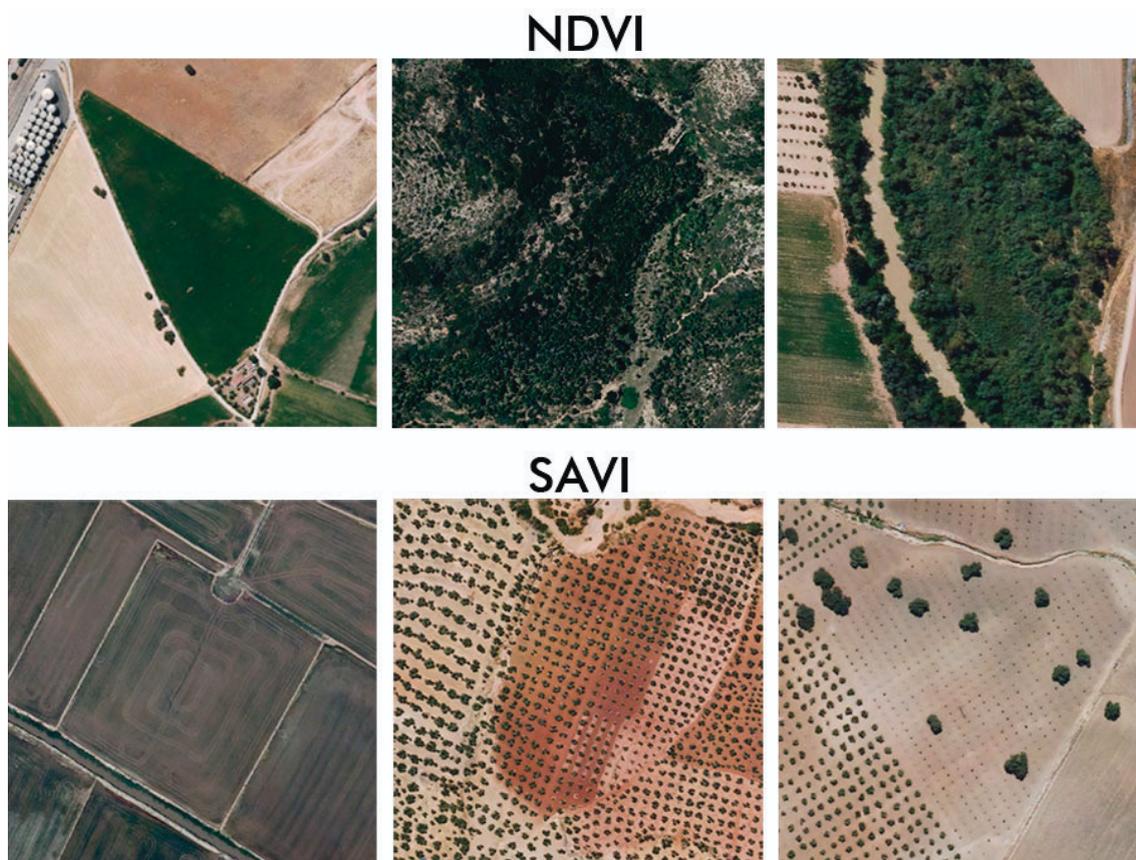


Figura 20. Situaciones donde usar el índice NDVI o SAVI
[\(https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/\)](https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/)

En la tabla 2 se resumen las principales diferencias entre los índices NDVI y SAVI, haciendo hincapié en las bandas usadas por cada uno y su aplicación.

Tabla 2. Comparación entre de características de los índices NDVI y SAVI

Índice	Bandas usadas	Rango de valores	Aplicación principal	Ventaja clave
NDVI	Red y NIR	-1 a +1	Evaluación de la salud y vigor de la vegetación	Muy sensible a cambios en la biomasa vegetal
SAVI	Red y NIR+ factor L	-1 a +1	Análisis en zonas con poca vegetación o suelo expuesto	Corrige el efecto del fondo del suelo

Por otro lado, cuando se trata de evaluar el impacto de incendios forestales, se recurre al Índice de Quemado Normalizado (NBR, Normalized Burn Ratio), diseñado específicamente para detectar áreas quemadas y medir la severidad del daño. Este índice explota el hecho de que la vegetación sana refleja intensamente

en el infrarrojo cercano, mientras que las superficies quemadas absorben más en el infrarrojo de onda corta (SWIR), como se muestra en la fórmula (3).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (3)$$

En este caso, se utilizan las bandas B5 y B7 en Landsat 8/9, o las bandas B8 y B12 en Sentinel-2. Los valores altos del NBR indican vegetación viva y no afectada, mientras que los valores bajos o negativos suelen señalar zonas quemadas. Este índice resulta especialmente útil para el seguimiento de incendios en áreas protegidas, reservas naturales o cultivos vulnerables al fuego. La figura 21 muestra un ejemplo del cálculo del NBR.

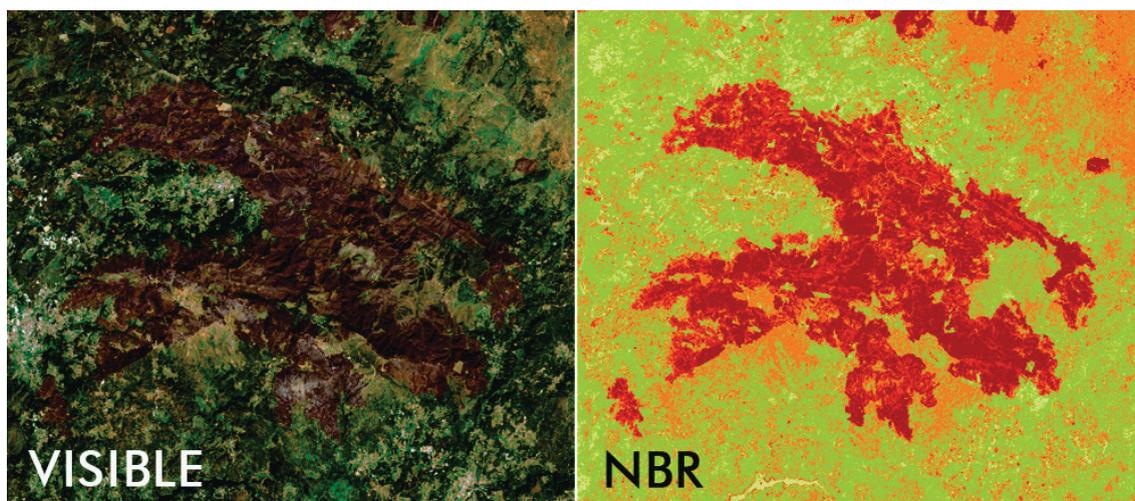


Figura 21. NBR en comparación con la imagen en el espectro visible
[\(https://www.gisandbeers.com/analisis-severidad-incendios-indice-nbr/\)](https://www.gisandbeers.com/analisis-severidad-incendios-indice-nbr/)

Para complementar este análisis, se utiliza el dNBR (delta NBR), que consiste en la resta entre los valores de NBR obtenidos antes y después de un incendio. Su propósito es cuantificar la severidad de la quema y clasificar el grado de impacto sobre la vegetación (ecuación 4).

$$dNBR = NBR_{anteior} - NBR_{posterior} \quad (3)$$

Los valores resultantes se interpretan según umbrales establecidos:

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

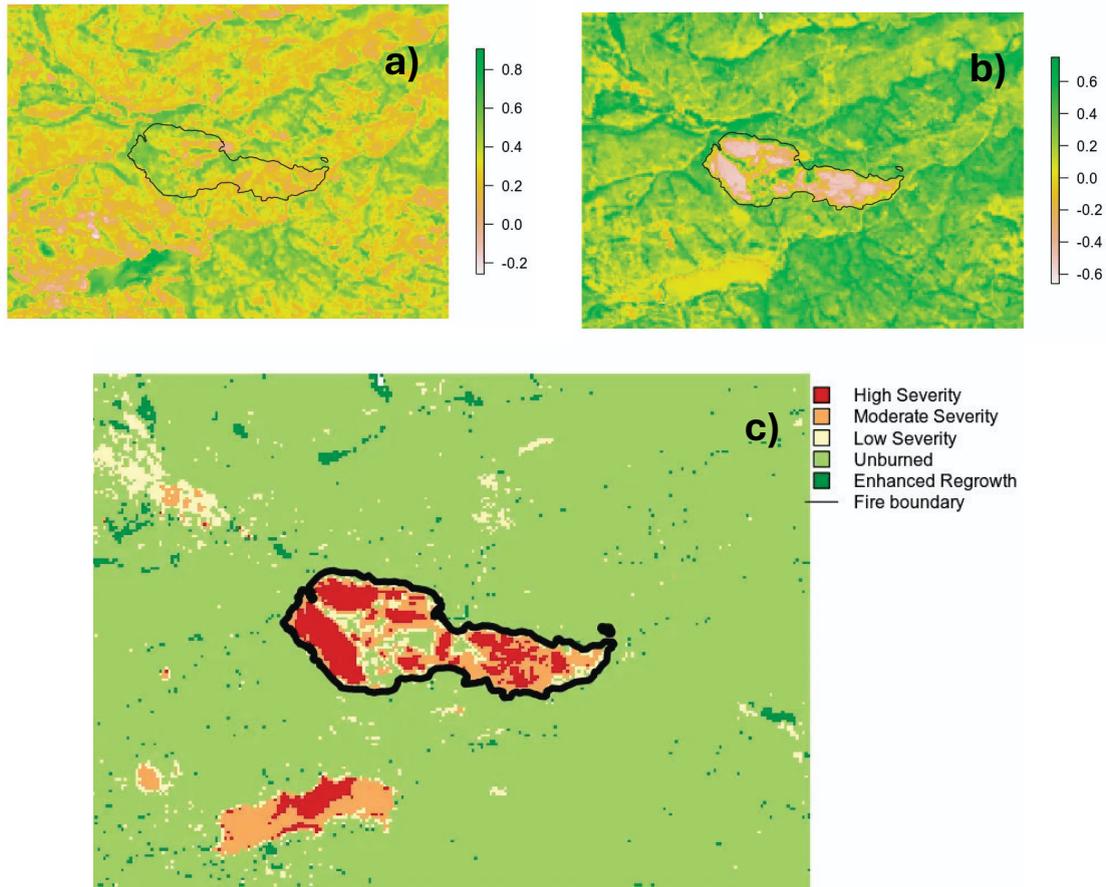


Figura 22. NBR anterior a un incendio (1), NBR posterior a un incendio (b) y dNBR resultante (c) (<https://www.earthdatascience.org/courses/earth-analytics/multispectral-remote-sensing-modis/normalized-burn-index-dNBR/>)

La figura 22 muestra un ejemplo del cálculo del dNBR a partir de los NBR anterior y posterior a un incendio.

4. Recursos web

Existen diversas plataformas online que permiten acceder de manera gratuita a imágenes satelitales provenientes de diferentes programas de observación de la Tierra, como las imágenes Landsat o Sentinel. Estos recursos web son herramientas fundamentales para trabajar en Teledetección, análisis territorial o seguimiento ambiental. Dos de los principales portales web son el EarthExplorer, USGS, y el Copernicus Browser, desarrollado por la ESA, en el marco del programa Copernicus.

4.1. EarthExplorer

EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) es un portal desarrollado por el USGS que permite consultar, visualizar y descargar datos geoespaciales de múltiples misiones satelitales, incluyendo la serie Landsat, así como imágenes de radar, fotografías aéreas y datos de elevación (figura 23). Se ha consolidado como una de las herramientas más completas para acceder a imágenes históricas y actuales.

La interfaz ofrece herramientas para delimitar áreas de interés, seleccionar rangos temporales y aplicar filtros por tipo de sensor o misión. También permite ajustar el nivel de nubes y seleccionar fechas. Una vez definidos estos parámetros, EarthExplorer muestra los resultados disponibles, los cuales pueden visualizarse en un visor interactivo. Para descargar los datos es necesario registrarse con una cuenta gratuita.

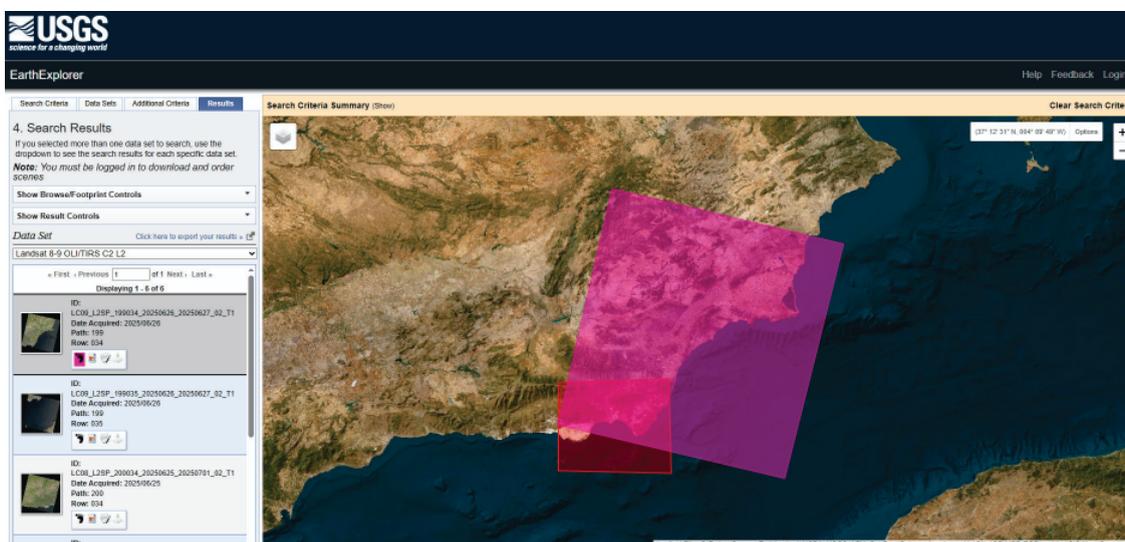


Figura 23. EarthExplorer web (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

4.1.1. Guía básica de EarthExplorer

Primero, se debe acceder a la plataforma EarthExplorer a través del siguiente enlace web: <https://earthexplorer.usgs.gov>. Después, para descargar imágenes es necesario iniciar sesión o registrarse de forma gratuita (figuras 24 a 26).

Teledetección Aplicada con QGIS: Casos Prácticos

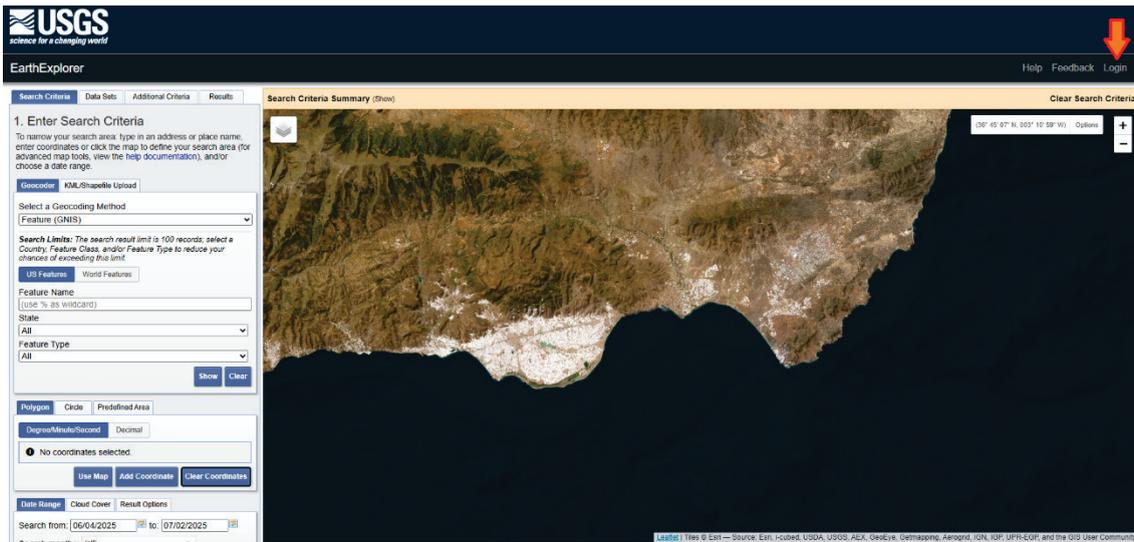


Figura 24. Acceso a registro de EarthExplorer

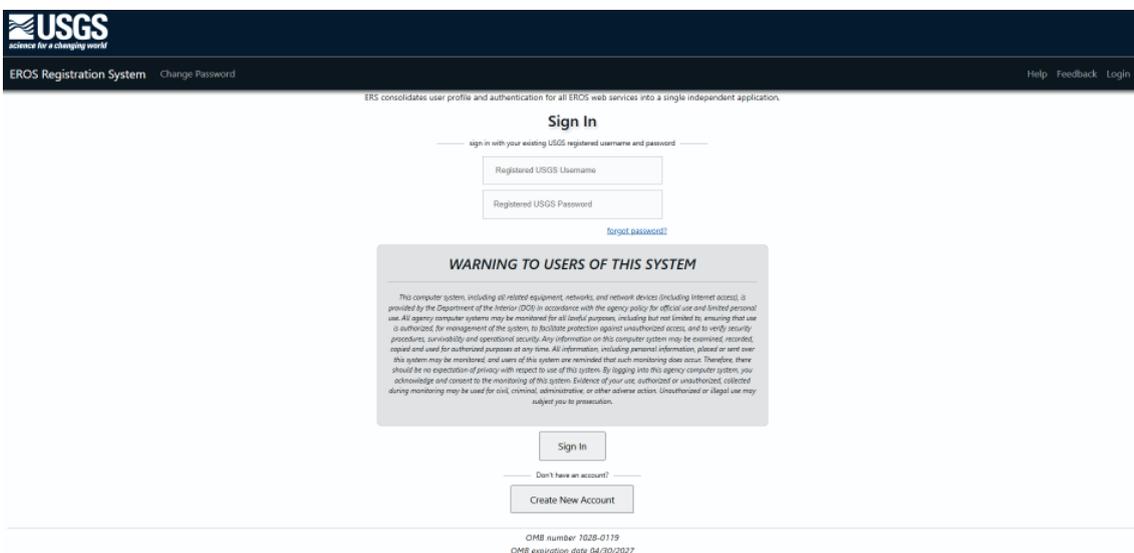


Figura 25. Inicio de sesión o registro en EarthExplorer

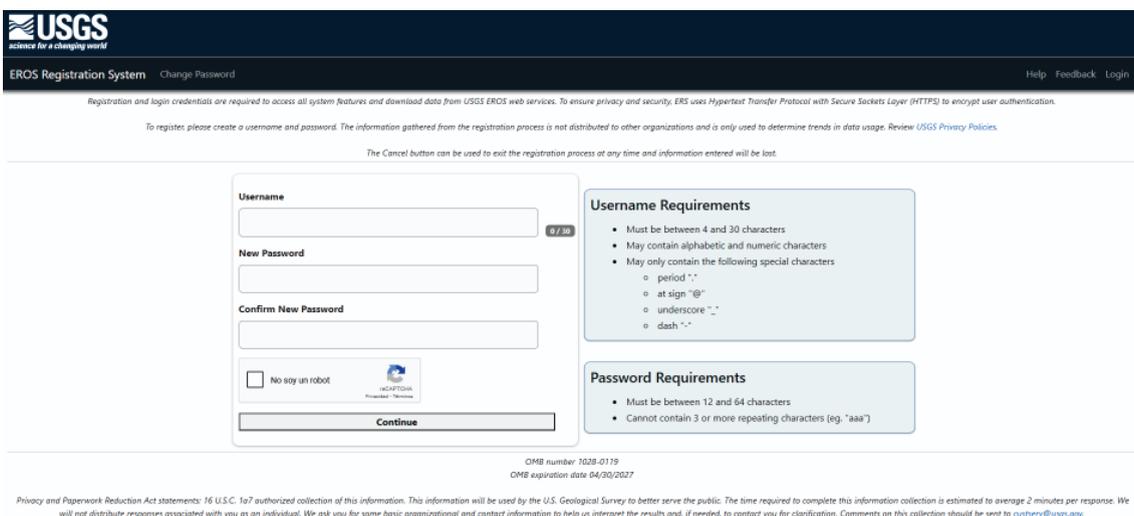


Figura 26. Registro EarthExplorer

Una vez iniciada sesión en la web, se define un área de interés. Esta representa la zona que queremos que incluya la imagen satélite. Se ha de tener en cuenta que las imágenes satélites Landsat tienen una resolución espacial del orden de varios kilómetros. Para definir el área de interés se debe acceder a la pestaña “Search Criteria”. En ella, el área de interés se puede definir en forma de polígono o círculo clicando en el visualizador de mapas de la plataforma o introduciendo sus coordenadas geográficas (figuras 27 y 28).



Figura 27. Definición del área de interés

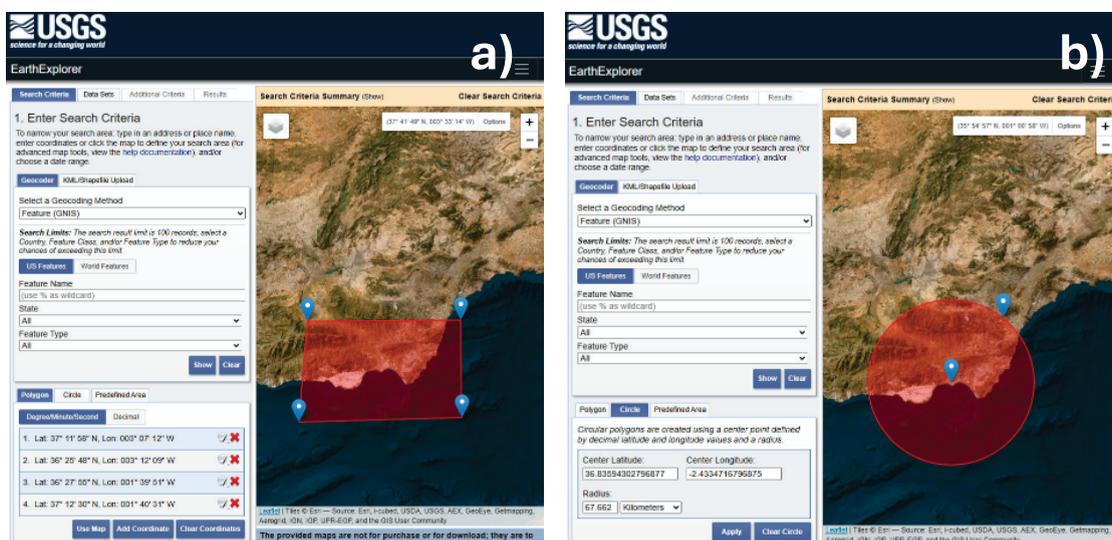


Figura 28. Definición del área de interés en forma de polígono (a) o círculo (b)

Tras definir el área de interés, se define el rango temporal de búsqueda de imágenes satélite (figura 29). Este apartado define la fecha de las imágenes satelitales que se obtendrán como resultado de la búsqueda. Este rango de fechas es flexible, pudiendo abarcar un día o varios años.

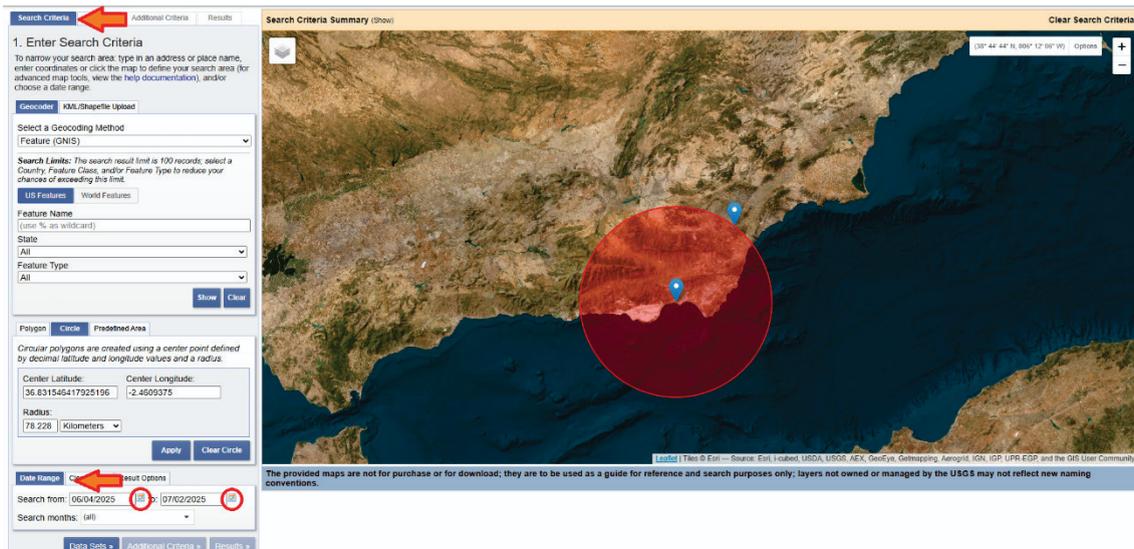


Figura 29. Definición del rango temporal de búsqueda

Además, se recomienda limitar la cobertura de nubes a un 10% o menos para que las imágenes seleccionadas no contengan un alto porcentaje de superficie terrestre cubierta por nubes. Así, se obtienen imágenes de mayor calidad. A esta opción también se accede desde la pestaña “Search Criteria” (figura 30).

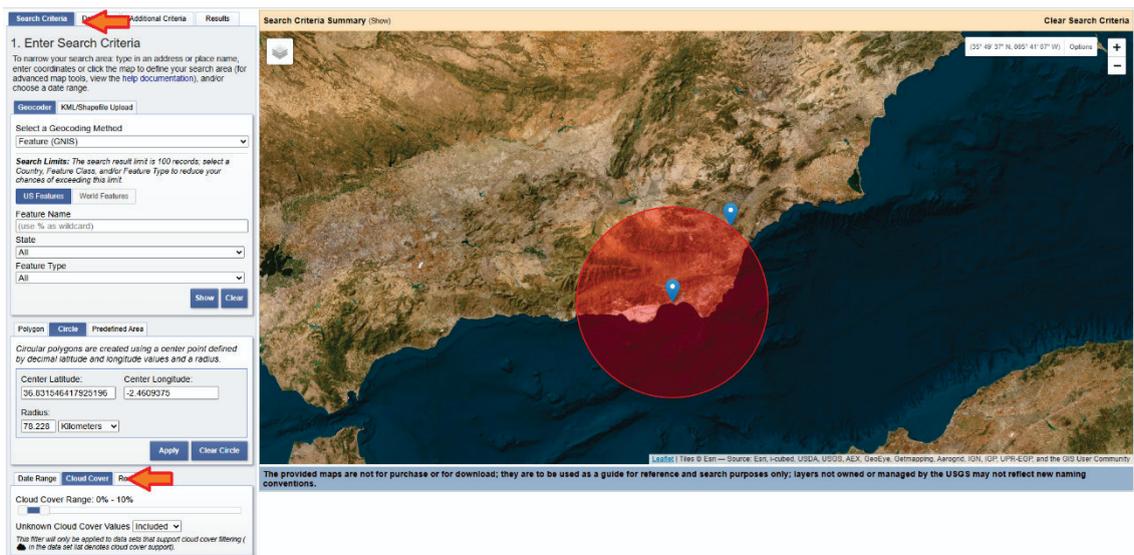


Figura 30. Limitación de la cobertura de nubes

Después, se debe elegir la procedencia de los datos, pudiendo ser de la colección de imágenes del Landsat con nivel de procesamiento 1 o 2 procedentes de los satélites Landsat 1 al 9. A esta opción se accede a través de la pestaña “Data sets” → Landsat → Landsat Collection 2 Level 1 o 2 (figura 31).

La diferencia entre los niveles de procesamiento 1 y 2 es que el primero de ellos incluye imágenes corregidas geoméricamente para que coincidan con proyecciones cartográficas. Además, están corregidas radiométricamente de forma que los valores digitales de los píxeles de las imágenes están calibrados. Como resultado se tienen imágenes con los valores de reflectancia tal y como se

observarían desde el satélite, antes de atravesar la atmósfera. A estos datos también se les llama top-of-atmosphere (TOA).

Por otro lado, el nivel de procesamiento 2 proporciona imágenes con los valores de reflectancia reflejadas por el suelo, sin la distorsión de la atmósfera.

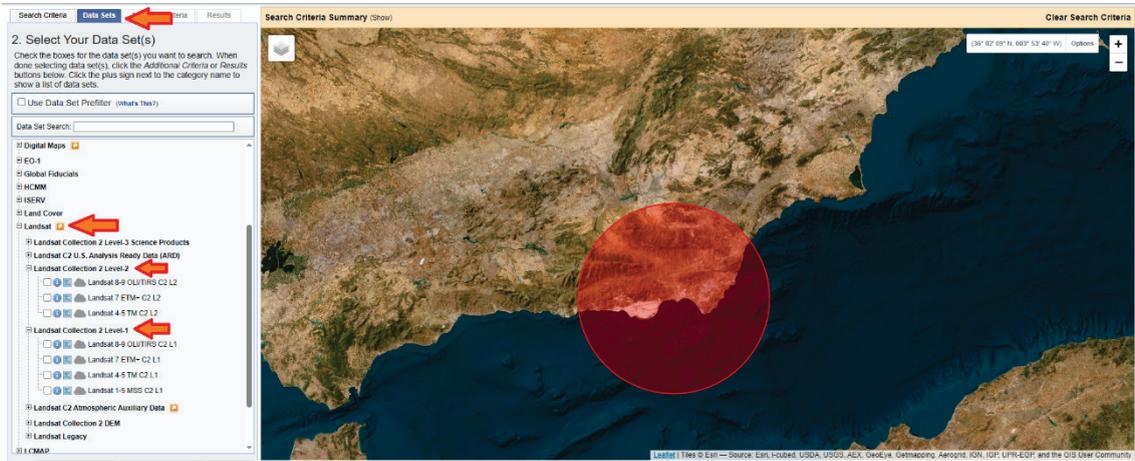


Figura 31. Elección de la colección de imágenes

Por último, se visualizan los resultados y se escoge la imagen que se prefiere descargar dentro de todas las imágenes encontradas limitadas al rango de fechas, tipo de satélite y porcentaje de cobertura de nubes. Desde la pestaña de “Results” se observan estos resultados (figura 32) y se pueden descargar las bandas de la imagen seleccionada (figura 33).

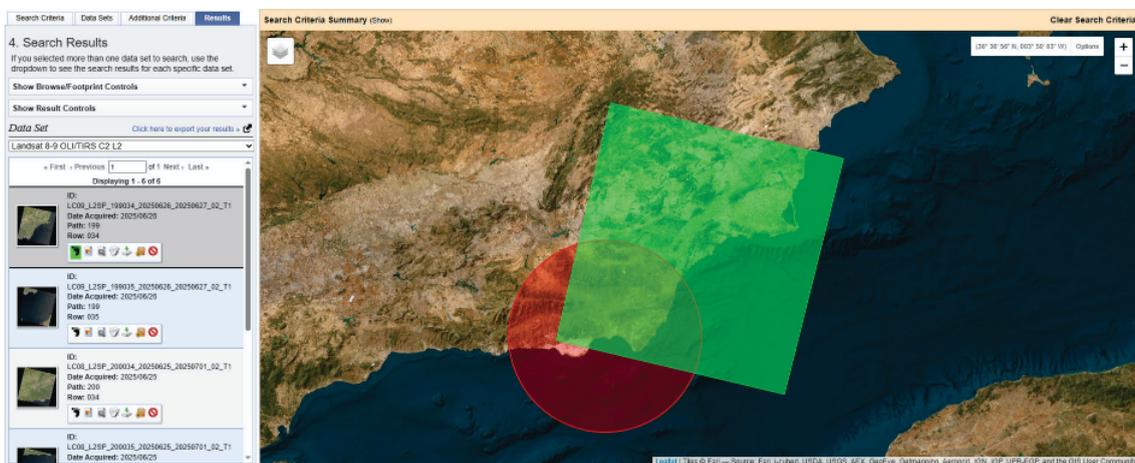


Figura 32. Elección de la colección de imágenes

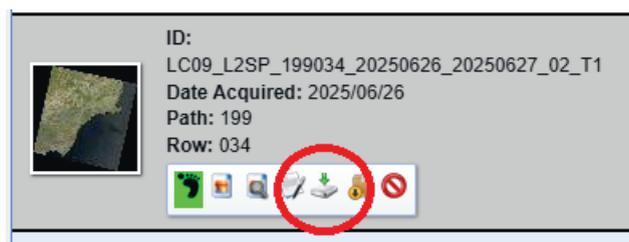


Figura 33. Descarga de datos satélite seleccionados

4.2. Copernicus Browser

El Copernicus Browser (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) es la plataforma oficial de acceso a los datos del programa Copernicus, gestionado por la ESA. A través de esta herramienta, los usuarios pueden visualizar y descargar imágenes de los satélites Sentinel.

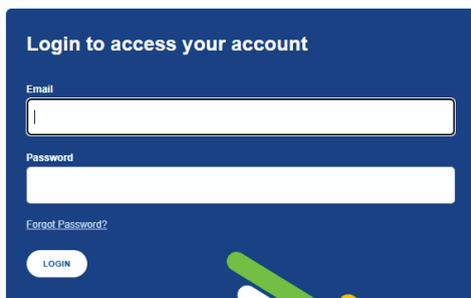
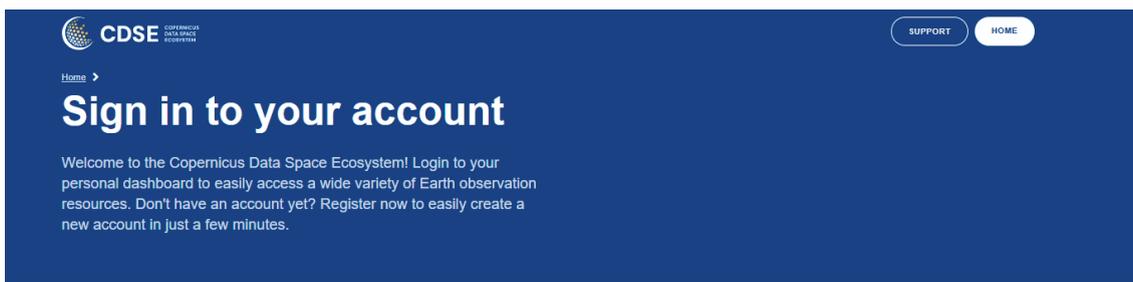
Una de sus funcionalidades más valoradas es la posibilidad de visualizar las imágenes en diferentes combinaciones de bandas espectrales, como el color verdadero (figura 34) o falso color infrarrojo, útil para analizar vegetación o identificar cuerpos de agua. Además, permite obtener series temporales de la evolución de imágenes en un lugar determinado. Al igual que la plataforma EarthExplorer, permite ajustar el nivel de nubes, seleccionar fechas y consultar metadatos detallados.



Figura 34. Buscador de Copernicus web
(<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>)

4.2.1. Guía básica de Copernicus Browser

Primero, se debe acceder a la plataforma Copernicus Browser a través del siguiente enlace web: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>. Después, para descargar imágenes es necesario iniciar sesión o registrarse de forma gratuita (figura 35).



Register and create an account for free in 60 seconds

- ✓ Access a variety of Earth observation data
- ✓ Manage your personal settings
- ✓ Follow your credits and orders

REGISTER

Figura 35. Inicio de sesión o registro en Copernicus Browser

Una vez iniciada sesión en la web, se debe ajustar el tamaño de la ventana de visualización al área que se desea consultar y se concretan los criterios de búsqueda. En la pestaña “Búsqueda” se puede escoger la familia Sentinel-2 y se concreta el porcentaje de cobertura de nubes (figuras 36 y 37). Además, se establece el rango de fechas entre las que se quiere buscar la imagen satélite.



Figura 36. Elección de familia Sentinel y cobertura de nubes



Figura 37. Elección del rango de fechas de imágenes satélite

Una vez seleccionados los criterios de búsqueda, los resultados aparecen tras pulsar el botón “Buscar” al final de la pestaña de “Búsqueda”. Se observan así las cuadrículas representando las imágenes que cumplen los criterios seleccionados y se puede descargar la información de la que se desee (figura 38).

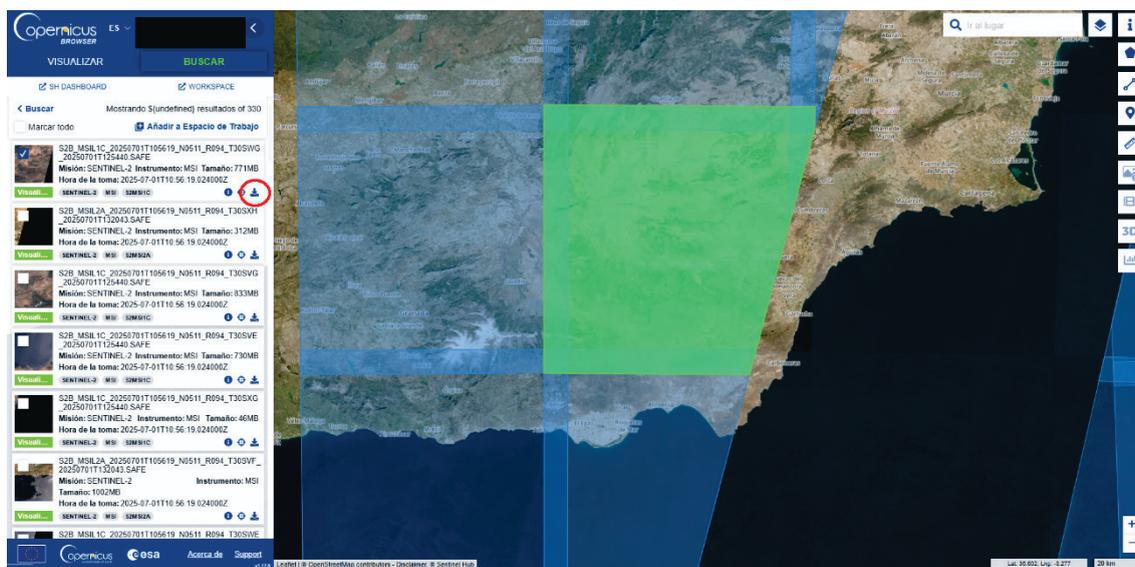


Figura 38. Selección de imagen satélite a descargar

5. Herramientas software

El análisis de imágenes satelitales requiere herramientas que permitan visualizar los datos, procesarlos, analizarlos e integrarlos con información geográfica. En este contexto, QGIS destaca como una plataforma de software libre y de código abierto que ha evolucionado hasta convertirse en una potente herramienta también para la Teledetección, especialmente gracias a su compatibilidad con formatos ráster, su ecosistema de complementos y su capacidad de integración con otras herramientas.

QGIS permite trabajar con una amplia variedad de formatos de imágenes satelitales, como GeoTIFF, NetCDF, HDF, entre otros. Esta compatibilidad facilita la importación directa de datos de satélite como Landsat o Sentinel-2 sin necesidad de convertir previamente los archivos.

Una de las funcionalidades más útiles es la visualización de imágenes multibanda, lo que permite aplicar combinaciones espectrales para analizar distintos aspectos del paisaje. Por ejemplo, es posible destacar la vegetación mediante composiciones de infrarrojo cercano, o detectar cuerpos de agua y áreas urbanas con combinaciones específicas de bandas. Esta capacidad es especialmente valiosa en estudios agrícolas y ambientales, donde se requiere interpretar características del suelo, los cultivos o la cobertura vegetal.

Uno de los mayores atractivos de QGIS es su sistema de complementos (plugins), que amplían enormemente sus capacidades básicas. Algunos de los más relevantes para el análisis de imágenes satelitales son el Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) (figura 39.a) y el Sentinel Hub (figura 39.b). El SCP permite descargar imágenes de satélite (como Landsat y Sentinel-2), realizar corrección atmosférica, llevar a cabo clasificaciones de imágenes supervisadas y no supervisadas, y calcular índices espectrales como el NDVI. Es especialmente útil en el monitoreo agrícola, la clasificación de uso del suelo y el seguimiento de cambios en la cobertura terrestre. Por otro lado, Sentinel Hub permite acceder directamente a imágenes del programa Copernicus Sentinel y visualizar datos en diferentes combinaciones espectrales.



Figura 39. SCP plugin (a) y Sentinel Hub plugin (b)

(a: <https://plugins.QGIS.org/plugins/SemiAutomaticClassificationPlugin/>;
b: <https://www.sentinel-hub.com/develop/integrate/desktopgis/QGIS-plugin/>)

5.1. Guía básica de instalación de QGIS y sus complementos

Primero se debe acceder a la web oficial de descarga de QGIS (<https://QGIS.org/>). Después, se debe descargar la última versión según el sistema operativo. Por último, una vez abierto un proyecto nuevo en QGIS, para instalar los complementos SCP y Sentinel Hub en QGIS, se debe acceder al menú de “Complementos” → “Administrar e instalar complementos” (figura 40).

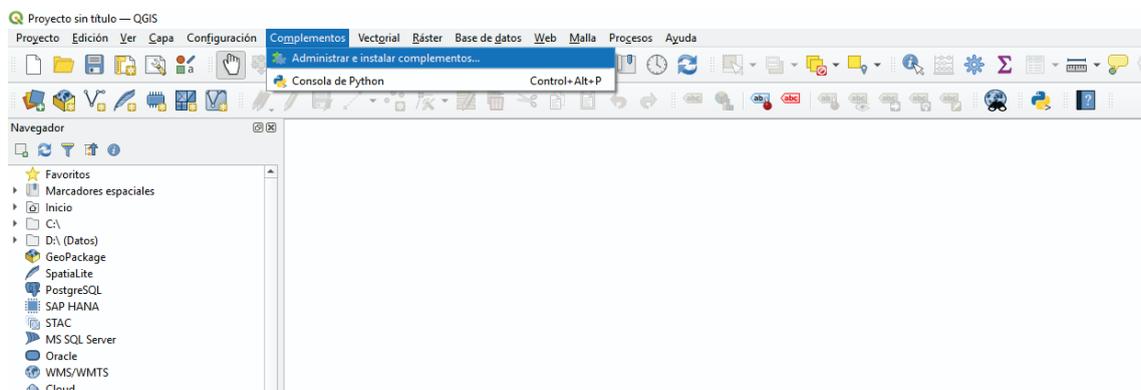


Figura 40. Administrador de complementos de QGIS

Se abrirá la ventana del administrador de complementos, donde se deberá escribir en el buscador de la parte superior de la ventana el nombre de los complementos a instalar, en este caso, los pugin SCP y Sentinel Hub (figuras 41 y 42). Para instalar cada complemento se debe pulsar sobre el botón “Instalar complemento” en la esquina inferior derecha de la ventana.

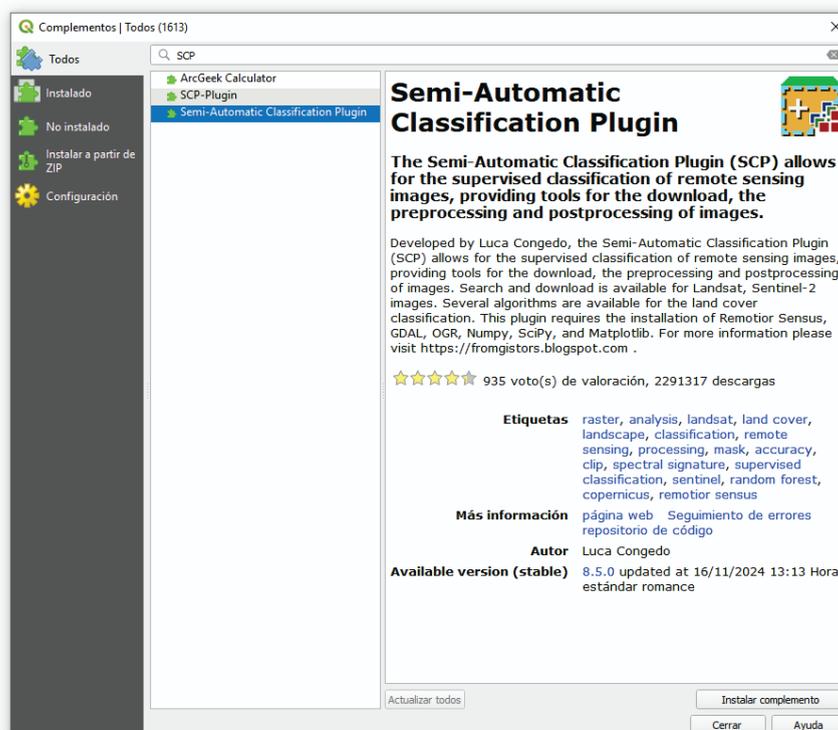


Figura 41. SCP plugin buscado en el administrador de complementos de QGIS