



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Análisis de un sistema de teledetección satelital por radar para el
mapeo de la superficie terrestre*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

ALUMNO: Gonzalo Espiño Sánchez

DIRECTOR: Rubén Nocelo López

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Análisis de un sistema de teledetección satelital por radar para el
mapeo de la superficie terrestre*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa
Especialidad de Sistemas y Tecnologías de la Información

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente trabajo aborda el análisis de las capacidades de los sistemas de teledetección satelital mediante el uso de tecnología radar de apertura sintética (SAR), con un enfoque específico en los satélites Sentinel-1 del programa Copernicus. Se plantean como objetivos principales la descripción de las características técnicas de Sentinel-1, la aplicación de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes utilizando la herramienta SNAP y la validación de los resultados obtenidos mediante la comparación con datos ópticos de Sentinel-2.

El estudio se centra en tres escenarios concretos: el Mar de China Meridional, donde se analizan las implicaciones geopolíticas y ambientales de la construcción de islas artificiales; el Estrecho de Gibraltar, orientado a evaluar posibles modificaciones en la línea de costa; y la comarca de Horta Sud, Valencia, afectada por la DANA recientemente. El análisis incluye procedimientos como la calibración radiométrica, el filtrado de speckle, la corrección geométrica y el análisis polarimétrico, obteniendo resultados precisos sobre las características y transformaciones de la superficie terrestre en las áreas de interés.

Los resultados obtenidos destacan la utilidad de los sistemas SAR en aplicaciones estratégicas y operativas, como la vigilancia marítima, la gestión de desastres naturales y la monitorización ambiental, entre otros. Además, se valida la capacidad de integrar imágenes SAR y ópticas para proporcionar una visión más completa y precisa de los fenómenos observados. Por último, se proponen líneas futuras orientadas al desarrollo de tecnologías emergentes, como el uso de inteligencia artificial para mejorar el análisis de datos y la ampliación de la infraestructura satelital, que prometen revolucionar la teledetección satelital con mayores resoluciones espaciales y temporales.

PALABRAS CLAVE

Teledetección, radar de apertura sintética (SAR), Sentinel-1, Copernicus, SNAP

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, Rubén Nocelo López, por su predisposición, disponibilidad y, sobre todo, por haberme guiado y tutorizado con tanta dedicación y profesionalidad durante la realización de este trabajo.

Asimismo, quiero dedicar un especial agradecimiento a mi familia y en especial a mi mujer, por su apoyo y comprensión a lo largo de este proceso. Este año no solo ha supuesto el reto de compaginar los estudios con otras responsabilidades, sino que también fue un periodo en el que tuvimos un hijo. Su apoyo y esfuerzo han sido fundamentales para haber podido dedicar el tiempo necesario a este trabajo.

Finalmente, a mis compañeros de especialidad por su compañerismo y apoyo durante todo este tiempo. Su ayuda y disposición han hecho que esta etapa sea más llevadera y enriquecedora, sobre todo a nivel personal.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	9
1.3 Estructura de la memoria	10
2 Estado del arte	12
2.1 Teledetección	12
2.2 Sensores ópticos y radar en teledetección	16
2.3 Fundamentos de los sistemas SAR	20
2.4 Aplicaciones de los sistemas SAR	24
2.5 Sensores SAR.....	28
3 Desarrollo del TFM	32
3.1 Descripción programa Copernicus. Sentinel-1	32
3.2 Procesamiento de los datos de Sentinel-1	38
3.2.1 Calibración radiométrica	38
3.2.2 Filtrado de speckle	39
3.2.3 Corrección geométrica.....	40
3.2.4 Análisis polarimétrico.....	41
3.3 Herramienta SNAP para análisis y procesamiento de datos	42
4 Planteamiento del problema / Resultados / Validación	45
4.1 Planteamiento del Problema.....	45
4.1.1 Expansión Mar territorial Mar de China	45
4.1.2 Gibraltar: estrategia y defensa en el estrecho	47
4.1.3 Análisis de los efectos de la DANA en Valencia	49
4.2 Resultados del Análisis	51
4.2.1 Metodología y procesamiento.....	51
4.2.2 Resultados en el mar de China Meridional	55
4.2.3 Resultados en Gibraltar.....	57
4.2.4 Resultados en Horta Sud, Valencia	62
4.3 Validación mediante comparación con imágenes ópticas de otros satélites	68
4.3.1 Mar de China Meridional.....	68

4.3.2 Gibraltar 69

4.3.3 Horta Sud, Valencia.....69

5 Conclusiones y líneas futuras 71

5.1 Conclusiones 71

5.2 Líneas Futuras 72

6 Bibliografía.....73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Detalle producto SAR (fuente: [5])	8
Figura 1-2 Sentinel-1 en misión sobre Italia (fuente: [5])	8
Figura 1-3 Sentinel-2 en misión sobre Europa (fuente: [5])	9
Figura 2-1 Espectro electromagnético (fuente: [1])	12
Figura 2-2 Firma espectral de diferentes materiales (fuente: [6])	13
Figura 2-3 Relación radiación y temperatura (fuente: [1])	13
Figura 2-4 Avión de reconocimiento estratégico U-2 (fuente: [1])	14
Figura 2-5 Imagen de la Tierra desde el Tiros-1 (fuente: [7])	14
Figura 2-6 Detalle satélite Seasat (fuente: [8])	15
Figura 2-7 ERS-2 en órbita (fuente: [6])	15
Figura 2-8 Última imagen tomada por Envisat ERS-2 (fuente: [11])	16
Figura 2-9 Sensores pasivos (izquierda) y activos (derecha) (fuente: [2])	17
Figura 2-10 Espectro visible (fuente: [3])	17
Figura 2-11 Detalle espectro infrarrojo (fuente: [3])	18
Figura 2-12 Detalle rango visible en la isla de la Palma en el mismo instante para imagen radar (izquierda) e imagen óptica (derecha) (fuente: [12])	18
Figura 2-13 Interferograma terremoto Izmit Turquía (1999) (fuente: [12])	19
Figura 2-14 Ejemplo polarimetría SAR (fuente: [3])	20
Figura 2-15 Geometría SAR: rango y azimuth (fuente: [3])	21
Figura 2-16 Geometría SAR: rangos cercano y lejano (fuente: [3])	21
Figura 2-17 Geometría SAR: ángulo de incidencia, rangos inclinado y terrestre (fuente: [3])	22
Figura 2-18 Geometría SAR: resolución en rango (fuente: [3])	22
Figura 2-19 Geometría SAR: resolución en azimuth (fuente: [3])	22
Figura 2-20 Foreshortening (fuente: [13])	23
Figura 2-21 Layover (fuente: [13])	23
Figura 2-22 Shadow (fuente: [13])	24
Figura 2-23 Diferentes aplicaciones de Sentinel-1 (fuente: [5])	25
Figura 2-24 Monitorización bosques Laos, Camboya y Vietnam (2018/2020) (fuente: [14])	25
Figura 2-25 Monitorización glaciar Larson C en la Antártida (2016/2017) (fuente: [14])	26
Figura 2-26 Mapa Bangladesh durante inundación de 2016 (fuente: [14])	26
Figura 2-27 Sentinel monitorizando el paso del portacontenedores Ever Given por el canal de Suez (fuente: [14])	27
Figura 2-28 Paz en tareas de vigilancia marítima (fuente: [15])	27
Figura 2-29 Análisis GEOINT del Aeropuerto de Madrid (fuente: [15])	28

Figura 2-30 Seasat (fuente: [16]).....	29
Figura 2-31 TerraSAR-X y TanDEM-X en misión (fuente: [17])	30
Figura 2-32 Satélite Paz (fuente: [15])	30
Figura 2-33 Satélite Sentinel-1 (Fuente: [5]).....	31
Figura 3-1 Sentinel-1 en su trayectoria sobre la Tierra (fuente: [5]).....	33
Figura 3-2 Órbita Sentinel 1A y 1B (fuente: [5])	34
Figura 3-3 Modos de adquisición Sentinel-1 (fuente: [20])	35
Figura 3-4 Sentinel-1 en tareas de vigilancia marítima (fuente: [5])	36
Figura 3-5 Sentinel-1 monitorizando Groenlandia (fuente: [5])	37
Figura 3-6 Sentinel-1 <i>six missions</i> (fuente: [23])	38
Figura 3-7 Aplicación calibración geométrica (fuente: [13]).....	39
Figura 3-8 Aplicación filtrado de speckle (fuente: [13]).....	40
Figura 3-9 Corrección geométrica (fuente: [3])	41
Figura 3-10 Análisis polarimétrico de imagen proporcionada por RADARSAT-2 empleando diferentes métodos: Freeman-Durden (a) y $m-\delta$ (b) (fuente: [3])	42
Figura 3-11 Interfaz inicial SNAP (fuente: elaboración propia)	42
Figura 3-12 Interfaz SNAP (fuente: [25])	43
Figura 3-13 EO Browser (Fuente: elaboración propia).....	44
Figura 4-1 Reclamaciones marítimas en el Mar de China Meridional (Fuente: [30])	46
Figura 4-2 Fiery Cross Reef (fuente: Google earth).....	46
Figura 4-3 Tráfico marítimo en el Estrecho de Gibraltar entre 2020 y 2023 (Fuente: [34]).....	47
Figura 4-4 Zona ejercicio de tiro en superficie, diciembre de 2023 (fuente: fuente: [37])	48
Figura 4-5 Simulación del proyecto turístico Eastside (Fuente: [39])	49
Figura 4-6 Imagen meteosat de la DANA (Fuente: [43])	50
Figura 4-7 Imágenes de Landsat antes y después del paso de la DANA (Fuente: [45]).....	50
Figura 4-8 Imagen SAR de Fiery Cross Reef (Fuente: elaboración propia)	52
Figura 4-9 Imagen SAR en área de barrido Sentinel (señalada en rojo) y a la derecha imagen del subconjunto específico en Fiery Cross Reef (Fuente: elaboración propia)	53
Figura 4-10 Captura SNAP tras aplicar calibración radiométrica (derecha) a subconjunto de la zona específica de estudio en Gibraltar (izquierda) (Fuente: elaboración propia)	53
Figura 4-11 Captura SNAP tras aplicar filtrado de speckle (derecha) (Fuente: elaboración propia)	54
Figura 4-12 Captura SNAP tras aplicar corrección geométrica (Fuente: elaboración propia).....	54
Figura 4-13 Imagen tras la calibración radiométrica (Fuente: elaboración propia)	55
Figura 4-14 Imagen tras el filtrado de Speckle (Fuente: elaboración propia).....	56
Figura 4-15 Imagen corregida geométricamente (Fuente: elaboración propia)	56

Figura 4-16 Gráfico de dispersión de intensidad de las polarizaciones VH y VV (Fuente: elaboración propia)	57
Figura 4-17 Imágenes SAR Gibraltar en Copernicus Browser (Fuente: elaboración propia).....	58
Figura 4-18 Importación de imágenes SAR en SNAP (Fuente: elaboración propia)	58
Figura 4-19 Detalle subconjuntos generados de las imágenes importadas en SNAP (Fuente: elaboración propia)	59
Figura 4-20 Detalle imagen sin calibración (izquierda) y con calibración (derecha) (Fuente: elaboración propia)	59
Figura 4-21 Detalle imagen sin filtro (izquierda) y con filtro de Lee (derecha) (Fuente: elaboración propia)	60
Figura 4-22 Imagen Gibraltar una vez aplicada la corrección geométrica (Fuente: elaboración propia)	60
Figura 4-23 Histograma para la imagen de 2014 (Fuente: elaboración propia).....	61
Figura 4-24 Histograma para la imagen de 2024 (Fuente: elaboración propia).....	61
Figura 4-25 Máscara generada en archivo kmz sobre google earth (Fuente: elaboración propia)...	62
Figura 4-26 Imágenes SAR Horta Sud en Copernicus Browser (Fuente: elaboración propia).....	63
Figura 4-27 Importación imágenes SAR en SNAP (Fuente: elaboración propia)	63
Figura 4-28 Detalle subconjuntos generados de las imágenes importadas en SNAP (Fuente: elaboración propia)	64
Figura 4-29 Detalle imagen sin filtro (izquierda) y con filtro de Lee (derecha) (Fuente: elaboración propia)	64
Figura 4-30 Imagen Horta Sud una vez aplicada la corrección geométrica (Fuente: elaboración propia)	65
Figura 4-31 Histograma para la imagen de 2023 (Fuente: elaboración propia).....	65
Figura 4-32 Histograma para la imagen de 2024 (Fuente: elaboración propia).....	66
Figura 4-33 Análisis estadístico para la imagen de 2024 (Fuente: elaboración propia)	66
Figura 4-34 Análisis estadístico para la máscara seleccionada (Fuente: elaboración propia)	67
Figura 4-35 Detalle tamaño píxeles extraídos de los metadatos de la máscara seleccionada (Fuente: elaboración propia)	67
Figura 4-36 Máscara generada en archivo kmz sobre google earth (Fuente: elaboración propia)...	68
Figura 4-37 Comparativa entre imagen óptica (izquierda) y radar (derecha) (Fuente: elaboración propia)	68
Figura 4-38 Comparativa entre imagen NDVI (izquierda), RGB (centro) y radar (derecha) (Fuente: elaboración propia)	69
Figura 4-39 Imagen NDWI obtenida de EO Browser (Fuente: elaboración propia)	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Principales parámetros sensores SAR (Fuente: elaboración propia)	31
Tabla 3-1 Principales parámetros Sentinel-1 (fuente: [21])	36
Tabla 4-1 Parámetros imagen Mar de China Meridional (Fuente: elaboración propia).....	51
Tabla 4-2 Parámetros imágenes Gibraltar (Fuente: elaboración propia).....	52
Tabla 4-3 Parámetros imágenes Valencia (Fuente: elaboración propia).....	52

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La teledetección es un método de obtención de información de un objeto sin estar en contacto directo con él. Como tal, la teledetección es una herramienta de interés para la observación a distancia de la superficie del planeta, permitiendo la recopilación de datos a gran escala sobre la superficie terrestre sin la necesidad de estar en contacto directo con ella. Este enfoque ha resultado clave para mejorar la comprensión de numerosos fenómenos geofísicos y ha posibilitado importantes avances en disciplinas como la meteorología, la agricultura, la gestión de recursos naturales, la geología y la seguridad y defensa [1].

Entre los principales tipos de plataformas de teledetección destacan los satélites, que no solo cubren una extensa área de observación, sino que también pueden operar con una amplia variedad de sensores que se adaptan a distintas condiciones atmosféricas, como nubosidad, baja visibilidad o cambios de temperatura y humedad [2].

El funcionamiento de un sistema de teledetección depende de varios factores que determinan la capacidad y alcance de la observación. Estos sistemas, que integran sensores y plataformas que capturan y procesan información, emplean la energía electromagnética para adquirir datos reflejados o emitidos desde la superficie terrestre. Posteriormente, los datos obtenidos se someten a un procesamiento específico y detallado, proporcionando información valiosa para el análisis de distintas superficies y fenómenos naturales [3].

Los sistemas de teledetección satelitales abarcan una variedad de tecnologías, como la teledetección radar, que emplea ondas de microondas y es particularmente útil para la observación continua en condiciones meteorológicas adversas. Dentro de la teledetección radar, el Radar de Apertura Sintética (SAR) destaca por su capacidad de generar imágenes detalladas mediante la emisión de pulsos de microondas, logrando una representación precisa de la superficie terrestre, incluso en condiciones de baja visibilidad. Esta tecnología ha probado ser de gran valor en aplicaciones de geodesia y topografía, así como en la identificación de características de terreno y la detección de movimientos en la superficie terrestre [4].

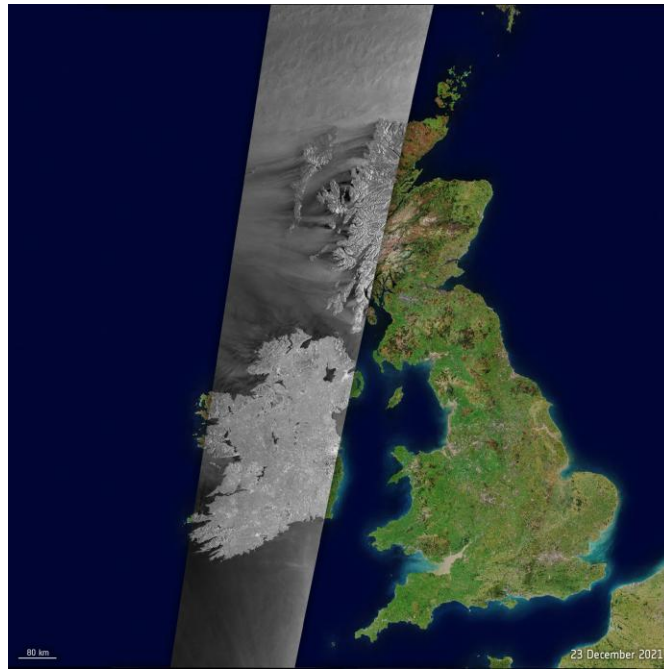


Figura 1-1 Detalle producto SAR (fuente: [5])

En este contexto, el programa Copernicus, liderado por la Unión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), se ha consolidado como una de las iniciativas más ambiciosas en la observación de la Tierra. Este programa proporciona acceso gratuito a datos satelitales avanzados a través de las misiones Sentinel, diseñadas específicamente para aplicaciones medioambientales, climáticas y de seguridad. Dentro de estas misiones, destacan los satélites Sentinel-1, que emplean tecnología SAR en banda C, lo que les permite generar imágenes de alta resolución y precisión en cualquier condición atmosférica.



Figura 1-2 Sentinel-1 en misión sobre Italia (fuente: [5])

El presente trabajo se centra en el análisis de las capacidades de los sistemas SAR utilizando datos obtenidos por los dos satélites que componen la misión de Sentinel-1 para la monitorización de la superficie terrestre. Para ello, se emplearán técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes

mediante la herramienta Sentinel Application Platform (SNAP). El estudio incluye la validación de los resultados obtenidos mediante la comparación con imágenes ópticas del satélite Sentinel-2, con el objetivo de evaluar la precisión y la eficacia de ambos sensores en diferentes escenarios. Este enfoque permitirá demostrar la utilidad de Sentinel-1 en aplicaciones como la detección de cambios en la superficie terrestre, el análisis de fenómenos meteorológicos extremos y la evaluación de actividades humanas de impacto ambiental.



Figura 1-3 Sentinel-2 en misión sobre Europa (fuente: [5])

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar las capacidades de los sistemas SAR con los dos satélites Sentinel-1 para la monitorización de la superficie terrestre, haciendo especial énfasis en el uso de técnicas de análisis de las imágenes a través de la herramienta Sentinel Application Platform (SNAP). Los objetivos específicos del trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Describir las capacidades y aplicaciones del programa Copernicus, concretamente de los dos satélites Sentinel-1 en el ámbito de la teledetección radar. El programa Copernicus, constituye un marco integral para la observación de la Tierra. Dentro de este programa, los satélites Sentinel-1 desempeñan un papel fundamental en la teledetección radar gracias a su tecnología SAR, que permite la adquisición de datos en condiciones meteorológicas adversas y sin depender de la luz solar. Este objetivo busca identificar y documentar las capacidades del terminal Sentinel-1, como su alta resolución espacial y temporal, su capacidad multitemporal para análisis de cambios y su versatilidad operativa en diferentes escenarios. Entre las aplicaciones relevantes se incluyen la detección de cambios en la línea de costa, el análisis de inundaciones y el monitoreo de actividades humanas, tales como la construcción de islas artificiales. Además, se analizará cómo el acceso abierto a los datos de Copernicus fomenta la integración de esta información en estudios medioambientales, de seguridad y de gestión de recursos.
2. Aplicar técnicas avanzadas de análisis mediante la herramienta SNAP para procesar datos de Sentinel-1 y monitorizar la superficie terrestre en diferentes escenarios. Este objetivo se centra en el uso de SNAP como herramienta clave para el procesamiento y análisis de datos SAR. Las técnicas aplicadas incluyen la calibración radiométrica, el filtrado de speckle y la corrección

geométrica, indispensables para obtener imágenes precisas y comparables. A través de estos procedimientos, se busca extraer información relevante de las imágenes de Sentinel-1 que permita una interpretación detallada de los fenómenos estudiados.

3. Validar los resultados obtenidos a partir de las imágenes radar de Sentinel-1 mediante su comparación con imágenes ópticas de Sentinel-2, evaluando la precisión y eficacia de ambos sensores. Este objetivo específico incluye la comparación de datos obtenidos de Sentinel-1 con imágenes ópticas de Sentinel-2, utilizando herramientas como EO Browser para generar índices como el NDWI (Índice de Diferencia Normalizada de Agua). Esta comparación permitirá determinar la precisión de los datos SAR en aplicaciones concretas como la detección de áreas inundadas o la monitorización de la línea de costa.
4. Realizar un análisis en tres escenarios específicos, demostrando la capacidad de los datos obtenidos de Sentinel-1 para abordar diferentes misiones con eficacia. Los escenarios seleccionados abarcan aplicaciones geopolíticas, ambientales y de gestión de desastres: el Mar de China Meridional, el Estrecho de Gibraltar y la comarca de Horta Sud en Valencia. Cada una de estas situaciones representa un escenario único y diferente, desde el análisis de expansión territorial hasta la evaluación de los daños causados por fenómenos meteorológicos. Este objetivo busca demostrar cómo la tecnología SAR puede adaptarse a distintos contextos y proporcionar resultados significativos en cada uno de ellos.

1.3 Estructura de la memoria

La presente memoria se ha estructurado en cinco capítulos principales, cada uno de los cuales aborda un aspecto del estudio y desarrollo de este trabajo. A continuación, se detalla la organización del contenido:

1. El primer capítulo establece el contexto y justificación del trabajo, explicando la relevancia de los sistemas de teledetección radar y su importancia en el análisis de la superficie terrestre. Además, se detallan los objetivos generales y específicos que guían el desarrollo del estudio, así como las herramientas utilizadas para alcanzarlos.
2. En el segundo tema se analiza el estado del arte de los sistemas de teledetección en general y los sistemas SAR en particular. Se lleva a cabo un análisis de sus orígenes históricos y las principales misiones satelitales que han marcado hitos en su desarrollo. A continuación, se centra en la tecnología SAR, describiendo las principales aplicaciones prácticas, como la agricultura, la monitorización y seguimiento ambiental y la seguridad y defensa. Finalmente, se incluye un análisis de las constelaciones de satélites SAR más relevantes, como Sentinel-1, PAZ y TerraSAR-X, destacando sus características técnicas, contribuciones y evolución a lo largo del tiempo.
3. El tercer apartado describe el enfoque metodológico y las técnicas empleadas para procesar los datos obtenidos por Sentinel-1. Se explican en detalle las etapas del procesamiento y análisis de imágenes radar mediante la herramienta SNAP, como la calibración radiométrica, el filtrado de speckle, la corrección geométrica y el análisis polarimétrico. Además, se incluye una descripción del programa Copernicus y las características técnicas de los satélites Sentinel-1.
4. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos a través del análisis de imágenes SAR de Sentinel-1 en los tres escenarios seleccionados: el Mar de China Meridional, el Estrecho de Gibraltar y la comarca de Horta Sud en Valencia. Los resultados incluyen la detección de

cambios en la superficie terrestre, la validación de los datos mediante comparación con imágenes ópticas de Sentinel-2 y un análisis multitemporal de los eventos estudiados.

5. En el capítulo quinto se resumen las principales conclusiones del trabajo, evaluando si se han alcanzado los objetivos planteados y destacando las implicaciones de los resultados obtenidos. También se proponen posibles líneas de investigación futuras para ampliar y mejorar el estudio presentado en esta memoria.
6. Finalmente, se detallan las fuentes bibliográficas empleadas durante el desarrollo de la memoria. Estas referencias abarcan documentación técnica, artículos científicos y manuales especializados que han servido como base para el análisis y la interpretación de los datos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Teledetección

La teledetección se define como la obtención de información sobre un objeto o superficie sin que exista un contacto físico directo, mediante la medición y análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por dicho objeto. Al observar un objeto, nuestros ojos procesan la luz reflejada y extraen información sobre su color y forma. De manera similar, un sensor en un satélite capta la radiación electromagnética emitida o reflejada por una superficie, pero con capacidades extendidas que permiten capturar datos más allá del rango visible para el ojo humano [1].

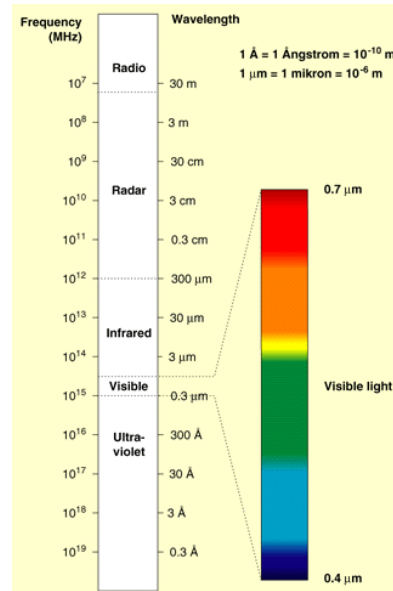


Figura 2-1 Espectro electromagnético (fuente: [1])

La teledetección utiliza la radiación electromagnética como principal fuente de información. Esta radiación puede ser reflejada, como en el caso de la luz solar que incide en una superficie, o emitida, dependiendo de las características térmicas del objeto. Por ejemplo, una superficie blanca refleja cantidades similares de luz en todas las longitudes de onda visibles, mientras que una hoja verde refleja menos radiación en las partes roja y azul del espectro y más en la parte verde, lo que explica su color característico. Esta variación en la cantidad de radiación reflejada o emitida se denomina firma espectral, y proporciona información única sobre la composición y características del objeto observado [6].

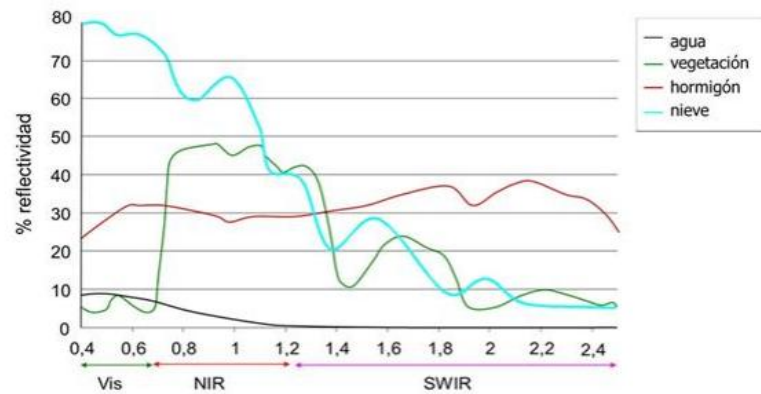


Figura 2-2 Firma espectral de diferentes materiales (fuente: [6])

Mientras que el ojo humano solo puede percibir radiación en el espectro visible, los instrumentos de teledetección extienden este rango, accediendo a longitudes de onda que incluyen el infrarrojo, radar o radio, dentro del espectro electromagnético. Esto permite obtener información adicional sobre el objeto o superficie analizada, como su temperatura, humedad o la densidad, factores no perceptibles a simple vista.

Como ejemplo, la radiación térmica emitida por la Tierra está directamente relacionada con su temperatura superficial. La Tierra, con una temperatura promedio de 290 °K, emite su energía máxima en el espectro infrarrojo térmico, alrededor de 14 μm . En contraste, el Sol, con una temperatura superficial de 6.000 °K, emite su energía máxima en el espectro visible, alrededor de 0,483 μm . Esta correlación entre temperatura y emisión permite que la teledetección térmica sea utilizada para medir temperaturas superficiales y estudiar fenómenos como incendios forestales, donde las emisiones son predominantes en el infrarrojo medio [1].

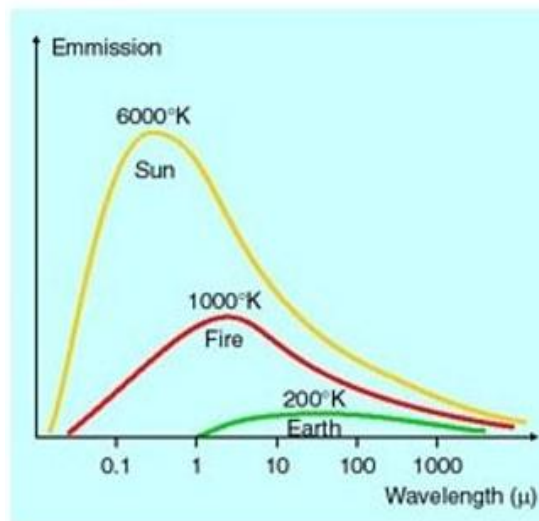


Figura 2-3 Relación radiación y temperatura (fuente: [1])

La radiación solar que incide sobre la superficie terrestre puede ser reflejada o absorbida. La fracción de luz reflejada, que se conoce como albedo, varía según el tipo de superficie y es un indicador clave en estudios climáticos y energéticos. Por ejemplo, superficies claras como el hielo o la nieve tienen un albedo elevado, reflejando la mayor parte de la radiación solar, mientras que superficies oscuras como los océanos o bosques tienen un albedo bajo, absorbiendo más energía y contribuyendo al calentamiento de estas superficies.

La teledetección tiene sus orígenes en la Primera Guerra Mundial, donde se comenzó a utilizar la fotografía aérea como herramienta de observación. Los aviones de reconocimiento, equipados con cámaras fotográficas, permitían capturar imágenes de las posiciones enemigas, facilitando la identificación de movimientos de tropas y el planeamiento de campañas militares sin necesidad de contacto directo con el terreno.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la técnica se perfeccionó aún más. Por ejemplo, en los preparativos del Desembarco de Normandía (Día D), se emplearon fotografías aéreas para cartografiar las condiciones de la costa y seleccionar los lugares de desembarco más adecuados. Además, se utilizó película infrarroja para identificar la vegetación verde y distinguirla de las redes de camuflaje enemigas.



Figura 2-4 Avión de reconocimiento estratégico U-2 (fuente: [1])

La década de 1960 marcó un punto de inflexión en la teledetección con el desarrollo de películas sensibles a distintas longitudes de onda, utilizadas para cartografiar diversos tipos de vegetación y otras características terrestres. Paralelamente, se realizaron experimentos con sistemas de radar aerotransportados, ampliando las capacidades de observación en condiciones meteorológicas adversas.

Un hito significativo fue el lanzamiento del TIROS-1 en 1960, el primer satélite meteorológico que proporcionó imágenes diarias de las formaciones de nubes, marcando un antes y un después en la predicción meteorológica y demostrando el potencial de la observación de la Tierra desde el espacio.

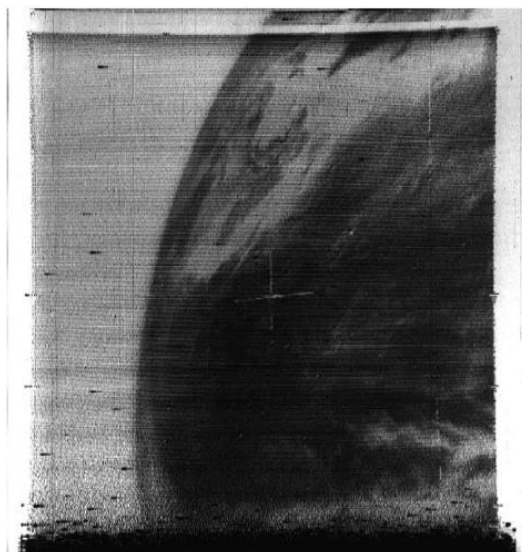


Figura 2-5 Imagen de la Tierra desde el Tiros-1 (fuente: [7])

A partir de este momento, las capacidades de teledetección satelital comenzaron a expandirse rápidamente con nuevas misiones que incorporaron sensores más avanzados y mayores resoluciones espaciales y espectrales.

Paralelamente, la década de 1970 vio el lanzamiento del programa Landsat, que introdujo sensores multiespectrales capaces de capturar datos en el visible, infrarrojo cercano y térmico. Estas misiones consolidaron la teledetección como una herramienta fundamental para la gestión de recursos naturales, la cartografía y el monitoreo ambiental.

Por otro lado, en 1978, la misión Seasat incorporó por primera vez la tecnología Radar de Apertura Sintética (SAR) en banda L para la observación de la superficie terrestre y de los océanos. A diferencia de los sensores ópticos, que dependen de la luz solar, los radares SAR utilizan microondas activas, lo que permite obtener imágenes precisas bajo cualquier condición meteorológica y de iluminación. Aunque el funcionamiento de Seasat fue breve debido a un fallo técnico, esta misión demostró el potencial del radar como herramienta esencial en la monitorización continuo del planeta [8].



Figura 2-6 Detalle satélite Seasat (fuente: [8])

A partir de la década de 1990, la teledetección experimentó un crecimiento exponencial con el lanzamiento de satélites especializados en diferentes aplicaciones. Entre ellos destacan:

- ERS-1 (1991) y ERS-2 (1995): misiones europeas equipadas con radares SAR que permitieron el estudio de movimientos de la superficie terrestre, el monitoreo de hielos polares y la observación de océanos [9].



Figura 2-7 ERS-2 en órbita (fuente: [6])

- Radarsat-1 (1995): satélite canadiense diseñado para la obtención de imágenes SAR en banda C, con aplicaciones en cartografía, agricultura, monitorización de inundaciones y gestión de desastres naturales [10].
- Envisat (2002): satélite europeo que incorporó instrumentos multiespectrales y radares SAR para aplicaciones en estudios climáticos y medioambientales, consolidando la teledetección como herramienta clave para la investigación global [11].

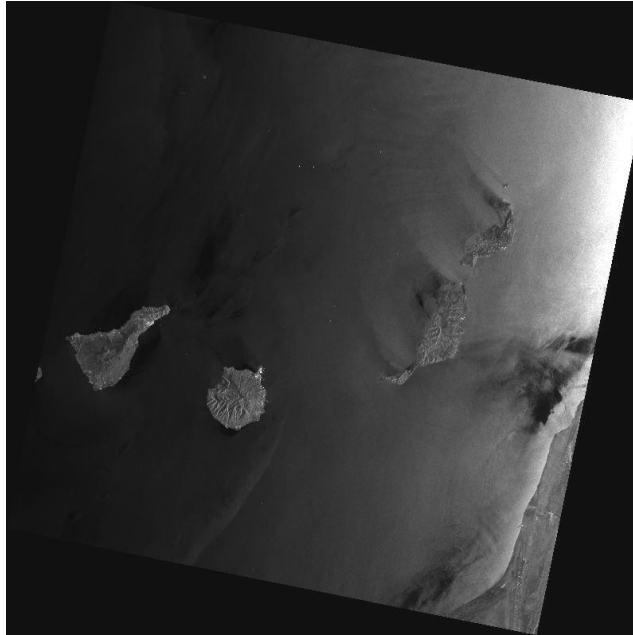


Figura 2-8 Última imagen tomada por Envisat ERS-2 (fuente: [11])

En el contexto actual, la teledetección satelital ha alcanzado un elevado nivel de madurez gracias a programas como Copernicus, desarrollado por la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea (ESA). Dentro de este programa, los satélites de la serie Sentinel destacan por sus capacidades avanzadas y acceso libre a los datos. En particular, Sentinel-1, equipado con tecnología SAR en banda C, ha revolucionado el análisis de la superficie terrestre al ofrecer imágenes de alta resolución y precisión bajo cualquier condición atmosférica y luminosidad.

2.2 Sensores ópticos y radar en teledetección

En teledetección satelital, los sensores se clasifican principalmente en sensores ópticos y sensores radar (SAR), cuya diferencia esencial radica en el tipo de energía utilizada y en las condiciones operativas bajo las que funcionan. Ambos sistemas desempeñan un papel crucial en la observación de la superficie terrestre, proporcionando información complementaria para aplicaciones científicas y prácticas [3].

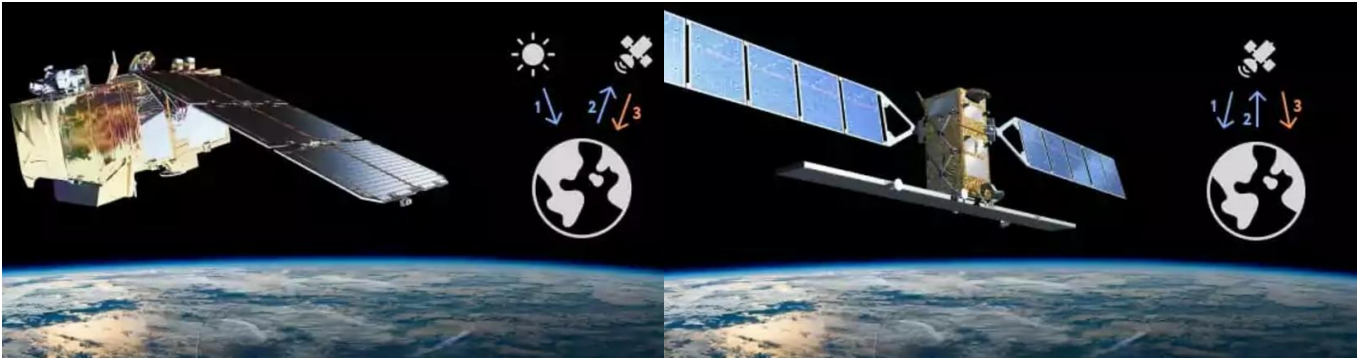


Figura 2-9 Sensores pasivos (izquierda) y activos (derecha) (fuente: [2])

Los sensores ópticos son dispositivos pasivos que dependen de la radiación solar reflejada por los objetos en la superficie terrestre o de la propia energía emitida en forma de calor por los objetos. Esta radiación se capta en distintas regiones del espectro electromagnético, principalmente en el visible (VIS), el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo térmico (TIR). El espectro visible, que comprende longitudes de onda entre 0.4 y 0.7 μm , coincide con los colores que percibe el ojo humano, como el azul, el verde y el rojo. Esta porción del espectro es especialmente útil para la identificación de características superficiales, como la vegetación y cuerpos de agua, ya que las diferencias en la reflectancia permiten distinguir entre tipos de cobertura terrestre [3].

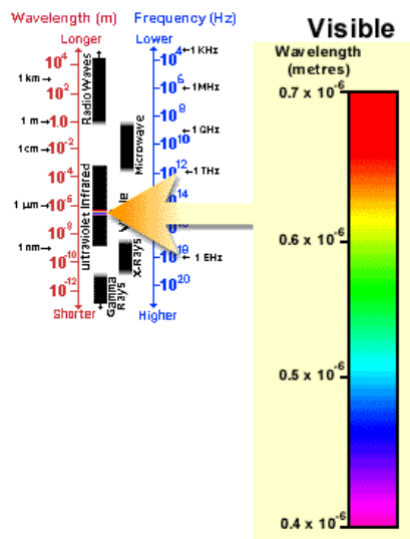


Figura 2-10 Espectro visible (fuente: [3])

Más allá del visible, el infrarrojo cercano (NIR), que abarca longitudes de onda entre 0.7 y 3.0 μm , juega un papel fundamental en el estudio de la vegetación. La alta reflectancia en esta región, causada por la estructura celular de las hojas, facilita la detección de áreas con vegetación y permite evaluar el estado de salud de los ecosistemas, algo que imperceptible en el espectro visible. Por otro lado, en el infrarrojo térmico (TIR), con longitudes de onda entre 3.0 y 100 μm , se mide la radiación emitida por los objetos en forma de calor, lo que resulta útil para aplicaciones relacionadas con la temperatura superficial, como el seguimiento de incendios o actividad volcánica [3].

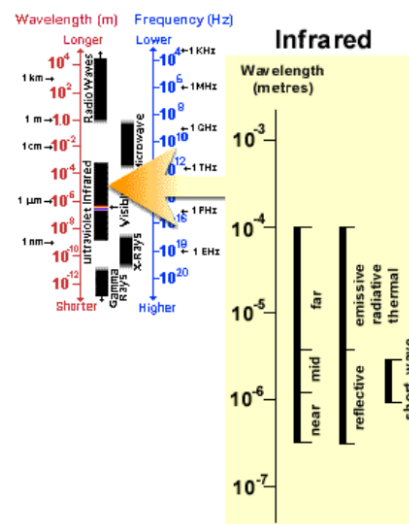


Figura 2-11 Detalle espectro infrarrojo (fuente: [3])

A pesar de sus ventajas, los sensores ópticos presentan una limitación importante: su operatividad depende de la iluminación solar en el caso de los sensores dentro del rango visible y se ve afectada en presencia de nubosidad, lluvia o durante la noche. Esta dependencia reduce su eficacia en regiones con condiciones meteorológicas adversas o en estudios que requieren observaciones continuas.

Por otro lado, los sensores radar, al ser dispositivos activos, emiten su propia radiación en forma de microondas y registran la señal reflejada por la superficie terrestre. Esta característica les proporciona la capacidad de operar de manera independiente a la luz solar y a las condiciones atmosféricas, lo que permite obtener imágenes en cualquier momento del día y en presencia de nubes, lluvia o niebla.

En la siguiente figura se compara una imagen obtenida con sensores dentro del rango visible con Sentinel-2 con una imagen radar obtenida con Sentinel-1 en prácticamente el mismo instante temporal.



Figura 2-12 Detalle rango visible en la isla de la Palma en el mismo instante para imagen radar (izquierda) e imagen óptica (derecha) (fuente: elaboración propia)

El empleo de sistemas SAR, como los instalados en los satélites Sentinel-1 y PAZ, al no depender de la luz solar para la captación de imágenes, proporcionan una ventaja significativa. Su capacidad para operar en cualquier condición meteorológica hace que estos sensores sean una herramienta esencial para la monitorización continua de la Tierra, permitiendo la observación en áreas donde los sensores ópticos no son efectivos. Además, la tecnología SAR permite la penetración en capas de vegetación y nubes densas, lo que facilita la obtención de información sobre la estructura de la superficie terrestre y su topografía [3].

El desarrollo de técnicas avanzadas en teledetección radar ha ampliado significativamente las aplicaciones SAR, destacando la Interferometría SAR (InSAR) y la Polarimetría SAR (PolSAR). La interferometría SAR permite medir con gran precisión desplazamientos y deformaciones en la superficie terrestre, mientras que la polarimetría SAR aprovecha la polarización de las ondas electromagnéticas para analizar las propiedades físicas y estructurales de los objetos en la superficie. Estas técnicas avanzadas consolidan al radar SAR como una herramienta fundamental en la monitorización y análisis de la superficie terrestre [3].

La interferometría SAR (InSAR) es una técnica que utiliza imágenes SAR capturadas en diferentes momentos para medir desplazamientos precisos en la superficie terrestre. Al comparar la fase de las ondas reflejadas en dos o más imágenes SAR, es posible generar un mapa de interferencia o interferograma que permite detectar cambios milimétricos en la posición de la superficie. Esta técnica ha revolucionado el estudio de fenómenos dinámicos como los movimientos tectónicos, los hundimientos del suelo y las deformaciones causadas por terremotos, erupciones volcánicas o deslizamientos de tierra. La información generada a partir de InSAR es esencial para la monitorización continua de zonas críticas, contribuyendo a la gestión de desastres naturales y a la planificación de infraestructuras en áreas susceptibles a deformaciones.

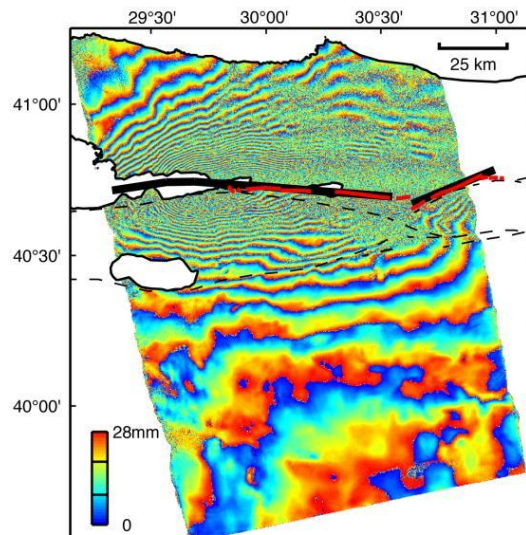


Figura 2-13 Interferograma terremoto Izmit Turquía (1999) (fuente: [12])

La polarimetría SAR (PolSAR) es una técnica de procesamiento de imágenes radar que analiza la polarización de las ondas electromagnéticas emitidas y recibidas por un sistema SAR. Los sensores SAR pueden emitir y recibir ondas con diferentes modos de polarización (como HH, HV, VH y VV), y al estudiar la interacción de estas ondas con los objetos de la superficie terrestre, es posible obtener información detallada sobre sus propiedades físicas y estructurales. PolSAR resulta especialmente útil para caracterizar la vegetación, ya que permite identificar parámetros como la orientación, la densidad y la rugosidad del dosel vegetal. Además, esta técnica es ampliamente aplicada en estudios de suelo, hielo polar y clasificación de superficies urbanas, donde la combinación de polarizaciones mejora la capacidad de discriminación entre diferentes tipos de materiales y estructuras [3].

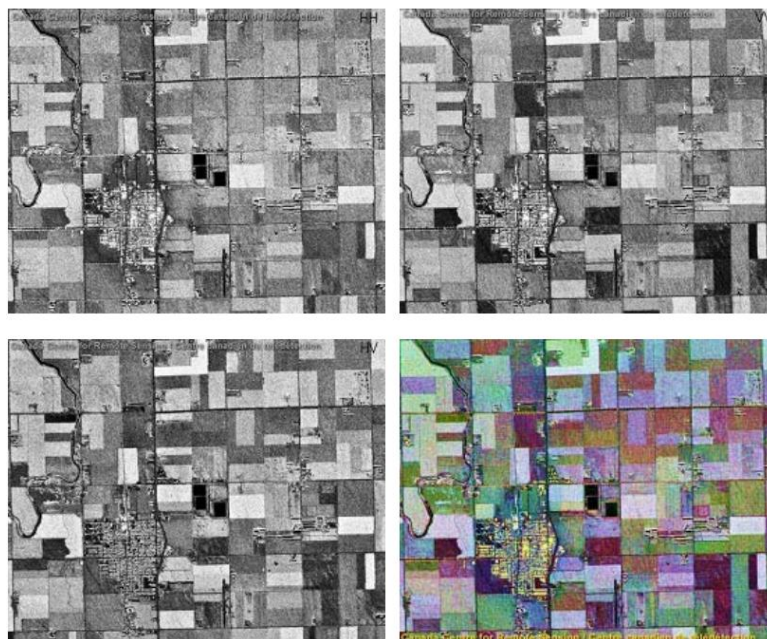


Figura 2-14 Ejemplo polarimetría SAR (fuente: [3])

La figura 2-14 ilustra cómo las diferentes polarizaciones de un radar de apertura sintética (SAR) (HH, VV, HV) y su combinación en una composición en color permiten destacar distintas características en una escena agrícola. Esta capacidad es una de las grandes ventajas de la técnica Polarimetría SAR, que utiliza las propiedades de la polarización de las ondas electromagnéticas para analizar las propiedades físicas y estructurales de los objetos observados. En las imágenes superiores, la polarización empleada es HH y VV respectivamente, más sensibles a grandes estructuras como edificaciones, así como en la rugosidad que produce la reflexión como por ejemplo el agua. La tercera imagen (abajo-izquierda), muestra HV, óptima para la detección de vegetación. El producto mostrado en la última imagen (abajo-derecha) combina las tres polarizaciones anteriores en falso color, lo cual facilita la identificación de tipos de cultivos.

2.3 Fundamentos de los sistemas SAR

Los sistemas de Radar de Apertura Sintética (SAR) se distinguen por su capacidad de obtener imágenes de alta resolución a través de un haz de microondas emitido de manera oblicua. En particular, la característica más destacada de un sistema SAR es que permite obtener imágenes de gran resolución, como si se tratara de una antena “virtual” de gran tamaño, a partir de una antena real relativamente pequeña integrando coherentemente imágenes a la vez que el sensor se mueve sobre el satélite a lo largo de su trayectoria. A diferencia de los sensores ópticos, los sistemas SAR operan en cualquier condición meteorológica y de iluminación, como se ha apuntado anteriormente, generando imágenes desde una perspectiva lateral que introduce particularidades en su interpretación y procesamiento.

La geometría SAR se define por la forma en que el sensor adquiere datos en relación con su posición y orientación respecto a la superficie terrestre [3]:

1. Ejes de adquisición:

- El eje de rango se define como la dirección perpendicular al sentido de vuelo, correspondiente a la dimensión transversal de la franja iluminada (D).
- El eje de azimut es paralelo a la dirección de vuelo del sensor y representa la dimensión longitudinal de la franja (E).

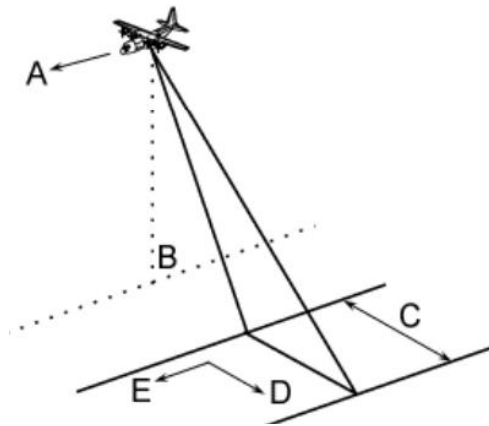


Figura 2-15 Geometría SAR: rango y azimuth (fuente: [3])

La franja iluminada por el radar se divide en dos partes: el rango cercano, más próximo al sensor, y el rango lejano, más alejado. A medida que la distancia aumenta, las características geométricas y de resolución cambian, afectando la precisión de los datos obtenidos.

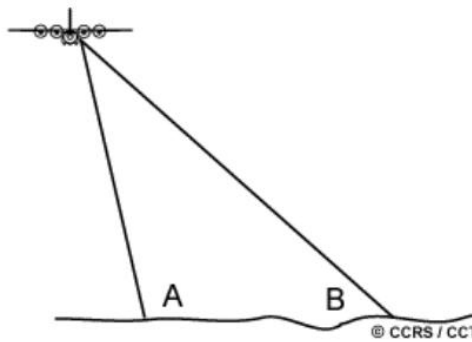


Figura 2-16 Geometría SAR: rangos cercano y lejano (fuente: [3])

2. Ángulos y distancias relevantes:

- El ángulo de incidencia es el formado entre el haz de radar y la superficie terrestre (A); este incrementa desde el rango cercano hasta el rango lejano.
- La distancia entre el radar y un punto en la superficie terrestre se mide en términos de rango inclinado o slant range (C). Sin embargo, la representación real de las imágenes se realiza en función del rango terrestre o ground range (D), que es la distancia horizontal verdadera entre el sensor y el objetivo.

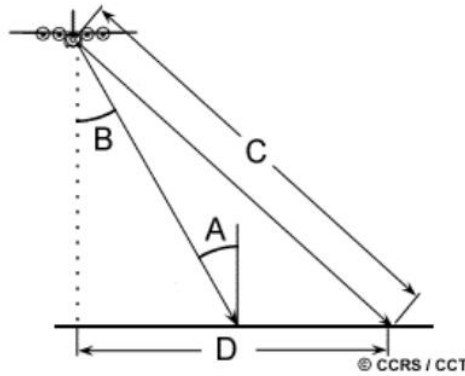


Figura 2-17 Geometría SAR: ángulo de incidencia, rangos inclinado y terrestre (fuente: [3])

3. Resolución espacial:

- Resolución en rango: la capacidad de diferenciar dos objetivos en el eje de rango depende de la longitud del pulso emitido por el radar (P). Objetivos con separaciones superiores a la mitad de la longitud del pulso pueden ser distinguidos (3 y 4), mientras que aquellos más cercanos no serán resolubles (1 y 2).

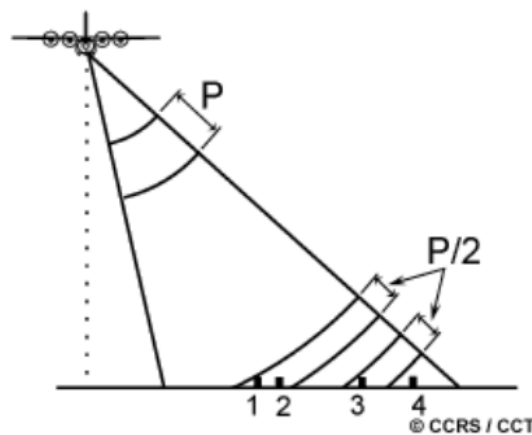


Figura 2-18 Geometría SAR: resolución en rango (fuente: [3])

- Resolución en azimuth: está determinada por el ancho del haz de microondas y la distancia al objetivo. En el rango lejano, el haz se ensancha, lo que reduce la capacidad de resolución en azimuth. Sin embargo, el uso de técnicas de apertura sintética permite superar esta limitación al simular una antena mucho más larga mediante el movimiento del sensor y el procesamiento de las señales reflejadas.

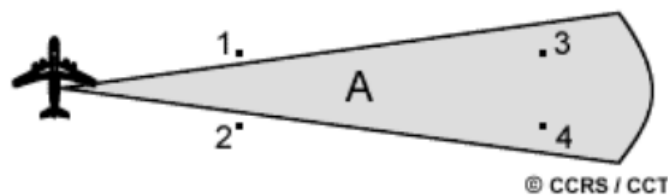


Figura 2-19 Geometría SAR: resolución en azimuth (fuente: [3])

4. Apertura sintética (SAR): la técnica de apertura sintética es fundamental para los sistemas SAR. Consiste en simular una antena más larga utilizando el movimiento del sensor a lo largo

del eje de azimut. A medida que un objetivo entra en el campo de visión del radar, se registran los ecos de las señales reflejadas durante el tiempo en que el objetivo permanece dentro del haz. Esto crea una antena virtual o "sintética", que permite alcanzar una resolución uniforme y precisa en todo el rango de observación.

Por otra parte, la geometría lateral de los sistemas SAR introduce distorsiones específicas en las imágenes que deben ser corregidas durante el procesamiento [3]:

1. **Foreshortening:** Las pendientes orientadas hacia el sensor aparecen comprimidas.

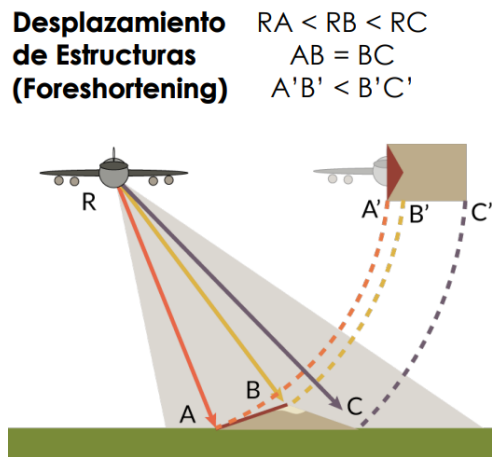


Figura 2-20 Foreshortening (fuente: [13])

2. **Layover:** Los objetos altos, como montañas, pueden reflejar señales de sus partes superiores antes que de sus bases, creando superposiciones.

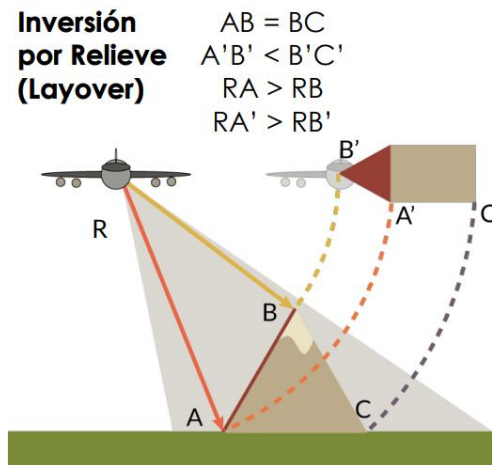


Figura 2-21 Layover (fuente: [13])

3. **Sombra radar (radar shadow):** Las áreas detrás de pendientes pronunciadas no son alcanzadas por el haz, generando regiones oscuras en las imágenes.

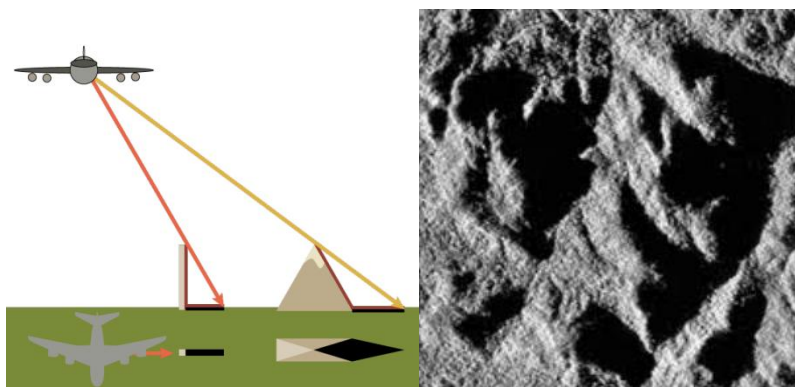


Figura 2-22 Shadow (fuente: [13])

Asimismo, los sensores de teledetección presentan diferentes características que afectan a la precisión y al detalle de los datos capturados. La resolución radial o longitudinal, es la capacidad del sensor para diferenciar dos objetivos longitudinalmente próximos. La resolución transversal, o angular, es la capacidad del sensor para diferenciar dos blancos angularmente próximos. Además, la resolución espacial define la distancia mínima entre dos objetos cercanos en el plano de la imagen, permitiendo la observación detallada de áreas pequeñas [4].

Otro tipo de resolución es la temporal, que determina la frecuencia con la que el sensor puede captar datos de la misma zona, permitiendo el seguimiento de cambios a lo largo del tiempo y siendo esencial en la detección de cambios o variaciones en la vegetación, erosión o fenómenos dinámicos como catástrofes naturales. La resolución temporal viene determinada por el tiempo de revisita de la órbita sobre la que se encuentra el satélite que lleva el sensor. La resolución espectral se refiere a la capacidad del sensor para capturar diferentes longitudes de onda, lo que facilita la identificación de materiales específicos en la superficie terrestre, especialmente útil en la identificación de áreas deforestadas o en la evaluación de la producción agrícola. Finalmente, la resolución radiométrica se relaciona con la sensibilidad del sensor para detectar pequeños cambios en la intensidad de la radiación capturada, mejorando así el contraste de la imagen y permitiendo un análisis detallado de las características y estado de los elementos observados, empleada fundamentalmente en la identificación de características geográficas o la evaluación de ecosistemas [3] [4].

2.4 Aplicaciones de los sistemas SAR

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es una herramienta versátil y poderosa en el ámbito de la teledetección, con aplicaciones que abarcan desde la monitorización ambiental hasta la gestión de emergencias. A continuación, se detallan algunas de las principales aplicaciones de los sistemas SAR, basadas en la información proporcionada por el programa Copernicus [14].



Figura 2-23 Diferentes aplicaciones de Sentinel-1 (fuente: [5])

El SAR juega un papel clave en la monitorización del medio ambiente gracias a su capacidad para detectar cambios en la superficie terrestre. Algunas de sus aplicaciones incluyen:

- Monitorización de bosques y deforestación: El radar SAR permite medir la biomasa forestal, detectar deforestación y evaluar cambios en la cobertura vegetal, incluso en regiones con alta nubosidad o densa vegetación.

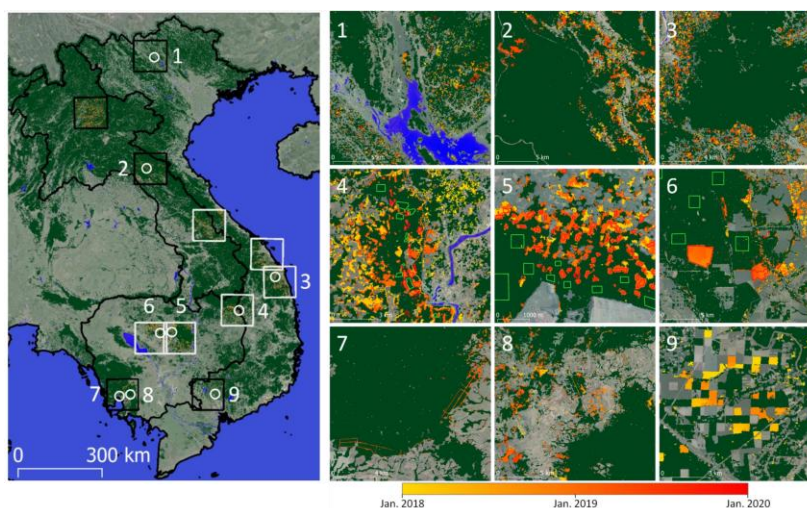


Figura 2-24 Monitorización bosques Laos, Camboya y Vietnam (2018/2020) (fuente: [14])

- Glaciares y casquetes polares: facilita el seguimiento de glaciares, la medición de movimientos de hielo y el análisis de los cambios en las masas de nieve.

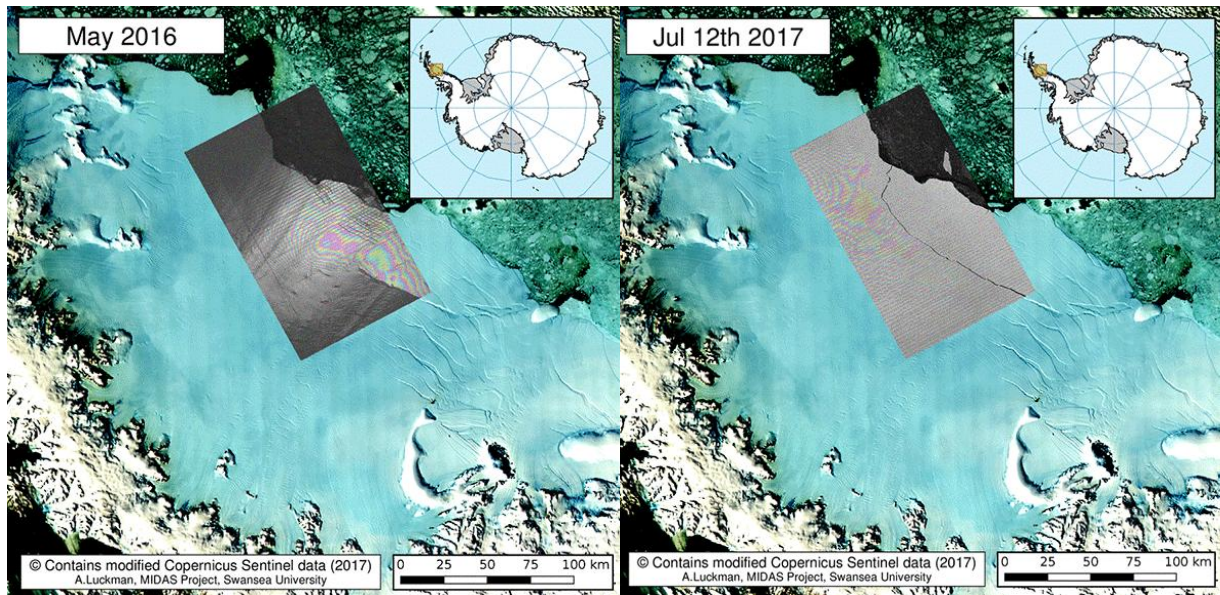


Figura 2-25 Monitorización glaciar Larson C en la Antártida (2016/2017) (fuente: [14])

- Seguimiento de cuerpos de agua: El radar puede detectar cambios en cuencas hidrográficas, lagos y embalses, facilitando la gestión eficiente de los recursos hídricos.
- Inundaciones y sequías: Gracias a su resolución y frecuencia de adquisición, Sentinel-1 permite mapear áreas afectadas por inundaciones en tiempo casi real y evaluar la pérdida de agua durante periodos de sequía.



Figura 2-26 Mapa Bangladesh durante inundación de 2016 (fuente: [14])

Dentro del ámbito de la seguridad y defensa, cabe destacar las siguientes aplicaciones:

- Vigilancia marítima: El radar SAR es utilizado para la detección de buques, reconocimiento de rutas marítimas y lucha contra actividades ilícitas como la pesca ilegal y el tráfico marítimo.

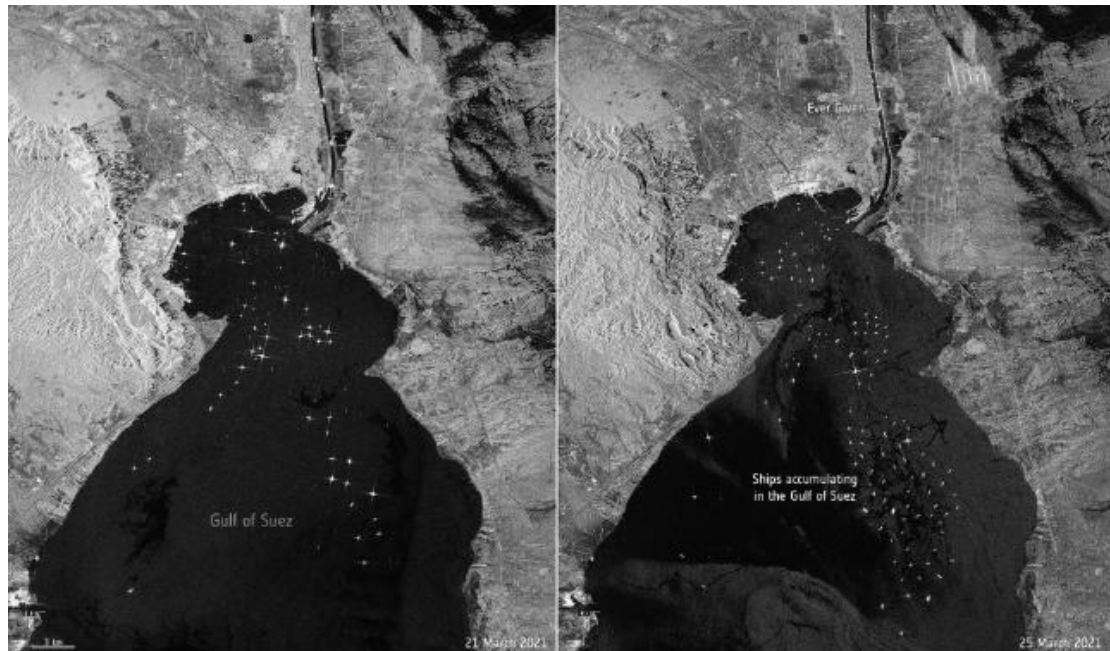


Figura 2-27 Sentinel monitorizando el paso del portacontenedores Ever Given por el canal de Suez (fuente: [14])

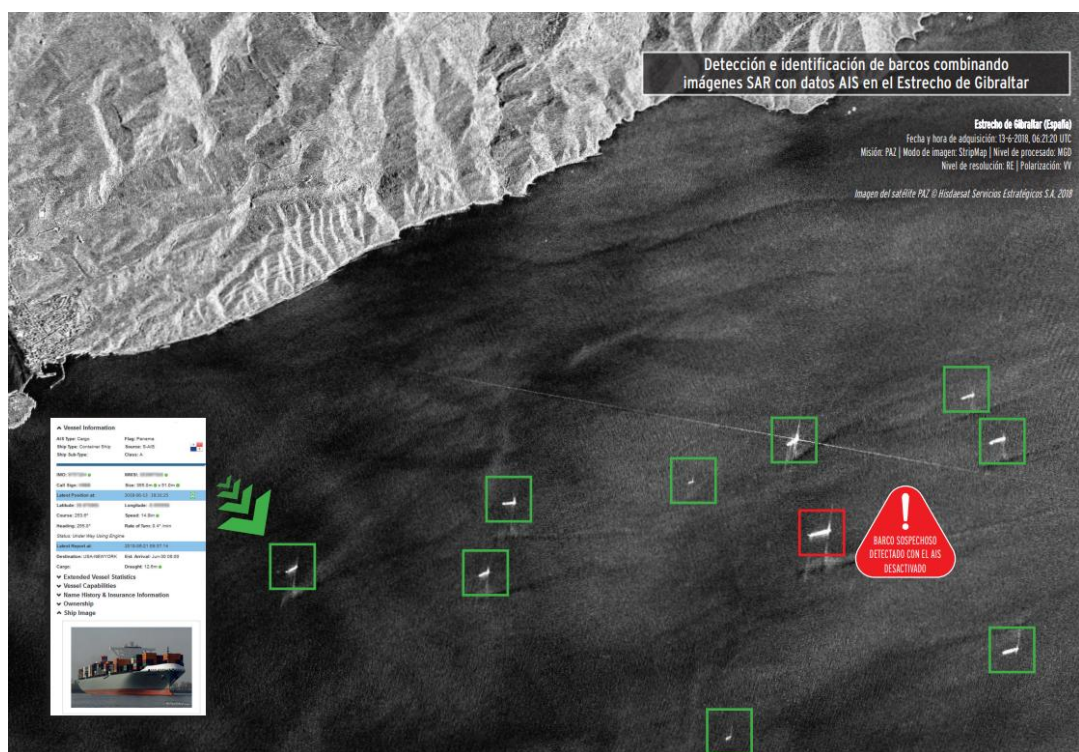


Figura 2-28 Paz en tareas de vigilancia marítima (fuente: [15])

- Control de fronteras: su capacidad para captar imágenes de alta resolución bajo cualquier condición permite la vigilancia terrestre y costera, contribuyendo a la seguridad nacional.
- Infraestructuras críticas: facilita el seguimiento del estado de infraestructuras críticas (carreteras, puentes, presas) al detectar posibles deformaciones en la superficie debido a fenómenos naturales o actividades humanas.



Figura 2-29 Análisis GEOINT del Aeropuerto de Madrid (fuente: [15])

2.5 Sensores SAR

Los sensores SAR han evolucionado significativamente desde sus inicios, convirtiéndose en herramientas esenciales para la observación de la Tierra debido a su capacidad para operar bajo cualquier condición climática y de iluminación. Este apartado presenta un análisis general sobre cinco misiones SAR relevantes: Seasat, PAZ, Sentinel-1, TerraSAR-X y la futura misión NISAR, destacando sus características técnicas más importantes y su evolución tecnológica. Si bien no se realiza un análisis exhaustivo, se muestran los hitos fundamentales que evidencian el progreso de estas misiones desde los primeros experimentos con Seasat hasta las capacidades avanzadas esperadas en NISAR [13] [16].

La misión Seasat, lanzada en 1978 por la NASA, fue pionera en la incorporación de tecnología SAR para la observación y estudio de la Tierra y los océanos. A pesar de su breve vida útil de 105 días, Seasat demostró la capacidad del radar para capturar imágenes precisas independientemente de las condiciones meteorológicas o de iluminación [8].

Seasat fue equipado con cuatro instrumentos radar para realizar distintas mediciones:

1. Radar de Apertura Sintética (SAR): Proporcionó imágenes de la superficie terrestre y marítima, utilizando banda L (longitud de onda de 24 cm) para garantizar una mayor penetración en la vegetación y la superficie oceánica.
2. Altimetro radar: Medía la distancia entre el satélite y la superficie del mar con precisión.
3. Radiómetro visual e infrarrojo: complementaba las mediciones radar al proporcionar observaciones ópticas e infrarrojas.
4. Dispersómetro (scatterometer): medía los vientos cercanos a la superficie oceánica.

Los parámetros técnicos más destacados de esta misión son:

- Banda de funcionamiento: Banda L (24 cm).
- Órbita: polar baja sincrónica al Sol, con un lanzamiento desde Vandenberg Air Force Base en California, lo que permitió colocar al satélite en una órbita polar.
- Tiempo de revisita: Seasat completaba una órbita cada 100 minutos, cubriendo la totalidad de la superficie terrestre y oceánica.
- Duración de la misión: la misión operó durante 106 días, demostrando la viabilidad de la tecnología radar antes de sufrir un fallo técnico.

El éxito de Seasat marcó un punto de inflexión para la teledetección radar, influyendo directamente en el desarrollo de sistemas SAR posteriores. Seasat demostró que el radar no solo era capaz de operar bajo cualquier condición de visibilidad, sino que además podía penetrar nubes y operar en condiciones climáticas adversas.



Figura 2-30 Seasat (fuente: [16])

La misión TerraSAR-X, lanzada el 15 de junio de 2007, fue desarrollada por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en colaboración con Airbus Defence and Space y completada con el lanzamiento del su satélite gemelo el TanDEM-X. TerraSAR-X fue diseñado para proporcionar imágenes de alta resolución espacial mediante SAR, convirtiéndose en una referencia global en cartografía de precisión [17].

Parámetros técnicos destacados:

- Banda de funcionamiento: Banda X (longitud de onda de 3.1 cm), optimizada para obtener imágenes detalladas y precisas.
- Órbita: polar sincrónica al Sol, a una altitud de 514 km.
- Tiempo de revisita: 11 días, con capacidad de realizar observaciones combinadas en modo bistático junto con el satélite PAZ.

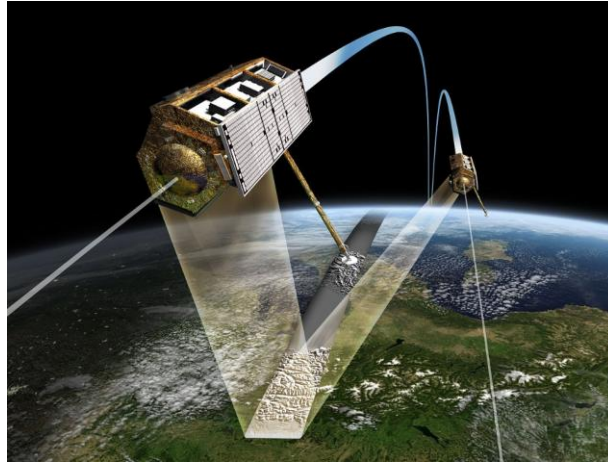


Figura 2-31 TerraSAR-X y TanDEM-X en misión (fuente: [17])

El satélite PAZ, lanzado el 22 de febrero de 2018, constituye la primera misión española de radar de apertura sintética (SAR). Fue desarrollado por Hisdesat en el marco del Programa Nacional de Observación de la Tierra, con el objetivo de proporcionar datos precisos para aplicaciones civiles, científicas y de defensa [15].

Una de sus principales ventajas es la capacidad de operar en la misma constelación que TerraSAR-X y TanDEM-X. Esta característica le permite capturar imágenes simultáneamente desde dos posiciones distintas, mejorando la precisión y el nivel de detalle de las observaciones.

Parámetros técnicos destacados:

- Banda de funcionamiento: Banda X (longitud de onda de 3.1 cm), permitiendo la obtención de imágenes de alta resolución.
- Órbita: polar sincrónica al Sol, con una altitud aproximada de 514 km y una inclinación de 97.44° .
- Tiempo de revisita: 11 días, con capacidad de sincronización en modo bistático junto a TerraSAR-X, aumentando la frecuencia y calidad de las observaciones.
- Cobertura: capacidad para generar imágenes con ancho de franja de hasta 300 km y una resolución de hasta 1 metro.

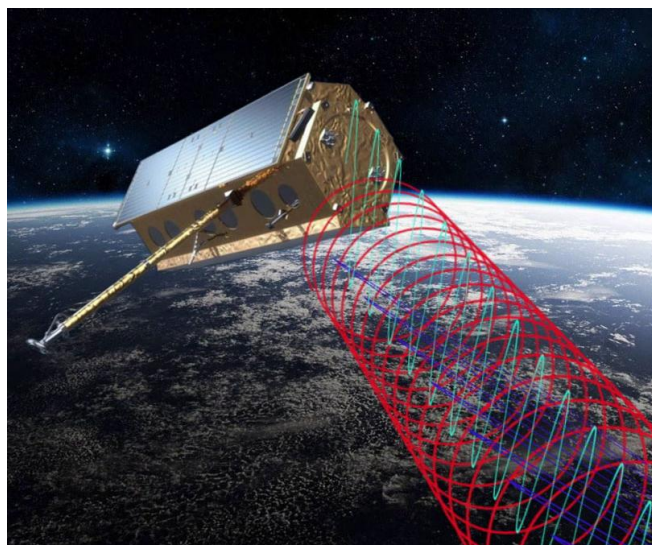


Figura 2-32 Satélite Paz (fuente: [15])

La constelación Sentinel-1, desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del programa Copernicus, está compuesta por dos satélites: Sentinel-1A (lanzado en 2014) y Sentinel-1B (lanzado en 2016), quedando este último inoperativo durante 2021. Sentinel-1 se caracteriza por ofrecer datos abiertos y gratuitos, garantizando la continuidad de las observaciones globales [13].

Parámetros técnicos destacados:

- Banda de funcionamiento: Banda C (5.6 cm), equilibrada para aplicaciones de observación terrestre y marítima.
- Órbita: polar sincrónica al Sol, a una altitud de 693 km, con una inclinación de 98.18°.
- Tiempo de revisita:
 - 6 días en regiones prioritarias como Europa.
 - 12 días en cobertura global.



Figura 2-33 Satélite Sentinel-1 (Fuente: [5])

Satélite	País/Organización	Banda SAR	Resolución espacial	Tiempo de revisita
Seasat	NASA	L	25 metros	100 minutos
TerraSAR-X	Alemania (DLR/Airbus)	X	Hasta 1 metro	11 días
Paz	España (Hisdesat)	X	Hasta 1 metro	11 días
Sentinel-1	Agencia Espacial Europea (ESA)	C	Hasta 10 metros	12 días

Tabla 2-1 Principales parámetros sensores SAR (Fuente: elaboración propia)

3 DESARROLLO DEL TFM

3.1 Descripción programa Copernicus. Sentinel-1

El programa Copernicus, impulsado por la Comisión Europea en conjunto con la Agencia Espacial Europea (ESA), es uno de los proyectos más ambiciosos a nivel global para la observación de la Tierra. Nacido como una evolución del programa GMES (Global Monitoring for Environment and Security), Copernicus tiene como finalidad garantizar una observación continua y precisa del estado del medio ambiente en el planeta, facilitando la toma de decisiones a través del análisis de información obtenida para, por ejemplo, decidir y tomar acción en la gestión de emergencias, monitorización del cambio climático o temas relacionados con la seguridad global. Su infraestructura está diseñada para proporcionar datos y servicios accesibles de manera abierta y gratuita, contribuyendo al desarrollo de múltiples sectores como la investigación científica, la industria o la seguridad nacional [18].

El programa Copernicus se estructura en una serie de servicios operativos que cubren áreas como la monitorización atmosférica, la seguridad, la gestión de emergencias, la monitorización de los océanos y la observación del cambio climático. Cada uno de estos servicios se fundamenta en la recolección y el análisis de datos proporcionados principalmente por los satélites de la serie Sentinel, que forman la columna vertebral del programa. Copernicus, al integrar estas funciones, permite la recolección de datos multidimensionales que ofrecen una visión precisa y global del planeta, permitiendo acciones preventivas en situaciones de emergencia y proporcionando información a largo plazo para la planificación estratégica y la investigación científica [19].

Una de las principales características de Copernicus es su enfoque multisectorial, que abarca la observación de la atmósfera, el océano y la tierra, así como la vigilancia del clima. Para alcanzar estos objetivos, el programa se apoya en una serie de misiones satelitales, conocidas como Sentinel, que proporcionan datos específicos para cada una de estas áreas [20]. La misión Sentinel-1 se caracteriza por monitorizar océanos o superficie terrestre día y noche independientemente de las condiciones meteorológicas a través de imágenes radar en banda C. La misión Sentinel-2 se caracteriza por la obtención de imágenes ópticas de alta resolución para servicios terrestres principalmente dentro del rango visible e infrarrojo. La misión Sentinel-3 proporciona información global sobre la monitorización de la Tierra y los océanos, mientras que la misión Sentinel-5 proporciona servicios de monitorización atmosférica como calidad del aire, concentración de dióxido de azufre, capa de ozono,...



Figura 3-1 Sentinel-1 en su trayectoria sobre la Tierra (fuente: [5])

Dentro de esta serie de satélites Sentinel, el satélite Sentinel-1 juega un papel crucial, no solo por su avanzada tecnología radar, sino también por su capacidad de proporcionar información crucial sobre la superficie terrestre. Sentinel-1 se distingue por usar radar de apertura sintética (SAR), una tecnología que, a diferencia de las imágenes ópticas, no depende de la luz solar ni de las condiciones climatológicas. Este aspecto lo convierte en un recurso crítico y fundamental para la monitorización de áreas que de otro modo serían inaccesibles o parcialmente accesibles. La capacidad de tomar imágenes del terreno en cualquier condición meteorológica hace que Sentinel-1 sea un sistema ideal para aplicaciones de seguimiento constante, como la predicción y gestión en tiempo real de desastres naturales, la gestión del cambio climático, y el seguimiento de la actividad geológica [14].

Sentinel-1 es un satélite diseñado para adquirir imágenes SAR en la banda C, lo que le permite operar de manera efectiva bajo cualquier condición atmosférica. Este tipo de radar es particularmente útil en situaciones en las que los sensores ópticos tradicionales se ven limitados, como en presencia de nubosidad, lluvia o en situaciones de visibilidad reducida, ya que las microondas que emite pueden atravesar estas condiciones adversas y reflejarse en la superficie terrestre. La misión Sentinel-1 incluye dos satélites gemelos, Sentinel-1A y Sentinel-1B, lanzados en 2014 y 2016 respectivamente. Ambos satélites siguen una órbita polar sincrónica al Sol alrededor de la Tierra, cubriendo casi todo el planeta en un ciclo de seis días cuando ambos terminales están operativos.

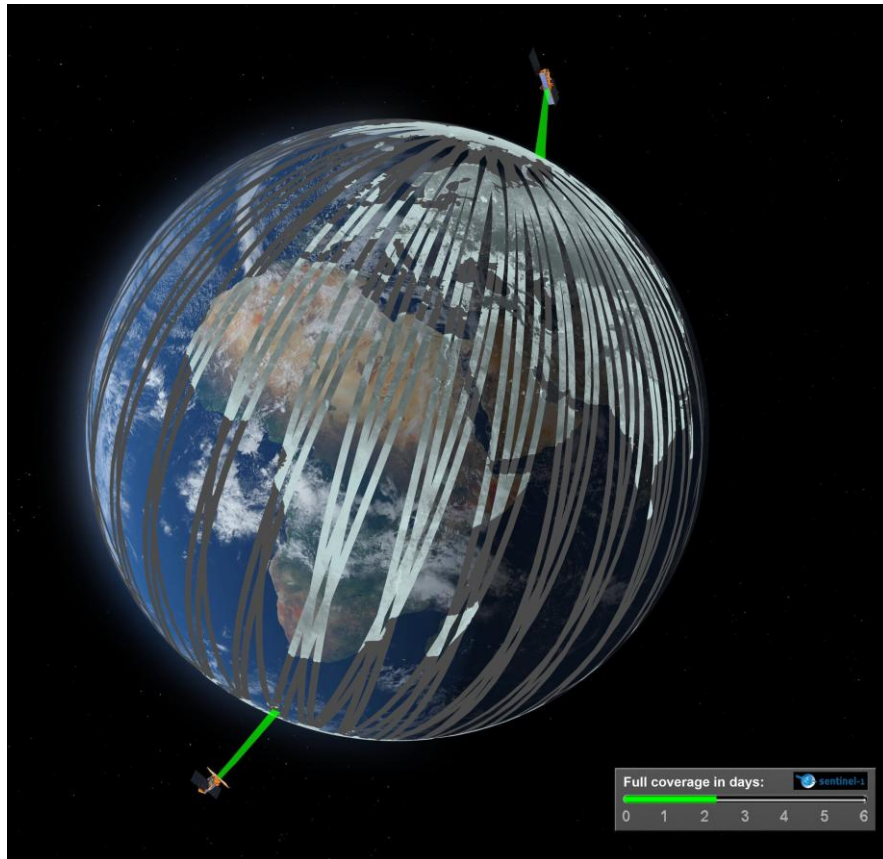


Figura 3-2 Órbita Sentinel 1A y 1B (fuente: [5])

El radar SAR de Sentinel-1 tiene la capacidad de adquirir imágenes de alta resolución con distintos modos operativos que ofrecen flexibilidad en cuanto a la cobertura geográfica y la precisión de las imágenes. A continuación, se describen los principales modos de adquisición [20]:

- **Interferometric Wide Swath (IW):** Este modo es el más utilizado en las aplicaciones científicas y operativas debido a su capacidad para generar imágenes interferométricas con un amplio campo de visión. En el modo IW, el satélite puede adquirir imágenes con una resolución de 5 x 20 metros, cubriendo un área de hasta 250 kilómetros de ancho, lo que es ideal para estudios de deformaciones del terreno mediante técnicas de interferometría SAR (InSAR). Esta técnica ha sido fundamental para detectar movimientos milimétricos en la corteza terrestre, como los provocados por terremotos, erupciones volcánicas o actividades humanas como la minería.
- **Stripmap Mode (SM):** Este modo ofrece una resolución espacial de 5 metros, lo que permite obtener imágenes con un mayor nivel de detalle, aunque con una menor cobertura espacial en comparación con el modo IW. El modo SM es adecuado para la vigilancia de áreas críticas, como infraestructuras, zonas urbanas o regiones de interés geopolítico, donde se requiere una alta precisión para identificar características específicas.
- **Extra-Wide Swath (EW):** Con una cobertura más amplia de hasta 400 kilómetros de ancho y una resolución más baja de 20 x 40 metros, el modo EW está diseñado para la observación de grandes áreas geográficas, como océanos, zonas costeras o áreas afectadas por desastres naturales. Es particularmente útil en la vigilancia de fenómenos de gran escala como la erosión costera o los cambios en la cobertura de hielo en regiones polares.
- **Wave Mode (WV):** En este modo, el satélite adquiere pequeñas imágenes centradas en áreas de interés específico en alta resolución. Este modo es utilizado principalmente para la observación del estado del mar y el análisis de las condiciones oceánicas, siendo una herramienta valiosa para la navegación y la seguridad marítima.

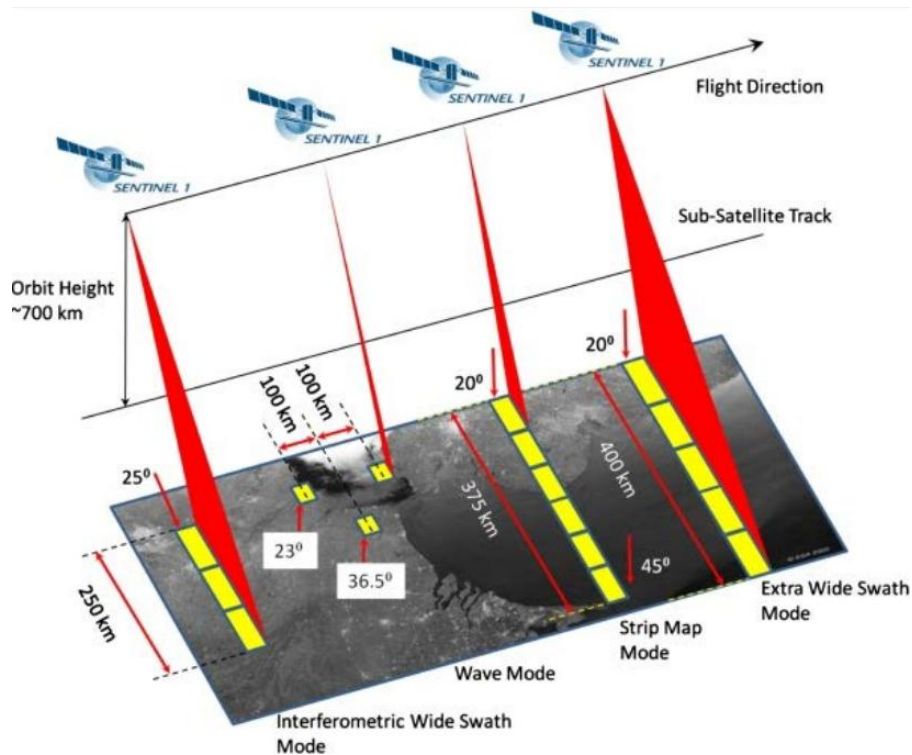


Figura 3-3 Modos de adquisición Sentinel-1 (fuente: [20])

Las características más destacadas de Sentinel-1 son resumidas en la Tabla 3-1.

Parámetros	Valor	Descripción
Banda de trabajo	Banda C	
Órbita	Ascendente	Datos adquiridos cuando el satélite viaja hacia el polo norte de la Tierra.
	Descendente	Datos adquiridos cuando el satélite viaja hacia el polo sur de la Tierra.
Resolución	Alta	10m/px para IW/SM y 25m/px para EW
	Media	40m/px para IW/SM y EW
Polarización	SH	HH
	SV	VV
	DH	HH+HV (típica en modo de adquisición EW)
	DV	VV+VH (típica en modo de adquisición EW)
	HH	Dual Parcial, solo HH

	HV	Dual Parcial, solo HV
	VV	Dual Parcial, solo VV
	VH	Dual Parcial, solo HV
Modos de adquisición	SM (Stripmap mode)	Polarización: HH+HV, VV+VH, HH, VV
	IW (Interferometric Wide swath mode)	Polarización: HH+HV, VV+VH, HH, VV
	EW (Extra Wide swath mode)	Polarización: HH+HV, VV+VH, HH, VV
	WV (Wave mode)	Polarización: HH, VV

Tabla 3-1 Principales parámetros Sentinel-1 (fuente: [21])

La versatilidad de Sentinel-1 ha permitido su aplicación en una amplia gama de sectores. En el ámbito ambiental, el satélite es esencial para la monitorización de la vegetación, la evaluación de los recursos hídricos y la detección de cambios en la superficie terrestre. Su capacidad para proporcionar datos continuos y actualizados es clave para entender los efectos del cambio climático en la biodiversidad y en la salud de los ecosistemas. Por ejemplo, a través del seguimiento de la deforestación, los datos proporcionados por Sentinel-1 permiten a las autoridades regionales y globales implementar políticas de conservación más eficaces [14].

En términos de seguridad, los datos de Sentinel-1 se emplean para la gestión de emergencias, como inundaciones, terremotos o desastres provocados por el ser humano, como el derrame de petróleo [21]. La rápida disponibilidad de imágenes permite a los equipos de respuesta ante desastres evaluar la magnitud de los daños y coordinar esfuerzos.

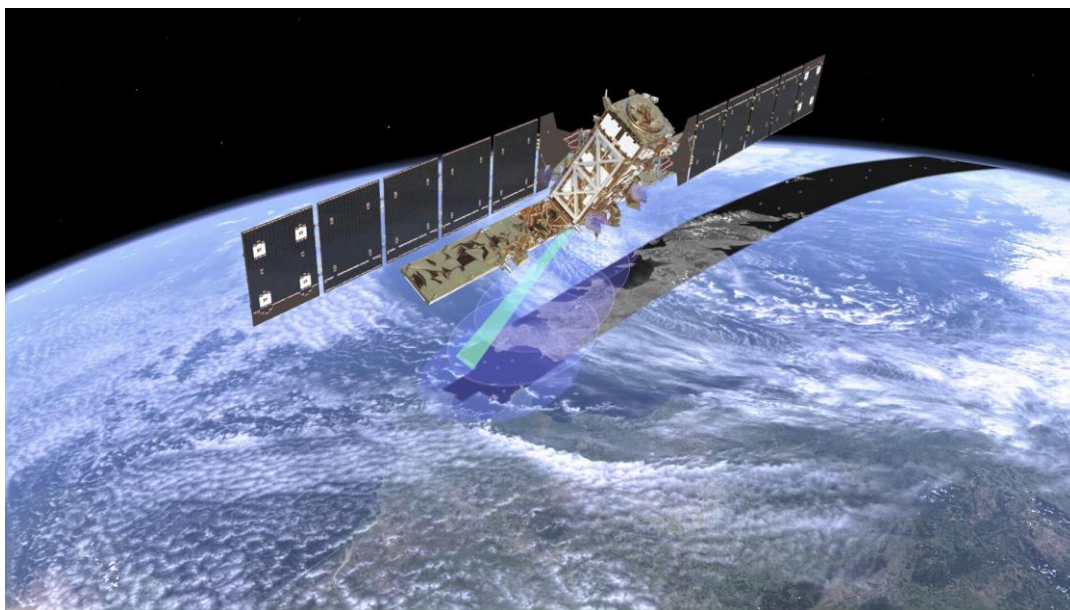


Figura 3-4 Sentinel-1 en tareas de vigilancia marítima (fuente: [5])

Sentinel-1 también tiene aplicaciones significativas en el seguimiento de las infraestructuras críticas, como presas, puentes y carreteras, proporcionando datos de alta resolución para detectar posibles desplazamientos o deformaciones que podrían afectar a la seguridad de estas infraestructuras [14].

En el marco del cambio climático, las aplicaciones de Sentinel-1 se extienden a la medición de la elevación de los glaciares y el seguimiento de la cobertura de nieve en las regiones más remotas. Estos datos ayudan a los científicos a predecir el futuro del deshielo y sus efectos sobre los niveles del mar, como el glaciar Zachariae Isstrom, en Groenlandia [22].

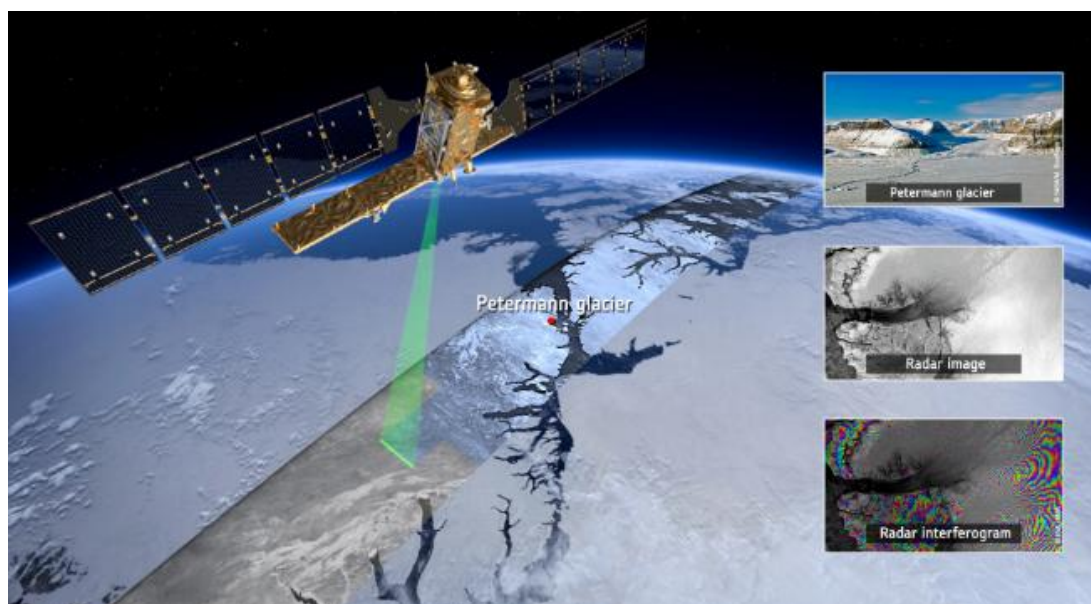


Figura 3-5 Sentinel-1 monitorizando Groenlandia (fuente: [5])

La política de datos abiertos implementada por Copernicus permite que investigadores, empresas, gobiernos y ciudadanos de todo el mundo puedan utilizar esta información sin restricciones. Esta política ha impulsado la innovación en diversas áreas de estudio y desarrollo, facilitando la creación de herramientas de análisis geoespacial y soluciones adaptadas a necesidades específicas de distintos sectores, como se destaca en las contribuciones realizadas en sectores como la gestión de recursos naturales, la vigilancia climática y la seguridad, donde estos datos representan un activo esencial para el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas [23].

En el ámbito académico, el acceso a datos de Sentinel-1 ha propiciado una cantidad considerable de investigaciones, publicaciones y estudios enfocados en entender mejor los cambios en el medio ambiente, los efectos del calentamiento global y la adaptación a desastres naturales. Universidades y centros de investigación pueden ahora contar con un flujo continuo de información, permitiéndoles generar modelos predictivos sobre la evolución de los ecosistemas, estudiar patrones de degradación ambiental y colaborar en la creación de políticas para la conservación de la biodiversidad [24].

Mirando hacia el futuro, la ESA y la Unión Europea están trabajando en la evolución de Copernicus y en la incorporación de nuevas misiones Sentinel, que mejorarán aún más la precisión y el alcance de sus aplicaciones. Nuevas tecnologías, como los sensores hiperspectrales y los sistemas de captura tridimensional, permitirán obtener información más detallada sobre la estructura y composición de los ecosistemas, proporcionando una visión más completa de los cambios que ocurren en el planeta. A medida que estas tecnologías avanzan, la información que pueden ofrecer se vuelve cada vez más específica y detallada, permitiendo un monitoreo de alta resolución para fenómenos ambientales complejos y para actividades humanas que impactan el entorno [25].

En conclusión, el programa Copernicus y la misión Sentinel-1 representan una transformación profunda en la forma en que observamos y entendemos nuestro planeta. Gracias a su tecnología avanzada, su política de datos abiertos y su enfoque multidisciplinario, Copernicus no solo contribuye a la investigación y la ciencia, sino que tiene un impacto directo en el bienestar social, económico y

ambiental a nivel global. A medida que la humanidad enfrenta desafíos cada vez mayores, como el cambio climático, la degradación de los ecosistemas y la seguridad alimentaria, herramientas como Sentinel-1 se vuelven esenciales para garantizar un futuro más resiliente y sostenible. La capacidad de observar, analizar y actuar sobre los cambios en la Tierra no solo representa un avance científico, sino también un paso crucial hacia la preservación del planeta para las generaciones futuras.



Figura 3-6 Sentinel-1 six missions (fuente: [23])

3.2 Procesamiento de los datos de Sentinel-1

El procesamiento de los datos SAR de Sentinel-1 implica una serie de pasos fundamentales que permiten convertir las imágenes obtenidas en productos utilizables para análisis detallados de la superficie terrestre. Este procesamiento es esencial para corregir las distorsiones inherentes a las imágenes de radar y mejorar la calidad y precisión de los datos antes de su aplicación en estudios científicos o proyectos de diferente índole. Las principales fases en este procesamiento incluyen la calibración radiométrica, el filtrado de speckle, la corrección geométrica y, en ocasiones, un análisis polarimétrico para obtener información más detallada sobre las características y la composición del terreno [3] [26] [27].

3.2.1 Calibración radiométrica

La calibración radiométrica tiene como objetivo corregir los valores de intensidad de las imágenes para que reflejen de manera precisa las propiedades de retrodispersión de la superficie terrestre. La retrodispersión es un parámetro esencial en la teledetección, ya que mide la cantidad de energía de radar que es reflejada desde la superficie terrestre hacia el sensor. Este parámetro es fundamental para el estudio de propiedades físicas del terreno, como la rugosidad del suelo, la estructura de la vegetación y la presencia de cuerpos de agua. La calibración convierte los valores de amplitud de las imágenes en coeficientes de retrodispersión normalizados, conocidos como Sigma-0, lo que permite una representación coherente de los datos [26] [27].

La importancia de este paso radica en su capacidad para asegurar que los datos de imágenes SAR de diferentes fechas o ubicaciones sean comparables en estudios multitemporales, donde es de vital

importancia observar cambios en el terreno a lo largo del tiempo. En aplicaciones como la agricultura de precisión, la calibración radiométrica permite monitorizar el estado de cultivos y optimizar recursos agrícolas, como el uso de agua, adaptando estas decisiones a las condiciones detectadas en el terreno. Por ejemplo, las variaciones en los coeficientes de retrodispersión pueden revelar cambios en la estructura de los cultivos o el nivel de humedad en el suelo, factores importantes para la planificación agrícola. Además, en contextos de monitorización y seguimiento de desastres o catástrofes naturales, los valores calibrados de Sigma-0 ayudan a identificar áreas con saturación de agua y detectar eventos como inundaciones, lo cual es esencial para evaluar los daños y planear respuestas de emergencia en casos de lluvias torrenciales [13].

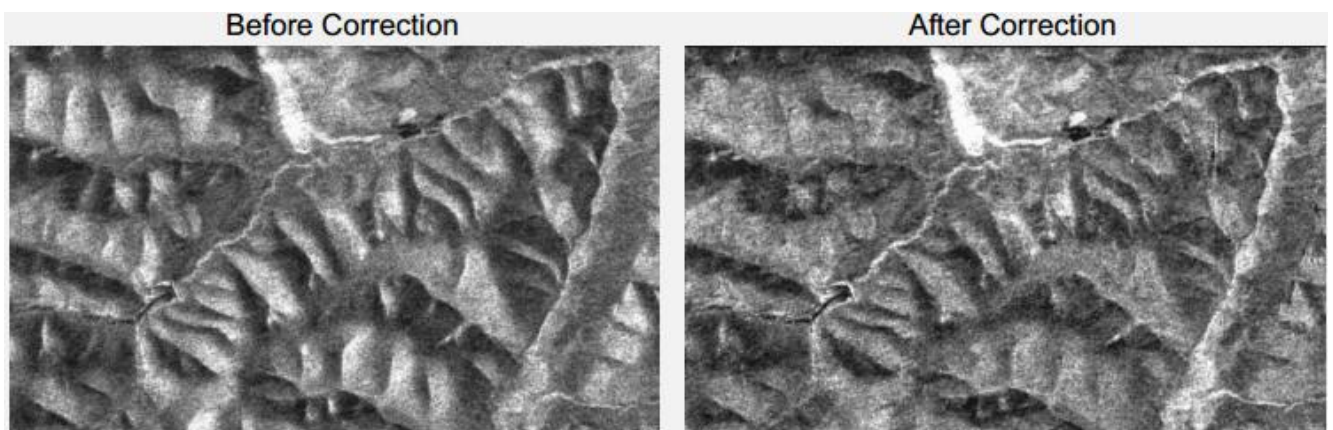


Figura 3-7 Aplicación calibración geométrica (fuente: [13])

3.2.2 Filtrado de speckle

El speckle es un fenómeno característico de las imágenes SAR, generado por la interferencia de ondas de radar que se reflejan en múltiples superficies. Aunque este ruido granular no afecta directamente los valores de retrodispersión, introduce un ruido visual que puede dificultar la interpretación y análisis de las imágenes, especialmente en aplicaciones que requieren alta precisión en la observación de detalles finos, como la identificación de infraestructuras o en la agricultura de precisión [13].

El filtrado de speckle también juega un papel crucial en el análisis multitemporal, donde es esencial que las imágenes mantengan una consistencia visual a lo largo del tiempo para detectar con precisión cambios sutiles en la superficie terrestre. En estudios de estado y evolución de glaciares, por ejemplo, la reducción del speckle permite observar con claridad los bordes de los glaciares y las áreas afectadas por el retroceso del hielo, lo cual facilita la identificación de tendencias en su derretimiento y los efectos del cambio climático. Del mismo modo, en la detección de áreas de deforestación, el filtrado de speckle mejora la precisión con la que se pueden identificar zonas con pérdida de cobertura vegetal, ayudando a cuantificar el impacto de actividades como la tala o la expansión agrícola en áreas de bosque.

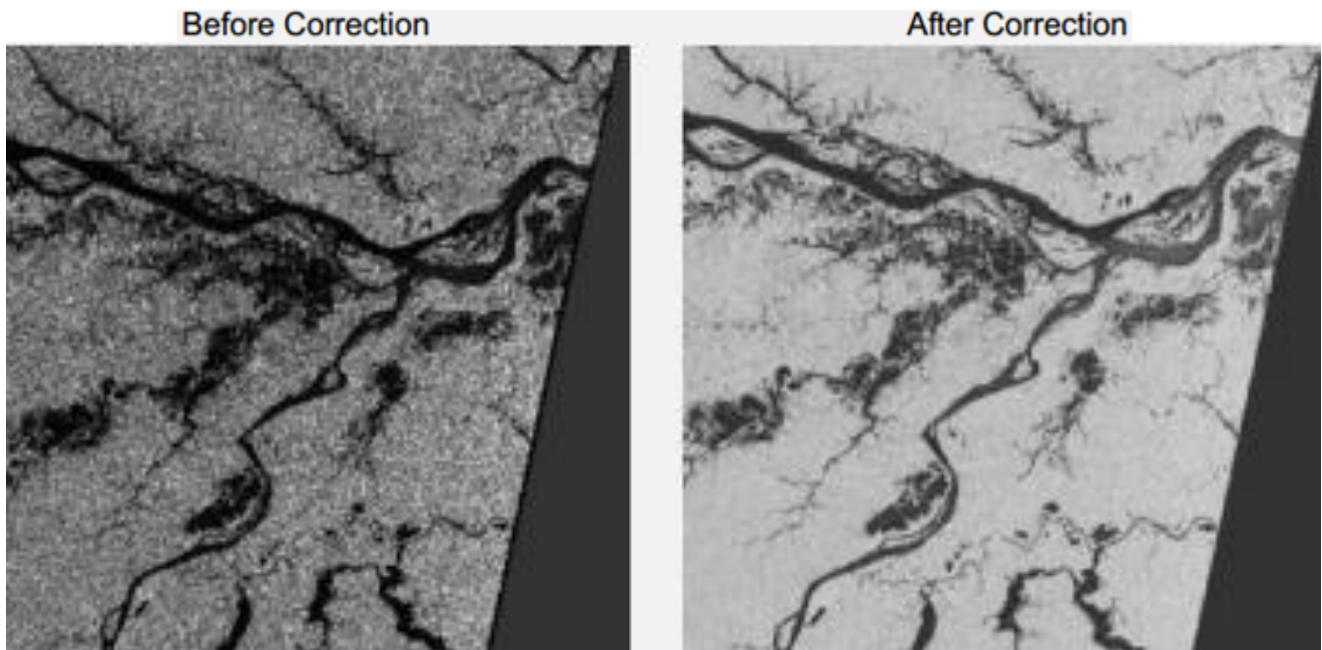


Figura 3-8 Aplicación filtrado de speckle (fuente: [13])

3.2.3 Corrección geométrica

Las imágenes SAR presentan distorsiones geométricas inherentes, resultado de la geometría de adquisición y de la interacción del radar con la topografía del terreno. Estas distorsiones, que incluyen el foreshortening, layover y shadowing, pueden afectar la representación de características del terreno, especialmente en áreas topográficamente complejas, como zonas montañosas o regiones con elevaciones pronunciadas. En el proceso de corrección geométrica, se ajustan las imágenes SAR para asegurar que los elementos topográficos se representen con precisión en un sistema de coordenadas geográficas [3].

Este paso es fundamental en aplicaciones como el control y estado de infraestructuras críticas, donde es necesario que la representación geoespacial de las imágenes SAR sea precisa para identificar cambios en estructuras específicas, como puentes, presas o edificios. La corrección geométrica garantiza que las coordenadas de cada píxel en la imagen SAR correspondan de forma exacta con la posición en el terreno, lo que facilita la detección de deformaciones en infraestructuras o el análisis de movimiento de terrenos en áreas urbanas.

Además, la corrección geométrica permite una integración precisa de imágenes SAR con otros tipos de datos geoespaciales, como los obtenidos mediante sensores ópticos. Esta integración es particularmente útil en estudios de monitoreo de cambios en el terreno, donde la combinación de datos SAR y ópticos ofrece una visión más completa del área de estudio. Por ejemplo, en la detección de deslizamientos de tierra, el uso de imágenes SAR corregidas geométricamente, combinadas con imágenes ópticas, permite una evaluación detallada de los desplazamientos del terreno y del impacto en infraestructuras cercanas.

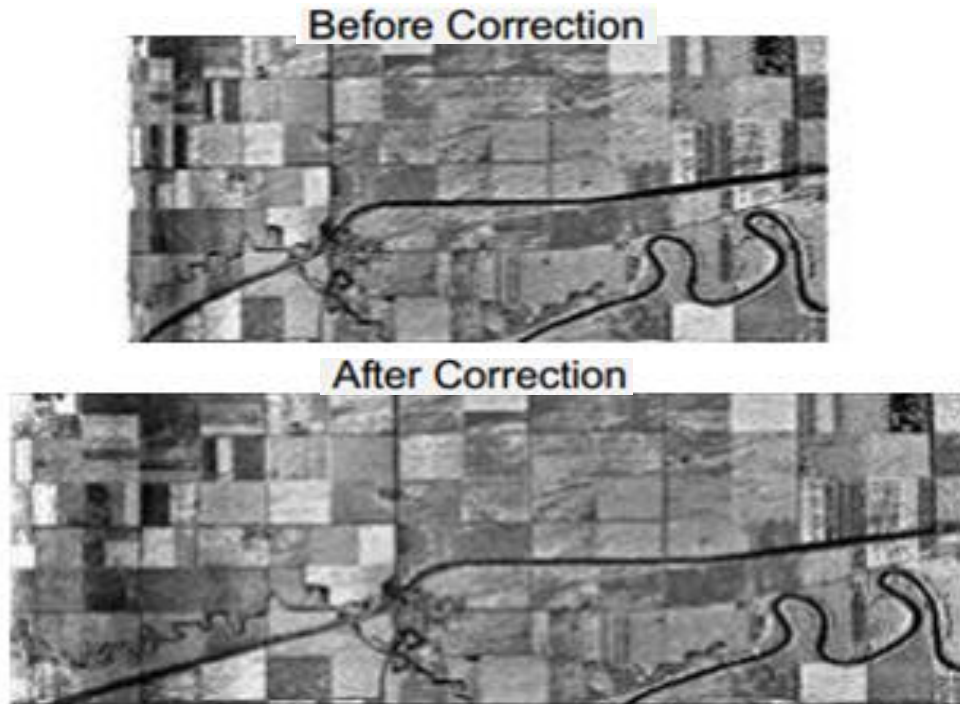


Figura 3-9 Corrección geométrica (fuente: [3])

3.2.4 Análisis polarimétrico

El análisis polarimétrico es una técnica avanzada en el procesamiento de datos SAR que permite obtener información detallada sobre la interacción de las ondas de radar con la superficie terrestre. Mediante el uso de diferentes combinaciones de polarización (VV, VH, HH, HV), el análisis polarimétrico facilita la comprensión de las propiedades físicas del terreno. En el caso de Sentinel-1, esta técnica proporciona información detallada sobre la rugosidad del suelo, la estructura de la vegetación y la presencia de cuerpos de agua [3].

En estudios de vegetación, el análisis polarimétrico permite diferenciar entre tipos de cobertura vegetal y evaluar su densidad. Las combinaciones de polarización permiten distinguir áreas de vegetación densa de superficies más homogéneas, como campos de cultivo o áreas deforestadas, lo que resulta valioso en la gestión forestal y en la planificación agrícola. En estos contextos, el análisis polarimétrico no solo ayuda a identificar la extensión de la vegetación, sino también permite evaluar la salud y el estado de crecimiento de los cultivos, información esencial en la agricultura.

Otra aplicación relevante del análisis polarimétrico es en el estudio de recursos hídricos, donde los datos polarimétricos permiten identificar cuerpos de agua y medir la rugosidad de las superficies de agua. Esto es útil en la gestión de catástrofes provocadas por inundaciones dado que la firma de retrodispersión del agua es fácilmente diferenciable del resto de componentes en la imagen radar.

En áreas urbanas, el análisis polarimétrico permite identificar estructuras construidas, como edificios y carreteras, diferenciándolas así de otro tipo de estructuras o materiales de diferente naturaleza.

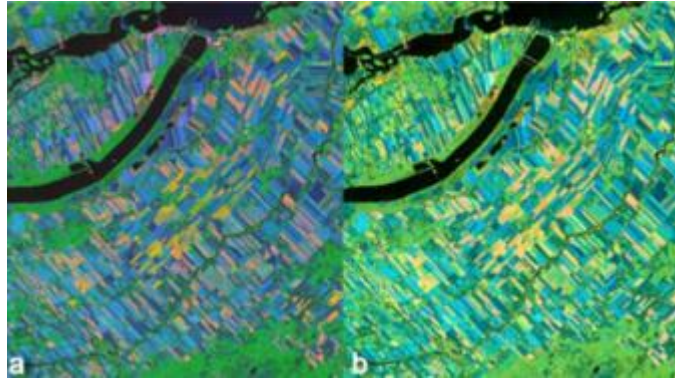


Figura 3-10 Análisis polarimétrico de imagen proporcionada por RADARSAT-2 empleando diferentes métodos: Freeman-Durden (a) y $m-\delta$ (b) (fuente: [3])

3.3 Herramienta SNAP para análisis y procesamiento de datos

La herramienta SNAP (Sentinel Application Platform) ha sido desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) para ofrecer una plataforma robusta y versátil destinada al procesamiento de datos de los satélites Sentinel, incluyendo Sentinel-1 [25]. SNAP es especialmente valiosa en el análisis de imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) por su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos, ofrecer múltiples opciones de procesamiento avanzado y facilitar la visualización de resultados de manera eficiente.

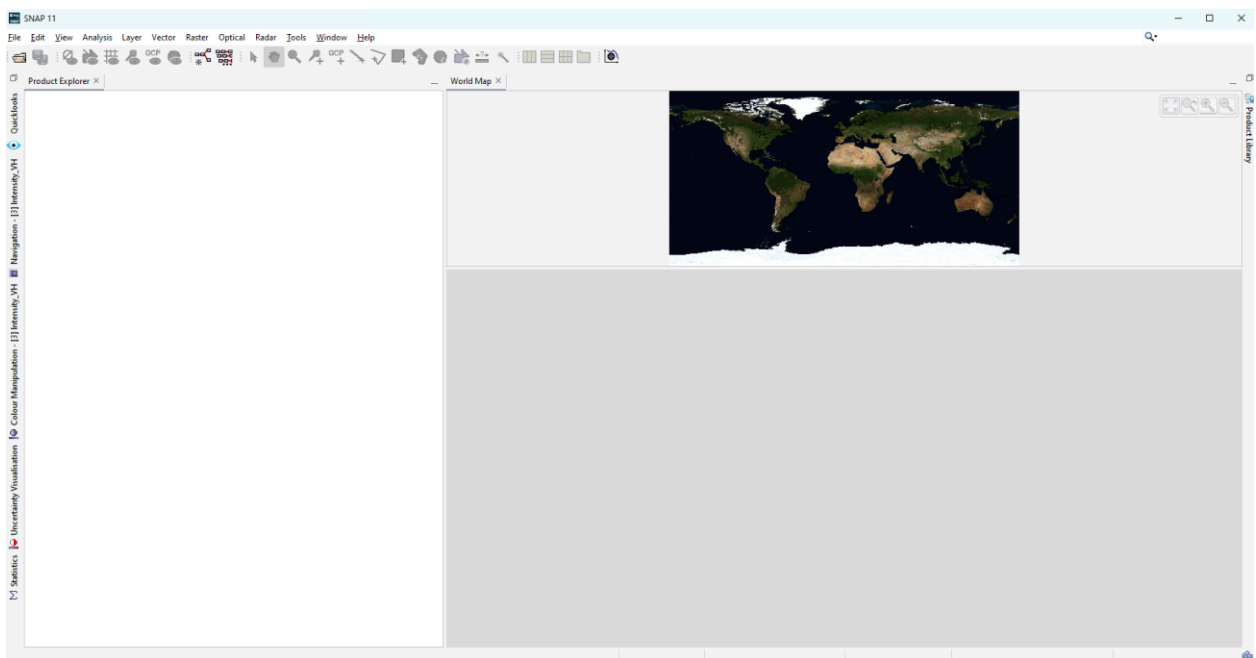


Figura 3-11 Interfaz inicial SNAP (fuente: elaboración propia)

La interfaz inicial de SNAP (Sentinel Application Platform) se presenta organizada en varios paneles que permiten gestionar, visualizar y analizar los datos de las imágenes a procesar. Presenta diferentes ventanas (figura 3-7) entre las que destacan:

- **Product Explorer:** situado en el lado izquierdo, este panel permite visualizar y gestionar los productos cargados en el proyecto.

- World Map: ubicado en la parte superior derecha, este visor muestra un mapa global por defecto. Permite explorar visualmente la extensión geográfica de los datos cargados y realizar acciones como acercamientos o desplazamientos por la imagen.
- Área inferior de trabajo: en la parte inferior se encuentra un panel destinado a la visualización y análisis de las imágenes cargadas. Aquí se pueden ver detalles como gráficos, histogramas además de herramientas de procesamiento de imágenes que se quieran incluir en el proyecto.
- Barra de herramientas superior: ubicada en la parte superior central de la pantalla, contiene accesos directos a las funciones principales de SNAP. Desde aquí, es posible abrir archivos, realizar análisis, aplicar correcciones y configurar opciones de procesamiento.

SNAP se caracteriza por su interfaz modular, que permite al usuario realizar tareas complejas de manera intuitiva. Su arquitectura está basada en módulos que se pueden combinar de acuerdo a las necesidades del análisis, proporcionando una flexibilidad crucial para proyectos de teledetección. Entre sus principales funcionalidades, destaca la capacidad de calibración de imágenes SAR, reducción de ruido, corrección geométrica y análisis polarimétrico. Estos procesos son esenciales para asegurar que las imágenes obtenidas por los satélites sean precisas y útiles en el análisis de cambios en la superficie terrestre.



Figura 3-12 Interfaz SNAP (fuente: [25])

Una de las funcionalidades clave de SNAP es su módulo de calibración radiométrica, que corrige los valores de retrodispersión (backscatter) para que reflejen de manera precisa las propiedades de la superficie terrestre. Este paso es esencial en el análisis multitemporal, ya que permite que las imágenes sean comparables a lo largo del tiempo, facilitando el estudio de cambios en el terreno, como la expansión de áreas urbanas o la deforestación.

Otra funcionalidad destacada es el filtrado de speckle, un proceso que elimina el ruido granular característico de las imágenes SAR, mejorando su calidad visual y facilitando la interpretación de los datos, optimizando la reducción de ruido sin comprometer la resolución de la imagen. Este paso es particularmente importante en aplicaciones que requieren una visualización detallada, como la observación de estructuras urbanas y de vegetación.

El módulo de corrección geométrica de SNAP permite ajustar las imágenes SAR para corregir distorsiones, garantizando así una representación georreferenciada precisa de las características topográficas. Esta corrección es indispensable cuando se integran imágenes SAR o cuando se necesitan análisis de precisión en áreas complejas, como por ejemplo terrenos montañosos.

Finalmente, SNAP permite el análisis polarimétrico, que proporciona información detallada sobre la estructura física y composición del terreno. A través del procesamiento polarimétrico, SNAP

permite generar matrices de coherencia y covarianza, las cuales son empleadas en descomposiciones como la de Freeman-Durden, para distinguir entre superficies con diferentes propiedades de dispersión, como la vegetación densa o los cuerpos de agua. Estas funcionalidades de análisis polarimétrico son cruciales en aplicaciones agrícolas, estudios forestales y en la gestión de recursos hídricos, ya que permiten una caracterización detallada de la cobertura terrestre.

Por su parte, EO-Browser, desarrollado en colaboración con la ESA y Sinergise, es una plataforma de visualización y exploración en línea que permite acceder rápidamente a imágenes satelitales de múltiples misiones, incluidas Sentinel y Landsat, sin necesidad de instalación. EO-Browser facilita la visualización en tiempo real y permite observar datos históricos, lo cual es fundamental para el análisis preliminar de áreas de interés. Esta herramienta es ideal para estudios que requieren un acceso rápido y directo a datos de teledetección y resulta especialmente útil en aplicaciones de monitoreo ambiental y en la observación de fenómenos en tiempo real, como incendios o inundaciones.

Además de su capacidad de visualización en tiempo real, EO-Browser permite la generación rápida de índices, como por ejemplo el NDWI (Índice de Diferencia Normalizada de Agua), que evalúa la presencia de agua en la superficie terrestre mediante la comparación de las reflectancias en bandas espectrales específicas, como el infrarrojo cercano y el verde. Esta función de índices predefinidos facilita la identificación rápida de cuerpos de agua y áreas inundadas, proporcionando una herramienta esencial para el análisis preliminar y evolución de la situación en fenómenos naturales extremos.

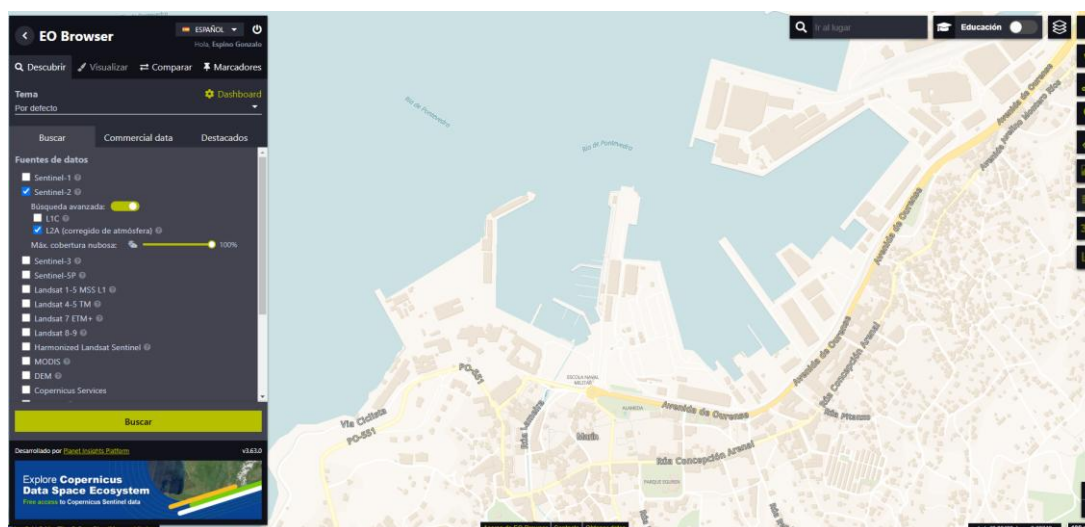


Figura 3-13 EO Browser (Fuente: elaboración propia)

Ambas herramientas se integran de manera complementaria en el flujo de trabajo del análisis de teledetección. EO-Browser facilita una primera visualización y selección de áreas de interés, permitiendo una exploración rápida de patrones y tendencias sin requerir procesamiento avanzado. SNAP, en cambio, permite un análisis en profundidad y la aplicación de técnicas más avanzadas de procesamiento, necesarias para obtener productos de alta precisión y mayor calidad analítica. EO-Browser permite la descarga de los datos brutos ó ligeramente procesados de un área de interés, los cuales pueden ser directamente cargados y procesados en mayor profundidad en SNAP.

4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA / RESULTADOS / VALIDACIÓN

4.1 Planteamiento del Problema

4.1.1 Expansión Mar territorial Mar de China

La estrategia de China en el Mar de China Meridional se ha consolidado como una maniobra de expansión territorial sin precedentes, que combina reclamaciones marítimas, proyectos de infraestructura a gran escala y objetivos militares. En la última década, China ha llevado a cabo un extenso proyecto de construcción de islas artificiales en esta región, transformando arrecifes y atolones en plataformas estratégicas dotadas de complejas instalaciones militares y civiles. Estas construcciones incluyen pistas de aterrizaje, puertos y sistemas de defensa, diseñados para consolidar el control chino sobre una zona de alta importancia geopolítica y económica. Meridional es una región de vital interés debido a su importancia en el comercio marítimo global y su abundancia en recursos naturales. Aproximadamente un tercio del comercio mundial pasa por esta vía, que conecta el Océano Índico con el Océano Pacífico. Además, esta región alberga vastas reservas de petróleo y gas natural, así como abundantes recursos pesqueros, lo cual hace que los países vecinos, como Filipinas, Vietnam y Malasia, también tengan intereses en el área. La construcción de estas islas artificiales permite a China no solo extender su presencia en el área, sino también reforzar sus reclamos sobre una extensa zona económica exclusiva (ZEE), obteniendo así derechos de explotación sobre estos recursos [28].

Desde 2014, China ha intensificado sus esfuerzos de expansión territorial en el Mar de China Meridional mediante proyectos de recuperación de tierras. Gracias a una infraestructura tecnológica avanzada y abundantes recursos financieros, China ha modificado la geografía de arrecifes como Fierly Cross o Mischief, transformándolos en islas artificiales bajo su control. Estas nuevas estructuras cuentan con instalaciones militares, como radares, sistemas de defensa aérea y hangares, que les permiten funcionar como plataformas estratégicas de vigilancia y respuesta rápida. De esta forma, la construcción de islas artificiales no solo representa un reclamo territorial, sino también una táctica para consolidar el dominio militar en una región de alta relevancia geoestratégica [29].



Figura 4-1 Reclamaciones marítimas en el Mar de China Meridional (Fuente: [30])

La militarización de estas islas artificiales ha generado una preocupación significativa a nivel internacional, ya que ha intensificado las tensiones en la región. Al construir una infraestructura militar en estas islas, China refuerza su capacidad para proyectar su poder en el Pacífico. Esto ha provocado reacciones adversas de países vecinos y otras potencias internacionales, como Estados Unidos y Japón, que han expresado que estas acciones son un intento de modificar el statu quo en el sudeste asiático. La expansión china en el Mar de China Meridional plantea desafíos geopolíticos, ya que, al establecer una presencia dominante en la zona, China podría controlar el tráfico marítimo y acceder a recursos naturales, desestabilizando el equilibrio de poder en la región y generando incertidumbre sobre la libertad de navegación y la soberanía territorial en el área [31].



Figura 4-2 Fiery Cross Reef (fuente: Google earth)

Desde una perspectiva ambiental, la construcción de estas islas artificiales ha planteado serias inquietudes debido al impacto negativo que supone para el ecosistema marino. La transformación de los arrecifes en plataformas de construcción implica la destrucción de hábitats y la alteración de la biodiversidad local. Las operaciones de dragado necesarias para crear estas islas afectan los hábitats coralinos, perjudicando a especies marinas que dependen de los arrecifes para su supervivencia. Asimismo, el desarrollo de infraestructuras y la actividad militar en estas zonas han elevado el riesgo de contaminación, poniendo en peligro la salud de los ecosistemas marinos en una región que ya enfrenta amenazas climáticas y de sobrepesca [32].

Este estudio se centra en el análisis de la única imagen de radar de apertura sintética (SAR) disponible, capturada por el satélite Sentinel-1 para identificar las dimensiones y extraer datos objetivos sobre el arrecife de Fiery Cross. Si bien no se puede llevar a cabo el análisis de una serie temporal, sí se puede realizar, por ejemplo, un análisis polarimétrico.

4.1.2 Gibraltar: estrategia y defensa en el estrecho

El Estrecho de Gibraltar se ha consolidado como una de las zonas marítimas más estratégicas y transitadas del mundo. Su posición como punto de conexión entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo lo convierte en un corredor crucial para el comercio internacional y un escenario clave en la geopolítica europea. Según datos del Centro de Coordinación de Salvamento Marítimo de Tarifa, más de 70.000 buques transitan anualmente estas aguas, la mayoría en rutas mercantes Este-Oeste, junto con transbordadores y naves de alta velocidad que operan entre los puertos de Algeciras, Tarifa, Ceuta y Tánger [33].

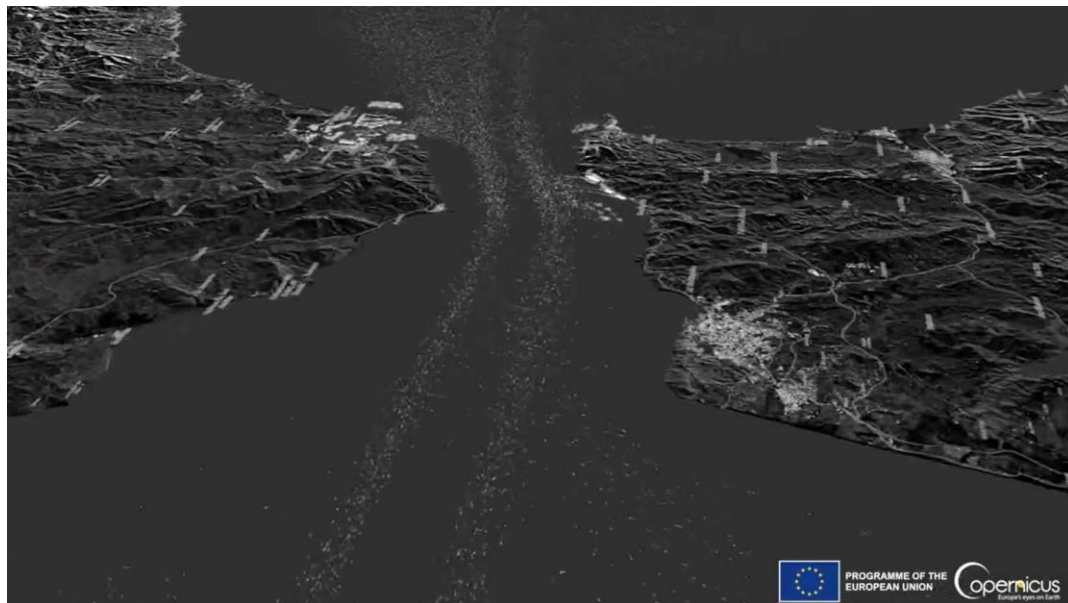


Figura 4-3 Tráfico marítimo en el Estrecho de Gibraltar entre 2020 y 2023 (Fuente: [34])

En el estrecho coexisten intereses estratégicos de múltiples actores, destacando el papel de España y Reino Unido en la gestión y control de este corredor. Gibraltar alberga instalaciones clave como el aeródromo militar, utilizado tanto para operaciones británicas como para ejercicios de la OTAN. Por parte de España, la implementación de agentes de la Guardia Civil y la colaboración con organismos internacionales reflejan su intención de mantener una presencia activa en el área, cabe señalar la Operación Paso del Estrecho (OPE), que durante los meses de julio y agosto involucra a más de 26.000 agentes de la Policía Nacional y Guardia Civil para la gestión del flujo de viajeros entre Europa y el Norte de África [35].

Estas capacidades no solo están diseñadas para disuadir posibles conflictos, sino también para garantizar la seguridad en el tráfico marítimo y combatir actividades ilícitas, como el narcotráfico y el contrabando. Como ejemplo, el Estrecho de Gibraltar se ha convertido en una vía crítica para el transporte de migrantes desde el norte de África hacia Europa, aumentando la presión sobre las infraestructuras y las operaciones de vigilancia en la zona [36].

El control del estrecho tiene implicaciones directas en las relaciones internacionales y la estabilidad regional. La militarización de Gibraltar por parte del Reino Unido es percibida por España como una barrera a su soberanía plena en la región, generando debates sobre el estatus del territorio y sus impactos en el equilibrio de poder en el Mediterráneo. En agosto de este año, por ejemplo, unas maniobras militares británicas en Gibraltar generaron protestas por parte del Gobierno español, señalando que dichas acciones intensificaban las tensiones diplomáticas [37].

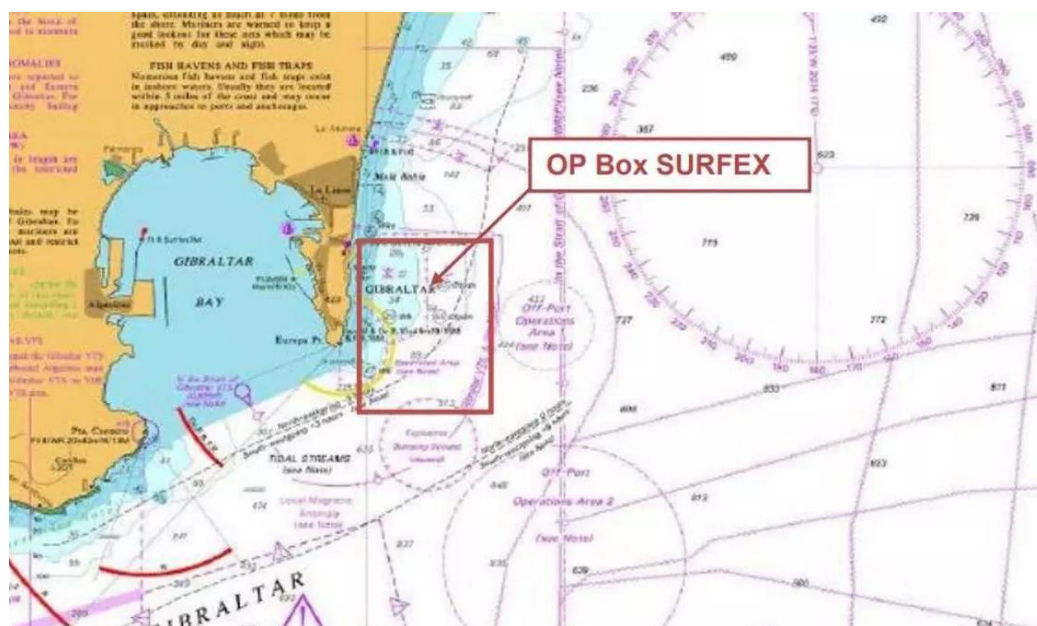


Figura 4-4 Zona ejercicio de tiro en superficie, diciembre de 2023 (fuente: [37])

Desde una perspectiva ambiental, la presencia de instalaciones militares y el tráfico marítimo intenso han generado preocupaciones sobre la sostenibilidad del ecosistema marino. Las operaciones de mantenimiento de submarinos nucleares en Gibraltar han sido objeto de críticas debido al riesgo de contaminación y los posibles efectos adversos para las comunidades locales y la biodiversidad marina. Estas preocupaciones han provocado demostraciones públicas de rechazo, realizándose movilizaciones de la Mancomunidad del Estrecho de Gibraltar ya desde el año 2001, tras la estancia en puerto del HMS Tireless de la Royal Navy británica [38].

Por otra parte, proyectos como la construcción de diques, rellenos costeros y ampliaciones portuarias muestran una estrategia expansionista de Gibraltar, consolidando su capacidad operativa tanto comercial como militar. Un ejemplo significativo de estas prácticas es el uso de miles de toneladas de piedra provenientes de canteras de Málaga para rellenar el mar en Gibraltar con la finalidad del proyecto turístico Eastside, según información de TNG Global [39], estas actividades, realizadas sin el cumplimiento de la normativa ambiental española, han generado controversia por su impacto en la biodiversidad marina y las posibles implicaciones legales y diplomáticas [40].



Figura 4-5 Simulación del proyecto turístico Eastside (Fuente: [39])

Desde una perspectiva geopolítica, la expansión costera refuerza la posición de Gibraltar como un enclave estratégico en el Mediterráneo, lo que a su vez intensifica las tensiones diplomáticas entre España y Reino Unido. Estas disputas se agravan con la percepción de que los cambios en la línea de costa podrían consolidar un dominio británico ampliado en la región [41].

Este estudio pretende analizar las posibles modificaciones en la línea de costa de Gibraltar mediante imágenes de radar de apertura sintética (SAR) capturadas por el satélite Sentinel-1. El análisis multitemporal se centrará en identificar patrones de expansión costera desde 2015, obteniendo datos objetivos para evaluar tanto el impacto ambiental como las implicaciones estratégicas de estas transformaciones.

4.1.3 Análisis de los efectos de la DANA en Valencia

La Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) es un fenómeno meteorológico que se manifiesta como una masa de aire frío aislada en niveles altos de la atmósfera. Al interactuar con aire cálido y húmedo en niveles inferiores, puede generar condiciones de inestabilidad atmosférica, propiciando lluvias intensas y tormentas severas. Este tipo de sistemas es común en la cuenca mediterránea, especialmente durante el otoño, cuando las temperaturas del mar aún son elevadas, favoreciendo la convección y la formación de precipitaciones intensas [42].

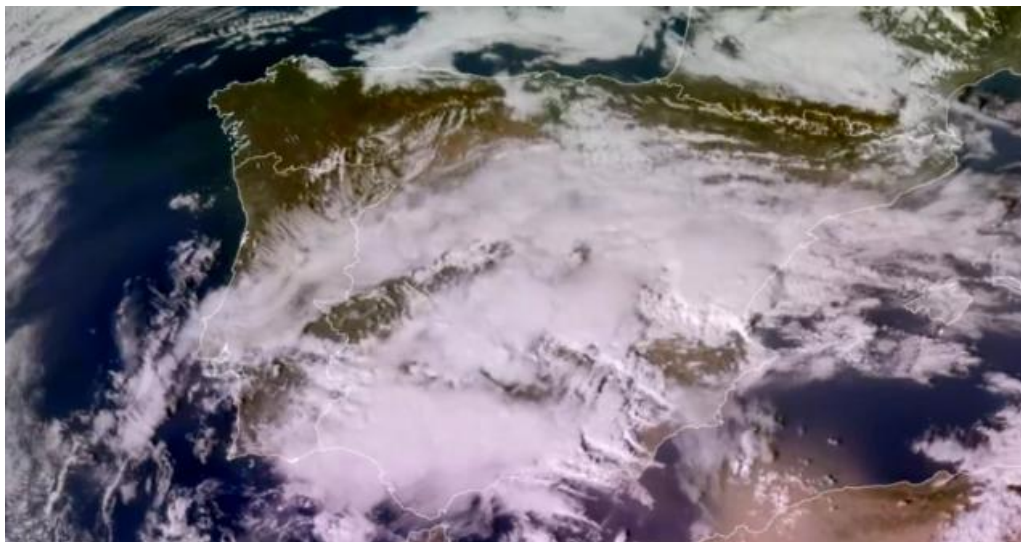


Figura 4-6 Imagen meteosat de la DANA (Fuente: [43])

Entre finales de octubre y principios de noviembre de 2024, una DANA afectó significativamente la Comunidad Valenciana, provocando precipitaciones acumuladas que superaron los 200 mm en menos de 24 horas en diversas localidades. Este evento extremo ocasionó inundaciones, deslizamientos de tierra y daños considerables en infraestructuras, áreas urbanas y agrícolas. La comarca de Horta Sud, que incluye municipios como Paiporta, Torrent y Picanya, fue una de las más afectadas. En Paiporta, por ejemplo, se registraron inundaciones en viviendas y vías públicas, mientras que en Torrent y Picanya los desbordamientos de barrancos anegaron zonas residenciales y agrícolas, causando pérdidas económicas significativas [44].



Figura 4-7 Imágenes de Landsat antes y después del paso de la DANA (Fuente: [45])

Este estudio se propone analizar imágenes satelitales obtenidas por el Sentinel-1 antes y después de la DANA, empleando su tecnología de radar de apertura sintética (SAR) para identificar y delimitar las áreas inundadas. La capacidad del SAR para penetrar nubes y operar en condiciones meteorológicas adversas lo hace especialmente útil en situaciones de nubosidad densa, como las asociadas a eventos de DANA. Mediante el análisis multitemporal de estas imágenes, se pretende cuantificar la extensión de las hectáreas afectadas, proporcionando una evaluación precisa del impacto del evento.

4.2 Resultados del Análisis

4.2.1 Metodología y procesamiento

El análisis de las imágenes SAR de Sentinel-1 para los casos de estudio en Valencia y Gibraltar sigue un flujo de trabajo que comienza con la identificación de las imágenes relevantes y continúa con una serie de pasos técnicos realizados en SNAP. Este enfoque permite obtener resultados cuantitativos precisos y visualizaciones útiles para la interpretación a lo largo de una serie temporal de información. Sin embargo, en el caso del Mar de China Meridional, donde solo se dispone de una imagen radar, el análisis se ajusta para centrarse en la interpretación visual de los datos disponibles y un análisis polarimétrico.

4.2.1.1 Selección e importación de imágenes

El proceso comienza con la identificación y descarga de las imágenes necesarias para cada caso de estudio. Para ello, se utilizan plataformas como EO Browser y Copernicus Browser, que permiten acceder y visualizar datos satelitales de Sentinel-1.

4.2.1.1.1 Selección de imágenes

Se seleccionan imágenes SAR correspondientes a las áreas y fechas de interés, asegurándose de incluir adquisiciones previas y posteriores a los eventos analizados. Esto permite observar los cambios en la superficie, como las áreas ganadas al mar en el Mar de China, las transformaciones costeras en Gibraltar o las zonas inundadas en Valencia, teniendo en cuenta la plataforma que ha realizado la imagen y su número relativo de órbita para asegurarse de que las imágenes extraídas pueden ser posteriormente comparadas.

Asimismo, las imágenes son obtenidas en el modo IW ya que proporciona una alta resolución, permite polarizaciones duales (VV y VH) y una resolución de 10x10 metros. Por último, se selecciona la dirección orbital ascendente o descendente y a la hora de seleccionar las imágenes, cerciorarse de que es la misma para ambas imágenes, al igual que con el número relativo de órbita.

Finalmente, se procede a la descarga de las imágenes en formato SAFE para garantizar la compatibilidad con SNAP.

La siguiente tabla, muestra los parámetros de las imágenes seleccionadas para el Mar de China Meridional:

Fecha de adquisición	Tipo de órbita	Número relativo de órbita	Modo de Adquisición	Polarización
19 DIC 21	Descendiente	149	IW	VV y VH

Tabla 4-1 Parámetros imagen Mar de China Meridional (Fuente: elaboración propia)

En la siguiente, se pueden visualizar los parámetros para Gibraltar:

Fecha de adquisición	Tipo de órbita	Número relativo de órbita	Modo Adquisición	Polarización
15 NOV 14	Ascendente	74	IW	VV y VH
10 NOV 24	Ascendente	74	IW	VV y VH

Tabla 4-2 Parámetros imágenes Gibraltar (Fuente: elaboración propia)

Por último, en la siguiente tabla se pueden observar los parámetros para la comarca de Horta Sud, en Valencia:

Fecha de adquisición	Tipo de órbita	Número relativo de órbita	Modo Adquisición	Polarización
06 NOV 23	Ascendente	103	IW	VV y VH
31 OCT 24	Ascendente	103	IW	VV y VH

Tabla 4-3 Parámetros imágenes Valencia (Fuente: elaboración propia)

4.2.1.1.2 Importación de imágenes

Las imágenes seleccionadas se importan al software SNAP, donde se organizan en proyectos individuales para cada área de estudio.

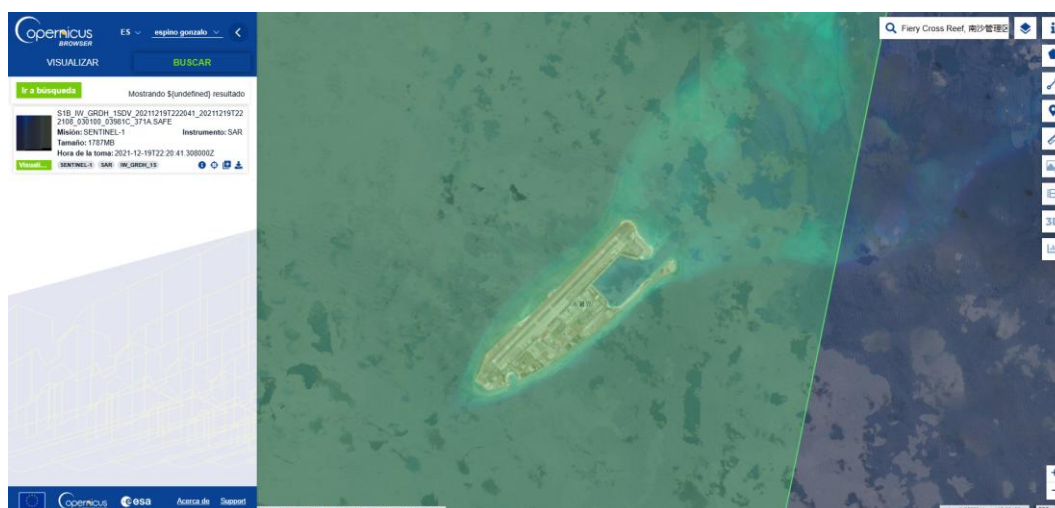


Figura 4-8 Imagen SAR de Fiery Cross Reef (Fuente: elaboración propia)

4.2.1.2 Preprocesamiento de datos

Una vez llevada a cabo la importación de imágenes, se realiza su preprocesamiento para asegurar su calidad y precisión antes del análisis.

4.2.1.2.1 Creación de subconjuntos

Las áreas de interés se recortan para optimizar el procesamiento y focalizar el análisis en las zonas específicas. En el caso particular de Fiery Cross Reef se recorta dentro de lo posible el área correspondiente al Océano, para que los datos a procesar sean lo más representativos posibles a nuestro interés (superficie terrestre en este caso).

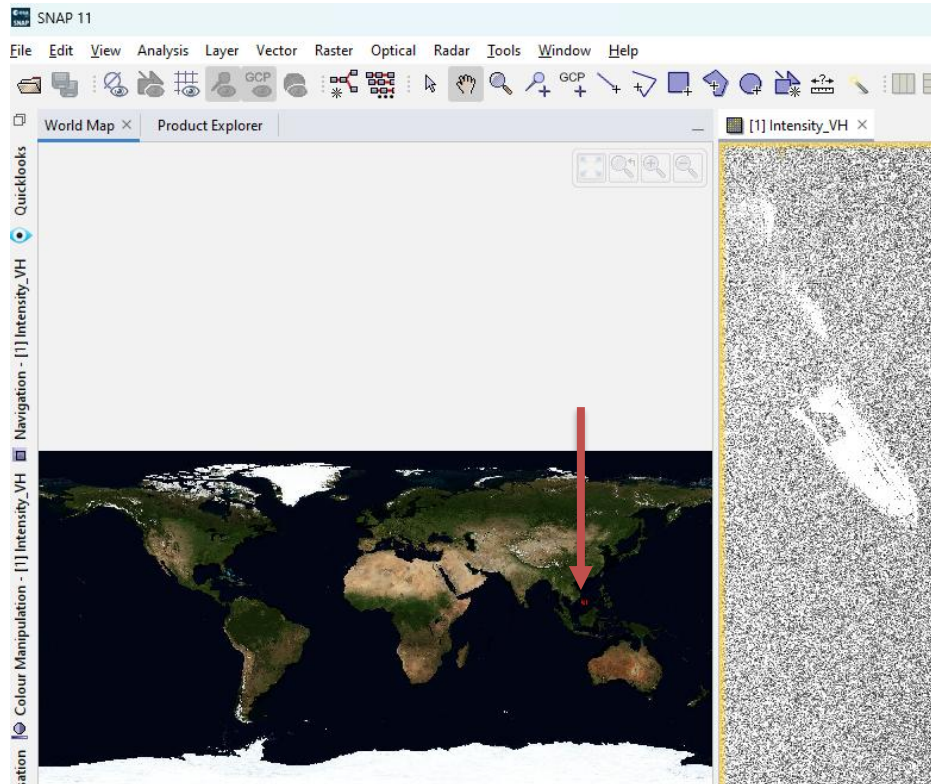


Figura 4-9 Imagen SAR en área de barrido Sentinel (señalada en rojo) y a la derecha imagen del subconjunto específico en Fiery Cross Reef (Fuente: elaboración propia)

4.2.1.2.2 Calibración radiométrica

Este paso cuantifica la retrodispersión de los píxeles, normalizando los valores para que representen con precisión las propiedades de la superficie terrestre.

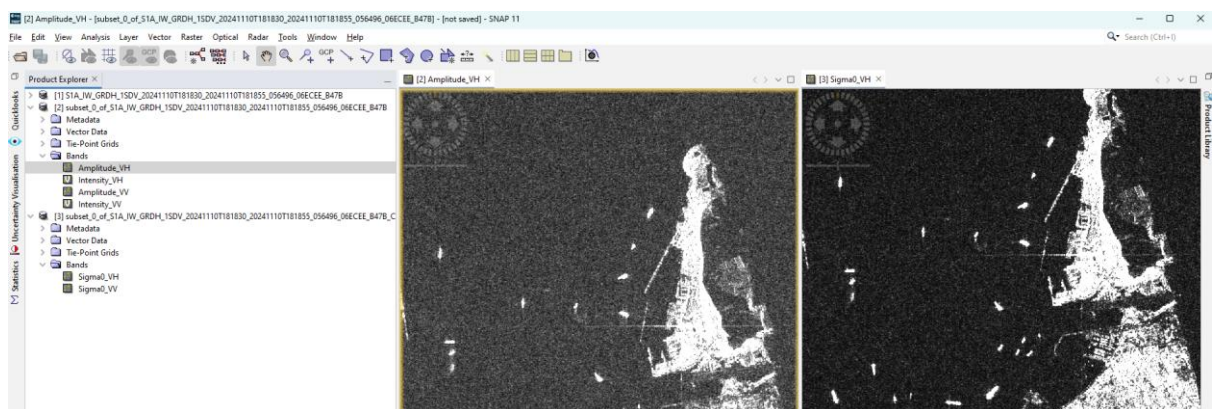


Figura 4-10 Captura SNAP tras aplicar calibración radiométrica (derecha) a subconjunto de la zona específica de estudio en Gibraltar (izquierda) (Fuente: elaboración propia)

4.2.1.2.3 Filtrado de Speckle

Se aplica un filtro Lee para reducir el ruido granular, lo que mejora la claridad de las áreas homogéneas, como las zonas inundadas o transformadas.

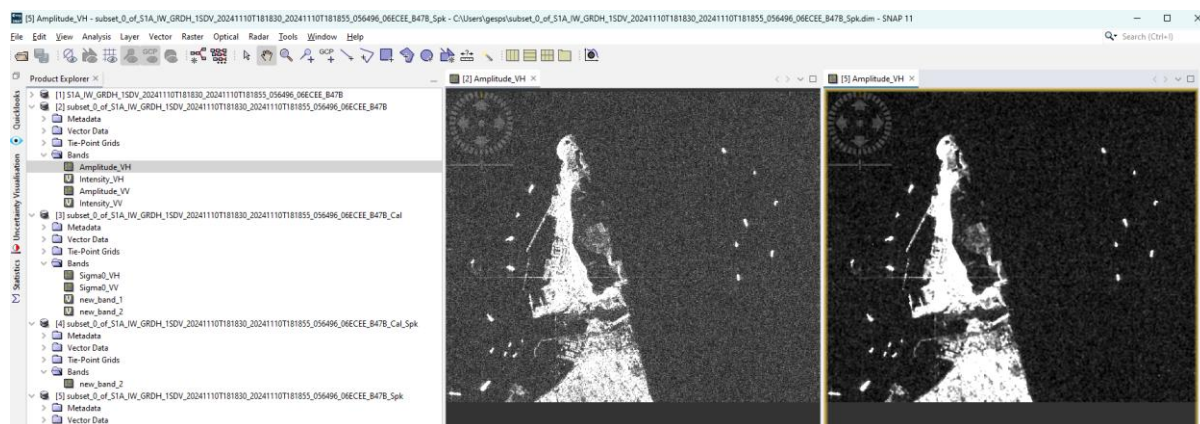


Figura 4-11 Captura SNAP tras aplicar filtrado de speckle (derecha) (Fuente: elaboración propia)

4.2.1.2.4 Corrección geométrica

Se utiliza el método *Terrain Correction* para corregir la distorsión espacial y rotación causada por el sistema de adquisición radar, asegurando la precisión geográfica de la imagen.

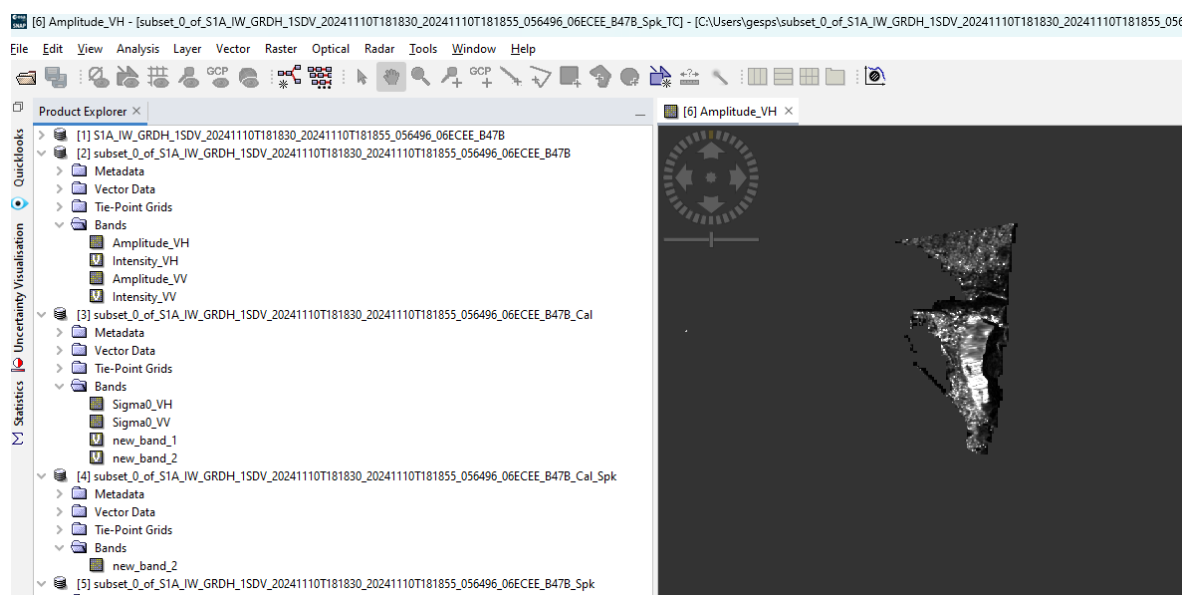


Figura 4-12 Captura SNAP tras aplicar corrección geométrica (Fuente: elaboración propia)

4.2.1.3 Procesamiento y análisis

Una vez preprocesadas, se analizan las imágenes, permitiendo extraer información cuantitativa sobre las transformaciones en las áreas de estudio.

- Generación de productos tratados: se procesan las imágenes por lotes, obteniendo productos ajustados mediante modelos de elevación digital. Estos productos incluyen máscaras y superponibles, en algunos casos, que destacan áreas como zonas inundadas o superficies ganadas al mar.

- Creación de máscaras y umbrales: Se genera una máscara para las áreas afectadas, definiendo un umbral basado en el histograma de retrodispersión.
- Cuantificación de superficies: se calcula la extensión total de las áreas afectadas en función del número de píxeles en la máscara y el tamaño de cada píxel. Este flujo de trabajo permite obtener resultados precisos para Valencia y Gibraltar mediante análisis multitemporal, mientras que, en el caso del Mar de China Meridional, la falta de datos históricos se suple con una interpretación directa. El proceso asegura resultados consistentes y ajustados a las características de cada caso de estudio.

4.2.2 Resultados en el mar de China Meridional

El presente apartado aborda el procesamiento y análisis de datos SAR en la región de Fiery Cross Reef, una de las islas artificiales más relevantes del Mar de China Meridional. Utilizando datos radar de Sentinel-1 procesados en SNAP, se evalúan las características de retrodispersión de la superficie. Dado que solo se dispone de una imagen radar, el análisis se centra en el uso de un gráfico de dispersión (Scatter Plot) que compara las polarizaciones VV y VH para extraer información sobre las propiedades físicas del terreno.

Antes de generar los gráficos, se llevó a cabo el preprocesamiento de las imágenes en SNAP, seleccionando inicialmente el subconjunto con el área de Fiery Cross Reef para orientar el análisis en la región de interés., llevando a cabo la calibración radiométrica, para normalizar los valores de retrodispersión, filtrado de speckle para reducir el ruido granular y la corrección geométrica mediante la corrección del terreno.

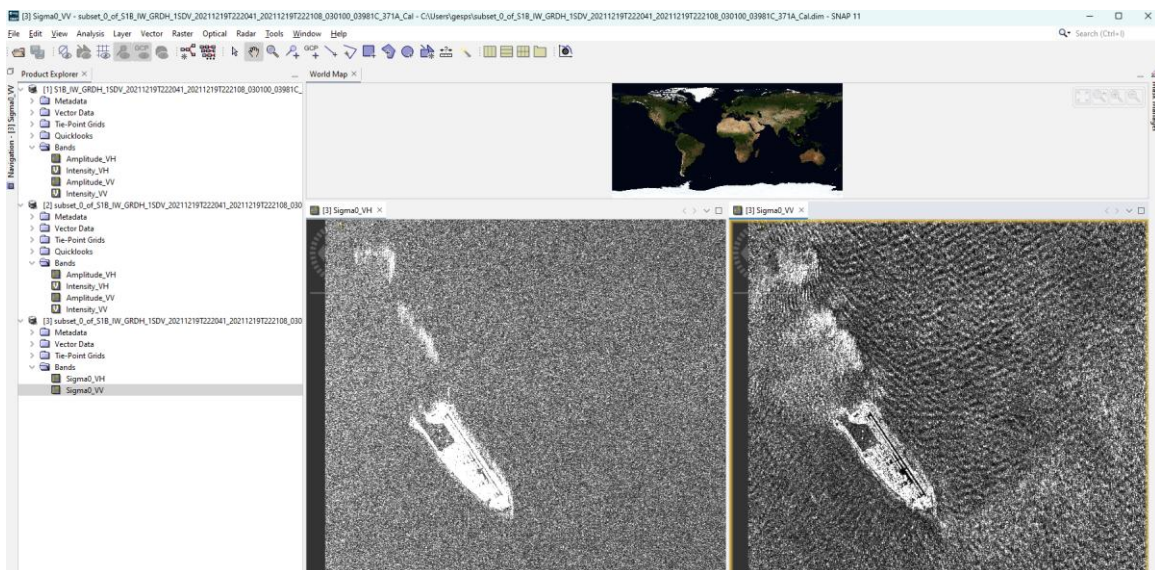


Figura 4-13 Imagen tras la calibración radiométrica (Fuente: elaboración propia)

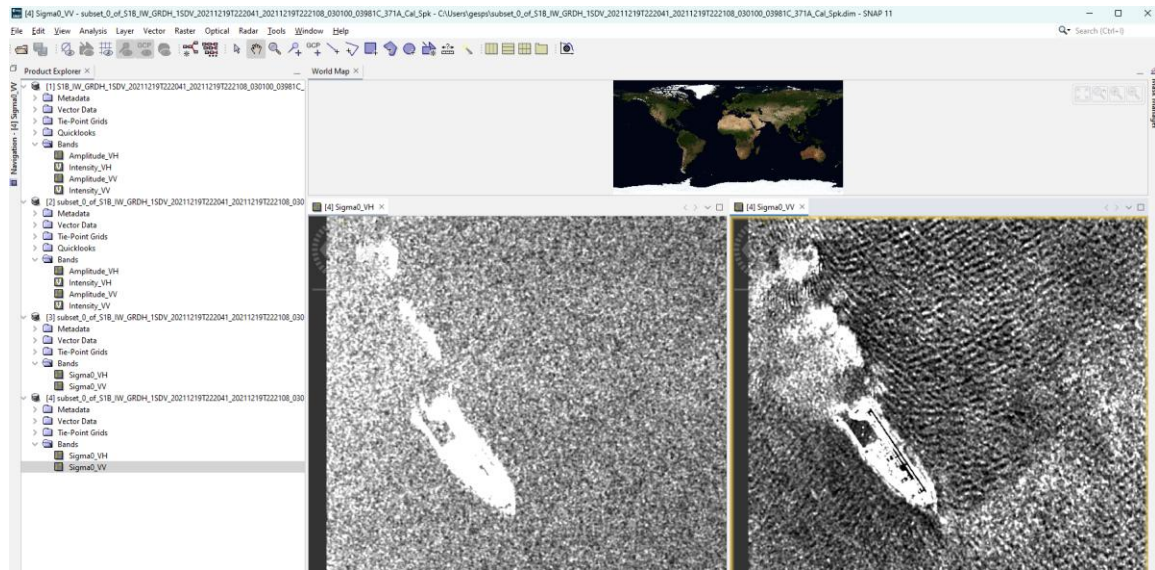


Figura 4-14 Imagen tras el filtrado de Speckle (Fuente: elaboración propia)

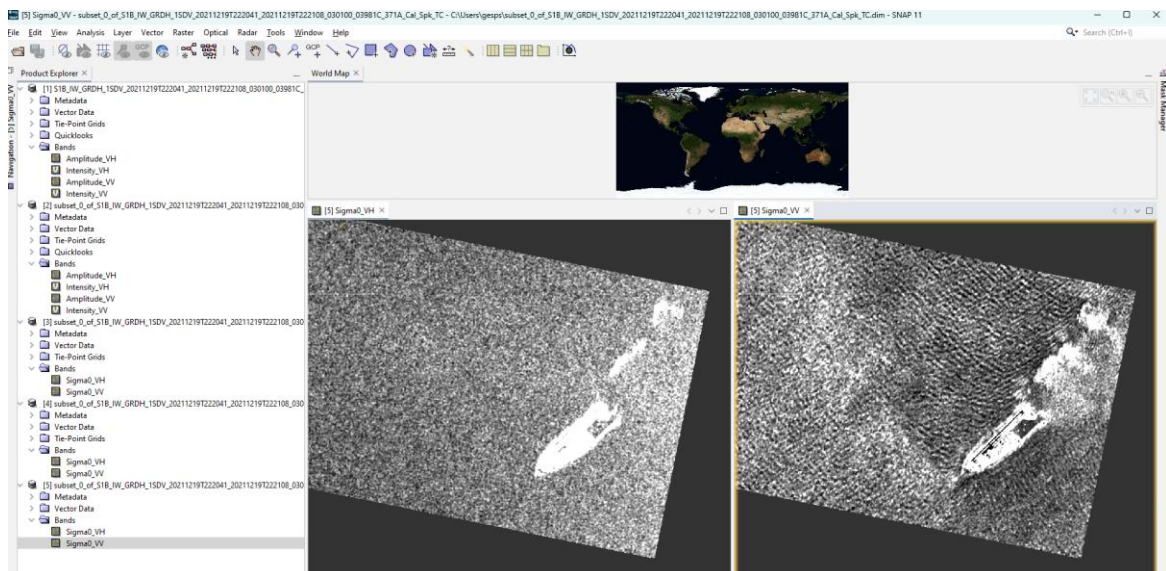


Figura 4-15 Imagen corregida geométricamente (Fuente: elaboración propia)

Debido a la existencia de una única imagen radar disponible, para este análisis, se emplea un Scatter Plot, comparando las polarizaciones VV y VH de la imagen preprocesada, permitiendo obtener información complementaria sobre las propiedades físicas del terreno.

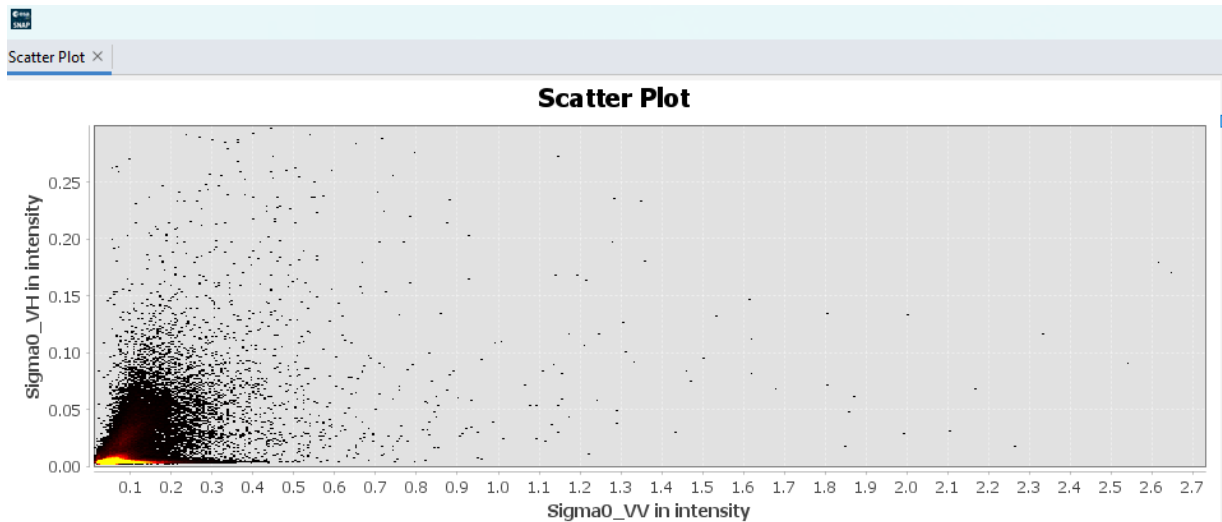


Figura 4-16 Gráfico de dispersión de intensidad de las polarizaciones VH y VV (Fuente: elaboración propia)

El gráfico de dispersión de intensidad (figura 4-16) muestra una concentración de puntos en valores bajos, característica de áreas homogéneas como agua o superficies lisas. En este caso, además, se observa que la intensidad en VV (eje horizontal) es significativamente mayor que en VH (eje vertical), lo cual es característico para superficies lisas, como el océano, debido a la reflexión especular, que tiende a conservar la polarización transmitida y recibida.

Por otra parte, los puntos dispersos en valores altos sugieren la presencia de vegetación densa, estructuras urbanas o superficies rugosas, elementos que podrían corresponder a las características físicas de Fiery Cross Reef.

La interpretación del producto final podría relacionar los valores bajos en VV y VH con agua o con superficies lisas (áreas homogéneas) y los valores más altos en ambos ejes, superficies más rugosas o heterogéneas. El único problema es que la falta de imágenes multitemporales limita el análisis, no pudiendo llevar a cabo una comparación para extraer si finalmente ha aumentado la superficie de la isla en un marco temporal definido.

4.2.3 Resultados en Gibraltar

El análisis en Gibraltar se enfoca en identificar posibles cambios en la línea de costa mediante imágenes radar de Sentinel-1. A través del análisis multitemporal, se busca cuantificar la superficie ganada al mar por las intervenciones humanas, como la construcción de diques y ampliaciones portuarias.

4.2.3.1 Selección de imágenes

Las imágenes radar se seleccionaron a través de Copernicus Browser, asegurando que ambas adquisiciones correspondieran al mismo número de órbita relativa:

- Imagen de referencia: 15 de noviembre de 2014.
- Imagen de análisis: 10 de noviembre de 2024.

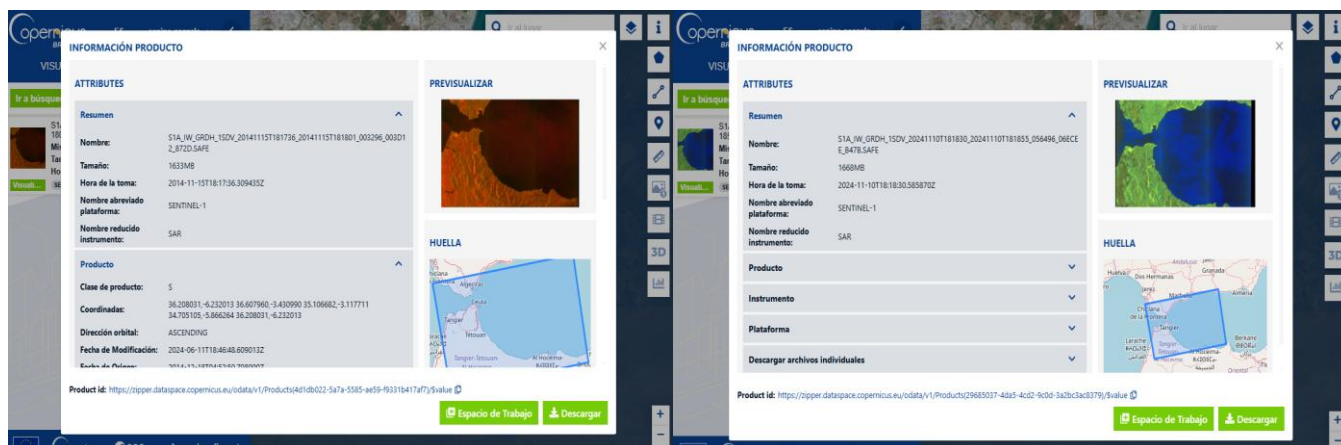


Figura 4-17 Imágenes SAR Gibraltar en Copernicus Browser (Fuente: elaboración propia)

4.2.3.2 Importación de imágenes

Las imágenes seleccionadas se importan al software SNAP, previamente a su posterior procesado.

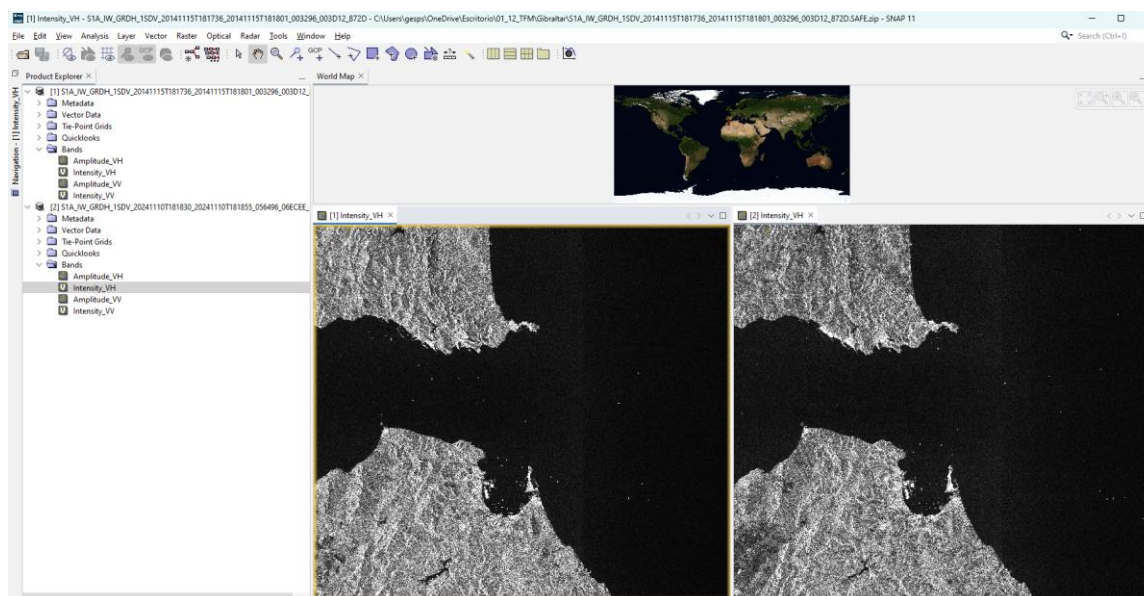


Figura 4-18 Importación de imágenes SAR en SNAP (Fuente: elaboración propia)

4.2.3.3 Preprocesamiento de datos

Una vez llevada a cabo la importación de imágenes, se realiza su preprocesamiento para asegurar su calidad y precisión antes del análisis.

Para garantizar la calidad y precisión de las imágenes antes del análisis, se realizaron los siguientes pasos: creación de subconjuntos, calibración radiométrica, filtrado de speckle y corrección geométrica.

4.2.3.3.1 Creación de subconjuntos

Creación de subconjuntos para delimitar la zona de Gibraltar.

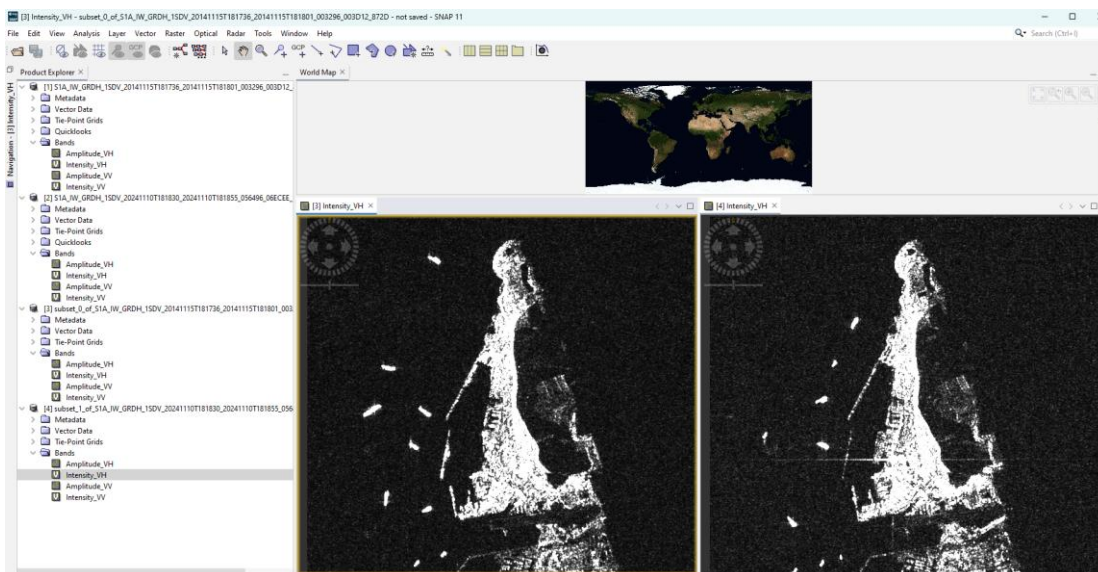


Figura 4-19 Detalle subconjuntos generados de las imágenes importadas en SNAP (Fuente: elaboración propia)

4.2.3.3.2 Calibración radiométrica

Este paso cuantifica la retrodispersión de los píxeles, normalizando los valores para que representen con precisión las propiedades de la superficie terrestre.

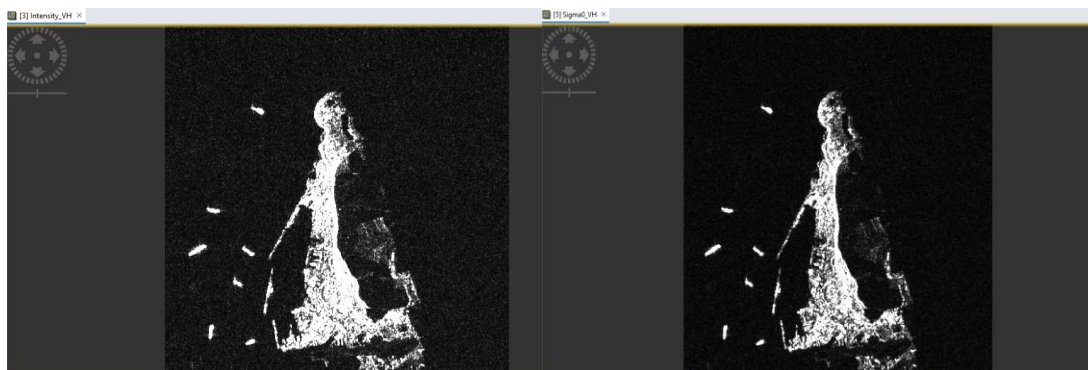


Figura 4-20 Detalle imagen sin calibración (izquierda) y con calibración (derecha) (Fuente: elaboración propia)

4.2.3.3.3 Filtrado de Speckle

Se aplica un filtro Lee para reducir el ruido granular, lo que mejora la claridad de las áreas homogéneas, como las zonas inundadas o transformadas.

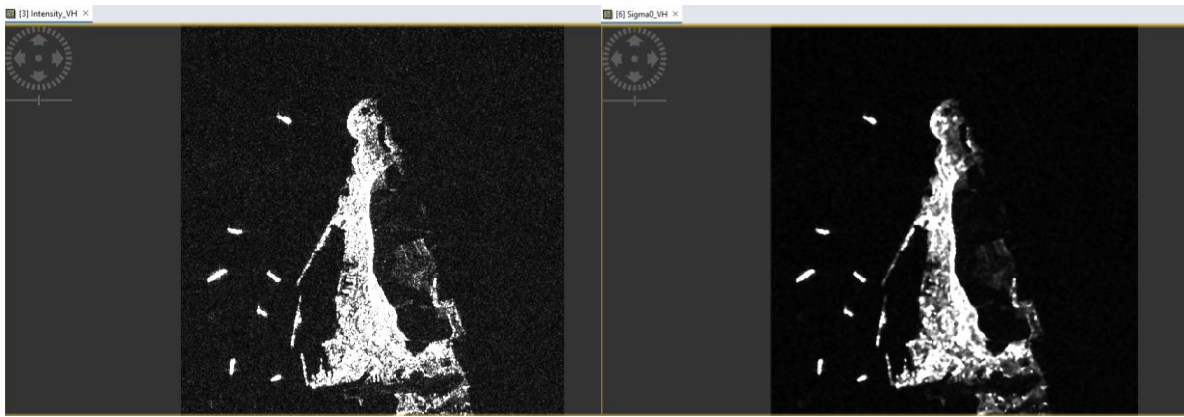


Figura 4-21 Detalle imagen sin filtro (izquierda) y con filtro de Lee (derecha) (Fuente: elaboración propia)

4.2.3.3.4 Corrección geométrica

Se utiliza el método Terrain Correction para corregir la distorsión espacial y rotación causada por el sistema de adquisición radar, asegurando la precisión geográfica de la imagen.

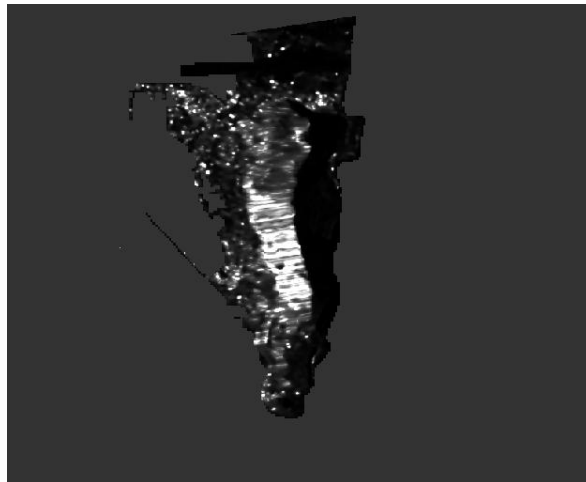


Figura 4-22 Imagen Gibraltar una vez aplicada la corrección geométrica (Fuente: elaboración propia)

4.2.3.4 Análisis Multitemporal y Detección de Inundaciones

El análisis multitemporal realizado sobre las imágenes SAR de Sentinel-1 de las fechas 15 de noviembre de 2014 y 10 de noviembre de 2024 revela cambios significativos en las características de retrodispersión de la región estudiada en Gibraltar.

En 2014 la mayoría de píxeles muestran valores bajos de retrodispersión, entre -26 y -18 dB, indicando una predominante presencia de superficies lisas (agua o áreas poco edificadas).

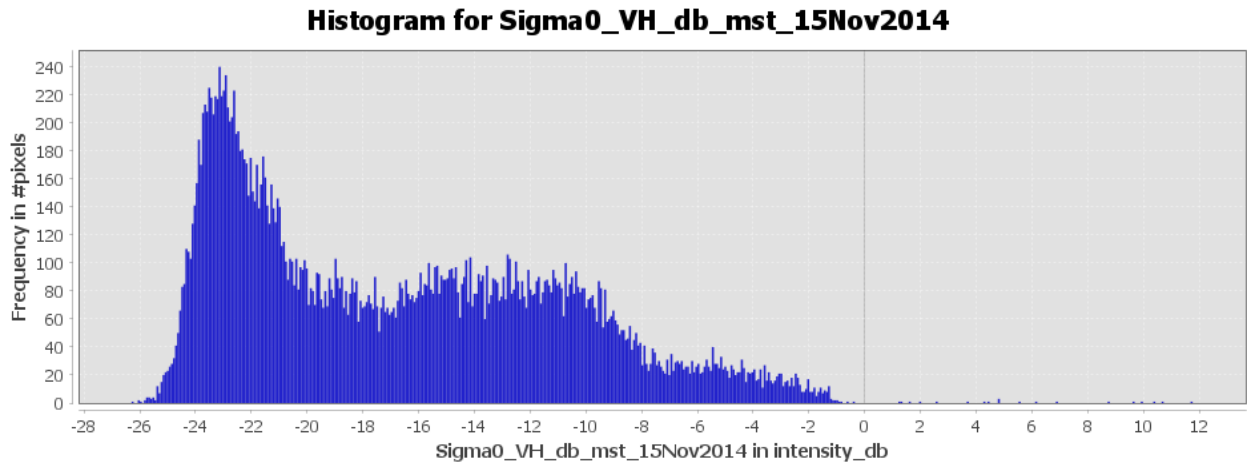


Figura 4-23 Histograma para la imagen de 2014 (Fuente: elaboración propia)

Sin embargo, en 2024, aunque la gráfica muestra similares valores entre -26 y -18 dB, sí muestra un segundo pico en el rango de -12 y -8 dB, lo que podría indicar una mayor presencia de superficies edificadas.

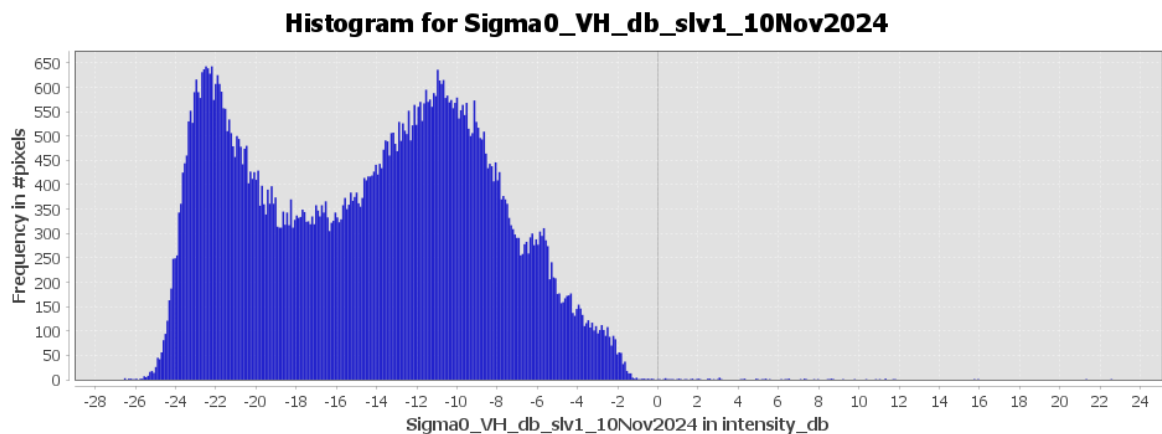


Figura 4-24 Histograma para la imagen de 2024 (Fuente: elaboración propia)

4.2.3.5 Mapa Temático y Conclusión

El mapa final muestra un superponible entre una imagen satelital actual y la imagen procesada SAR. En ella se puede apreciar que, aunque el análisis sí concluye que ha habido significativos cambios, con una mayor presencia de superficies edificadas, la línea de costa se mantiene prácticamente intacta, con lo que se podría concluir que las actividades humanas han impactado principalmente el interior del territorio sin implicar una invasión hacia el mar.



Figura 4-25 Máscara generada en archivo kmz sobre google earth (Fuente: elaboración propia)

4.2.4 Resultados en Horta Sud, Valencia

El análisis de las imágenes SAR de Sentinel-1 se centra en identificar y cuantificar las áreas afectadas por la DANA en la comarca de Horta Sud. Utilizando datos adquiridos antes y después del evento, se procesaron las imágenes en SNAP para obtener resultados precisos sobre la extensión de las zonas inundadas.

Cabe señalar que se consulta la web del Servicio de Gestión de emergencias del programa Copernicus para identificar la zona afectada, así como para extraer los datos analizados por copernicus para realizar la comparación final con el análisis llevado a cabo.

4.2.4.1 Selección de imágenes

Las imágenes radar se seleccionaron a través de Copernicus Browser, asegurando que ambas adquisiciones correspondieran al mismo número de órbita relativa:

- Imagen de referencia: 6 de noviembre de 2023, antes del evento.
- Imagen de análisis: 31 de octubre de 2024, tras la DANA.

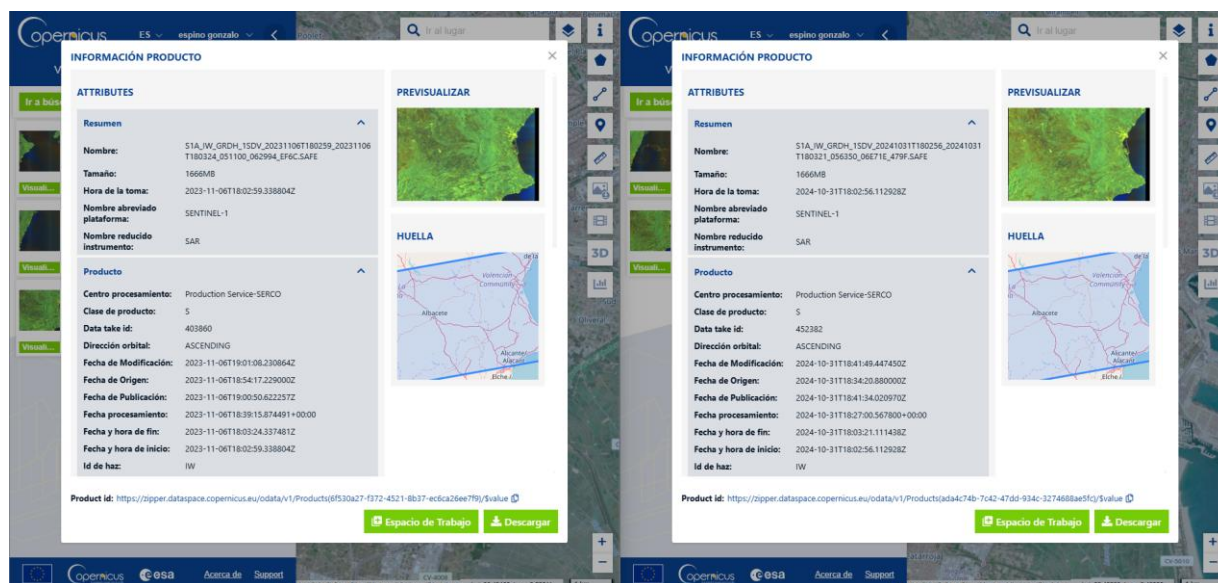


Figura 4-26 Imágenes SAR Horta Sud en Copernicus Browser (Fuente: elaboración propia)

4.2.4.2 Importación de imágenes

Las imágenes seleccionadas se importan al software SNAP, donde se organizan en proyectos individuales para cada área de estudio.

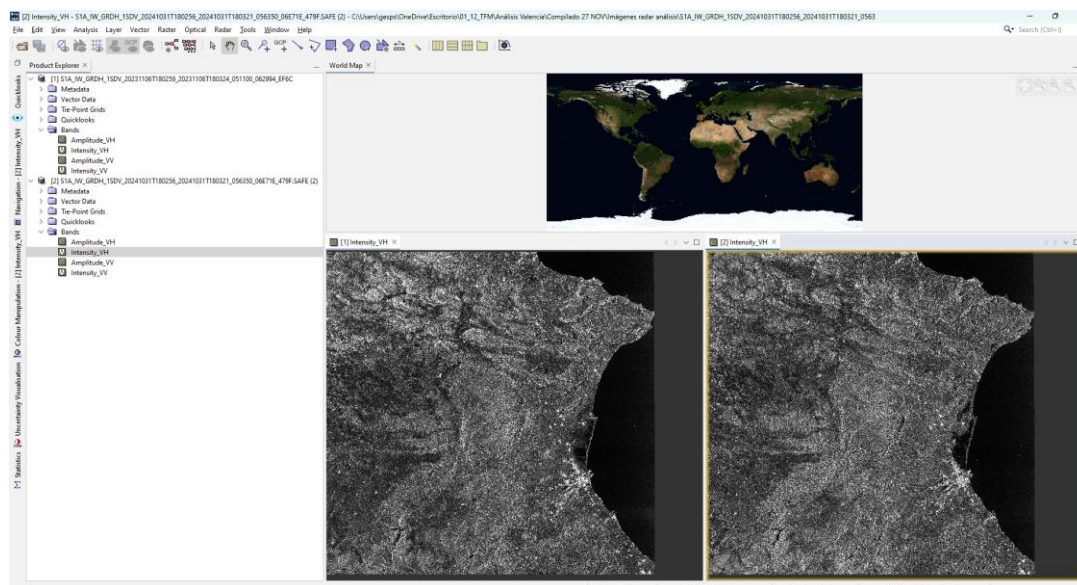


Figura 4-27 Importación imágenes SAR en SNAP (Fuente: elaboración propia)

4.2.4.3 Preprocesamiento de datos

Una vez llevada a cabo la importación de imágenes, se realiza su preprocesamiento para asegurar su calidad y precisión antes del análisis.

4.2.4.3.1 Creación de subconjuntos

Creación de subconjuntos para delimitar la zona de estudio en Horta Sud. Una vez creados los subconjuntos, se realiza el procesamiento por lotes para realizar el análisis multitemporal y aplicar las correcciones a una única imagen compilada.

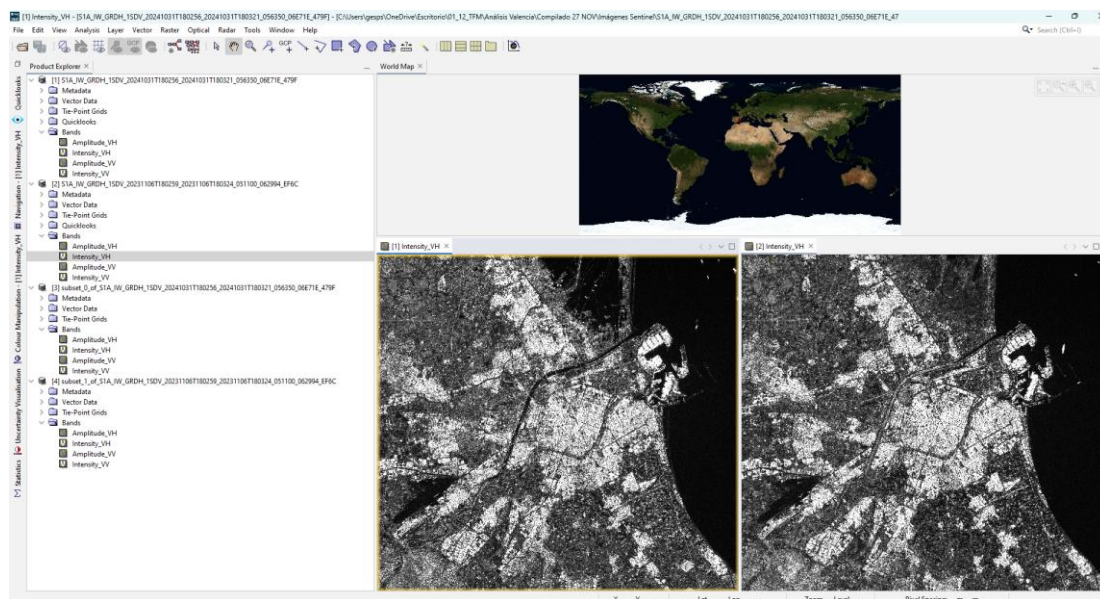


Figura 4-28 Detalle subconjuntos generados de las imágenes importadas en SNAP (Fuente: elaboración propia)

4.2.4.3.2 Calibración radiométrica

Este paso cuantifica la retrodispersión de los píxeles, normalizando los valores para que representen con precisión las propiedades de la superficie terrestre.

4.2.4.3.3 Filtrado de Speckle

Se aplica un filtro Lee para reducir el ruido granular, lo que mejora la claridad de las áreas homogéneas, como las zonas inundadas o transformadas.

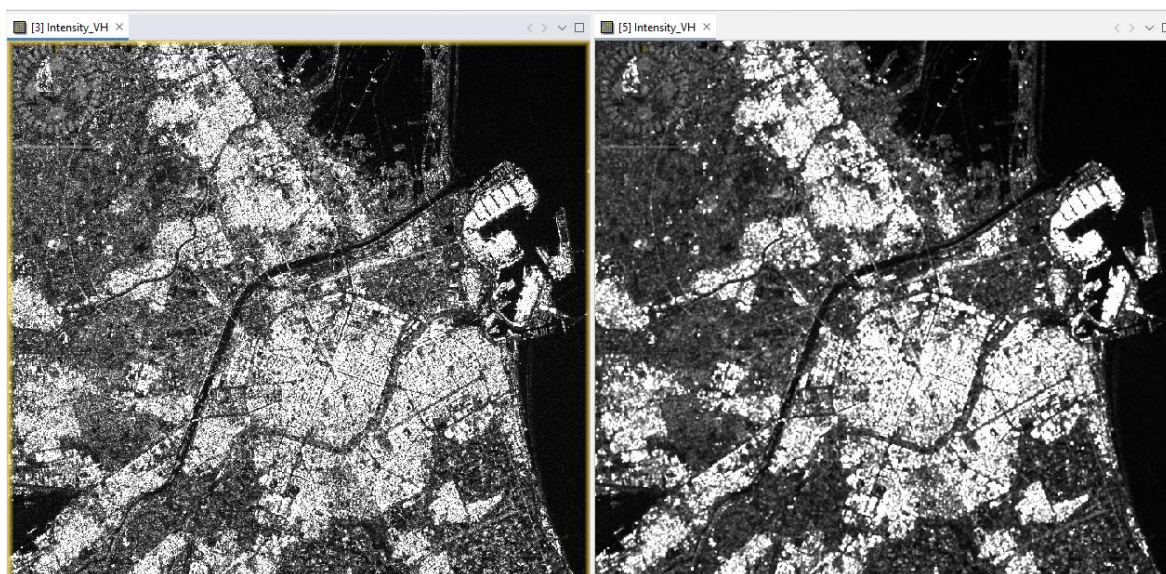


Figura 4-29 Detalle imagen sin filtro (izquierda) y con filtro de Lee (derecha) (Fuente: elaboración propia)

4.2.4.3.4 Corrección geométrica

Se utiliza el método *Terrain Correction* para corregir la distorsión espacial y rotación causada por el sistema de adquisición radar, asegurando la precisión geográfica de la imagen.

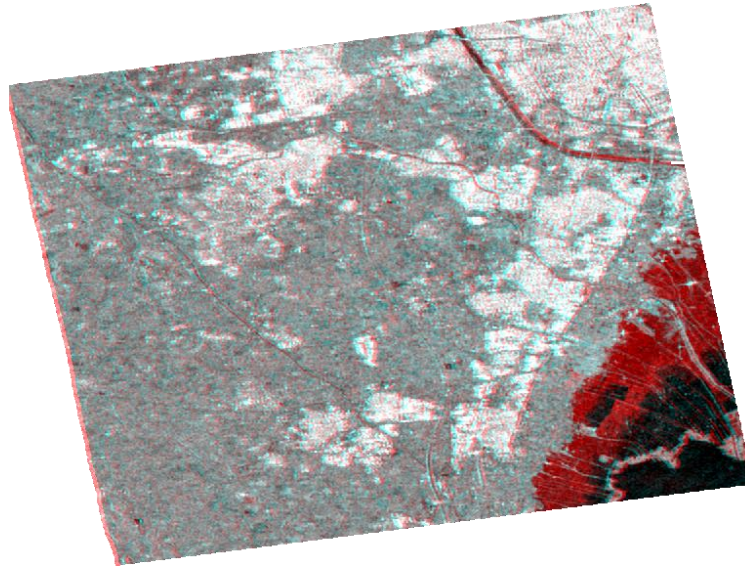


Figura 4-30 Imagen Horta Sud una vez aplicada la corrección geométrica (Fuente: elaboración propia)

4.2.4.4 Análisis Multitemporal y Detección de Inundaciones

Se generaron diferencias de retrodispersión entre las imágenes de 2023 y 2024, aplicando un valor umbral basado en el histograma de retrodispersión. A continuación mostramos los histogramas para realizar una comparación entre imágenes, en los que se aprecia una diferencia significativa en valores cercanos a -20 dB, lo que se asociaría principalmente con superficies lisas como cuerpos de agua. A partir de este umbral, fue posible segmentar las zonas inundadas y representarlas en una máscara binaria:

- **Píxeles con valores inferiores a -16 dB:** Correspondientes a zonas de agua.
- **Píxeles con valores superiores:** Representan tierra firme.

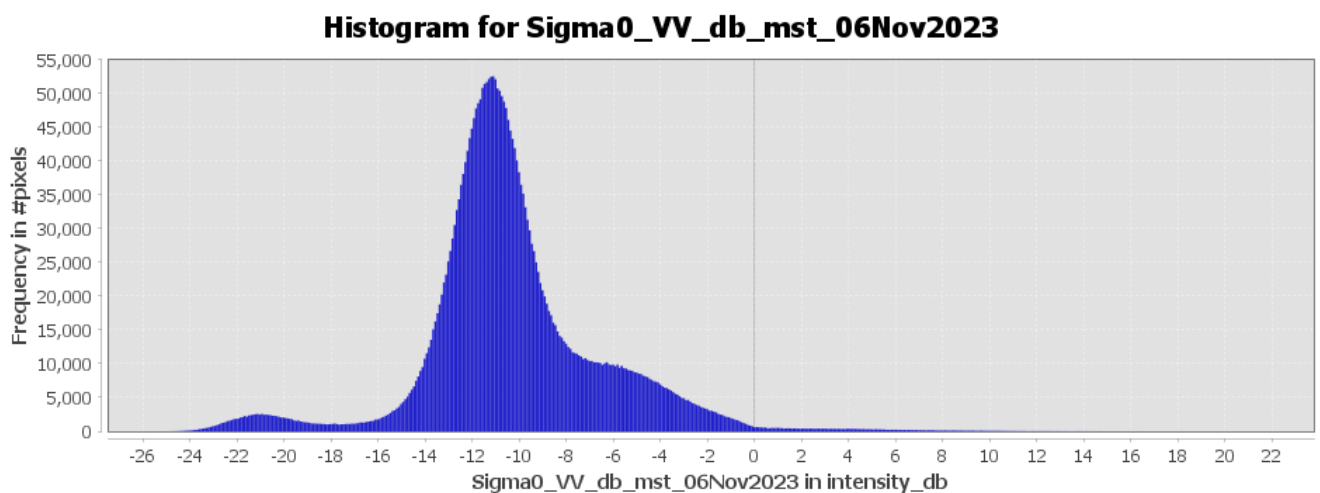


Figura 4-31 Histograma para la imagen de 2023 (Fuente: elaboración propia)

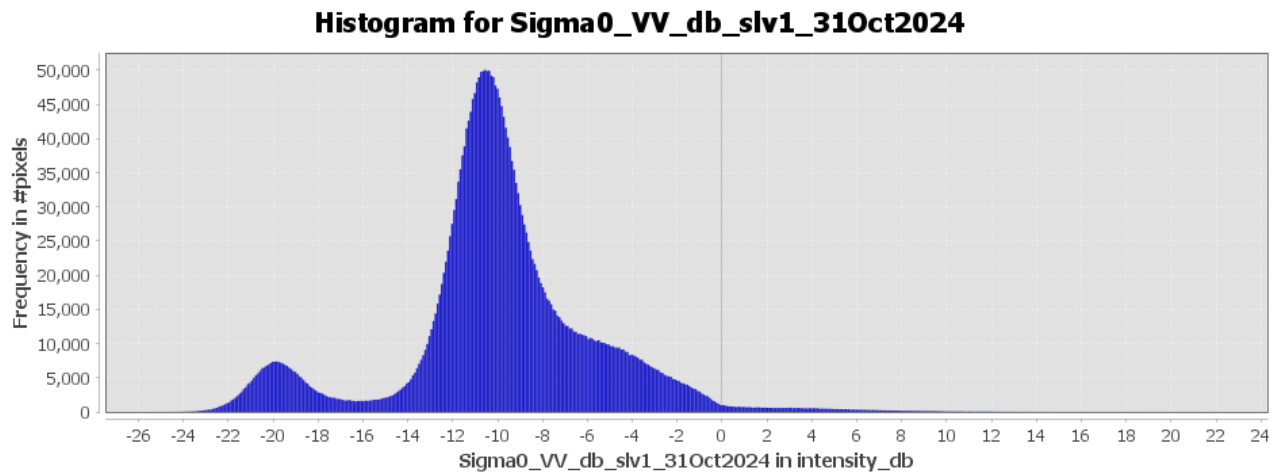


Figura 4-32 Histograma para la imagen de 2024 (Fuente: elaboración propia)

4.2.4.5 Cuantificación de superficies

La extensión total de las áreas inundadas se calculó utilizando la máscara generada, que compara las diferencias existentes entre las imágenes de 2023 y 2024 y a través de la cual se pudo extraer el número total de píxeles diferentes (figura 4-34). A partir de los metadatos extraídos (figura 4-35), se pudo calcular el área individual de cada píxel, de 100 metros cuadrados, obteniendo finalmente la superficie total inundada.

Al comparar los datos obtenidos con los datos oficiales extraídos de Copernicus Emergency Service, se comprueba la coherencia entre ambos resultados, con un error aproximado del 11%.

- **Número de píxeles:** 268.029, con una dimensión de 10 x10 metros cada uno.
- **Superficie total:** 2.680,29 hectáreas, calculadas mediante la multiplicación del número de píxeles por su área individual.
- **Comparación con Copernicus Emergency Service:** La superficie obtenida es consistente con los datos oficiales, que estimaron un área afectada de 2.407,4 hectáreas.

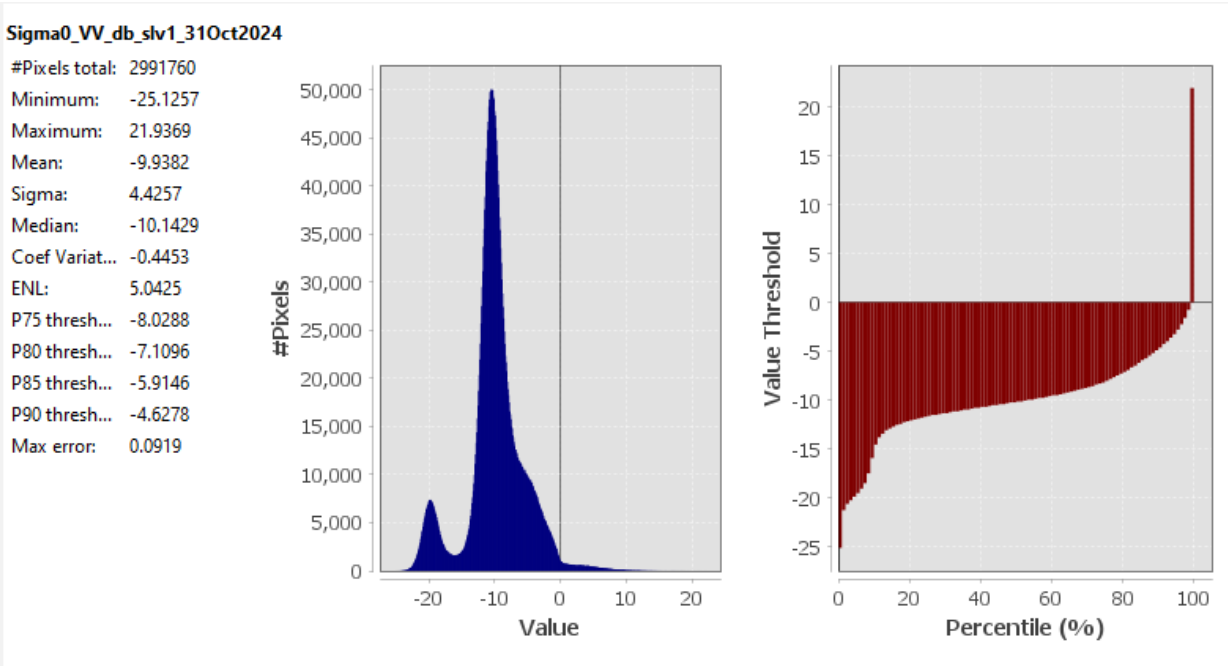


Figura 4-33 Análisis estadístico para la imagen de 2024 (Fuente: elaboración propia)

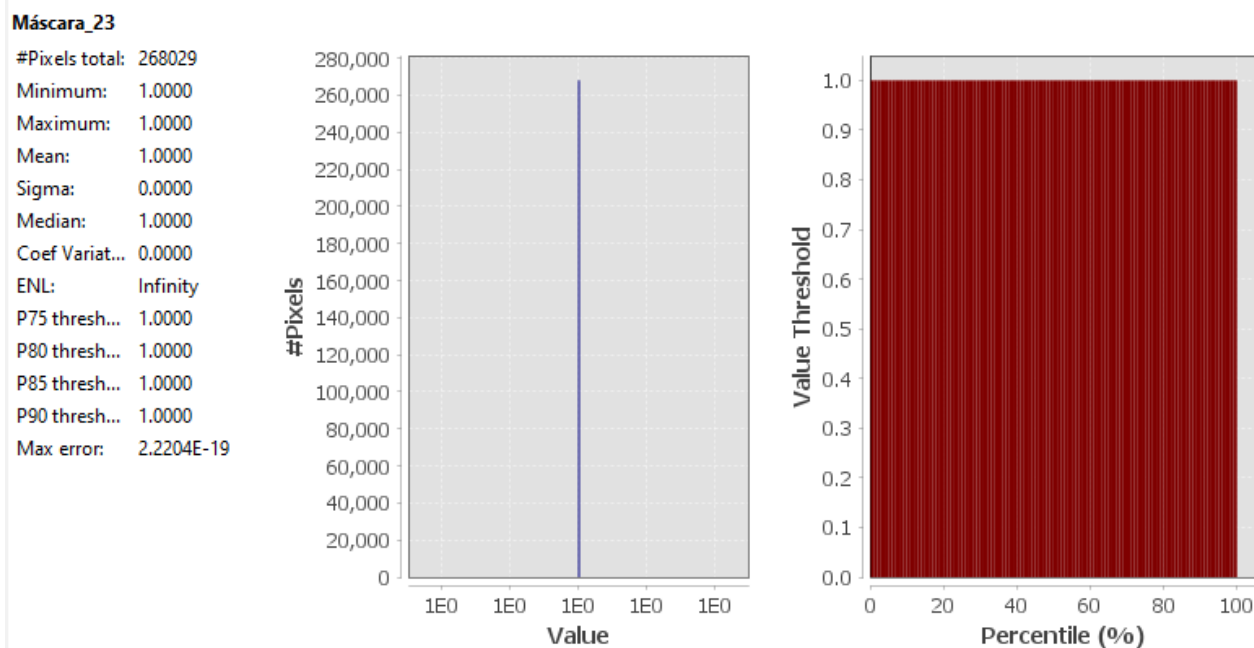


Figura 4-34 Análisis estadístico para la máscara seleccionada (Fuente: elaboración propia)

Name	Value	Type	Unit	Description
first_near_long	-0.5485008293375366	float64	deg	
first_far_lat	39.47960793450089	float64	deg	
first_far_long	-0.34224764010369446	float64	deg	
last_near_lat	39.32437905340504	float64	deg	
last_near_long	-0.5485008293375366	float64	deg	
last_far_lat	39.32437905340504	float64	deg	
last_far_long	-0.34224764010369446	float64	deg	
PASS	ASCENDING	ascii		ASCENDING or DESCENDING
SAMPLE_TYPE	DETECTED	ascii		DETECTED or COMPLEX
mds1_tx_rx_polar	VH	ascii		Polarization
mds2_tx_rx_polar	VV	ascii		Polarization
mds3_tx_rx_polar	-	ascii		Polarization
mds4_tx_rx_polar	-	ascii		Polarization
polar_data	0	uint8	flag	Polarimetric Matrix
algorithm	-	ascii		Processing algorithm
azimuth_looks	1.0	float64		
range_looks	5.0	float64		
range_spacing	10.0	float64	m	Range sample spacing
azimuth_spacing	10.0	float64	m	Azimuth sample spacing
range_window_type	Hamming	ascii		Range window type
range_window_coefficient	0.7	float64		Range window coefficient
pulse_repetition_frequency	1717.128973878037	float64	Hz	PRF
radar_frequency	5405.000454334349	float64	MHz	Radar frequency
line_time_interval	0.001499081152583706	float64	s	
total size	25	uint32	MB	Total product size

Figura 4-35 Detalle tamaño píxeles extraídos de los metadatos de la máscara seleccionada (Fuente: elaboración propia)

4.2.4.6 Mapa Temático y Conclusión

El mapa final muestra las zonas afectadas por las inundaciones, destacando las áreas más críticas en Horta Sud. Este análisis confirma la utilidad de Sentinel-1 para la evaluación de desastres,

proporcionando una estimación rápida y precisa de los daños, aunque la precisión depende del umbral y del nivel de ruido residual.



Figura 4-36 Máscara generada en archivo kmz sobre google earth (Fuente: elaboración propia)

4.3 Validación mediante comparación con imágenes ópticas de otros satélites

4.3.1 Mar de China Meridional

La validación del análisis radar en la región de Fiery Cross Reef se realiza comparando con una imagen de Sentinel-2, empleando el índice NDVI (Índice de Vegetación Normalizado). Este enfoque permite evaluar la correspondencia entre las zonas detectadas como homogéneas o con retrodispersión elevada en el análisis radar y las áreas destacadas en el análisis óptico.

4.3.1.1 Selección de imágenes ópticas

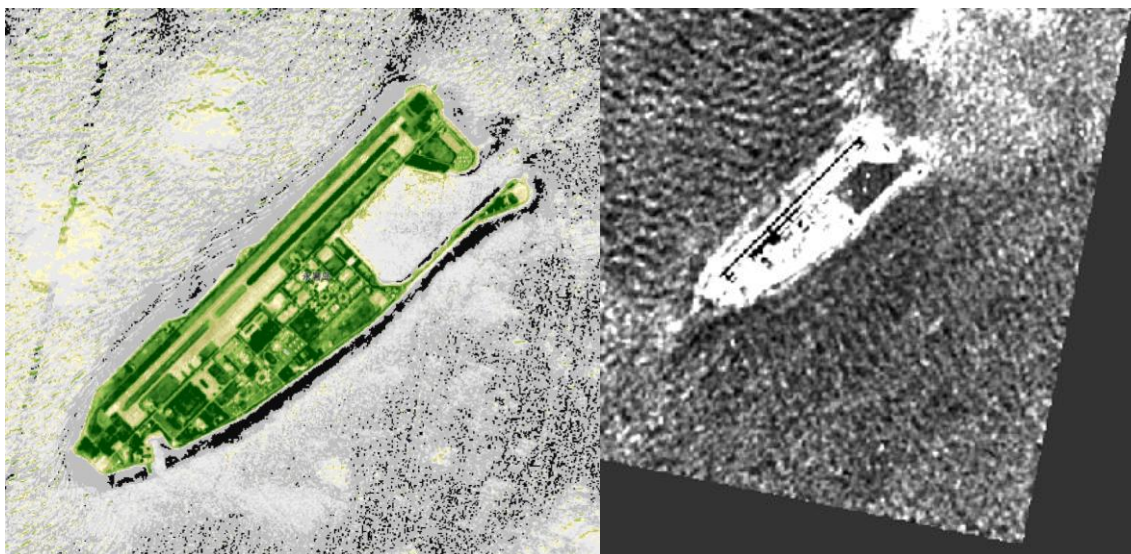


Figura 4-37 Comparativa entre imagen óptica (izquierda) y radar (derecha) (Fuente: elaboración propia)

4.3.1.2 Correspondencia de áreas y validación visual

El análisis comparativo entre los resultados SAR y el índice NDVI obtenido a partir de imágenes ópticas de Sentinel-2 revela una correspondencia importante. Las áreas identificadas en las imágenes radar como de retrodispersión elevada, que representan estructuras artificiales o vegetación densa, coinciden en gran medida con las zonas resaltadas en el índice NDVI como vegetación activa o edificaciones. Esta correspondencia valida parcialmente los resultados obtenidos mediante análisis radar.

4.3.2 Gibraltar

En el caso de Gibraltar, la validación del análisis radar se lleva a cabo mediante la comparación con imágenes ópticas de Sentinel-2, utilizando tanto el índice NDWI para evaluar cuerpos de agua como imágenes en color verdadero (RGB) para observar áreas urbanizadas y cambios en la línea de costa.

4.3.2.1 Selección de imágenes ópticas

Se seleccionan imágenes de Sentinel-2 capturadas el 31 de julio de 2024, ya que, para el 10 de noviembre de 2024, las condiciones meteorológicas impiden su visualización. Las imágenes preprocesadas en EO Browser, incluidas las visualizaciones NDWI y RGB, se emplean para identificar áreas de interés y facilitar la comparación directa con los resultados del radar.

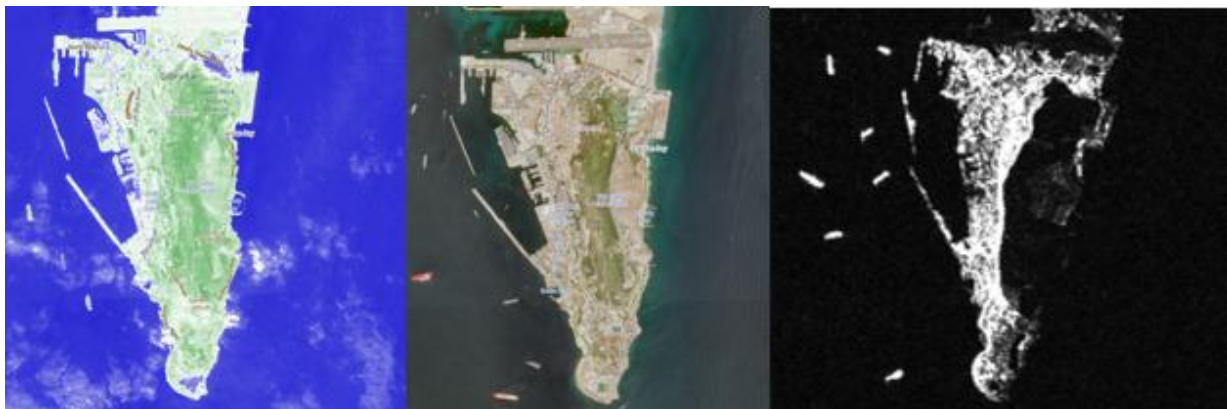


Figura 4-38 Comparativa entre imagen NDVI (izquierda), RGB (centro) y radar (derecha) (Fuente: elaboración propia)

4.3.2.2 Correspondencia de áreas y validación visual

La comparación entre las imágenes ópticas y el análisis radar muestra una correspondencia general entre las áreas urbanizadas detectadas en ambos productos. El índice NDWI respalda la detección de cuerpos de agua en la región y tampoco aportan discrepancias con los resultados SAR. La imagen en RGB permite verificar que la línea de costa se ha mantenido estable, en concordancia con los resultados obtenidos mediante el análisis SAR.

4.3.3 Horta Sud, Valencia

La validación del análisis radar en la comarca de Horta Sud se realiza mediante la comparación con una imagen óptica de Sentinel-2, específicamente con el índice NDWI (Índice de Agua Normalizado) generado y descargado directamente desde EO Browser. Este enfoque permite verificar

si las áreas detectadas como inundadas en el análisis radar coinciden con las zonas destacadas como agua en el índice NDWI, respaldando así los resultados obtenidos.

4.3.3.1 Selección de imágenes ópticas

Se selecciona una imagen de Sentinel-2 capturada el 31 de octubre de 2024, cercana al evento de la DANA. En EO Browser, se utiliza la visualización preprocesada del índice NDWI para destacar las zonas cubiertas por agua, obteniendo un producto listo para la validación. Esta imagen representa las condiciones posteriores a la DANA y es adecuada para comparar con los resultados radar.

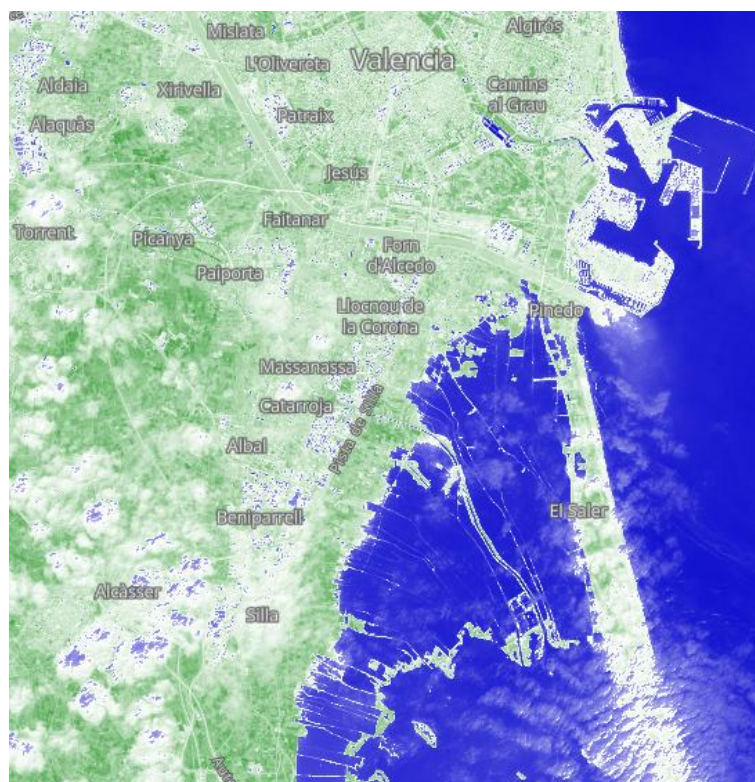


Figura 4-39 Imagen NDWI obtenida de EO Browser (Fuente: elaboración propia)

4.3.3.2 Correspondencia de áreas y validación visual

Las zonas destacadas como agua en la imagen NDWI coinciden en gran medida con las áreas detectadas como inundadas en el análisis radar de Sentinel-1.

Algunas diferencias menores pueden observarse en áreas donde la nubosidad o las sombras afectan la imagen óptica o posibles zonas de retrodispersión baja en el radar no relacionadas con agua (ruido o estructuras artificiales).

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El desarrollo de esta memoria ha permitido demostrar la utilidad de los sistemas SAR, particularmente del satélite Sentinel-1, dentro del programa Copernicus, en la monitorización de la superficie terrestre. Los resultados obtenidos destacan la versatilidad de los SAR, demostrando el valor de estos sistemas en diferentes contextos: geopolíticos, ambientales y de gestión de emergencias. A continuación, se presentan las conclusiones organizadas en torno a los objetivos planteados para este trabajo:

1. Describir las capacidades y aplicaciones del programa Copernicus y Sentinel-1: el análisis realizado confirma la versatilidad de los sistemas SAR en diversas aplicaciones. Las imágenes de Sentinel-1, con su capacidad para operar bajo cualquier condición meteorológica y lumínica, han resultado concluyente en la evaluación de desastres naturales, la identificación de estructuras artificiales y la monitorización de cambios en la superficie terrestre. Además, su integración en el programa Copernicus ha demostrado ser una herramienta clave para proporcionar acceso abierto a datos que benefician a sectores como la gestión de emergencias, la investigación científica y la planificación ambiental.
2. Aplicar técnicas avanzadas de procesamiento mediante SNAP: las técnicas aplicadas, como la calibración radiométrica, el filtrado de speckle y la corrección geométrica, han permitido obtener productos consistentes y de alta calidad para el análisis multitemporal y polarimétrico. Esto ha sido especialmente útil para extraer información válida sobre áreas inundadas, cambios en la línea de costa y estructuras urbanas.
3. Validar resultados SAR con imágenes ópticas de Sentinel-2: la comparación entre los análisis radar y los índices ópticos (NDWI, NDVI o RGB) ha evidenciado una alta correspondencia en la identificación de áreas de interés, como zonas inundadas o superficies edificadas. Esta validación ha resaltado el valor complementario de los sensores ópticos y radar para proporcionar una visión integral de los fenómenos analizados.
4. Demostrar la aplicabilidad de Sentinel-1 en escenarios diversos:
 - Mar de China Meridional: aunque limitado por la disponibilidad de una sola imagen radar, el análisis ha permitido identificar estructuras artificiales y vegetación, validando el potencial de Sentinel-1 para estudios en este tipo de escenario geopolítico.
 - Gibraltar: el análisis multitemporal ha revelado un incremento en superficies edificadas, confirmando el impacto humano en el interior del territorio sin cambios significativos

en la línea de costa. Este análisis muestra el valor de los sistemas SAR en la evaluación de intervenciones humanas en áreas específicas.

- Horta Sud, Valencia: se logró cuantificar con precisión las áreas afectadas por la DANA, corroborando los resultados mediante el índice NDWI, destacando la capacidad de Sentinel-1 para la gestión de emergencias y la evaluación de desastres naturales.

Aunque los resultados han sido positivos, se identificaron algunas limitaciones, como la dependencia de imágenes históricas en escenarios como el Mar de China Meridional, las diferencias en resolución espacial y temporal entre los sensores ópticos y radar o dependencia de parámetros de retrodispersión que podrían introducir pequeñas variaciones en el resultado final del análisis.

5.2 Líneas Futuras

La teledetección satelital continúa evolucionando hacia tecnologías más avanzadas, sostenibles y accesibles. El reciente lanzamiento de Sentinel-1C o el desarrollo del programa NISAR, por ejemplo, representan oportunidades únicas para ampliar y fortalecer las aplicaciones de estas tecnologías. A continuación, se plantean las principales líneas futuras:

1. Ampliación y mejora de la capacidad satelital: el reciente lanzamiento del Sentinel-1C refuerza la continuidad operativa del programa Copernicus y garantiza una mayor fiabilidad y precisión en la observación de la Tierra. Este satélite incorpora tecnología avanzada en sus sensores, como el sistema de identificación automática, un gran avance en seguridad marítima al proporcionar una monitorización constante del tráfico de buques y mercantes en zonas críticas [46]. Paralelamente, la misión NISAR, una colaboración entre la NASA y la Agencia Espacial de la India (ISRO), cuyo lanzamiento está previsto para febrero de 2026 [15], integrará sensores SAR en bandas L y S, mejorando notablemente la resolución espacial y temporal para aplicaciones críticas, como la agricultura de precisión, la monitorización de recursos hídricos y el seguimiento de glaciares [47].

2. Adopción de tecnologías emergentes y metodologías avanzadas: las tendencias en teledetección satelital apuntan hacia una mayor integración de datos procedentes de distintas plataformas, como sensores ópticos y radar. Esta combinación mejora significativamente la capacidad de analizar fenómenos complejos y contribuye al desarrollo de aplicaciones más precisas y adaptadas a las necesidades actuales en la monitorización del cambio climático, deforestación o gestión de catástrofes naturales [48]. Además, la integración de métodos de aprendizaje automático a través del empleo de tecnología de algoritmos de inteligencia artificial (IA), están revolucionando el análisis de los datos obtenidos por las plataformas satelitales, permitiendo una automatización más eficiente en tareas como la clasificación de superficies terrestres y acuáticas, la detección de cambios o la generación de modelos predictivos. Estas metodologías permiten anticipar con mayor precisión fenómenos como inundaciones, sequías y cambios en la cobertura vegetal, mejorando significativamente la respuesta a estos eventos [49].

3. Optimización y mejora de las aplicaciones actuales: la incorporación de sensores más modernos y la utilización de bandas superiores del espectro electromagnético vislumbran un futuro prometedor en la obtención de imágenes de mayor calidad y detalle. Los programas como Copernicus o NISAR garantizan imágenes con resoluciones espaciales inferiores a 5 metros y con resoluciones temporales que permitirán visitar zonas de interés en plazos significativamente menores que los actuales. Esto facilitará aplicaciones como la monitorización en tiempo casi real de fenómenos dinámicos, la evaluación de impactos ambientales y el apoyo a políticas de conservación y gestión sostenible [13].

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ESA (European Space Agency), «Eduspace - Teledetección y Observación de la Tierra,» [En línea]. Available: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_0.html. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [2] EOS Data Analytics, «Teledetección: qué es, tipos y aplicaciones,» [En línea]. Available: <https://eos.com/es/blog/teledeteccion>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [3] Canada Centre for Remote Sensing, «Fundamentals of Remote Sensing,» Natural Resources Canada.
- [4] P. P.-I. M. Y. G. K. I. H. a. K. P. P. A. Moreira, *A tutorial on synthetic aperture radar*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013.
- [5] ESA (European Space Agency), «ESA Multimedia - Images,» [En línea]. Available: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/.
- [6] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «Fundamentos de teledetección aplicada,» 2018.
- [7] Tiempo.com, «Primera imagen del TIROS-1," Revista del Aficionado a la Meteorología (RAM),» 12 abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.tiempo.com/ram/32594/primera-imagen-del-tiros-1>. [Último acceso: 15 01 2025].
- [8] NASA, «"Seasat-1," Earth Observing System Project Science Office (EOSPSO),» [En línea]. Available: <https://eospsa.nasa.gov/missions/seasat-1>.
- [9] ESA, «ERS Mission Description,» Earth Online - ESA EO Gateway, [En línea]. Available: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers/description>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [10] NASA, «RADARSAT-1 Mission,» NASA Science, [En línea]. Available: <https://science.nasa.gov/mission/radarsat-1/>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [11] ESA, «Envisat Mission Description,» Earth Online - ESA EO Gateway, [En línea]. Available: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/envisat/description>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [12] NASA/JPL, «Izmit, Turkey 1999 Earthquake Interferogram,» NASA Jet Propulsion Laboratory, [En línea]. Available: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia00557-izmit-turkey-1999->

earthquake-interferogram/. [Último acceso: 15 enero 2025].

- [13] E. Podest, «An Introduction to SAR and Its Applications, NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET),» 2024. [En línea]. Available: <https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/spanish/arset-introduccion-al-radar-de-apertura-sintetica-sar-y-sus>.
- [14] Copernicus, «Sentinel-1 Overview,» [En línea]. Available: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-1>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [15] Hisdesat, «Satélite PAZ,» [En línea]. Available: <https://www.hisdesat.es/paz>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [16] M. Younis, «Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications,» German Aerospace Center (DLR), Microwaves and Radar Institute, Oberpfaffenhofen, 2015.
- [17] Wikipedia, la enciclopedia libre, «TerraSAR-X,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/TerraSAR-X>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [18] ESA, «El programa Copérnico,» [En línea]. Available: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/El_programa_Copernico. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [19] Copernicus, «Copernicus Programme Overview,» [En línea]. Available: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/copernicus-programme>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [20] P. S. D. G. D. B. M. D. E. A. R. Torres, «GMES Sentinel-1 mission,» 2012.
- [21] M. Johansson, «SAR para la gestión de desastres, Parte 3,» UiT Universidad Ártica de Noruega, 2022. [En línea]. Available: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2022-10/SAR_Disasters_Part3_Spanish_final_no_audio.pdf. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [22] ESA, «Investigaciones internacionales revelan pérdida de hielo en Groenlandia,» [En línea]. Available: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Investigaciones_internacionales_revelan_perdida_de_hielo_en_Groenlandia.. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [23] GMV, «Espacio - Observación de la Tierra,» [En línea]. Available: <https://www.gmv.com/es-es/sectores/espacio#observacion-de-la-tierra>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [24] Copernicus, «Academia Copernicus - Educación y oportunidades,» [En línea]. Available: <https://www.copernicus.eu/es/oportunidades/educacion/academia-copernicus>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [25] INTA, «Blog de Copernicus,» [En línea]. Available: https://www.inta.es/INTA/es/blogs/copernicus/BlogEntry_1513327960079. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [26] L. Veci, «S1TBX Polarimetry Tutorial,» ESA, 2015.
- [27] A. B. y. L. Veci, «SAR Basics Tutorial,» ESA, 2021.
- [28] M. L. Garay, «Pasado, presente y futuro de la geopolítica en el mar de China Meridional,» [En línea]. Available: <https://revista.ieee.es/article/view/2864>.
- [29] BBC Mundo, «Por qué las islas del mar de la China Meridional son motivo de disputa,» [En línea]. Available: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/05/150503_islas_mar_china_meridional_disputa_men

. [Último acceso: 15 enero 2025].

- [30] Descifrando la Guerra, «Mapa de las disputas en el Mar de China Meridional,» [En línea]. Available: <https://www.descifrandolaguerra.es/mapa-de-las-disputas-en-el-mar-de-china-meridional/>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [31] France24, «Taiwán detecta decenas de aviones y barcos militares chinos mientras un buque de guerra japonés pasa cerca de la isla,» [En línea]. Available: <https://www.france24.com/es/asia-pac%C3%A9fico/20240926-taiw%C3%A1n-detecta-decenas-de-aviones-y-barcos-militares-chinos-mientras-un-buque-de-guerra-japon%C3%A9s-pasa-cerca-de-la-isla>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [32] J. Esteban, «Revista de Estudios en Seguridad Internacional,» 2020. [En línea]. Available: <https://seguridadinternacional.es/resi/html/antropoceno-naturaleza-y-seguridad-en-el-sudeste-asiatico-una-aproximacion-eco-critica-a-los-conflictos-del-mar-de-china-meridional/>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [33] Salvamento Marítimo, «Dispositivos de separación de tráfico,» [En línea]. Available: <http://www.salvamentomaritimo.es/mejora-tu-seguridad/control-y-servicios-en-la-mar/dispositivos-de-separacion-de-traffic>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [34] Ceuta Actualidad, «El tráfico marítimo en el Estrecho de Gibraltar: años en segundos,» 8 noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.ceutaactualidad.com/articulo/otras-noticias/traffic-maritimo-estrecho-gibraltar-anos-segundos/20231108003648175323.html>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [35] P. G. García, «Aspectos estratégicos del estrecho de Gibraltar,» Center for Global Affairs & Strategic Studies, Universidad de Navarra, Navarra, 2024.
- [36] T. N. Gracia, «El narcotráfico en el Campo de Gibraltar: ¿hacia la consolidación de un nodo transnacional?,» Instituto Español de Estudios Estratégicos, 2018.
- [37] Europa Sur, «Reino Unido realiza maniobras militares en aguas de Gibraltar y rellenos: protestas de España,» 26 septiembre 2024. [En línea]. Available: https://www.europasur.es/gibraltar/reino-unido-maniobras-militares-aguas-rellenos-protestas-espana_0_2002233140.html. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [38] L. R. Bartumeus, «Las escalas de submarinos nucleares en Gibraltar y Rota, y los planes de emergencia radiológica,» Cuadernos de Gibraltar – Gibraltar Reports, Gibraltár.
- [39] TNG Global Foundation, «Eastside Project,» [En línea]. Available: <https://tng-global.org/eastside/>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [40] Europa Sur, «Ecologistas denuncia irregularidades en la cantera de Casares para los rellenos de Gibraltar,» [En línea]. Available: : https://www.europasur.es/campo-de-gibraltar/ecologistas-denuncia-irregularidades-cantera-casares-rellenos_0_2002794102.html. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [41] L. Romero, «Lo estratégico en la cuestión de Gibraltar,» UNISCI, 2006.
- [42] AEMET, «Estudio sobre la DANA en España,» [En línea]. Available: https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/estudios/dana_ext.pdf. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [43] Regió7, «Avanzo de la DANA a vista del Meteosat en Valencia,» 4 noviembre 2024. [En

- línea]. Available: <https://www.regio7.cat/comunicacio-empresarial/2024/11/04/avanzo-dana-vista-meteosat-valencia-111350293.html>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [44] Las Provincias, «El barranco del Poyo se desborda en Torrent, Picanya, Paiporta y Catarroja y arrasa puentes,» [En línea]. Available: <https://www.lasprovincias.es/comunitat/barranco-poyo-desborda-picanya-paiporta-20241029191017-nt.html>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [45] La Razón, «La NASA muestra el antes y después del paso de la DANA en Valencia,» 31 octubre 2024. [En línea]. Available: https://www.larazon.es/tecnologia/nasa-muestra-antes-despues-paso-dana-valencia_202410316723757ad058410001ca7b1c.html. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [46] Thales Alenia Space, «Copernicus Sentinel-1C Earth observation satellite successfully launched,» [En línea]. Available: <https://www.thalesaleniaspace.com>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [47] NASA ARSET, «Una Sesión de Preguntas y Respuestas sobre La Teledetección por Radar (o Todo lo que siempre quisiste saber sobre SAR),» [En línea]. Available: <https://arset.gsfc.nasa.gov/disasters/webinars/intro-SAR>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [48] IPL (Image Processing Laboratory), «Program - RAQRS,» [En línea]. Available: <https://ipl.uv.es/raqr/?q=content/program>. [Último acceso: 15 enero 2025].
- [49] Evenor-Tech, «Evolución y futuro de la teledetección,» [En línea]. Available: <https://evenor-tech.com/evolucion-y-futuro-de-la-teledeteccion>. [Último acceso: 15 enero 2025].