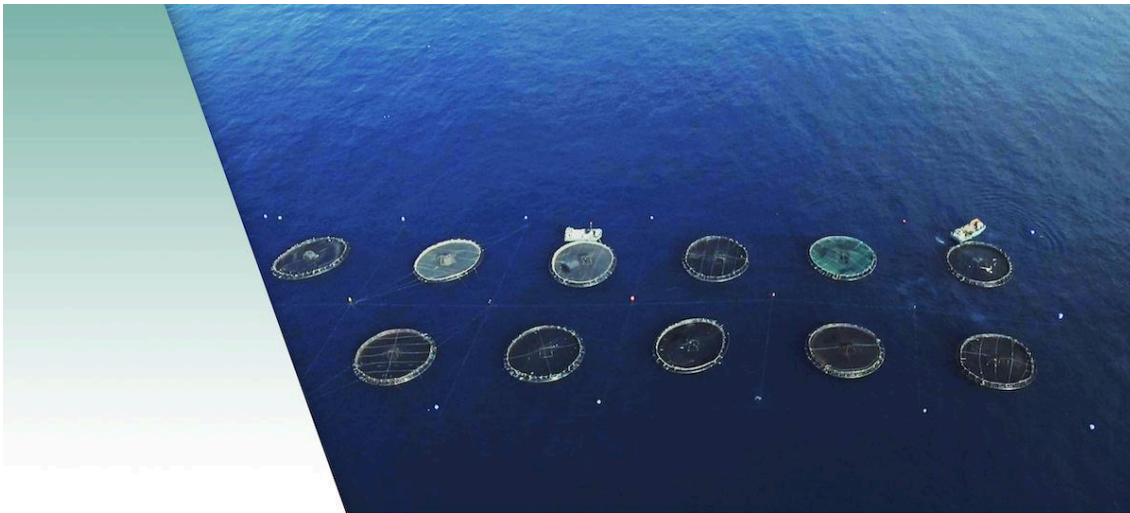




Proyecto SIRENA:

Sistema Remoto Integral de Monitorización, Detección y Predicción de Riesgos de Eventos Marinos Potencialmente Nocivos de Origen Natural o Antrópico en Áreas Off-Shore Destinadas a la Acuicultura



Informe de Resultados / Fuente de Verificación

FV1.3 Informe de casos reales – Análisis de eventos de contaminación marina mediante teledetección en Gran Canaria (Puerto de la Luz, emisario 222 y contaminación orgánica)

Fecha: 23/05/2025

Entidad Responsable: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)

Este proyecto se desarrolla con la colaboración de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través del Programa Pleamar, y se cofinancia por la Unión Europea por el FEMPA (Fondo Europeo Marítimo, de Pesca y de Acuicultura).





Índice

1. Introducción	3
2. Casos reales - uso de SIRENA	3
3. Aplicabilidad del sistema	5
4. Conclusión	5

Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de la persona o personas que ostenten su autoría y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto.



1. Introducción

Este informe recoge el análisis de tres casos reales de vertidos potencialmente nocivos.

El primero corresponde a un vertido de hidrocarburos asociado a un evento ocurrido en el Puerto de la Luz (Gran Canaria) los días 5 y 13 de septiembre de 2024, con una estimación de vertido de 1,5 toneladas de gasoil. Para su análisis se utilizaron imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética) del satélite Sentinel-1A, empleadas para la detección y caracterización de la mancha. El análisis incluyó la identificación de blobs (objetos sospechosos), así como la detección de barcos presentes en la zona y de estructuras de jaulas de acuicultura, con el fin de contextualizar el entorno marino y posibles fuentes del vertido.

El segundo caso corresponde a un episodio de anomalía en aguas costeras en el entorno del emisario identificado como vertido 222, en la costa noreste de Gran Canaria, coincidente temporalmente con un evento de afección a instalaciones acuícolas. El análisis se realizó mediante el uso de imágenes de satélite Sentinel-2 (productos L1C y L2A del programa Copernicus), complementadas con técnicas de corrección atmosférica específicas para aguas costeras (Sen2Cor y ACOLITE), con el objetivo de detectar, delimitar y caracterizar posibles anomalías ópticas en la superficie marina.

El tercer caso corresponde a un episodio de contaminación orgánica asociado a la mortalidad masiva de peces y su posterior descomposición. El análisis se realizó mediante imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética) de los satélites Sentinel-1 durante el mes de octubre de 2025.

Estos casos permitieron validar el desempeño del sistema automatizado de detección desarrollado en el marco del proyecto SIRENA, así como evaluar su capacidad de respuesta ante situaciones reales de contaminación marina.

2. Casos reales - uso de SIRENA

Vertido Puerto de la Luz

Las imágenes analizadas revelaron que el vertido se había fragmentado en **20-30 manchas** de pequeñas dimensiones (diámetros inferiores a 60 metros), y que la más próxima a instalaciones acuícolas se encontraba a **unos 2 km de distancia**, por lo que **no se produjeron afecciones directas al sector productivo**. Estos resultados se confirmaron con un segundo análisis realizado el **9 de septiembre de 2024**, en el que ya no se apreciaban manchas en la zona marina afectada.

Este caso constituye una **prueba real de la aplicabilidad y eficacia del sistema de alerta temprana** desarrollado en SIRENA, demostrando su potencial para apoyar la **prevención de daños a la acuicultura** y la **planificación de acciones de limpieza** por parte de las autoridades competentes.

CASO REAL. 1,5 tm Gasoil.
Gran Canaria. Puerto de la Luz 5 and 13 SEP 2024
IMÁGENES Radar SAR Sentinel 1A (Blobs + Barcos +Jaulas acuicultura).

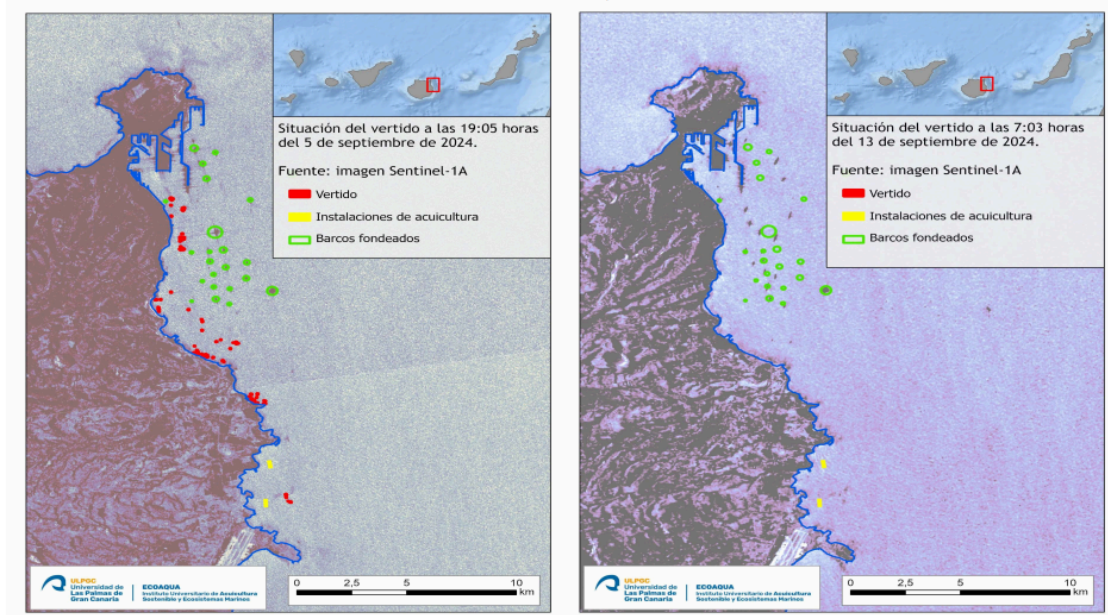


Figura 1: Imágenes radar SAR Sentinel 1A los días 5 de septiembre de 2024 (izquierda) y 13 de septiembre de 2024 (derecha).

Vertido del Emisario 222

Desde comienzos de octubre de 2025, se registraron episodios masivos de mortalidad de peces en las granjas acuícolas ubicadas en las proximidades de la bahía de Melenara (Gran Canaria). Estos episodios de mortalidad inusualmente elevada también afectaron, en fechas posteriores del mismo mes, a instalaciones acuícolas de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria situadas en Taliarte. Esta mortalidad coincidió con la presencia de plumas superficiales localizadas sobre el emisario 222, situado en esa zona. Desde el proyecto SIRENA se analizaron las imágenes de satélite obtenidas y se elaboró un informe técnico cuyos resultados se recogen en el Anexo I de este documento. Desde la ULPGC se indica que no se publique el Anexo I hasta que no finalice un proceso judicial que en la actualidad se está llevando a cabo y donde se está utilizando la información del Anexo I por petición del SEPRONA en la causa abierta.

Evolución de la mancha asociada a la descomposición de peces en las granjas de Aquanaria



Tras los episodios de elevada mortalidad de peces en las granjas acuícolas, se activó en Gran Canaria una alerta que dio lugar a la intervención del plan de emergencias (PLATECA), debido al vertido asociado a la presencia en el mar de aproximadamente 1.500 toneladas de peces en descomposición procedentes de las jaulas afectadas.

Desde el proyecto SIRENA se identificaron, mediante imágenes satelitales radar, diversas zonas afectadas por el vertido.

Se adjunta el vídeo de las imágenes radar derivadas de los satélites de la constelación Copernicus Sentinel-1A y 1C, que miden la rugosidad de la superficie del agua, donde las zonas oscuras destacan la posible presencia de vertido. El vídeo muestra la evolución de la mancha desde el 1 de octubre hasta el 20 de octubre de 2025

Nombre del vídeo: video_imagenes_radar_SENTINEL_octubre_2025.mp4

La información obtenida a partir de las imágenes radar fue facilitada a PLATECA durante la gestión de esta emergencia de contaminación orgánica.

3. Aplicabilidad del sistema

Estos casos reales permiten validar los siguientes aspectos clave del sistema SIRENA:

- Capacidad de detección multiescala de eventos de contaminación marina mediante el uso combinado de sensores radar (Sentinel-1) y ópticos (Sentinel-2), adaptándose a diferentes tipos de vertidos (hidrocarburos, plumas ópticas y materia orgánica).
- Eficacia en la identificación y caracterización de anomalías superficiales, tanto en escenarios de fragmentación (vertido de hidrocarburos en Puerto de la Luz) como en estructuras continuas (plumas del emisario 222) y manchas difusas asociadas a contaminación orgánica.
- Integración de información satelital con el contexto operativo, permitiendo evaluar la proximidad y posible afección a infraestructuras sensibles como instalaciones acuícolas.
- Capacidad de seguimiento temporal de los eventos mediante análisis multitemporal, facilitando la evaluación de la evolución, persistencia o disipación de las manchas.
- Utilidad como herramienta de apoyo a la gestión de emergencias y a la toma de decisiones, proporcionando información objetiva para la activación de alertas, planificación de actuaciones y coordinación con organismos competentes.
- Aplicabilidad demostrada en situaciones reales, incluyendo la transferencia de información a sistemas de gestión de emergencias (como PLATECA) y su uso para la evaluación de riesgos en el sector acuícola.
- Potencial de integración con modelos hidrodinámicos para la predicción de trayectorias y zonas de impacto, reforzando su papel como sistema de alerta temprana en el marco del proyecto SIRENA.



4. Conclusión

Los casos analizados ponen de manifiesto la capacidad del sistema SIRENA para detectar, caracterizar y realizar el seguimiento de distintos tipos de eventos de contaminación marina en condiciones reales, incluyendo vertidos de hidrocarburos, anomalías ópticas en aguas costeras y episodios de contaminación orgánica.

En el caso del vertido de hidrocarburos en el Puerto de la Luz, el sistema permitió una detección temprana y una evaluación rápida del riesgo, descartando afecciones directas al sector acuícola. Por el contrario, en el episodio asociado al emisario 222, coincidente con eventos de mortalidad en instalaciones acuícolas, así como en el posterior proceso de contaminación orgánica derivado de la descomposición de biomasa, el sistema ha demostrado su utilidad para identificar, monitorizar y contextualizar la evolución de las anomalías detectadas.

Estos resultados evidencian el potencial del sistema SIRENA como herramienta de apoyo a la gestión de emergencias ambientales, la evaluación de riesgos y la toma de decisiones en el ámbito de la acuicultura, así como su capacidad para proporcionar información relevante en eventos con distinta naturaleza e impacto.

Este informe constituye la **Fuente de Verificación FV1.3**, correspondiente a la **Acción A3** del proyecto SIRENA, y documenta la aplicación operativa del sistema en varios eventos reales, en línea con los objetivos de alerta temprana y protección de zonas acuícolas definidos en el Marco Lógico del proyecto.



ANEXO I



Cofinanciado por
la Unión Europea



MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN



Fondos Europeos



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

ICMAT
INSTITUTO DE CIENCIAS MATEMÁTICAS



ULPGC
Universidad de
Las Palmas de
Gran Canaria



ECOAQUA
Instituto Universitario de Acuicultura
Sostenible y Ecosistemas Marinos

INFORME SOBRE LA MORTALIDAD MASIVA DE PECES EN LAS GRANJAS ACUÍCOLAS MARINAS

(Octubre de 2025.Municipio de Telde-NE de Gran Canaria)

Análisis de las escenas de satélites SENTINEL 2A/2C de la Constelación Europea COPERNICUS

Dr. Antonio González Ramos. Instituto ECOAQUA (ULPGC)

antonio.ramos@ulpgc.es

Dr. Angel Rodríguez Santana. Instituto ECOAQUA (ULPGC)

angel.santana@ulpgc.es

Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Campus Universitario de Tafira, 35212-Las Palmas de Gran Canaria. España.

1. Objeto del informe

El presente informe tiene por objeto

1. Argumentar la **coherencia científica del esquema de clasificación espectral** presentado para la identificación remota de **vertidos químicos compatibles con la presencia de compuesto sulfúreos y sus especies derivadas**.
2. Justificar la **validez del uso de imágenes Sentinel-2** para la detección y caracterización espectral de plumas anómalas en zonas costeras.
3. Proporcionar herramientas para la **detección remota y el análisis de posibles vertidos industriales compatibles con posibles compuestos relacionados con el azufre** sin atribuir en ningún caso a esta metodología una identificación química inequívoca de los mismos.

2. Validez de la utilización de Sentinel-2 en este evento.

Abundante literatura científica reciente confirma que el producto L2A de Sentinel-2, a pesar de su diseño inicial para la tierra, es ampliamente utilizado y validado para la monitorización de la calidad del agua en zonas costeras y estuarios. La alta resolución espacial (10-20 m) de Sentinel-2 y su relativamente amplio rango espectral lo convierten en una herramienta eficiente para el seguimiento de plumas localizadas como las generadas por emisarios, permitiendo la detección de contaminantes como sólidos en suspensión, que son proxies comunes de vertidos. Esto contradice el argumento de que es un sensor inadecuado.

2.1. Qué se puede y qué no se puede pedir a Sentinel-2

- Sentinel-2 no mide H_2S ni compuestos de azufre de manera directa.
- El producto L2A de Copernicus no es una corrección atmosférica óptima, y puede presentar limitaciones para aguas costeras complejas (se aplicaron dos correcciones Sen2cor y ACOLITE) para la mejora de la identificación radiométrica de las escenas del 3 y el 6 de Octubre 2025.
- El espectro de Sentinel-2 en la región azul-verde-rojo es menos específico que el de sensores diseñados para color del océano (MODIS, OLCI, etc.). Sin embargo, de estas limitaciones **no se deriva** que Sentinel-2 sea inválido para **detectar plumas sulfúreas anómalas en emisarios de aguas costeras a partir del análisis de las bandas radiométricas B2 (azul turquesa) y B3 (verde azulado) durante el evento contaminante frente a otros días en los que se observa la misma coloración turquesa en el mismo punto de vertido 222, pero en los que no haya eventos de contaminación nociva**.
- Se realizan comparaciones entre **zonas afectadas (días 3 y 6 de octubre de 2025) y la misma zona de referencia con otras escenas del mismo punto de vertido**, minimizando con ello errores sistemáticos de la corrección atmosférica, porque afectan de forma similar a ambos espectros.
- El resultado no es un valor absoluto de concentración, sino un **cambio relativo de su forma espectral**, dominado por un aumento de reflectancia en la banda S2 de Sentinel 2 (azul) frente a la banda 3 (azul-verdoso) que confiere una tonalidad azul turquesa muy marcada frente al agua vecina.

Es por ello que Sentinel-2 se usa generalmente como **herramienta de vigilancia y pre-diagnóstico** que permite localizar, delimitar y caracterizar ópticamente una pluma que posteriormente deberá ser confirmada y analizada con datos in situ.

De hecho, el azufre coloidal posee un alto índice de refracción, lo que resulta en una dispersión de luz muy intensa que confiere el característico color blanco-lechoso o turquesa a las plumas asociadas. Este fenómeno óptico de dispersión múltiple es el signo visible e inmediato de la oxidación del sulfuro de hidrógeno (H_2S) (invisible) frente al Sulfato de Cobre (SO_4Cu) (azul turquesa) e identificado a partir de las bandas 2 y banda 3 de Sentinel 2, para formar Sulfuro de Cobre (SCu) (coloración negra y precipitación en el fondo) y ácido Sulfúrico (SO_4H_2) (invisible) disuelto en el agua de mar, y responsable de anoxias y potenciales cuadros de hipoxia, anoxia y heridas causticas en órganos y tejidos de peces en entornos confinados (jaulas).

En el informe indicamos EXPLÍCITAMENTE que el objetivo del análisis espectral de Sentinel-2 es: “identificar posibles alteraciones espectrales asociadas a un **vertido industrial de Sulfato de Cobre (azul turquesa) y sulfídrico (transparente), generadores de un sedimento de coloración negra (sulfuro de cobre) y de Acido Sulfúrico (SO_4H_2)**.”

Por todo:

- **No se habla de detección directa de H_2S o de SO_4H_2 .** La única forma de detectar químicamente especies de azufre es con un método químico. De hecho, el SH_2 y el ácido sulfúrico SO_4H_2 son INCOLOROS y su identificación “per se” es imposible, si bien **combinaciones de la banda 2 y banda 3 del Sentinel 2 pueden reportar SU PRESENCIA.**
- La conclusión es que el vertido “**se puede vincular a vertido químico, tanto en cuanto su coloración coincide con la obtenida en otros estudios anteriores**”, no que se haya demostrado inequívocamente su composición.

En este sentido, el informe se limita a:

- Mostrar la evidencia de vertidos sistemáticos de “blobs” de color celeste turquesa en el Emisario 222 asociados a sulfatos de Cobre en presencia de Sulfídrico, utilizado en la industria para la limpieza del óxidos y eliminación de impurezas de cobre en superficies metálicas o vítreas.
- Describir un **patrón espectral anómalo en los blobs de vertido de los días 3 y 6 de Octubre de 2025**, significativamente distintos a las de otros días en los que aparece la misma pluma en la misma coordenada (vertido 222) observadas estos años con escasa frecuencia.
- Identificar una anomalía en la ratio de las reflectancias de las Bandas 2 (azul turquesa) y banda 3 (azul verdoso). **Una ratio muy elevada indica la presencia MASIVA de azul brillante (SO_4Cu) frente a la banda 3 (verde azulado).**
- **Esta singularidad no se observa en las escenas previas analizadas desde 2022 en las que aparece la misma coloración turquesa sobre el punto de vertido 222 (ratios B2/B3 iguales a 1),** que indicarían la normalización del vertido y por ende también indicaría que a concentraciones pequeñas de vertido el océano la asimilación del Sulfato de Cu no generaría impacto en las jaulas.
- En los primeros días de octubre de 2025 se reportó en PLATECA la **ruptura de un difusor en el vertido 222.** Ello implicaría **LA DESCARGA y FLUJO MASIVO** de vertido que explicaría **LA ELEVADA SEÑAL DE LA BANDA2/BANDA3 DE SENTINEL 2** los días 3 y 6 y **la incapacidad de su eliminación eficiente en el interior de la bahía como en los casos de vertidos con cargas menores reportados en escenas previas con los mismos blobs celestes (desde 2022) con ratios B2/B3 iguales a 1 (NEUTRALIZADOS)** que explicarían la ausencia de efectos letales sobre la ictiofauna marina en el área como si ocurrió el 3 y el 6 de octubre de 2025.

Es importante destacar que el informe **no diagnostica** directamente la pluma, sino que la clasifica como vertido rico en especies de azufre según un esquema espectral desarrollado que utiliza la ratio entre las bandas de reflectancia 2 y 3 de Sentinel 2.

- La aplicación de esta ratio (reflectancia de las bandas B2/B3) indican la presencia de **Sulfato de Cu (SO₄Cu)** de coloración azul celeste en el punto de vertido 222 y también indicaría la presencia (transparente) de **ácido Sulfídrico (SH₂)** (transparente). La reacción utilizada en la industria forma **Sulfuro de cobre (SCu)** (que desaparece al poco tiempo en forma de sedimento de coloración negra) y por ende como resultado de la reacción, **Acido Sulfúrico (SO₄H₂)** (DISUELTO) como producto final.

2.2. Coherencia con la práctica habitual en teledetección costera

Aunque Sentinel-2 no sea un sensor de “color del océano puro”, es hoy uno de los instrumentos **más utilizados** en estudios de:

- Turbidez y sólidos en suspensión.
- Plumas de sedimentos y vertidos costeros.
- Caracterización de cambios de color asociados a fenómenos físicos/biogeoquímicos.

El informe reconoce explícitamente que, con Sentinel-2, sí se puede afirmar que:

“Hay una pluma saliendo del emisario 222. Su espectro indica incremento de turbidez / partículas / coloides respecto a aguas del entorno. Es coherente con la existencia de un vertido o efluente que altera ópticamente el agua.”

A esto hay que añadir que el agua, correctamente depurada, que sale por cualquier emisario, incluido el emisario 222 no deja marca óptica, así lo demuestran las imágenes tomadas cada día. Sin embargo, repetidas veces (NO MUY FRECUENTES) se observa la presencia de una pluma, lo cual indica la presencia de vertido de algo que contiene otros agentes químicos además de agua.

3. Validez del esquema/algoritmo para vertidos relacionados con azufre

3.1. Qué se aporta en este informe:

El informe no presenta un “algoritmo general de detección de sulfuros”, sino un esquema de clasificación ad hoc.

- No se PRETENDE en este informe publicar una fórmula cerrada que, a partir de las reflectancias de sentinel 2, devuelva una concentración de H₂S entre otras cosas porque es, al igual que el ácido sulfúrico (SO₄H₂), **AMBAS ESPECIES SULFÚREAS SON TRANSPARENTES EN EL AGUA.**
- La clasificación se construye a partir de las señales de las **reflectancias de color azul celeste (B2 de sentinel 2) y azul verdoso (B3) que aparecen sobre el difusor del emisario 222** ubicado en la bahía.

3.2. Adaptación a Sentinel-2 a la detección de SH₂

En este informe :

- No se aplica una traslación literal de las relaciones de bandas de otros satélites, sino que se **adapta el razonamiento físico** a las bandas disponibles en Sentinel-2, concentrándose en:
 - El comportamiento diferencial entre el azul y el verde.
 - La respuesta en el rojo, sensible a absorciones por pigmentos y partículas.
- El criterio se plantea como **clasificación empírica** (“compatible con vertidos ricos en compuestos relacionados con azufre”), no como determinación exacta de especies de azufre.

En el informe original, cuando se habla de ‘algoritmo de obtención de ácido sulfhídrico’, debe entenderse como un **esquema de clasificación espectral empírico**, basado en la similitud entre la firma de la pluma del emisario 222 y la de eventos previamente caracterizados (ej. El Hierro), y no como un algoritmo químico cuantitativo.

3.3. Por qué tiene sentido físico esperar esa similitud

Desde el punto de vista químico-físico:

1. El H_2S disuelto **no es directamente visible**, pero su oxidación y reacción con metales genera:
 - Azufre coloidal (S^0) de tamaño submicrónico.
 - Sulfuros metálicos (FeS , CuS , etc.) y óxidos/hidróxidos posteriores (SO_4^{2-})
2. Todos estos productos son **constituyentes ópticamente activos**: aumentan la dispersión de la luz, especialmente en la región verde, y modifican la absorción en azul y rojo.
3. Precisamente ese tipo de mezcla de **partículas finas + coloides + posibles pigmentos** es la que se documenta en la pluma volcánica de El Hierro, donde las aguas pasan de tonos oscuros (FeS) a verde-lechoso (oxidación de sulfuros de Cu y formación de S^0) con firmas Rrs muy características.

En aguas marinas oxigenadas, la especie de azufre inorgánico dominante es el sulfato (SO_4^{2-}), pero **en zonas costeras sometidas a aportes reductores (emisarios, sedimentos anóxicos, descargas industriales)** es frecuente la aparición transitoria de especies reducidas e intermedias del azufre. El sulfuro disuelto ($\text{H}_2\text{S}/\text{HS}^-$), ya sea generado in situ por procesos biogeoquímicos o vertido directamente por un efluente, se oxida rápidamente en contacto con el oxígeno disuelto dando lugar a azufre elemental (S^0) coloidal, tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), sulfito (SO_3^{2-}) y politionatos, además de reaccionar con metales para formar sulfuros metálicos (FeS , CuS , etc.), que a su vez se oxidan a óxidos e hidróxidos de Fe(III) y Mn(IV) . Estas especies intermedias, especialmente el azufre coloidal y las partículas finas de sulfuros y óxidos metálicos, son fuertemente dispersoras de la luz en la región visible y pueden generar tonalidades turquesas o blanquecinas similares a las descritas en plumas sulfhídricas como la de la erupción de El Hierro.

Por tanto, en un escenario de un posible vertido con alta carga de compuestos de azufre reducido que llega a agua costeras oxigenadas, es físicamente razonable esperar una firma óptica similar a la observada en otros sistemas dominados por la oxidación de sulfuro, aunque las especies químicas presentes no sean idénticas.

Samukawa, T. (1992)

Este artículo examina las propiedades ópticas del azufre coloidal (S^0), uno de los principales productos de la oxidación del sulfuro en ambientes marinos. Samukawa determina el índice de refracción específico en diferentes longitudes de onda para partículas submicrométricas, mostrando cómo influyen en la dispersión de la luz visible, especialmente en la región verde. Sus resultados ayudan a comprender cómo la presencia de S^0 modifica la reflectancia superficial en sistemas con procesos redox activos. El estudio es fundamental para interpretar firmas espectrales anómalas captadas por sensores satelitales **en zonas con vertidos** o actividad volcánica submarina.

Goyens, C., et al. (2016)

Este trabajo utiliza técnicas de dispersión de luz para caracterizar partículas coloidales presentes en agua de mar, incluyendo minerales finos, polímeros naturales y compuestos reducidos. Los autores muestran que estas partículas, generalmente de tamaño submicrónico, afectan de manera notable la dispersión óptica en las bandas azul-verde, generando incrementos en la señal medida por satélite. El estudio demuestra cómo los coloides contribuyen a la variabilidad espectral de la reflectancia, siendo un componente clave en la detección de **plumas de origen natural o antrópico**. Sus mediciones in situ permiten vincular directamente el tamaño y concentración de los coloides con sus propiedades ópticas.

Nelson, N. B., & Siegel, D. A. (2013)

Esta revisión ofrece una visión completa sobre los controles químicos del color oceánico, abordando desde compuestos orgánicos cromóforos hasta partículas minerales y coloides inorgánicos. Los autores explican cómo diferentes materiales modifican la dispersión y absorción en el espectro visible, afectando directamente la reflectancia remota (Rrs). Se incluyen análisis detallados de cómo partículas submicrónicas, incluyendo sulfuros metálicos y azufre elemental, alteran el balance óptico de la columna de agua. El artículo destaca la importancia de comprender estos componentes para mejorar la interpretación de **imágenes Sentinel-2 y otros sensores ópticos en ambientes costeros y volcánicos**.

Goswami, N., et al. (2023)

Este artículo investiga en profundidad los procesos ópticos asociados a nanoestructuras de sulfuro de cobre (CuS), un compuesto que puede formarse en el mar cuando el H_2S reacciona con iones Cu^{2+} . Los autores describen cómo el CuS presenta una absorción intensa en el visible, **especialmente en azul y rojo**, mientras que su comportamiento dispersante influye en las bandas verdes. **Estas propiedades explican los cambios de color observados en aguas afectadas por emisiones sulfurosas**. El estudio demuestra que los sulfuros metálicos pueden **producir firmas ópticas fuertemente reconocibles desde satélite**. Su relevancia es alta en contextos volcánicos y en **zonas con descargas industriales ricas en metales**.

En función de todo lo indicado, no es casualidad que un posible vertido con altas cargas de compuestos reducidos de azufre genere, al descargarse a mar abierto y oxidarse, **muestre patrones espectrales similares a los observados en un contexto volcánico donde existen especies reducidas de azufre**.

La similitud de firma no implica unicidad, pero sí es coherente con el comportamiento óptico esperado de aguas donde la química está dominada por procesos de oxidación de sulfuros. Esto justifica el uso del esquema de clasificación como **indicador de compatibilidad** con posibles vertidos ligados a compuestos de azufre.

4. Validez de las imágenes Sentinel-2 en este evento concreto

Es importante combinar aspectos técnicos y el contexto del suceso estudiado.

1. **Localización espacial:** la pluma se origina de forma inequívoca en el punto del emisario 222, identificado a partir de la cartografía oficial, y se proyecta hacia la zona de jaulas acuícolas siguiendo el campo de corrientes modelado.
2. **Evidencia temporal:** la coloración turquesa anómala aparece coincidiendo con el episodio de mortalidad masiva y no se observa en días posteriores inmediatamente consecutivos.
3. **Contraste espectral interno:** los espectros medios de las zonas afectadas y no afectadas presentan diferencias significativas en la región visible, con incremento claro en el verde y cambios en el rojo-NIR que son difíciles de explicar sólo por variaciones de mar de fondo o aporte de agua residual tratada.

El informe del SMM muestra imágenes con coloraciones similares en años previos y en otros emisarios sin incidencias. La figura 1 recoge tres ejemplos, lo que demuestra que:- La tonalidad turquesa **no es exclusiva** de vertidos ligados a compuestos de azufre, algo que en el informe original no se niega, lo que sí es coincidente con vertidos de materiales que no son agua tratada, ya que esta última no deja huella espectral, lo cual se evidencia en el registro de imágenes también en la misma zona.

- En el análisis de imágenes de dicho informe se aplica el análisis espectral y se ha indicado que no se puede descartar la presencia de compuestos relacionados con el azufre. Sin embargo, en el caso de las imágenes del día 3 y 6 de octubre, se diferencian claramente los espectros, mostrando una relación entre la óptica y la composición.

- Todas las escenas sin embargo, fueron reportadas sobre el difusor de vertido, e indefectiblemente muestran la presencia de SH₂ y su emisión a lo largo de varios años (2022-). La diferencia radica en que la neutralización-disolución del SH₂ mostraría valores altos de reflectancia en la banda 3 que es lo que se ha observado en el análisis que la ULPGC realizó con las escenas previas y que indican su alta concentración debida a la rotura del difusor. La emisión masiva de vertido que no permitió su neutralización (oxidación del SH₂ en formas químicas oxidadas (SO₂, SO₃, SO₄) inocuas en el medio marino).

- La diferencia significativa de la presencia o no de SH₂ disuelto a altas concentraciones, se refleja en la relación relativa entre la banda 2 y la banda 3 del Sentinel 2 (metodología utilizada por la ULPGC y que se incluye en esa réplica). Una señal significativa de presencia es el predominio de la banda 2, la presencia del SH₂ quedaba claramente mostrada en la escena del 3 de octubre y (algo menor) en la del 5 de octubre, ambas significativas y que indicaban la presencia de SH₂ disuelto en el blob “celeste” que se reporta en las escenas de satélite.

- En el informe de Grafcan sin embargo, se muestran escenas descriptivas de blobs de color celeste, pero no se realizó análisis radiométrico alguno de la ratio entre la banda 2 y la banda 3 del Sentinel 2, si lo hubiera realizado, observaría que las escenas previas mostradas por el contrainforme de Grafcan muestran valores muy similares de la banda 2 y la banda 3 (aguas normalizadas).

- El análisis espectral de estas imágenes y su comparación con la correspondiente al día 3 de octubre de 2025 sí muestran diferencias que destacan en esta última una firma espectral compatible con la presencia de compuestos relacionados con el azufre. En efecto, reflectancias en la banda 2 (azul) de Sentinel significativamente superiores a las de la banda 3 (verde) constituyen un rasgo característico de la presencia de un compuesto sulfúreo disuelto en el agua. Si, para los distintos píxeles dentro del contorno del vertido del emisario en las imágenes de la Figura 1, se calcula el cociente de las reflectancias de la banda 2 respecto a la banda 3 y se representan dichos valores, se obtiene el diagrama mostrado en la Figura 2. De manera clara, el vertido del día 3 de octubre de 2025 se distingue por la notable prevalencia de la banda 2 frente a la banda 3. (IMÁGENES DISPONIBLES EN EL ANEXO).

Las escenas involucradas en este informe se procesaron, además, con la aplicación de corrección atmosférica para aguas costeras ACOLITE (1), aplicando el algoritmo DSF(2) sobre los datos originales con nivel de procesamiento L1C suministrado por Sentinel. Dada las características de las escenas y las condiciones atmosféricas presentes en los días en que se tomaron, no se aprecian diferencias significativas en los resultados de los análisis respecto a los datos utilizados en el primer informe, procedentes del tratamiento con el algoritmo Sen2Cor(3) aplicado a las escenas L2A también suministradas por Sentinel.

1.ACOLITE <https://odnature.naturalsciences.be/remsem/software-data/fad48ee1-5ffb-4600-9deb-a73c4d3e1b54>

2.Dark Spectrum Fitting approach (DSF, Vanhellemont and Ruddick, 2018, 2021, Vanhellemont, 2019a, 2019b, 2020a, 2023, Vanhellemont et al. 2024)

3.Sen2Cor 2.12 <https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/sen2cor-v2-12/>

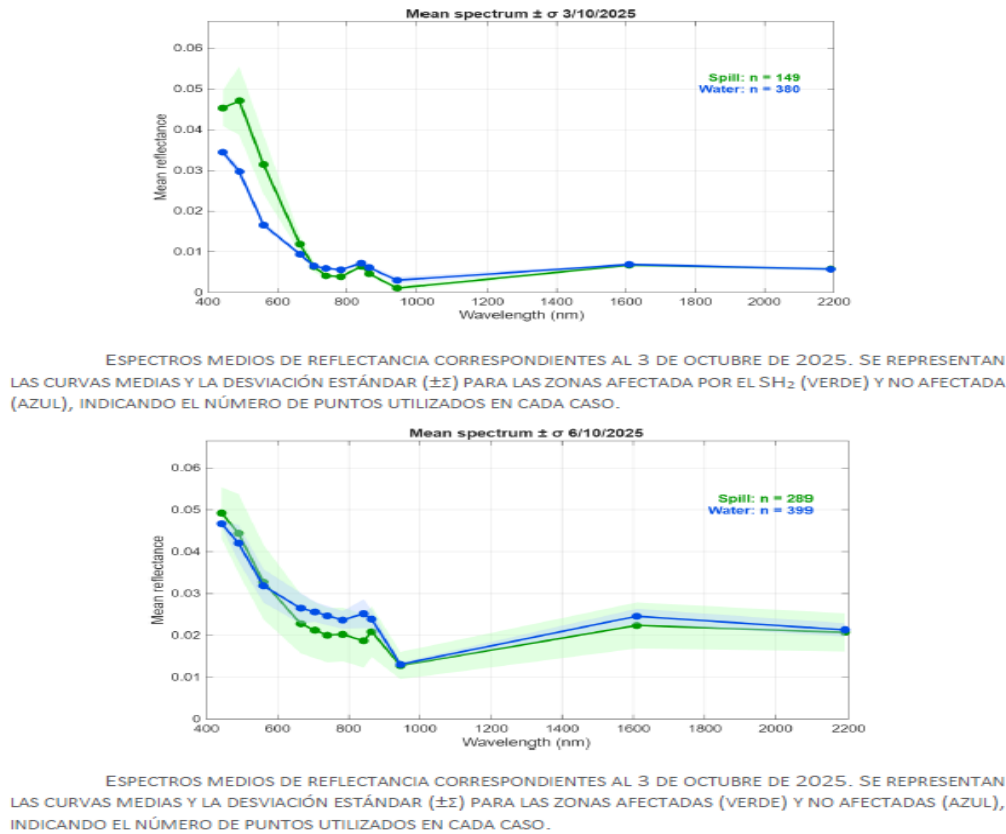


Figura 1. Reflectancias vs longitud de onda para los días 3 y 6 de octubre de 2025.

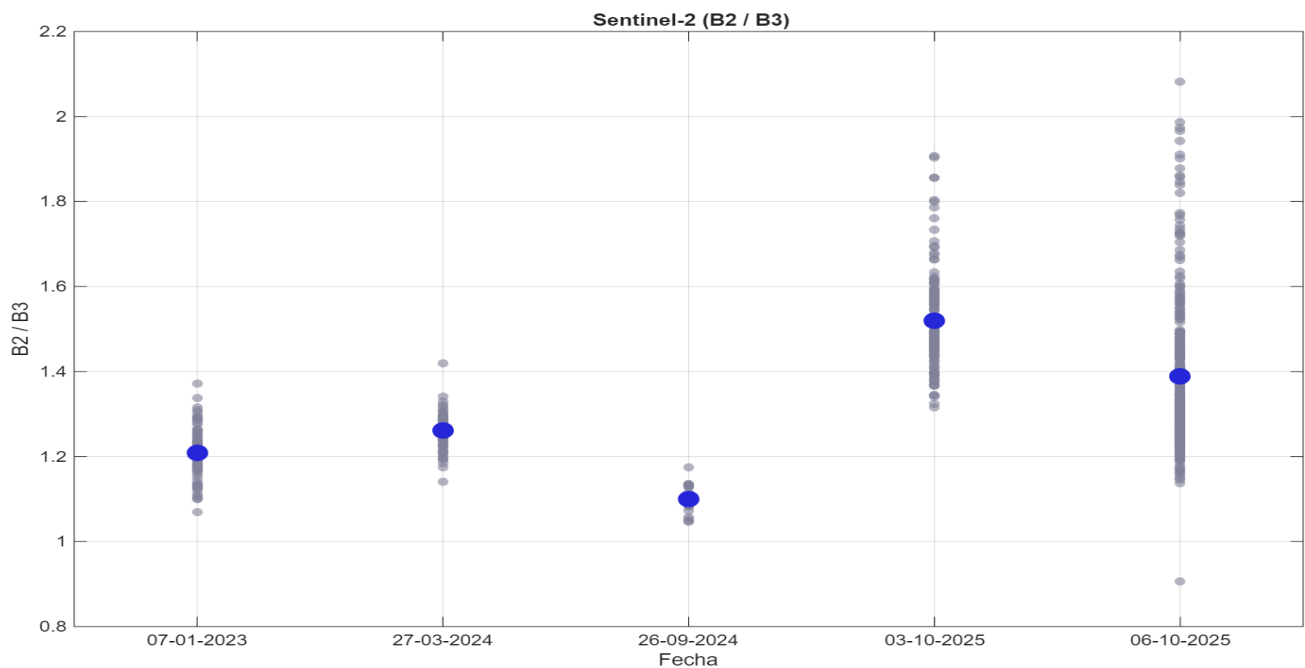


Figura 2: Cociente entre las reflectancias en la banda 2 y la banda 3 de los satélites Sentinel 2A,C en los puntos en el interior del vertido del emisario 222 en diferentes fechas. El vertido del día 3 de octubre de 2025 (a la derecha) destaca por la notable prevalencia de la banda 2 frente a la banda 3.

La comparación de las medias de los cocientes de reflectancia entre las bandas 2 y 3 correspondientes a la pluma del vertido sobre el emisario 222 en las fechas 3 de octubre de 2025 y 7 de enero de 2023 indica que, aplicando el test t de Welch con un nivel de significación $\alpha = 0.005$, la media correspondiente al primer grupo es significativamente mayor que la del segundo. Este mismo resultado se obtiene al comparar la media del primer grupo con las medias de los datos correspondientes a las fechas 27 de marzo de 2024 y 26 de septiembre de 2024.

Asimismo, al repetir la comparación de las medias de los cocientes de reflectancia entre las bandas 2 y 3 para la pluma del vertido sobre el emisario 222 en la fecha 6 de octubre de 2025 y contrastarlas sucesivamente con los datos de 7 de enero de 2023, 27 de marzo de 2024 y 26 de septiembre de 2024, se observa que, aplicando el test t de Welch con $\alpha = 0.005$, la media correspondiente al primer grupo es significativamente mayor que la de los segundos.

La figura muestra además que las desviaciones estándar correspondientes a los datos del 3 y 6 de octubre de 2025 son mayores que las observadas el 7 de enero de 2023, el 27 de marzo de 2024 y el 26 de septiembre de 2024, **lo cual es consistente con una mayor dispersión de las reflectancias asociadas a compuestos derivados de reacciones relacionadas con el azufre.**

Al comparar las varianzas del 3 de octubre de 2025 con las obtenidas el 7 de enero de 2023, el 27 de marzo de 2024 y el 26 de septiembre de 2024 mediante el contraste de Brown–Forsythe, realizado al 2% de significación, se confirma la existencia de evidencia estadística suficiente para afirmar que la varianza poblacional del primer grupo excede a la de los segundos.

De forma análoga, al comparar las varianzas correspondientes al 6 de octubre de 2025 con las varianzas obtenidas en las fechas 7 de enero de 2023, 27 de marzo de 2024 y 26 de septiembre de 2024, aplicando nuevamente el contraste de Brown–Forsythe con un nivel de significación del 2%, se obtiene el mismo resultado: la varianza poblacional del primer grupo excede a la de los segundos.

Las ratios de las reflectancias de las Banda2/Banda3 evidencian:

Las imágenes Sentinel-2 no bastan solas para dictaminar la naturaleza química del vertido, pero sí proporcionan evidencia espacial y temporal clave de la presencia de SH₂ que, combinada con información oceanográfica, operacional del emisario e inspecciones in situ, debe ser tomada en cuenta en cualquier evaluación integral del evento.

5. Uso de sentinel-2 para monitorización marina

Diversos trabajos recientes demuestran de forma explícita la capacidad de Sentinel-2 para identificar y seguir en el espacio y en el tiempo plumas de contaminación en el litoral:

- Wang et al. (2022) desarrollan un modelo automático para la **detección de vertidos de aguas residuales desde emisarios costeros** usando exclusivamente imágenes Sentinel-2/MSI. A partir de un catálogo de espectros Rrs de distintos tipos de aguas, entrenan un clasificador de bosques aleatorios que discrimina 14 tipos ópticos, incluyendo clases específicas para aguas fuertemente eutróficas y para “agua sospechosa de contener vertido” en la vecindad de emisarios. El modelo, validado con campañas in situ (muestreo químico y drones), se aplica de forma **operacional** a lo largo de la costa de Zhejiang, identificando automáticamente emisarios con descargas anómalas.
- Scrivner et al. (2025) comparan la información multibanda de **Sentinel-2** con datos hiperespectrales EMIT **para analizar plumas transfronterizas del río Tijuana. Sentinel-2 permite detectar incrementos en B2-B3-B4 por sedimentos y aguas residuales**, mientras

que EMIT aporta mayor capacidad de discriminación química. Las bandas NIR y SWIR ayudan a resaltar zonas con mayor turbidez.

- Tian et al. (2024) crean un dataset global con imágenes **Sentinel-2 para entrenar modelos de deep learning destinados a detectar emisarios y plumas**. El modelo utiliza B2, B3, B4 y B8, aprendiendo firmas ópticas características de aguas residuales, como mayor reflectancia azul-verde y heterogeneidad espacial. El enfoque automatizado supera métodos basados en umbrales espectrales.
- Faria et al. (2021) utiliza las bandas visibles de Sentinel-2 (B2, B3, B4) para identificar variaciones en **reflectancia asociadas a turbidez y partículas generadas por emisarios** en Portugal. La pluma se detecta mediante aumentos en B2–B3 y absorción en B4, combinando perfiles espectrales e imágenes RGB. También integran la banda B8 para delimitar zonas de alta turbidez. Así logran caracterizar la dinámica espacial y temporal de la pluma.
- de Liz Arcari et al. (2023) desarrollan el índice WCI a partir de relaciones espectrales entre las bandas visibles de **Sentinel-2 para resaltar diferencias entre aguas limpias y plumas residuales**. El WCI combina B2, B3 y B4 para detectar aumentos de reflectancia asociados a contaminación. La banda B8 contribuye a delimitar zonas turbias. El índice se valida con datos in situ, demostrando gran eficacia para seguimiento continuo de plumas.
- Roca et al. (2025) analizan el impacto de un **gran vertido de aguas residuales** en una laguna costera eutrófica de Brasil mediante una serie de 359 imágenes Sentinel-2 (2017–2024) procesadas con ACOLITE, obteniendo campos de clorofila-a, $K_d(\text{PAR})$ y profundidad de disco de Secchi satelital. Demuestran que Sentinel-2 permite cuantificar el pico de biomasa fitoplanctónica tras el episodio (clorofila-a $>100 \text{ mg m}^{-3}$) y seguir la recuperación del sistema durante varios años, incluso en aguas someras y ópticamente complejas.
- Gierach et al. (2016), aunque anterior a Sentinel-2, muestran con detalle cómo la teledetección multiesensor (color del océano, TSM, temperatura y SAR) permite detectar plumas de **diversiones de aguas residuales** frente a California y establecen umbrales de contraste mínimo en clorofila-a y SST para que los vertidos sean discernibles desde satélite, reforzando el marco conceptual que hoy se aplica con Sentinel-2.

Estos ejemplos confirman el uso de sensores ópticos de alta resolución —y en particular Sentinel-2— para la **detección y caracterización de contaminación costera** no sólo es metodológicamente sólido, sino que está ya siendo explotado en aplicaciones operacionales para la supervisión de emisarios y vertidos.

En este contexto general, es especialmente relevante que se hayan publicado trabajos en los que Sentinel-2 se utiliza directamente para el análisis de vertidos y procesos de transporte de contaminantes en zonas marinas y costeras, y en los que figuran dos miembros del equipo de trabajo que presenta este informe.

- García-Sánchez et al. (2022) aplican una combinación de imágenes de Sentinel-1 (SAR), **Sentinel-2 y Sentinel-3** junto con modelos de corrientes y herramientas de sistemas dinámicos para reconstruir el origen y la trayectoria de un gran **episodio de llegada de chapapote** a la costa del Mediterráneo oriental. Las observaciones de Sentinel-2/3 se procesan como datos de color del océano y se utilizan para validar las estructuras de transporte (Lagrangian Coherent Structures) que conectan el posible punto de vertido con

los tramos de costa afectados, reforzando el uso de Sentinel-2 en la trazabilidad de vertidos de hidrocarburos hasta la franja costera.

- Más recientemente, García-Sánchez et al. (2024) emplean imágenes de **Sentinel-2A/B y Sentinel-3 en un entorno portuario (Rafina, Grecia)** para validar de forma remota un modelo hidrodinámico de altísima resolución. En este trabajo se indica explícitamente que las imágenes ópticas cercanas a la costa, una vez procesadas, permiten identificar **turbidez generada por partículas en suspensión, materia orgánica e inorgánica y aportes de aguas residuales**, y que las formas convolutas de las plumas observadas se corresponden con estructuras lagrangianas calculadas a partir del modelo. Esto se utiliza como criterio cuantitativo de ajuste entre modelo y observación, confirmando la utilidad de Sentinel-2 para caracterizar plumas de efluentes y su transporte en zonas costeras.

6. Conclusiones

1. El informe de la ULPGC-ICMAT/CSIC enviado a PLATECA en noviembre 2025 **no afirma** que Sentinel-2 detecte ácido sulfhídrico de forma directa, sino que identifica una pluma anómala cuya firma espectral es **compatible con un vertido industrial ligado a tres compuestos de azufre**, formulado siempre en términos de “potencial vertido” y “especies similares”.
2. Se reconocen las limitaciones de los satélites para una identificación química inequívoca; sin embargo, su uso para la **detección, delimitación y clasificación óptica** de plumas costeras es metodológicamente sólido y está alineado con la práctica internacional.
3. Este esquema, adaptado de forma prudente a Sentinel-2, es una base razonable para calificar la pluma del emisario 222 como **responsable de un vertido rico en azufre y relacionado con la avería en el difusor**.
4. La coincidencia entre: (i) la aparición de la **pluma en el punto del emisario**, (ii) su **evolución temporal**, (iii) su **patrón espectral** y (iv) **la mortalidad masiva** en las jaulas, constituyen un conjunto de indicios que justifican plenamente nuestra hipótesis de trabajo y la necesidad de una investigación más profunda con muestreos in situ específicos.
5. Estas técnicas radiométricas derivadas de satélites de observación específicas para aguas costeras, refuerzan la posición de que **las evidencias satelitales actuales son suficientemente robustas como para justificar esa investigación**, y no deben ser descartadas por las capacidades de Sentinel-2

Agradecimientos

Este informe y la dedicación de los investigadores se hace bajo un proyecto competitivo: SIRENA: Sistema Remoto Integral de Monitorización, Detección y Predicción de Riesgos de Eventos Marinos Potencialmente Nocivos de Origen Natural o Antrópico en Áreas Off-Shore Destinadas a la Acuicultura.

Se desarrolla con la colaboración de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través del Programa Pleamar, y se cofinancia por la Unión Europea por el FEMPA (Fondo Europeo Marítimo, de Pesca y de Acuicultura).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Coca, J., Ohde, T., Redondo, A., García-Weil, L., Santana-Casiano, M., González-Dávila, M., **A.Ramos** et al. (2014). Remote sensing of the El Hierro submarine volcanic eruption plume. *International Journal of Remote Sensing*, 35(17), 6573–6598.
- De Liz Arcari, A., et al. (2023). The Wastewater Contamination Index for mapping wastewater plumes with Sentinel-2. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1130655.
- Faria, B., Santos, P., & Calado, R. (2021). Insights for sea outfall turbid plume monitoring through Sentinel-2 high-resolution imagery. *Remote Sensing*, 13(22), 4482.
- García-Sánchez, G., **Mancho, A. Ramos, A. G.**, et al. (2022). Structured pathways in the turbulence organizing recent oil spill events in the Eastern Mediterranean. *Scientific Reports*, 12, 3662.
- García-Sánchez, G., **Mancho, A. G, Ramos, A. G.**, et al. (2024). Dynamical systems for remote validation of very high-resolution ocean models. *Nonlinear Dynamics*, 112, 8653–8673.
- Gierach, M. M., Holt, B., Trinh, R., Pan, B. J., & Rains, C. (2017). Satellite detection of wastewater diversion plumes in Southern California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 186, 171–182.
- Goswami, N., et al. (2023). Crystalline properties and optical processes in copper sulfide nanostructures. *Surface and Coatings Technology*, 495, 129219.
- Goyens, C., Jamet, C., & Thiria, S. (2016). Characterisation of colloidal particles in seawater by light scattering techniques. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7), 4906–4921.
- Gomez Letona, M, J. Arístegui, **A.Ramos**, M, Montero et al, (2018). .ack of impact of the El Hierro (Canary Islands) submarine volcanic eruption on the local phytoplankton community. 2018 . *Scientific Reports*. DOI:10.1038/s41598-018-2296.
- Nelson, N. B., & Siegel, D. A. (2013). The chemistry of ocean color. *Chemical Reviews*, 113(8), 5816–5843.
- Roca, M., Peixoto-Dias, C. E., Horta, P., Almaraz, P., Heredia, S., Caballero, I., et al. (2025). Massive wastewater discharge severely impacts a whole eutrophic coastal lagoon ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 221, 118532.
- Samukawa, T. (1992). Estimation of spectral refractive index of colloidal sulfur at various temperatures. *Colloid and Polymer Science*, 270, 188–193.
- Scrivner, E., et al. (2025). Hyperspectral characterization of wastewater using EMIT and Sentinel-2. *Science of the Total Environment*, 944, 173819.
- Tian, Y., et al. (2024). Dataset for sewage outfall recognition from Sentinel-2 imagery. *Scientific Data*, 11, 345.
- Wang, Y., He, X., Bai, Y., Tan, Y., Zhu, B., Wang, D., et al. (2022). Automatic detection of suspected sewage discharge from coastal outfalls based on Sentinel-2 imagery. *Science of the Total Environment*, 853, 158374.

ANEXO

IMÁGENES SATELITE: SENTINEL 2

- Las imágenes radiométricas de los satélites de la constelación europea Copernicus Sentinel-2 A, B y C sobre el emisario 222, utilizadas para el cálculo de los índices de las reflectancias entre las bandas 2 y 3, mostradas en la Figura 2, corregidas del efecto “top of atmosphere” con el algoritmo “ACOLITE”.

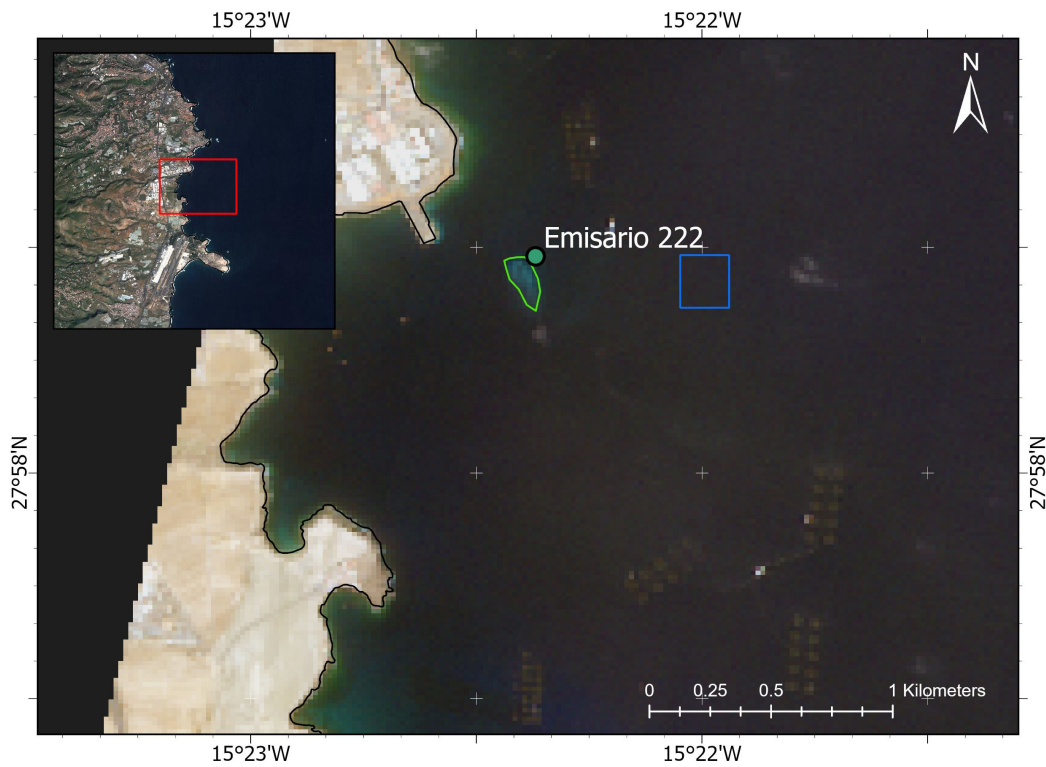


Figura 3: Imagen de Sentinel 2 tomada el 3 de octubre de 2025

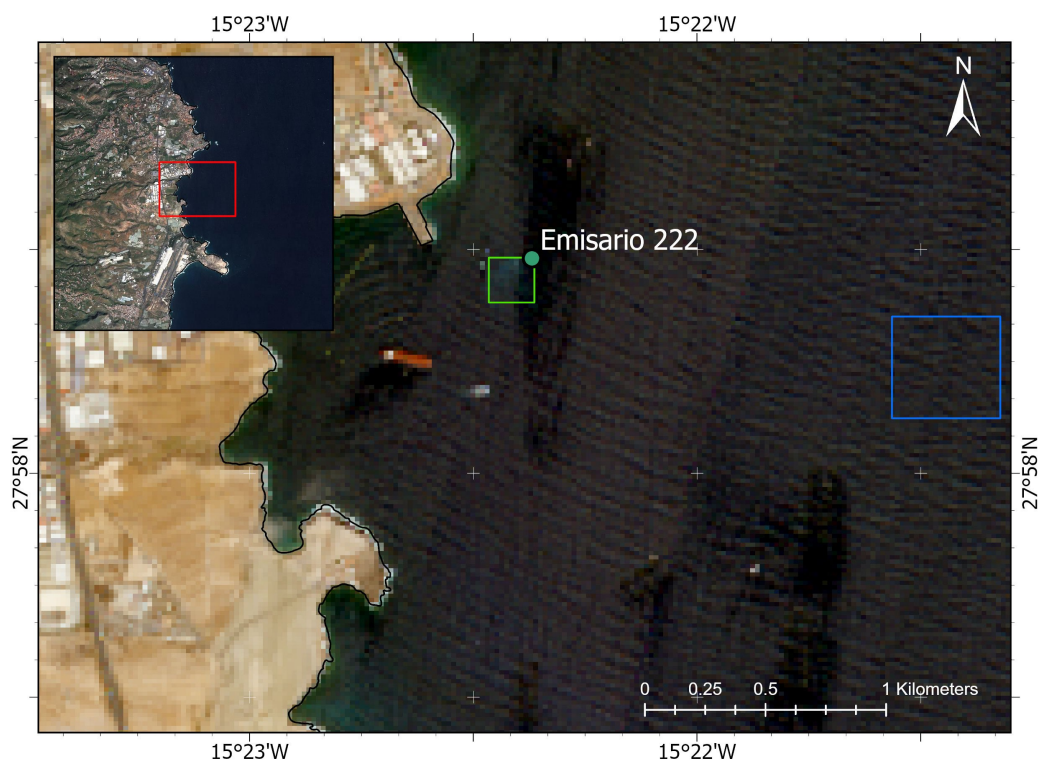


Figura 4: Imagen de Sentinel 2 tomada el 6 de octubre de 2025



Figura 5: Imagen de Sentinel 2 tomada el 26 de septiembre de 2024



Figura 6: Imagen de Sentinel 2 tomada el 27 de marzo de 2024

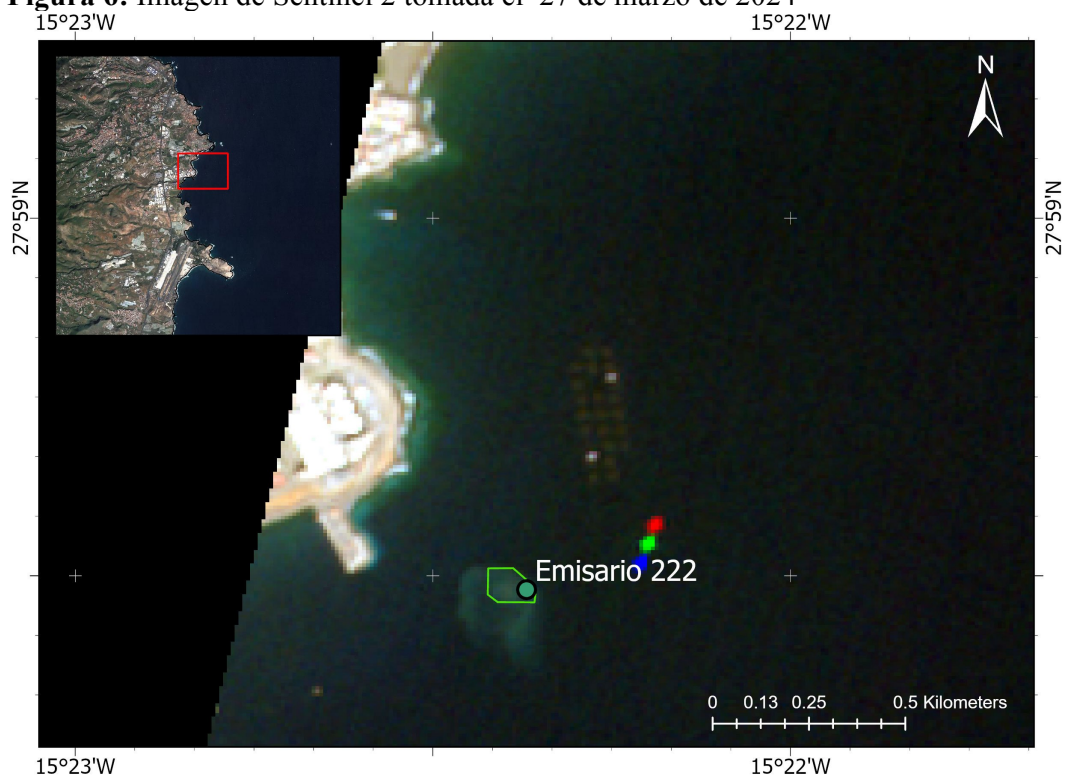


Figura 7: Imagen de Sentinel 2 tomada el 7 de enero de 2023