

Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Sistemas Informáticos



PROYECTO FIN DE GRADO

*Seguimiento de la calidad del agua mediante  
imágenes de satélite*

**Autor: Eduardo Alonso Peleato**

**Julio 2023**

*Seguimiento de la calidad del agua mediante  
imágenes de satélite*



Universidad  
Politécnica  
de Madrid

ETSI SISTEMAS  
INFORMÁTICOS

**Autor**

Eduardo Alonso Peleato

**Tutor/es**

Montserrat Hernández Viñas

Elvira Martínez de Icaya Gómez

Grado en Tecnologías para la Sociedad de la  
Información

Curso académico 2022/2023

## Abstract

Through satellite images, this work aims to monitor the water quality of the Mar Menor, the largest saltwater lagoon in Europe, located in the Region of Murcia.

The deterioration that many of these bodies of water have suffered in recent years is mainly due to the dumping of fertilisers from nearby land, which produces an enrichment of nutrients in the aquatic ecosystem (eutrophication), causing rapid growth of algae and other plants that cover the surface of the water. Consequently, light does not reach the deeper layers, and micro-organisms proliferate, feeding on the dead matter and consuming the oxygen that other species need to survive, resulting in an environmental disaster.

From a remote sensing point of view, we will focus on monitoring chlorophyll A concentrations. We will use multi-band images from the Sentinel-2 satellites, detailing how they are obtained and processed. From them, we will calculate the RI (Red tide Index), Se2WaQ, MPHBI (Maximum Peak Height Bloom Index) and Ulyssys indices, which will give us information on the amount of chlorophyll concentrated in the waters.

After calculating the proposed indices, we will analyse and obtain quantitative measurements, which involve classifying and comparing them. In addition, we will validate the results obtained with in-situ measurements in the area.

Throughout the study, we will use the most relevant GIS tools currently available, such as GDAL and QGIS, as well as other utilities explicitly developed for this work, to calculate the indices simply and orderly.

This work underlines the importance of using remote sensing and water quality indices for monitoring water bodies such as the Mar Menor. The conclusions of the paper are in line with the information on the Mar Menor that is currently available and its precarious situation. We hope that these will contribute to a better understanding of this problem and lead to an improvement in its conservation.

## Resumen

Este trabajo pretende realizar un seguimiento, a través de imágenes de satélite, de la calidad del agua del Mar Menor, la laguna salada más grande de Europa, situada en la Región de Murcia.

El deterioro que han sufrido muchos de estos cuerpos de agua en los últimos años se debe principalmente al vertido de abonos procedentes de tierras cercanas, que producen un enriquecimiento de nutrientes en el ecosistema acuático (eutrofización), provocando un crecimiento rápido de algas y otras plantas que cubren la superficie del agua. Como consecuencia, la luz no llega hasta las capas más profundas y proliferan microorganismos que se alimentan de la materia muerta y consumen el oxígeno que otras especies necesitan para sobrevivir, produciéndose un desastre medioambiental.

Desde el punto de vista de la teledetección, nos centraremos en realizar un monitoreo de las concentraciones de clorofila A. Para ello, utilizaremos imágenes multibanda de los satélites Sentinel-2, entrando en detalle en su obtención y procesado. A partir de ellas, calcularemos los índices RI (*Red tide Index*), Se2WaQ, MPHBI (*Maximum Peak Height Bloom Index*) y Ulyssys, que nos darán información sobre la cantidad de clorofila concentrada en las aguas.

Tras calcular los índices propuestos, pasaremos al análisis y la obtención de medidas cuantitativas, lo que supone clasificar los índices y compararlos entre ellos. Además de esto, validaremos los resultados obtenidos con las medidas in-situ de la zona.

A lo largo del estudio, haremos uso de las herramientas SIG más relevantes en la actualidad, como GDAL y QGis, aparte de otras utilidades desarrolladas específicamente para este trabajo con el objetivo de calcular los índices de forma sencilla y ordenada.

Este trabajo subraya la importancia de utilizar la teledetección y los índices de calidad del agua para la monitorización de cuerpos de agua como el Mar Menor. Las conclusiones del trabajo están en línea con la información sobre el Mar Menor que se puede encontrar actualmente, y su precaria situación. Esperamos que estas contribuyan a mejorar la comprensión de este problema y esto contribuya en una mejora en su conservación.

## Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a mis dos tutoras, Montse y Elvira, cuyo apoyo ha sido fundamental para la realización de este trabajo.

Ambas han proporcionado orientación, apoyo y ánimo (muy importante) durante toda la elaboración del proyecto, y gracias a ellas, he sido capaz de concluir el trabajo de forma satisfactoria, cumpliendo los objetivos propuestos.

# Índice

Abstract .....	3
Resumen.....	4
Agradecimientos .....	5
Índice.....	6
Tabla de figuras .....	8
1. Introducción .....	10
1.1 Motivación .....	10
1.2 Objetivos .....	10
2. Introducción a la teledetección.....	12
2.1 Usos de la teledetección .....	12
2.2 Programa Copernicus.....	13
2.3 Misión Sentinel-2 .....	14
2.4 Misión Sentinel-3 .....	14
2.5 Misión Landsat-8.....	14
3. Herramientas utilizadas .....	15
3.1 Acolite .....	15
3.2 PyCharm .....	15
3.3 QGis .....	16
3.4 GDAL.....	18
3.5 Jupyter.....	18
3.6 Panoply.....	18
3.7 Snap.....	19
4. El Mar Menor .....	21
5. Determinación de la calidad del agua .....	22
6. Metodología .....	25
6.1 Formatos de imagen en teledetección.....	26
6.2 Obtención de las imágenes .....	27
6.2.1 Sentinel Hub .....	27
6.2.2 Copernicus Hub .....	28
3.1.3 Formato SAFE .....	29
6.3 Corrección atmosférica .....	30
6.4 Recorte .....	32

7.	Cálculo de índices.....	34
7.1	Índice RI.....	34
7.2	Descarga y adaptación de índices de Sentinel Hub.....	38
7.3	Calculadora de bandas .....	39
7.4	Índice se2waq.....	39
7.5	Índice Maximum Peak Height Bloom Index .....	41
7.6	Índice Ulyssys Water Quality Viewer .....	43
8.	Comparación de índices .....	44
9.	Validación de los resultados obtenidos .....	50
9.1	Comparación con datos in-situ.....	51
9.2	Comparación usando el coeficiente de silueta .....	54
9.2.1	Cálculo del coeficiente de silueta.....	54
10.	Conclusiones.....	55
11.	Trabajo futuro .....	57
12.	Impacto social y medioambiental .....	58
13.	Bibliografía .....	60
Anexo 1 – Imágenes de 2016-2021 .....		61
	Índice RI.....	61
	Índice Se2WaQ.....	67
	Índice MPHBI.....	73
	Índice Ulyssys .....	79

## Tabla de figuras

Ilustración 1: Instrumento MSI. ....	13
Ilustración 2: Captura de PyCharm con un cuaderno de Jupyter del proyecto abierto.....	16
Ilustración 3: Captura de QGis con una imagen abierta del Mar Menor .....	17
Ilustración 4: Visor de Panoply.....	19
Ilustración 5: SNAP con un tile de Sentinel-2 abierto .....	20
Ilustración 6: Diagrama de bloques de la metodología empleada .....	25
Ilustración 7: Fragmento del mapa de tiles de Sentinel-2 .....	26
Ilustración 8: Interfaz de Copernicus Hub.....	28
Ilustración 9: Formato SAFE .....	29
Ilustración 10: Interfaz de ACOLITE en Windows.....	31
Ilustración 11: Recorte del Mar Menor en naranja.....	33
Ilustración 12: Calculadora ráster de QGis.....	35
Ilustración 13: Índice RI aplicado a la imagen de 2019 .....	36
Ilustración 14: Índice RI aplicado a la imagen de 2019 clasificado .....	37
Ilustración 15: EO Browser enfocado al Mar Menor.....	38
Ilustración 16: Índice Se2WaQ en modo clorofila A para la imagen del 2019.....	40
Ilustración 17: Índice MPHBI para la imagen de 2019 .....	42
Ilustración 18: Índice Ulyssys para la imagen de 2019.....	43
Ilustración 19: Comparación de los índices de 2019.....	44
Ilustración 20: Tabla de extensión por capas.....	45
Ilustración 21: Tabla de resultados del nivel de calidad muy baja.....	46
Ilustración 22: Tabla de resultados del nivel de calidad baja.....	46
Ilustración 23: Tabla de resultados del nivel de calidad media .....	47
Ilustración 24: Tabla de resultados del nivel de calidad alta .....	47
Ilustración 25: Tabla de resultados del nivel de calidad muy alta .....	48
Ilustración 26: Titular de El País de 2019 sobre el Mar Menor .....	49
Ilustración 27: Capa SCL de Sentinel-2.....	51
Ilustración 28: Datos Insitu sobre clorofila .....	52
Ilustración 29: Mapa de datos in-situ de clorofila de 2019.....	53
Ilustración 30: Coeficiente de silueta para todos los índices .....	54
Ilustración 31: Resultado de Google Trend para el Mar Menor desde 2016 hasta 2023 .....	58
Ilustración 32: Índice RI aplicado al año 2016 clasificado .....	61
Ilustración 33: Índice RI aplicado al año 2016.....	61
Ilustración 34: Índice RI aplicado al año 2017 clasificado .....	62
Ilustración 35: Índice RI aplicado al año 2017.....	62
Ilustración 36: Índice RI aplicado al año 2018 clasificado .....	63
Ilustración 37: Índice RI aplicado al año 2018.....	63
Ilustración 38: Índice RI aplicado al año 2019 clasificado .....	64
Ilustración 39: Índice RI aplicado al año 2019.....	64
Ilustración 40: Índice RI aplicado al año 2020 clasificado .....	65
Ilustración 41: Índice RI aplicado al año 2020.....	65
Ilustración 42: Índice RI aplicado al año 2021 clasificado .....	66
Ilustración 43: Índice RI aplicado al año 2021.....	66
Ilustración 44: Índice Se2WaQ aplicado al año 2016 .....	67
Ilustración 45: Índice Se2WaQ aplicado al año 2016 clasificado .....	67
Ilustración 46: Índice Se2WaQ aplicado al año 2017 .....	68

Ilustración 47: Índice Se2WaQ aplicado al año 2017 clasificado .....	68
Ilustración 48: Índice Se2WaQ aplicado al año 2018 .....	69
Ilustración 49: Índice Se2WaQ aplicado al año 2018 clasificado .....	69
Ilustración 50: Índice Se2WaQ aplicado al año 2019 .....	70
Ilustración 51: Índice Se2WaQ aplicado al año 2019 clasificado .....	70
Ilustración 52: Índice Se2WaQ aplicado al año 2020 .....	71
Ilustración 53: Índice Se2WaQ aplicado al año 2020 clasificado .....	71
Ilustración 54: Índice Se2WaQ aplicado al año 2021 .....	72
Ilustración 55: Índice Se2WaQ aplicado al año 2021 clasificado .....	72
Ilustración 56: Índice MPHBI aplicado al año 2016 clasificado .....	73
Ilustración 57: Índice MPHBI aplicado al año 2016 .....	73
Ilustración 58: Índice MPHBI aplicado al año 2017 clasificado .....	74
Ilustración 59: Índice MPHBI aplicado al año 2017 .....	74
Ilustración 60: Índice MPHBI aplicado al año 2018 clasificado .....	75
Ilustración 61: Índice MPHBI aplicado al año 2018 .....	75
Ilustración 62: Índice MPHBI aplicado al año 2019 clasificado .....	76
Ilustración 63: Índice MPHBI aplicado al año 2019 .....	76
Ilustración 64: Índice MPHBI aplicado al año 2020 clasificado .....	77
Ilustración 65: Índice MPHBI aplicado al año 2020 .....	77
Ilustración 66: Índice MPHBI aplicado al año 2021 .....	78
Ilustración 67: Índice MPHBI aplicado al año 2021 clasificado .....	78
Ilustración 68: Índice Ulyssys aplicado al año 2016 clasificado .....	79
Ilustración 69: Índice Ulyssys aplicado al año 2016 .....	79
Ilustración 70: Índice Ulyssys aplicado al año 2017 clasificado .....	80
Ilustración 71: Índice Ulyssys aplicado al año 2017 .....	80
Ilustración 72: Índice Ulyssys aplicado al año 2018 .....	81
Ilustración 73: Índice Ulyssys aplicado al año 2018 clasificado .....	81
Ilustración 74: Índice Ulyssys aplicado al año 2019 clasificado .....	82
Ilustración 75: Índice Ulyssys aplicado al año 2019 .....	82
Ilustración 76: Índice Ulyssys aplicado al año 2020 .....	83
Ilustración 77: Índice Ulyssys aplicado al año 2020 clasificado .....	83
Ilustración 78: Índice Ulyssys aplicado al año 2021 clasificado .....	84
Ilustración 79: Índice Ulyssys aplicado al año 2021 .....	84

## 1. Introducción

El Mar Menor está situado en Cartagena (Murcia) y es considerado la mayor laguna salada de toda Europa.

La zona que lo rodea ha estado ocupada de forma permanente por poblamientos humanos desde el Paleolítico, lo que ha causado un gran impacto y modificaciones en su entorno, flora y fauna.

Es un lugar de cría y refugio para decenas de aves marinas y otros seres vivos que habitan en sus aguas, islas y orillas. Esto le otorga una vital importancia natural, que se ve respaldada por la distinción de espacio protegido Red Natura 2000 "MAR MENOR", Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) y está incluida en lista de humedales de importancia internacional del Convenio de Ramsar, para el Movimiento conservacionista y la sostenibilidad de los humedales.

### 1.1 Motivación

La situación del Mar Menor es límite debido a la contaminación. El alto nivel de fitoplancton es un claro indicador de la contaminación de sus aguas. La principal causa para su proliferación es la eutrofización. Esta se produce por el exceso de nutrientes en el agua debido al vertido de aguas y residuos urbanos y agrícolas, la filtración procedente del subsuelo rica en nitratos, el aumento de la acuicultura y la acción de las líneas de transporte marítimo en el entorno, entre otras causas.

La motivación principal de este trabajo es estudiar cuantitativamente la evolución de la calidad del agua del Mar Menor entre los años 2016 y 2021 por medio de teledetección, utilizando imágenes de satélite, para mostrar el deterioro progresivo de este privilegiado entorno, al que, si no se pone freno de forma inmediata, acabará haciéndolo irrecuperable.

### 1.2 Objetivos

Los objetivos que se han fijado son:

- Procesado de las imágenes de satélite del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, de libre acceso.
- Estudio y selección de diferentes índices, mediante la combinación de diferentes bandas del espectro de observación, para determinar los más efectivos.
- Aplicar los índices seleccionados para clasificar las imágenes de satélite para obtener una medida cuantitativa de la calidad del agua, teniendo en cuenta valores como la turbidez o el contenido de clorofila en la misma.
- Validar los resultados obtenidos mediante dichos índices por medio de medidas obtenidas in-situ.

Con todo ello, se dispondrá de un modelo y unas herramientas que permitirán el análisis de entornos naturales utilizando imágenes de satélite, con múltiples aplicaciones.

## 2. Introducción a la teledetección

La teledetección se define como la ciencia o arte de adquirir información sin contacto directo entre “captador” y “objetivo”. Un sistema de teledetección comprende distintos elementos, entre ellos, una fuente de energía (en este caso el sol) que transmite energía al objetivo (en este caso la superficie terrestre), un sistema sensor (en este caso el del satélite), un sistema de detección que sea capaz de obtener las imágenes del sensor y finalmente un intérprete (nosotros), que nos encargamos de interpretar los datos y obtener unas conclusiones a partir de ellos.

### 2.1 Usos de la teledetección

Entre las diversas aplicaciones de la teledetección, se encuentran aplicaciones agrarias, acuáticas, atmosféricas, etc.

Por ejemplo, en cuanto a la agricultura, hay una demanda por parte del sector agrario de obtener métricas e información valiosa gracias a la teledetección. Factores como la sequía, la pérdida de nutrientes y la erosión del suelo hieren a este sector. Actualmente, es posible utilizar la teledetección para monitorizar la salud de los cultivos, la producción esperada, o el estado del suelo. Esto otorga una anticipación a los agricultores que puede llevar a unos cultivos de mayor calidad y con un menor coste tanto económico como medioambiental.

Las aplicaciones acuáticas de la teledetección son las más relevantes para este estudio. Garantizar la preservación y calidad de las masas de agua terrestres es vital dada la absoluta dependencia del ser humano hacia el agua. La teledetección ofrece una forma de monitorización capaz de impedir desastres y poner en peligro la calidad del agua, ya sea con altímetros que determinen su nivel, como los que encontramos en Sentinel-3, del que hablaremos más adelante o con espectrómetros, que utilizaremos en este estudio, capaces de detectar cambios en la coloración del agua que posteriormente se pueden caracterizar como sedimentos, clorofila u otros diversos contaminantes.

La humedad del suelo es un dato que también se puede extraer gracias a la teledetección, esto enlaza con lo expuesto anteriormente sobre la agricultura, ya que los cambios en la humedad del terreno pueden indicar riesgo de sequía.

Los océanos son también susceptibles de aplicar teledetección, los océanos proporcionan una muy elevada parte del oxígeno que hay en la tierra y atrapan el dióxido de carbono, evitando un mayor calentamiento de la tierra. El estudio de patrones de vientos y corrientes ayudan a estudiar nuevas rutas marítimas más eficientes.

Como último ejemplo tenemos los desastres naturales. Con el creciente número de incendios forestales que sufrimos sobre todo en época veraniega, la teledetección es una herramienta que nos permite en un periodo muy corto de tiempo caracterizar el alcance de un incendio, el efecto que ha tenido en cada zona, y la comparación de esas mismas zonas afectadas con imágenes de archivo de cuando el incendio todavía no se

había producido, además de poder visualizar la evolución gracias al corto tiempo de revisita de los satélites más actuales.

Otro tipo de desastres como las erupciones volcánicas también son interesantes casos de estudio con teledetección, ya que no sólo permiten estudiar los daños producidos en tierra, sino que el alcance del material suspendido en el aire puede ser estudiado por ejemplo para garantizar la seguridad del tráfico aéreo.

## 2.2 Programa Copernicus

En este trabajo se va a utilizar la información obtenida por los satélites del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, por lo que los resultados que obtenemos del sensor son imágenes multispectrales.

El programa Copernicus comprende una serie de misiones de observación de la Tierra, denominadas Sentinel. El objetivo del programa Sentinel es reemplazar las misiones anteriores de observación de la Tierra que se han retirado, como las misiones ERS y Envisat, o que actualmente se acercan al final de su vida operativa. Esto garantizará la continuidad de los datos para que no haya lagunas en los estudios en curso.

Hasta la fecha se han desarrollado 7 misiones Sentinel, cada una se centra en un aspecto diferente de la observación de la Tierra: monitorización atmosférica, oceánica y terrestre, y los datos son útiles en muchas aplicaciones. Para este trabajo utilizaremos imágenes de la misión Sentinel 2.

El satélite Sentinel 2 lleva a bordo un instrumento conocido como “MultiSpectral instrument” o MSI. Este instrumento mide la radiación reflejada por la tierra en 13 bandas, desde la VNIR (Visible and Near Infrared) a la SWIR (Short Wave Infrared). Cada una de estas bandas permite una resolución espacial determinada, que cuantifica el tamaño más pequeño que puede ser distinguido en la imagen. En el caso de Sentinel 2A, la resolución se especifica mediante cuadrados cuyo lado varía entre los 10 a los 60 metros.

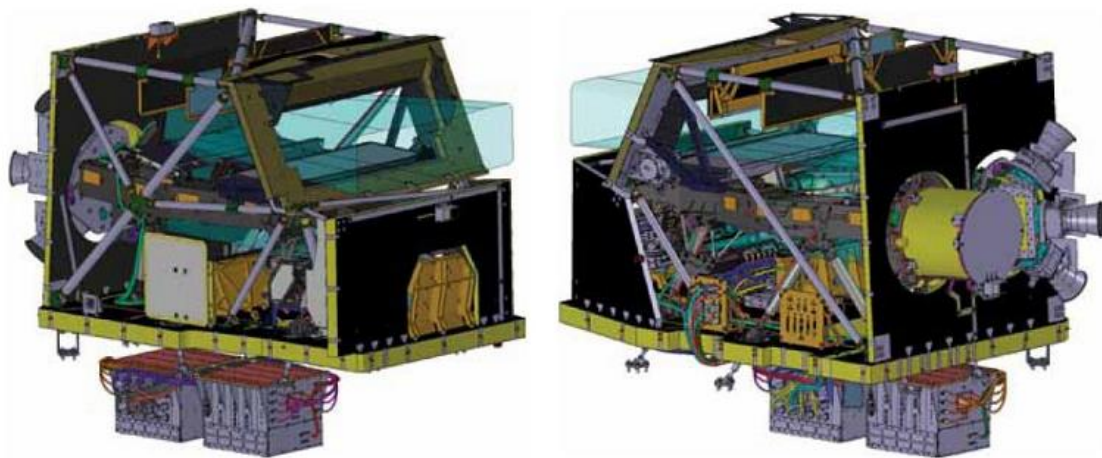


Ilustración 1: Instrumento MSI.

Tomada de “MultiSpectral Instrument (MSI) Overview” disponible en <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>

### 2.3 Misión Sentinel-2

Sentinel-2 es una misión espacial desarrollada por la Agencia Espacial Europea que fue lanzada al espacio a mediados de 2015 con su primer satélite, Sentinel-2A. A este satélite se le sumó uno idéntico llamado Sentinel-2B en 2017. Estos dos satélites están en la misma órbita, separados 180 grados para minimizar el tiempo de revisita de una misma zona, que es de cinco días.

La misión Sentinel-2 está enfocada a la vigilancia medioambiental. Su alta resolución y gran campo de visión suministran una información sin precedentes para las prácticas relativas a la agricultura. Sentinel-2 proporciona imágenes útiles para aplicar índices vegetales y acuáticos gracias a sus 13 bandas espectrales.

La misión Sentinel-2 es propiedad de la Comisión Europea, por lo que podemos disfrutar de todo su catálogo de imágenes de forma gratuita.

### 2.4 Misión Sentinel-3

A diferencia de Sentinel-2, Sentinel-3 lleva a bordo dos instrumentos que permiten especializarse más en los distintos entornos de la tierra como los océanos, el hielo o la atmósfera. Como Sentinel-2, esta misión está formada por dos satélites idénticos separados 180 grados en la misma órbita. El tiempo de revisita para el instrumento OLCI por ejemplo, que sería el análogo al MSI de Sentinel-2, es de 2 días en vez de 5.

Sentinel-3 es capaz de medir la temperatura, la altura y el color de la superficie del agua, al igual que el espesor del hielo.

Aparte del anteriormente mencionado OLCI, que cubre 21 bandas espectrales (desde 400 hasta 1020nm), también cuenta con el instrumento SLSTR. Este instrumento es un radiómetro que abarca desde los 550 a los 12.000 nm para medir la temperatura superficial del mar y de la tierra.

Al igual que con Sentinel-2, todos los datos tomados por Sentinel-3 son de libre acceso al público.

### 2.5 Misión Landsat-8

El programa Landsat es la iniciativa de la NASA para poner en órbita una serie de satélites de observación de la tierra, al igual que el programa Sentinel de la ESA. Este programa lleva en activo desde que se lanzó al espacio el primer satélite Landsat-1 en 1972.

Landsat-1 fue el primer satélite lanzado al espacio con el objetivo de la observación de la tierra. Landsat-1 poseía dos instrumentos, siendo el más importante una cámara multiespectral con tan solo 4 bandas.

Mucho ha cambiado desde el lanzamiento de Landsat-1, hasta hoy en día que contamos con Landsat-8 y sus 9 bandas en los instrumentos OLI y TIRS, en los que se aprecia cierto paralelismo con Sentinel-3.

### 3. Herramientas utilizadas

En este capítulo pasamos a enumerar y describir las distintas herramientas que se han utilizado para la elaboración de este trabajo.

#### 3.1 Acolite

Se trata de un programa desarrollado por el Royal Belgian Institute of Natural Sciences escrito en Python y encargado de hacer la corrección atmosférica.

Hemos obtenido este software desde su página de GitHub y ha sido el único con el que hemos corregido atmosféricamente las imágenes. Su facilidad de uso nos ha ahorrado mucho tiempo en hacer pruebas con distintos algoritmos.

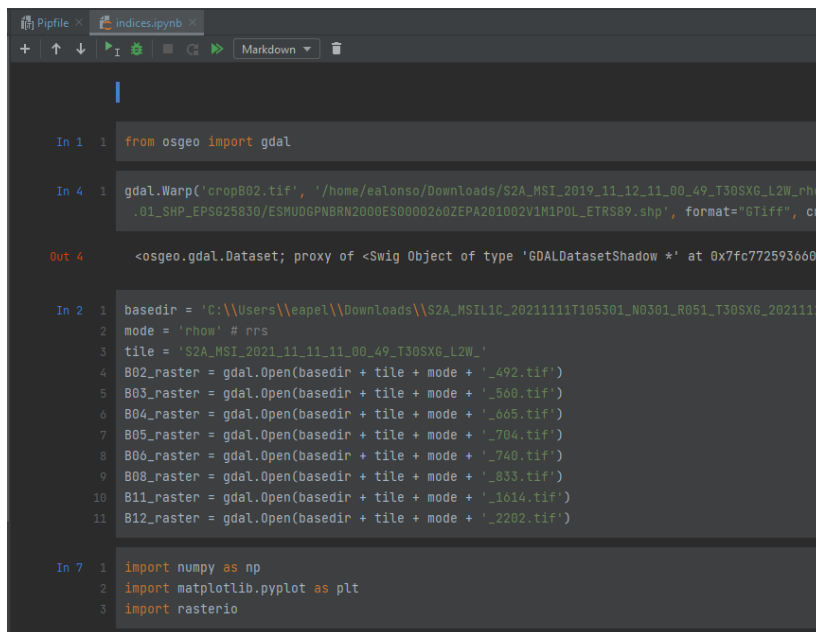
En sus últimas versiones, Acolite cuenta con novedosos algoritmos y mejoras, como la posibilidad de obtener la temperatura superficial del agua de imágenes de Landsat-8 utilizando la banda de datos térmicos como explica su autor (Van Hellemont, 2020).

#### 3.2 PyCharm

PyCharm es un potente IDE desarrollado por la empresa JetBrains para el desarrollo de código en Python. Este entorno de desarrollo cuenta con todas las funciones esperables en un entorno moderno y profesional.

PyCharm no sólo nos permite desarrollar código en Python, sino que tiene integración total con Git, permitiéndonos hacer control de cambios con mucha facilidad. También soporta cuadernos de Jupyter de forma totalmente integrada, lo que facilita el desarrollo en etapas de prototipado y evita el tener que utilizar otras herramientas como podría ser un navegador web. A esto se le suma la gestión de paquetes y entornos Python.

Todo el código de este proyecto ha sido desarrollado desde PyCharm.



```
Pipfile x indices.ipynb x
+ ↑ ↓ I C ⌂ Markdown 🗑️

In 1 1 from osgeo import gdal

In 4 1 gdal.Warp('cropB02.tif', '/home/eaalonso/Downloads/S2A_MSI_2019_11_12_11_00_49_T30SX6_L2W_rhob...
    .01_SHP_EPSG625830/ESMUDGPNBRN2000ES0000260ZEPA201002V1M1POL_ETRS89.shp', format="GTiff", crs

Out 4 <osgeo.gdal.Dataset; proxy of <Swig Object of type 'GDALDatasetShadow *' at 0x7fc772593660>

In 2 1 basedir = 'C:\\Users\\eapel\\Downloads\\S2A_MSI_20211111T105301_N0301_R051_T30SX6_20211111...
    2 mode = 'rhow' # rrs
    3 tile = 'S2A_MSI_2021_11_11_00_49_T30SX6_L2W_'
    4 B02_raster = gdal.Open(basedir + tile + mode + '_492.tif')
    5 B03_raster = gdal.Open(basedir + tile + mode + '_560.tif')
    6 B04_raster = gdal.Open(basedir + tile + mode + '_665.tif')
    7 B05_raster = gdal.Open(basedir + tile + mode + '_704.tif')
    8 B06_raster = gdal.Open(basedir + tile + mode + '_740.tif')
    9 B08_raster = gdal.Open(basedir + tile + mode + '_833.tif')
    10 B11_raster = gdal.Open(basedir + tile + mode + '_1614.tif')
    11 B12_raster = gdal.Open(basedir + tile + mode + '_2202.tif')

In 7 1 import numpy as np
    2 import matplotlib.pyplot as plt
    3 import rasterio
```

Ilustración 2: Captura de PyCharm con un cuaderno de Jupyter del proyecto abierto

### 3.3 QGIS

QGIS es un programa de código abierto y libre distribución, desarrollado por la comunidad QGIS. Esto quiere decir que es mantenido por voluntarios y organizaciones, por lo que cualquiera puede involucrarse en su desarrollo.

QGIS es el sistema de información geográfica de código abierto de referencia. Su única competencia viene de productos propietarios como ArcGIS.

En este proyecto hemos utilizado QGIS para ver y manipular todas las imágenes. En ausencia de herramientas automáticas, QGIS nos ha permitido abrir y ver rásters y capas vectoriales, cortar dichos rásters, crear una clasificación basada en k-medias y visualizar de forma personalizada las imágenes.

QGIS ha sido instrumental en este trabajo, nos ha permitido manipular imágenes multiespectrales de forma gratuita con una gran facilidad de uso, y de no existir, hubiéramos tenido que buscar una alternativa.

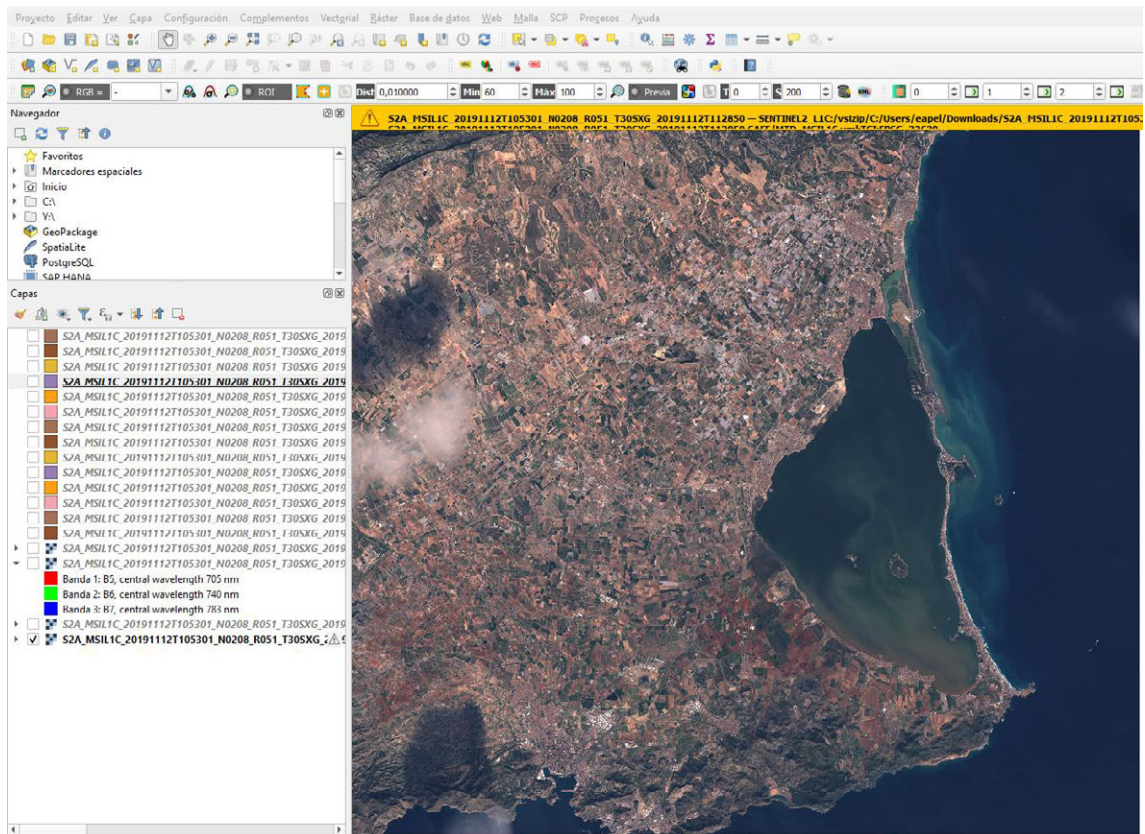


Ilustración 3: Captura de QGIS con una imagen abierta del Mar Menor

### 3.4 GDAL

GDAL es una muy reconocida y potente biblioteca para trabajar con datos geoespaciales, ya sean de tipo ráster o vectorial. GDAL es de código abierto y es ampliamente utilizada por investigadores en teledetección. Programas como QGis, basan su funcionamiento interno en llamadas a GDAL.

Esta biblioteca permite trabajar con ficheros como GeoTIFF, NetCDF, Shapefile o GeoJSON. En este trabajo, el uso de GDAL ha sido mayoritariamente utilizado para transformar imágenes. En ciertas partes del trabajo hemos necesitado re-proyectar la banda 1 de Sentinel-2 de 60 a 10 metros de resolución, esto lo hemos hecho gracias a GDAL. También lo hemos utilizado para analizar datos, ya que GDAL nos permite acceder al valor de cada píxel en una imagen. Esto queda bien explicado en el apartado 7.3.

Otra utilidad de GDAL que hemos utilizado en este trabajo es la de cortar imágenes. Para el cálculo de todos los índices, hemos utilizado una capa vectorial (en formato Shapefile) con la forma del mar Menor con la que hemos recortado los *tiles* de Sentinel-2 a la medida de estudio.

### 3.5 Jupyter

El proyecto Jupyter, y en concreto los *notebooks* de Jupyter, forman parte de un entorno web interactivo para programar en Python. Estos *notebooks* son sencillamente *scripts* de Python que se pueden ejecutar por partes, por lo que se crean celdas de código (también existen celdas de texto con soporte *markdown* para escribir comentarios o documentación) que se pueden ejecutar secuencialmente o bajo demanda.

Normalmente los *notebooks* de Jupyter se utilizan en la fase de prototipado de un proyecto o para investigación científica, que se beneficia por ejemplo de poder visualizar partes de un procesado en el navegador web paso por paso, ya que por ejemplo permite imprimir objetos arbitrarios con la sentencia *print* o mostrar gráficos creados con *matplotlib*.

En el caso de nuestro estudio, empezamos a utilizar *notebooks* de Jupyter al principio del desarrollo para hacer pruebas. Por ejemplo, una celda sirve para importar las bibliotecas de Python que necesitamos, otra celda se encarga de hacer el recorte de imágenes, otra de ejecutar Acolite... Esto otorga mucha flexibilidad, ya que quizás tenemos una imagen ya cortada y únicamente queremos aplicar un índice, o visualizar cierta información sin ejecutar todo el script.

### 3.6 Panoply

Panoply es un visor de ficheros netCDF, HDF y GRIB entre otros. Es una aplicación multiplataforma escrita en Java y desarrollada por la NASA de libre distribución, aunque no es de código abierto.

En este trabajo Panoply ha ayudado a visualizar los ficheros en formato netCDF descargados de la página web del servidor de datos científicos del Mar Menor de la Universidad Politécnica de Cartagena.

El formato netCDF tiene la particularidad de que admite datos en cuatro dimensiones, esto significa que en un único fichero es posible guardar las observaciones de varios años, en vez de utilizar el formato Tiff. De este modo, dando unas coordenadas de latitud y longitud y una fecha, podemos acceder a un dato de por ejemplo cantidad de clorofila. Podemos incluso seleccionar la profundidad a la que este dato se ha medido, ocupando otra dimensión.

Panoply permite visualizar estos datos tanto en una vista cruda en la que únicamente vemos valores, como en un más útil mapa en el que podemos visualizar los datos mucho más cómodamente, como se aprecia en la Ilustración 4.

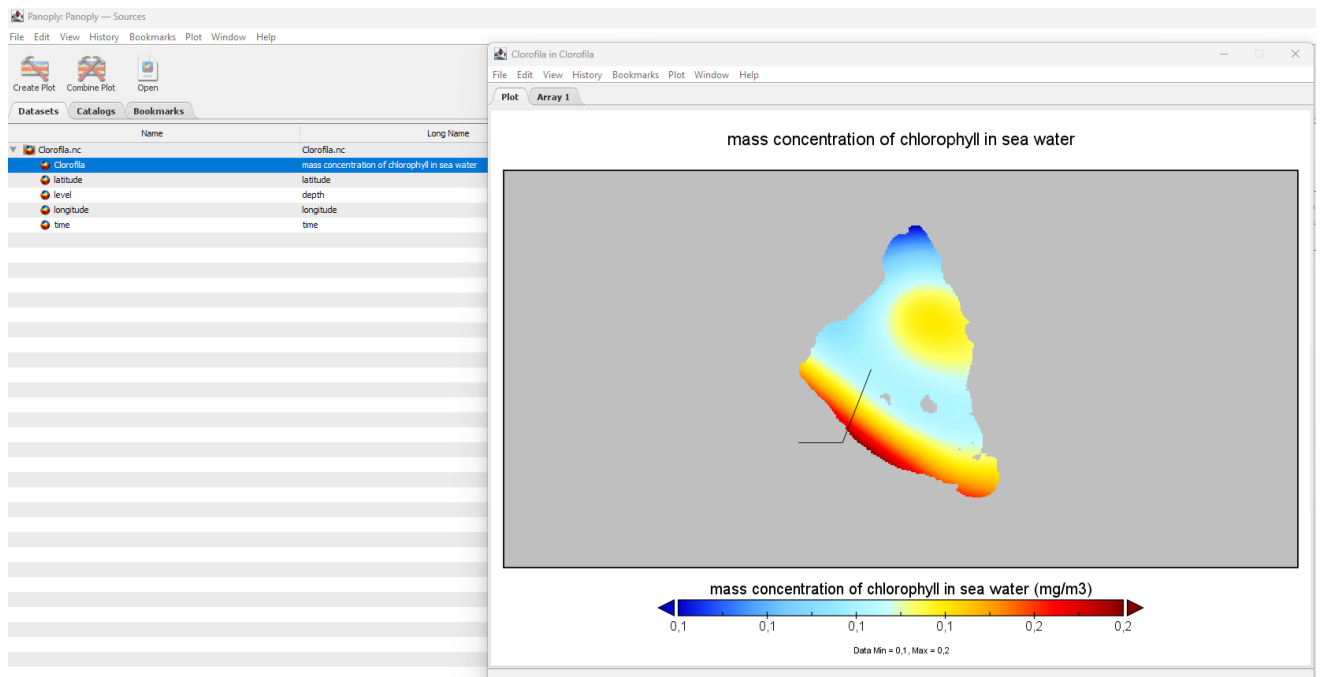


Ilustración 4: Visor de Panoply

El único inconveniente que le encontramos a este visor es la incapacidad de exportar estos datos a un formato más manejable como podría ser un fichero de texto, una imagen Tiff o un fichero CSV. Esta es una necesidad del proyecto ya que queremos calcular la media de estos datos para poder compararlos con la información que nos dan los índices, por lo que aparte de Panoply, aportamos código en Python para poder leer ficheros netCDF y extraer los datos en bruto.

### 3.7 Snap

SNAP (SentiNel Application Platform) es un programa de libre acceso y código abierto programado en Java de la Agencia Espacial Europea. SNAP es una herramienta capaz de abrir imágenes de Sentinel 1, 2 y 3 y Envisat entre otros que tiene como objetivo servir de caja de herramientas para investigadores en teledetección.

SNAP tiene integrados algoritmos de todo tipo, como aplicar máscaras, generar gráficos, clasificar, analizar cambios entre imágenes y aplicar una serie de algoritmos, como corrección atmosférica o reproyectado.

Además, dada su arquitectura, SNAP permite la instalación de extensiones o “plug-ins” que expanden aún más su funcionalidad, y permiten a los usuarios más avanzados contribuir con estas extensiones.

Para el cálculo de algunos índices, hemos utilizado SNAP para reproyectar todas las bandas a 10 metros, ya que la banda 1 en 443nm es de 60 metros por lo que necesitamos ajustarla al resto.

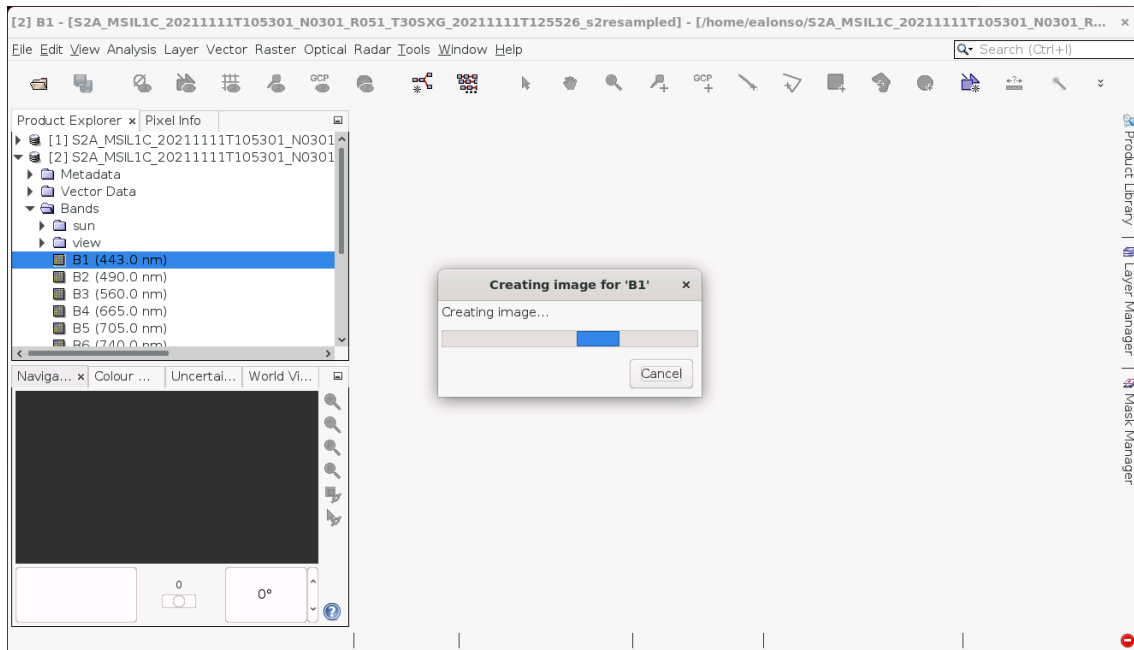


Ilustración 5: SNAP con un tile de Sentinel-2 abierto

## 4. El Mar Menor

Antes de adentrarnos en el estudio del Mar Menor y de la calidad de sus aguas, consideramos oportuno realizar una breve introducción al Mar Menor, a su posición geográfica, a sus alrededores y a la fauna que lo habita.

Como ya hemos adelantado, se trata de la laguna de agua salada más grande de Europa, se encuentra en la Región de Murcia, y forma parte de los municipios de Cartagena, Los Alcázares, San Javier y San Pedro del Pinatar. Se encuentra separado del mar Mediterráneo por una franja de arena de 22 km de longitud y de entre 100 y 1200 m de ancho, conocida como La Manga del Mar Menor, su peculiar forma semicircular se debe a las arenas y sedimentos que han sido arrastrados por las corrientes marinas desde hace 2,6 millones de años. A lo largo de su costa, que abarca 73 km, se suceden playas con aguas que solían ser transparentes, aunque a partir de mediados de la década de 2010 presentan una turbidez variable. Estas playas son poco profundas, con una profundidad máxima de 7 m. En total, el Mar Menor tiene una superficie de 135 km<sup>2</sup>.

En la parte sur del Mar Menor se encuentran cinco islas o islotes de origen volcánico.

Según el Centro Regional de Estadística de Murcia, las zonas aledañas al Mar Menor constituyeron en 2022 el 60% de las reservas hoteleras de la Región de Murcia. Esto no es de extrañar, pues la zona del Mar Menor incluye actividades deportivas como la vela, el buceo, la natación o el windsurf. Esto supone un gran ingreso económico a la región.

No obstante, su importancia está en la gran biodiversidad que aloja en sus aguas. No sólo es hogar de varias especies de peces, crustáceos y aves migratorias, sino que sus fondos marinos son también de interés, ya que ciertas algas permiten la oxigenación del agua y la protegen de la erosión de sus playas. Algunos ejemplos de especies que se pueden encontrar en el Mar Menor son la lubina, flamencos, garzas o charranes.

Como vamos a demostrar en este estudio, el Mar Menor ha sufrido en los últimos años de continuos problemas ambientales, como la pérdida de biodiversidad fruto de la eutrofización de sus aguas, causada por el turismo masivo, la agricultura de la zona y el desarrollo urbano. Esto muestra que el análisis mediante teledetección que aquí se realiza constituye un tema muy relevante y de gran actualidad.

## 5. Determinación de la calidad del agua

Para determinar la calidad del agua de un entorno natural (lagos, estanques, mares, etc) se utilizan medidas de diferentes parámetros que bien de forma aislada o conjunta proporcionan un índice de su calidad. Aquí nos centraremos en los que se usan habitualmente por los equipos científicos que estudian el Mar Menor.

Se consideran las siguientes variables ambientales:

**Temperatura:** Se trata de un factor que regula las propiedades físicas y químicas del agua, así como diversos procesos biológicos, como la velocidad del metabolismo de los organismos. En el agua de mar, la temperatura es un parámetro conservativo que indica la presencia de gradientes de energía que causan transferencia de calor. Su medida se expresa en grados centígrados (°C). En el caso del Mar Menor, en invierno la temperatura mínima oscila entre 5-8 grados, mientras que en verano alcanza los 30-31 grados. Durante el invierno, el Mar Menor se enfría más que el Mar Mediterráneo, pero en verano se calienta más que este último.

**Salinidad:** Representa la cantidad total de sales disueltas en un volumen de agua. Volumétricamente, se expresa en gramos de sal por litro de agua, aunque su medición se realiza generalmente utilizando unidades de PSU (Practical Salinity Units), que son equivalentes a las unidades volumétricas. La salinidad del Mar Menor generalmente varía entre 40 y 47 PSU, respectivamente, durante el verano e invierno, aunque puede haber variaciones locales significativas. La evaporación del agua es el principal factor que contribuye a su mayor salinidad, lo que confiere al Mar Menor su carácter hipersalino. La salinidad, junto con la temperatura, determina la densidad del agua.

**Transparencia:** La transparencia del agua se puede medir utilizando el método del disco de Secchi, que consiste en determinar la profundidad a la cual un disco blanco de 30 cm de diámetro ya no es visible desde la superficie. Esta profundidad se alcanza cuando la reflectancia iguala a la dispersión de la luz hacia atrás. Aunque no es una medida exacta del coeficiente de extinción de la luz, se utiliza como una estimación adecuada de la transparencia del agua y permite realizar comparaciones intuitivas entre diferentes cuerpos de agua.

**Clorofila:** Es la molécula utilizada por el fitoplancton (vegetales unicelulares suspendidos en el agua) para llevar a cabo la fotosíntesis, convirtiendo la materia inorgánica en biomasa mediante la energía solar. La concentración de clorofila en el agua, que confiere su color verde, se utiliza como una estimación de la biomasa del fitoplancton. Existen diferentes tipos de clorofila, siendo la clorofila a la más relevante. Por lo general, la concentración de clorofila en el agua se refiere al conjunto de clorofila A y feopigmentos (productos de degradación de la clorofila que absorben luz en las mismas longitudes de

onda). Este parámetro proporciona una aproximación de la biomasa del fitoplancton, aunque distintas células pueden contener cantidades variables de clorofila. Además, la concentración de clorofila puede variar dentro de una misma especie de fitoplancton debido a su adaptación a la intensidad de luz, concentración de nutrientes y otros factores. La medición de este parámetro se realiza comúnmente utilizando fluorómetros debido a la autofluorescencia de la clorofila a cuando se excita con luz azul. Se expresa en mg de clorofila por metro cúbico (mg/m<sup>3</sup>), equivalente a µg/L. Es importante tener en cuenta que, en aguas poco profundas como el Mar Menor, puede haber restos de vegetación sumergida que mantienen activa la clorofila o los feopigmentos en la columna de agua.

**Oxígeno:** Indica la concentración de oxígeno disuelto en el agua y se expresa en mg/L. El oxígeno es un gas presente en la atmósfera y también es producido por los vegetales acuáticos a través de la fotosíntesis. La solubilidad del oxígeno en el agua varía inversamente con la temperatura y la salinidad, y directamente con la presión. Las aguas del Mar Menor suelen tener una buena oxigenación debido al contacto de la capa superficial con la atmósfera y su redistribución por las corrientes. Durante el invierno, los valores de oxígeno disuelto suelen ser superiores a 10 mg/L, mientras que en verano pueden ser inferiores a 5 mg/L debido a los cambios de temperatura y salinidad. Cuando los valores de oxígeno disuelto descienden por debajo de 2-3 mg/L, se utiliza el término hipoxia para indicar que muchas especies no pueden tolerar niveles tan bajos para su respiración.

**Turbidez:** Refleja la cantidad de materiales suspendidos en el agua, ya sea de origen biótico o abiótico. Los sedimentos resuspendidos, las partículas de suelo (arcillas, fangos, arenas, etc.) que ingresan al agua, y los organismos suspendidos aumentan el valor de este parámetro. Se mide mediante la dispersión de la luz y se expresa en unidades de NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). También puede expresarse en relación con la turbidez generada por ciertas sustancias disueltas en agua o partículas suspendidas, como la Formazina, utilizando unidades de FTU (Unidades de Turbidez de Formazina).

**Irradiancia:** Se refiere a la cantidad de luz (potencia) que llega al agua (superficie) y se mide utilizando un radiómetro. Por lo general, se utilizan radiómetros planos ( $2\pi$ ) orientados hacia arriba para medir la irradiancia descendente en el espectro visible (400-700 nm de longitud de onda). Este rango de longitudes de onda, conocido como PAR (Photosynthetically Available Radiation) o radiación disponible para la fotosíntesis, es utilizado por las plantas acuáticas. Aunque la unidad de medida en el sistema métrico es W/m<sup>2</sup>, generalmente se expresa en micro-Einsteins (o micro-moles de fotones) por metro cuadrado y por segundo ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). La irradiancia presenta una gran

variabilidad debido al ángulo de incidencia solar y a las partículas (incluyendo el plancton) suspendidas en el agua, que absorben y dispersan la luz.

## 6. Metodología

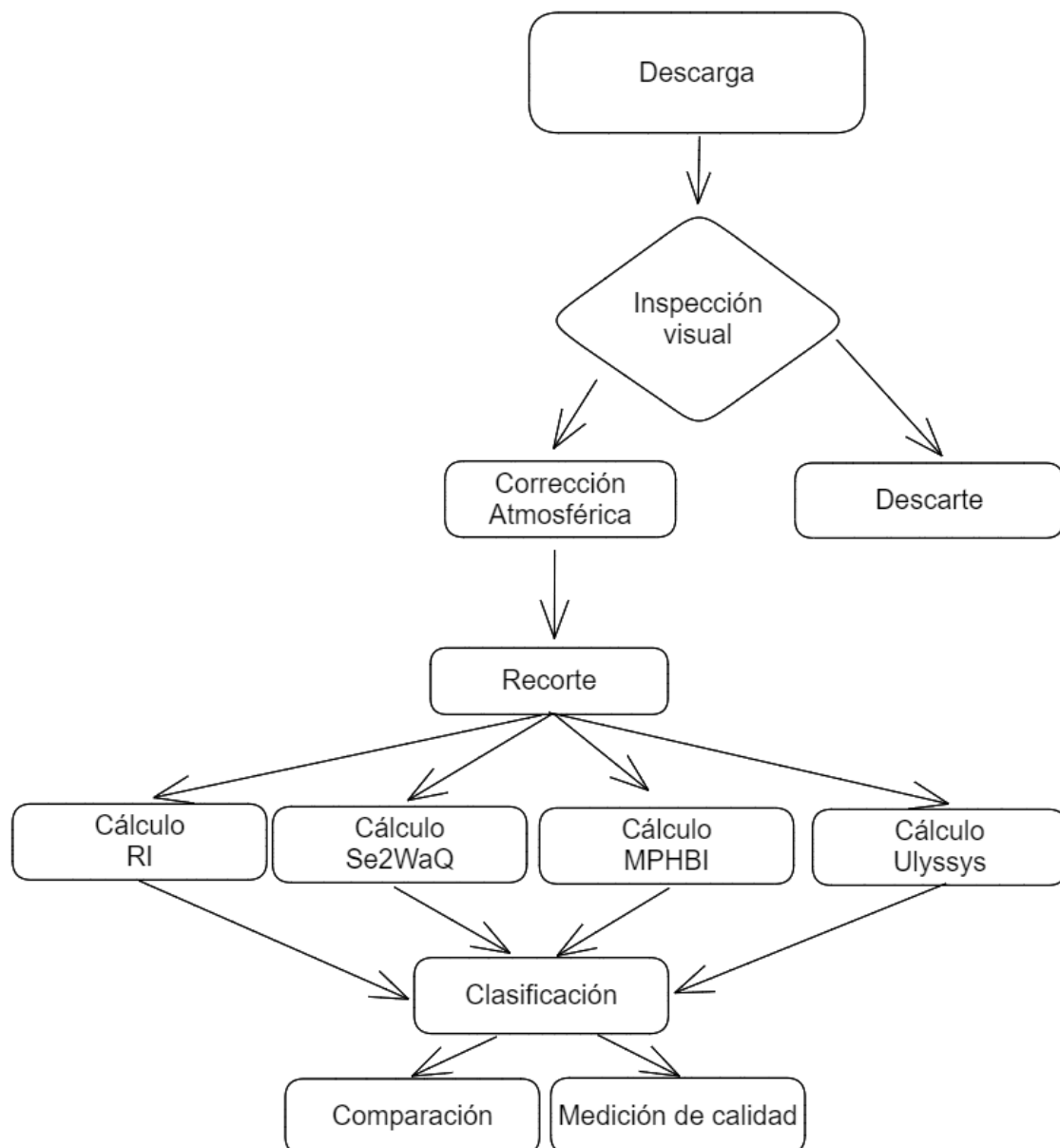


Ilustración 6: Diagrama de bloques de la metodología empleada

La Ilustración 6 muestra la metodología empleada en este trabajo. Comenzamos descargando imágenes para cada año del estudio, preferiblemente de la misma fecha. Aquí entra en juego el segundo paso, que consiste en un control manual en el que se descartan imágenes con nubes o reflejos.

Llegado el punto en el que tenemos las imágenes listas para trabajar con ellas, procedemos a su corrección atmosférica. Corregimos las imágenes y realizamos un recorte, con lo que culmina el preprocesado. Aquí aplicamos los índices a cada imagen y realizamos una clasificación para poder comparar el mismo índice entre años y distintos índices entre sí. Además, para comprobar su efectividad, contrastamos con datos in-situ.

## 6.1 Formatos de imagen en teledetección

Para un no iniciado en teledetección, puede resultar intrigante la forma de encontrar imágenes multispectrales, sus formatos y qué programas se pueden utilizar para trabajar con ellas, por lo que se hace a continuación una breve introducción a estos términos y herramientas.

El producto más común que podemos encontrar en teledetección es el “tile” o mosaico. Este concepto se refiere a todo lo que abarca un sensor como puede ser el MSI de Sentinel-2 para tomar una única imagen. Y es que esto también supone un problema, el cómo identificar a qué zona pertenece cada imagen. Para solucionarlo, la ESA creó un catálogo de tiles proyectadas en UTM/WGS84, cada una con un identificador único.

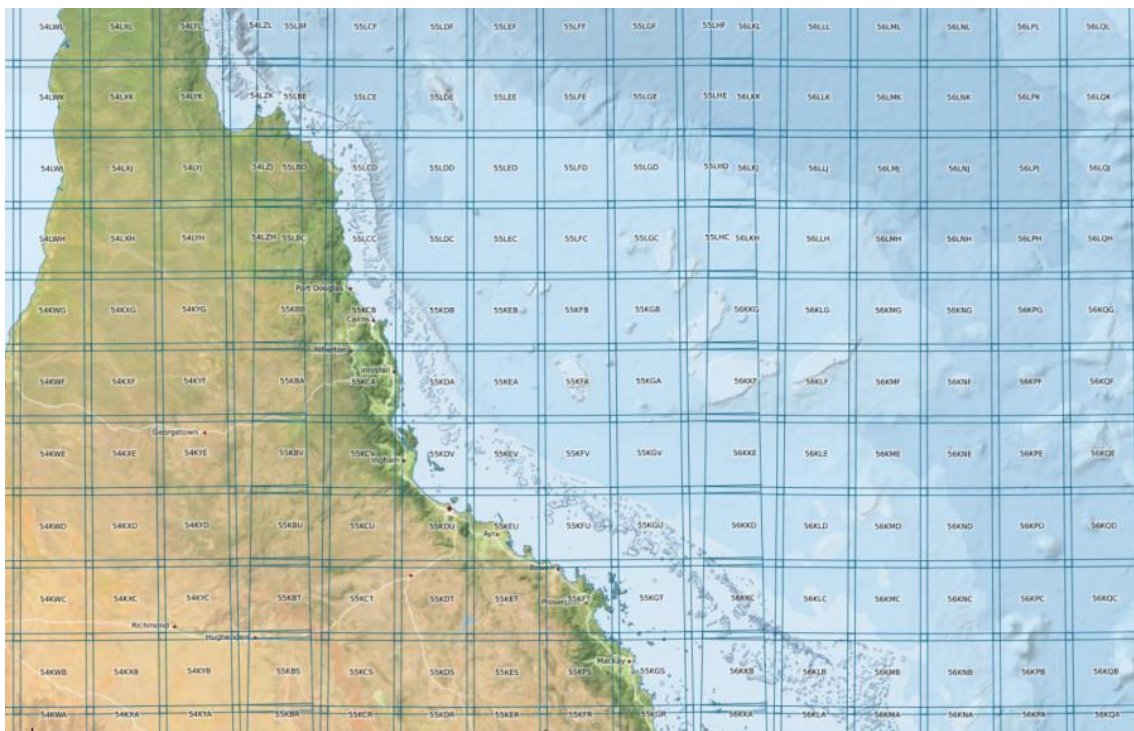


Ilustración 7: Fragmento del mapa de tiles de Sentinel-2

Tomada de “Sentinel-2 UTM Tiling Grid (ESA)” disponible en <https://eatlas.org.au/data/uuid/f7468d15-12be-4e3f-a246-b2882a324f59>

Una vez escogido un tile (la región) y una fecha, es necesario escoger el nivel de procesamiento. Habitualmente existen dos niveles de procesamiento, el 1C y el 2A.

Al capturar una imagen satelital, la radiación electromagnética terrestre atraviesa la atmósfera antes de llegar al instrumento del satélite. Este gran recorrido afecta a dicha radiación por el efecto de la absorción y la dispersión.

La absorción la causan diversos gases atmosféricos como el ozono, el dióxido de carbono o el vapor de agua, absorbiendo radiación en ciertas longitudes de onda. Esto tiene como resultado que la radiación que llega al sensor es menor de la que realmente hay.

Por otro lado, la dispersión la causan ciertas partículas que se encuentran en la atmósfera, que pueden cambiar la dirección de la radiación, causando que la radiación originalmente emitida o reflejada en un punto, se reemplace con la de otro objeto.

Resulta evidente que estos y otros fenómenos serán un inconveniente dependiendo de los cálculos que se necesite realizar, y es por eso por lo que existen diferentes niveles de procesamiento.

El nivel 1C proporciona imágenes que han sido simplemente corregidas topográficamente, para que cada píxel contenga coordenadas geográficas, imprescindible para trabajar con ellas.

El nivel 2A es más interesante, pues estas imágenes han sido corregidas para contrarrestar el efecto de la atmósfera, lo que hace que la imagen sea más fiel a la superficie terrestre.

Los valores de los píxeles de las imágenes en nivel 1C son de reflectancia del tope de la atmósfera o TOA (Top of Atmosphere) mientras que los del nivel 2A corresponden a la reflectancia de la superficie.

Una vez tenemos la imagen en nuestro poder, lo más normal es que contemos con productos en formato GeoTiff, a no ser que se traten de productos muy poco procesados. El formato GeoTiff es una extensión del formato TIFF, que es esencialmente un mapa de bits, al que se le añaden metadatos para georreferenciar la imagen, esto quiere decir que cada píxel tiene una posición en un sistema de coordenadas determinado. Las imágenes en formato Tiff o GeoTiff suelen llamarse rásters.

Estos rásters pueden tener información perteneciente a una o varias bandas. Las bandas de una imagen multispectral corresponden a una longitud de onda determinada, ya que estos sensores captan múltiples longitudes de onda, por lo que hay muchas formas de representar estas imágenes. Disponiendo de una banda azul, otra verde y otra roja, podemos construir en una herramienta GIS una imagen a color, por ejemplo.

## 6.2 Obtención de las imágenes

El primer paso una vez definido el sensor y la zona a estudiar, es obtener las imágenes relevantes para nuestro estudio. Los datos del programa Sentinel-2 son públicos, por lo que es posible encontrar imágenes en distintos portales online, entre ellos Sentinel Hub y Copernicus Hub, aunque durante la elaboración de este trabajo, se ha conocido que Google Cloud dispone de estas imágenes en colaboración con la Agencia Espacial Europea y permite descargarlas a una velocidad muy superior a Copernicus Hub.

### 6.2.1 Sentinel Hub

Sentinel Hub es un sitio web operado por y propiedad de “Sinergise Laboratory for geographical information systems, Ltd” con sede en Liubliana. Es una web de uso libre,

con opciones de pago que permite el acceso a multitud de herramientas, entre ellas, EO Browser.

EO Browser es una aplicación web que dispone de un mapa con varias opciones, pudiendo superponer las imágenes de distintos satélites, entre ellos Sentinel-2, Sentinel-3 y variedad de Landsat. Una peculiaridad de EO Browser es que hace posible aplicar índices directamente en su interfaz web, facilitando así su desarrollo y posterior descarga. Especialmente al inicio de este trabajo, cuando todavía no se ha empezado a escribir código para procesar las imágenes.

## 6.2.2 Copernicus Hub



*Ilustración 8: Interfaz de Copernicus Hub*

Por otro lado, Copernicus Hub es un sitio web operado por la Agencia Espacial Europea (ESA), que únicamente aloja imágenes de satélites del programa Sentinel (1-3 y 5). Permite el acceso a todo el catálogo de imágenes tomadas por dichos satélites, tanto a nivel 1C como 2A. Esto quiere decir que es posible descargar las imágenes con la corrección atmosférica ya aplicada, o bien descargar las imágenes sin procesar y aplicar dicha corrección por nuestra cuenta si se desea.

Para nuestro estudio se ha elegido Copernicus Hub como proveedor de imágenes, ya que, si bien EO Browser de Sentinel Hub es más cómodo y su interfaz es más amigable que la de Copernicus Hub, este únicamente permite descargar sus imágenes como GeoTiff con bandas RGB. Para nuestro estudio, nos interesa descargar las imágenes con todas sus bandas, ya que así se podrá realizar el estudio cuantitativo y calcular los índices por nuestra cuenta.

Al tratarse de un estudio anual, se debe elegir una fecha fija para obtener las imágenes de cada año. Por ello, se ha seleccionado la de principios de noviembre por su baja nubosidad, clave para obtener unas imágenes de calidad con la menor interferencia posible.

### 3.1.3 Formato SAFE

Las imágenes de Copernicus Hub se descargan en formato SAFE. Este es un formato desarrollado por la Agencia Espacial Europea como estándar para todos los productos generados por la familia de misiones Sentinel.

Este formato incluye las imágenes en forma JPEG2000, indicadores de calidad y datos auxiliares. Estos datos auxiliares sirven para proveer una máscara de píxeles defectuosos y demás metadatos.

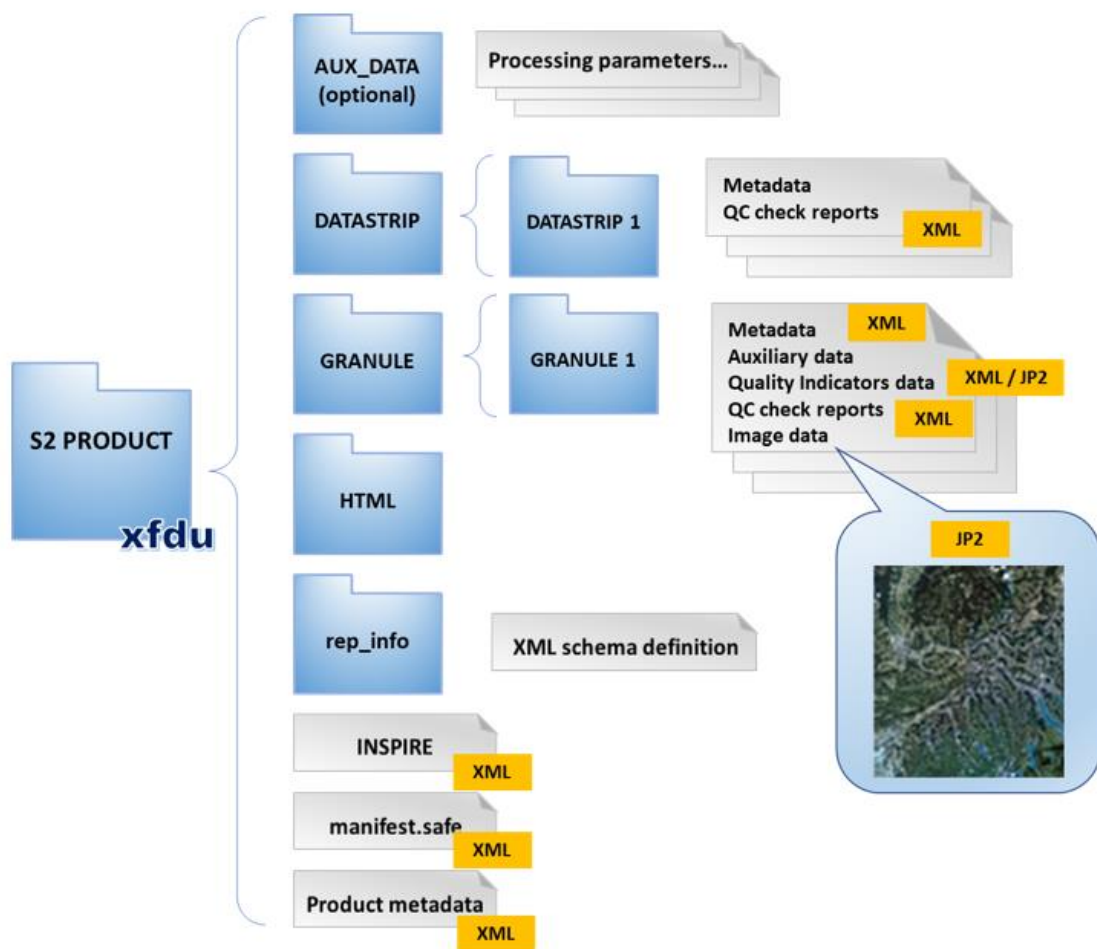


Ilustración 9: Formato SAFE

Tomada de "Sentinel-2 MSI Data Formats" disponible en <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/data-formats>

Debido a los objetivos de este estudio, no se considera necesario profundizar en este formato, ya que los programas que se utilizarán leen perfectamente el formato SAFE y generan productos más manejables en formato Tiff.

### 6.3 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica es el proceso que elimina los efectos que causa la atmósfera en los valores de reflectancia de las imágenes tomadas por un satélite. Estos efectos alteran de forma significativa la imagen, ya que la atmósfera absorbe y dispersa varias longitudes de onda del espectro visible.

Tanto Sentinel Hub como Copernicus Hub permiten la descarga de imágenes corregidas atmosféricamente (nivel 2A) proporcionadas por la ESA, sin embargo, no se dispone de información sobre cómo se ha realizado dicha corrección. Es más, distintos índices de los que se van a estudiar han sido optimizados para utilizar distintos algoritmos de corrección atmosférica, es por eso por lo que se decide realizarla de forma independiente, descargando las imágenes sin corregir (en formato 1C).

Para corregir las imágenes se utiliza Acolite (en su versión 20220222), un software desarrollado en Python que combina numerosos algoritmos de corrección atmosférica para Landsat y Sentinel 2, desarrollado por el “Royal Belgian Institute of Natural Sciences” (RBINS). Acolite es software libre, licenciado bajo GPL V3.0.

Acolite funciona especialmente bien para aplicaciones acuáticas incluso con cierta turbidez en el agua. Hace uso de un algoritmo llamado Dark Spectrum Fitting o DSF. Este algoritmo utiliza los puntos más oscuros de la imagen para estimar el camino de la reflectancia atmosférica de forma totalmente automática.

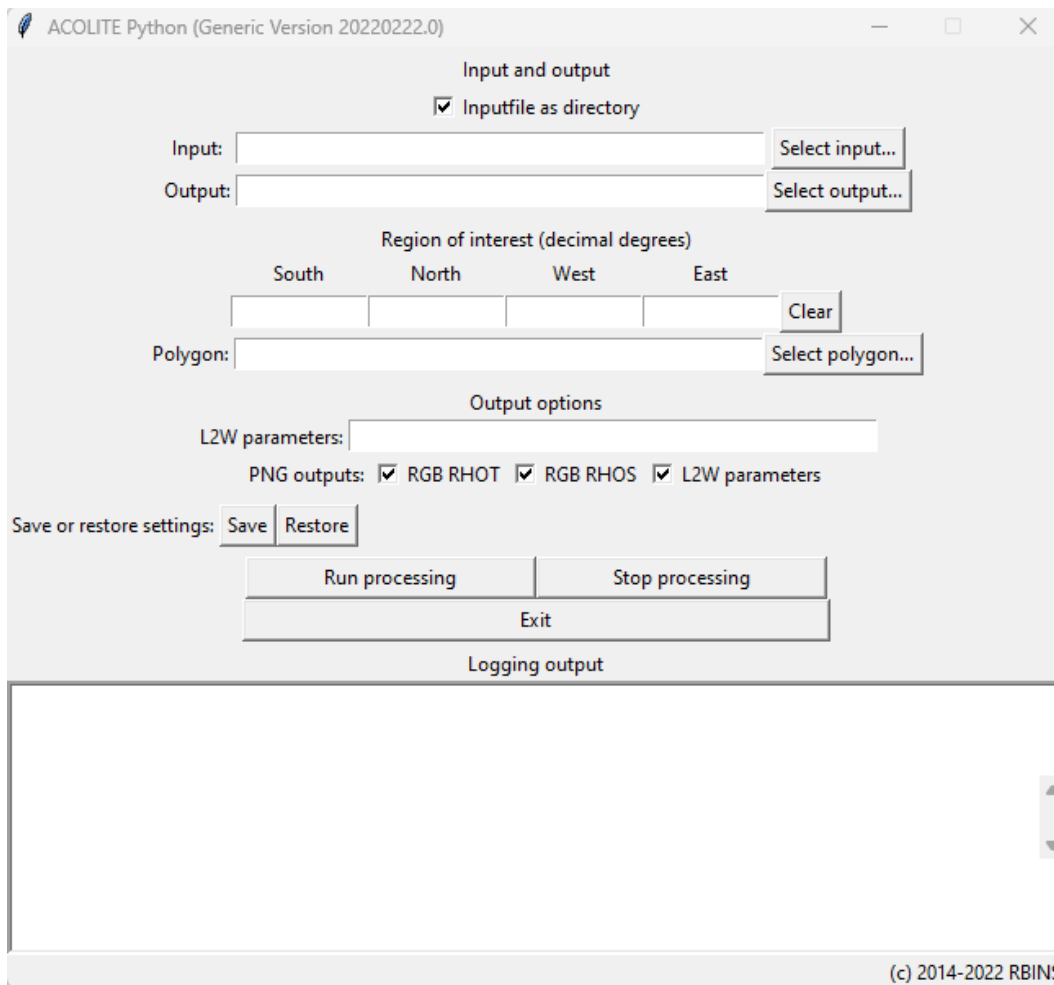


Ilustración 10: Interfaz de ACOLITE en Windows

Para corregir las imágenes atmosféricamente se debe crear un fichero de configuración para Acolite, que permita proporcionarle la entrada y la salida, especificar el algoritmo de corrección atmosférica, las bandas que interesa procesar, y el formato de salida entre otras opciones.

Para nuestro estudio, es suficiente con utilizar estas dos medidas:

- Water-leaving reflectance
- Remote sensing reflectance

Acolite espera las imágenes en formato SAFE, por lo que no es necesario realizar ninguna modificación sobre las imágenes que se han descargado de Copernicus Hub. Simplemente se indica la ubicación de las imágenes de entrada y donde se esperan las de salida, además del algoritmo a utilizar como se ha mencionado anteriormente.

Una vez ejecutado, Acolite crea un fichero .tiff para cada banda espectral corregida atmosféricamente, además de un fichero de log en el que registra todos los pasos que ha dado y los errores si los hubiera. También admite crear ficheros NetCDF, aunque no

se le ha encontrado utilidad para este trabajo y por ello se mantendrá esa opción deshabilitada.

#### 6.4 Recorte

Las imágenes descargadas de Copernicus Hub tienen una extensión muy grande, cada imagen tomada por Sentinel-2 cubre un área de 110km<sup>2</sup> mientras que este trabajo se centra en un área muy concreta, es por eso que es necesario recortarlas.

La Dirección General de Medio Ambiente de la Región de Murcia distribuye una serie de ficheros de tipo Shapefile (.SHP) que se pueden utilizar para recortar el área del Mar Menor. Estos ficheros denominados Shapefile contienen geometría vectorial, por lo que son muy útiles para utilizarlos como máscara de recorte. Para hacer el recorte se utilizará QGIS o bien GDAL directamente gracias al comando “gdal\_warp”.

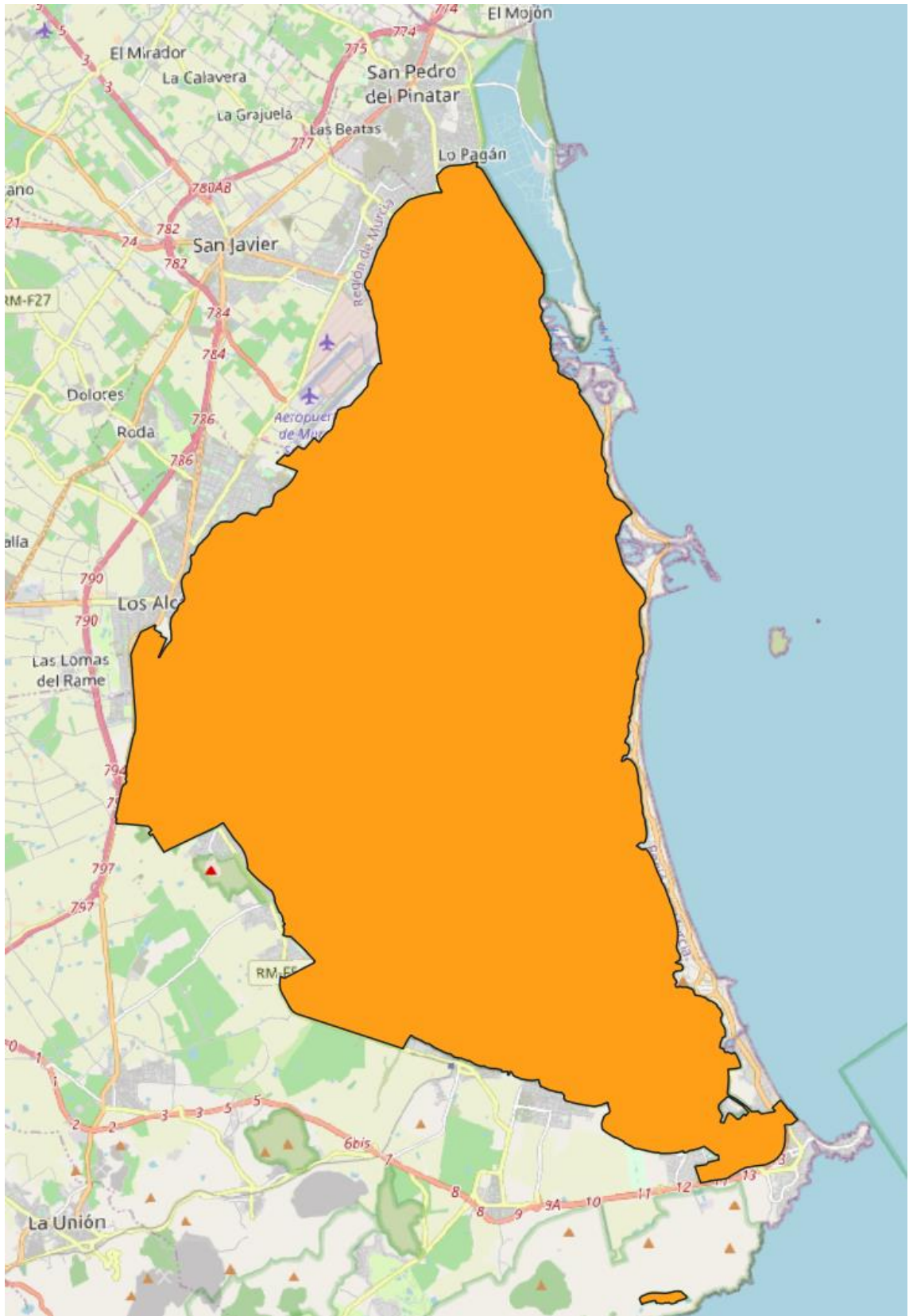


Ilustración 11: Recorte del Mar Menor en naranja

## 7. Cálculo de índices

Una vez se dispone de todas las imágenes corregidas y recortadas se puede empezar a calcular los índices que se consideren más útiles y efectivos. Para este trabajo, basado en estudios anteriores con objetivos similares, se han seleccionado los siguientes:

- Índice RI, que mide la presencia de algas
- Índice Se2WaQ, que mediante la configuración adecuada proporciona valores de: concentración de clorofila, densidad de cianobacterias, turbidez, materia orgánica disuelta, carbono orgánico disuelto y color del agua
- Índice “Maximum Peak Height Bloom Index” (MPHBI), que proporciona una estimación de las algas flotantes sumergidas y floraciones de cianobacterias
- índice Ulyssys, para visualizar la concentración de clorofila y de sedimentos suspendidos en el agua

A lo largo de este proyecto, se proporcionarán imágenes clasificadas en cinco clases para poder apreciar de forma más visual la calidad del agua según la siguiente leyenda:

- Calidad muy baja (marrón oscuro): Representa agua muy contaminada o sucia.
- Calidad baja (naranja): Representa agua con cierto grado de contaminación.
- Calidad alta (cian): Representa agua bastante limpia pero aún con cierto grado de impurezas.
- Calidad muy alta (verde claro): Representa agua muy limpia, con poco o ningún material contaminante.

A continuación, se detalla cómo funciona cada índice.

### 7.1 Índice RI

Se comenzará usando el índice RI o Red tide Index (Yu-Hwan Ahn, 2006). El autor desarrolla este índice tras percatarse del aumento de floraciones de algas perjudiciales por numerosas regiones costeras del mundo. Con este índice, trata de solucionar el problema de identificar correctamente dichas floraciones. Para este estudio, el autor utiliza imágenes de SeaWiFS, instrumento montado sobre el satélite SeaStar de la NASA, que cesó sus operaciones en 2010. Este instrumento es idóneo para monitorizar la concentración de clorofila y la claridad del agua, pues se diseñó con esos objetivos en mente. De igual modo, las bandas espectrales que recibía eran las óptimas, e incluso era capaz de inclinarse para evitar el reflejo del sol.

Este índice utiliza imágenes corregidas con el algoritmo “Water-leaving radiance” (en adelante  $L_w$ ) para detectar dichas floraciones de algas perjudiciales. El índice queda definido como sigue:

$$RI = \frac{\frac{L_w(510)}{L_w(555)} - L_w(443)}{\frac{L_w(510)}{L_w(555)} + L_w(443)}$$

Como se puede observar en la fórmula, el índice RI utiliza las bandas de 443, 510 y 555 nm que corresponden a las bandas 1 (Aerosol costero), 2 (Azul) y 3 (Verde) del MSI de Sentinel-2 respectivamente. Este índice establece una relación empírica de 0.4-71mg/m<sup>3</sup> de clorofila, por lo que es ideal para hacer estudios cuantitativos.

Realmente lo que hace el índice RI es obtener la relación azul/verde normalizada con el valor absoluto de la radiancia en la banda de aerosol costero (443nm).

El índice RI puede tomar valores entre -1 y +1. Un valor de -1 significa ausencia de floraciones de algas perjudiciales, mientras que un valor cercano a +1 implica la máxima cantidad de estas floraciones.

Al tratarse de un índice fácil de calcular, lo más sencillo es utilizar la calculadora de QGIS para obtenerlo, puesto que no contiene sentencias condicionales.

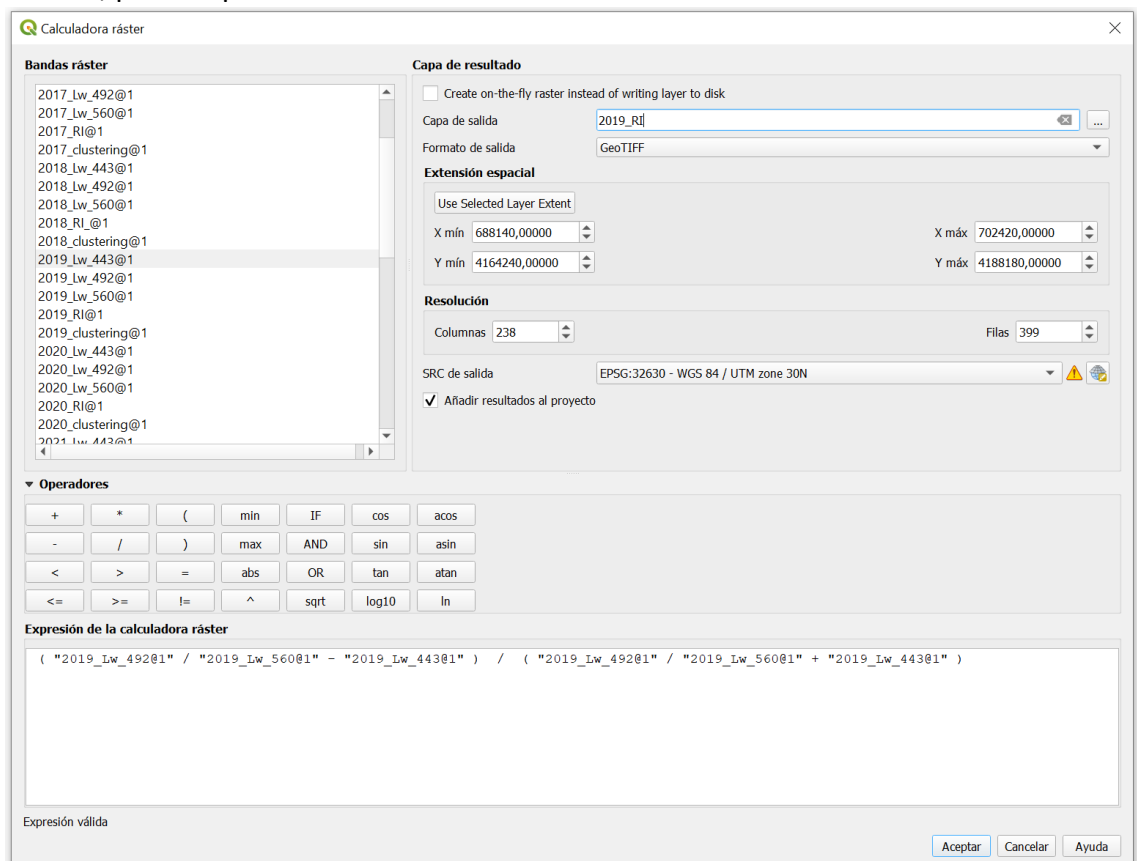


Ilustración 12: Calculadora ráster de QGIS

Esta calculadora integrada en QGIS soporta operaciones básicas, por lo que más adelante se explicará cómo calcular índices más complejos.

A continuación, se presenta el resultado de aplicar el índice RI a la imagen del año 2019.

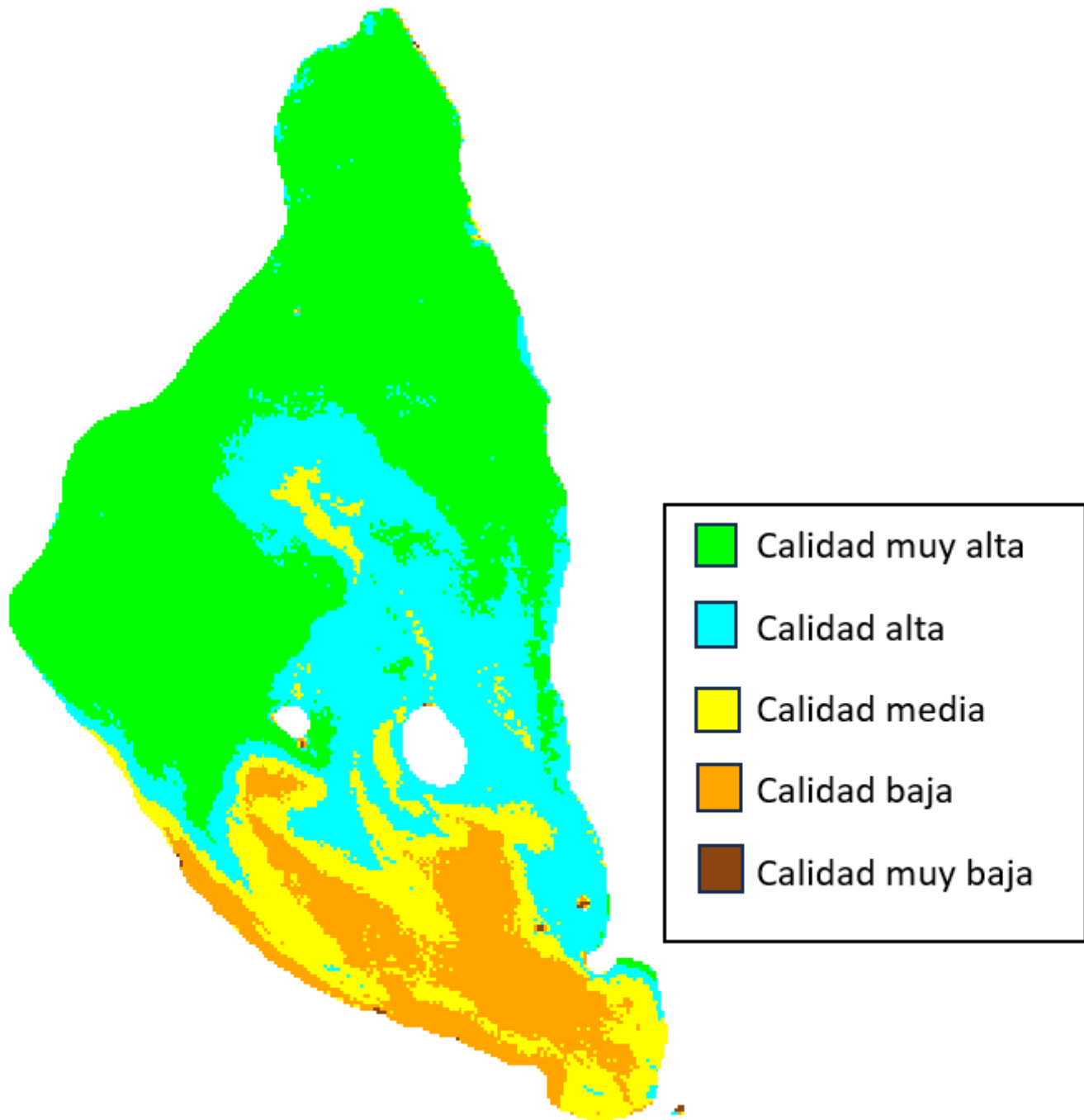


*Ilustración 13: Índice RI aplicado a la imagen de 2019*

Ya que nuestro objetivo es realizar un estudio cuantitativo, se procede a clasificar la imagen en varias clases (clustering). Esto se puede realizar fácilmente gracias al plugin “SCP” (Semi-Automatic Classification Plugin) de QGis, que permite utilizar K-medias como método de agrupamiento. Para todos los ejemplos se utilizarán 5 clases.

Según la definición del índice, las partes más claras de la imagen (valores más bajos) corresponden a una mayor calidad del agua (menor contenido de clorofila), mientras

que las partes más oscuras (valores más altos) corresponden a una masa de agua con mayor cantidad de algas perjudiciales.



*Ilustración 14: Índice RI aplicado a la imagen de 2019 clasificado*

Conociendo el tamaño del píxel, es posible conocer la extensión real en metros cuadrados de cada clase.

## 7.2 Descarga y adaptación de índices de Sentinel Hub

Como ya se ha mencionado, el visor EO Browser de Sentinel Hub resulta muy cómodo de usar, aunque eso dificultará el poder descargar imágenes para manipular localmente. Una de sus ventajas es la facilidad de crear y utilizar índices en su plataforma.

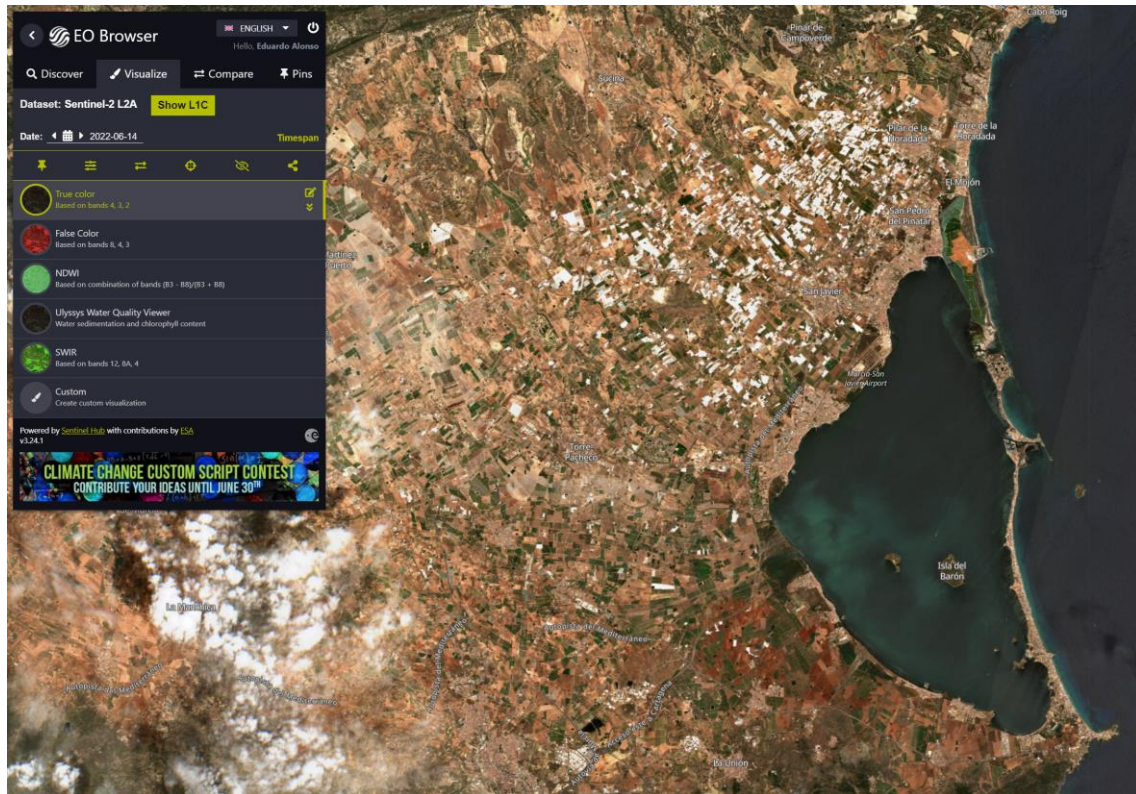


Ilustración 15: EO Browser enfocado al Mar Menor

Tal y como muestra la Ilustración 15, en la barra de tareas se pueden combinar las bandas en las formas más usuales, como por ejemplo “True color” que involucra las bandas RGB o calcular índices sencillos como NDVI/NDWI. Lo más interesante está al final del menú, donde da la posibilidad de hacer nuestra propia combinación.

Aquí es donde entran en juego los “custom scripts”, que son códigos en Javascript enviados por usuarios de la plataforma que permiten calcular nuestro propio índice haciendo operaciones con bandas. Estos scripts permiten hacer operaciones aritméticas como cualquier código de Javascript, tal que el código se ejecuta una vez por cada píxel, pudiendo especificar operaciones del tipo “B02 / B03” que devuelve el resultado de la división del píxel de la banda 2 con el de la banda 3. También permite estructuras condicionales.

Resulta evidente que para replicar estos índices se va a necesitar una herramienta más poderosa que QGIS, dado su limitado potencial.

### 7.3 Calculadora de bandas

Ya que QGIS se muestra insuficiente para nuestros cálculos, se va a utilizar GDAL. Se trata de una biblioteca de software para trabajar con datos geoespaciales. Mucha de la funcionalidad de QGIS se basa en GDAL, que funciona de forma transparente al usuario. GDAL está escrita en C/C++, aunque existen interfaces para varios lenguajes de programación como Python.

Se elige Python para este desarrollo, que hace uso de *notebooks* de Jupyter para realizar los cálculos de bandas. Gracias a GDAL, es posible abrir cada banda como una matriz de píxeles, realizar operaciones entre todas ellas y guardar el resultado en un fichero final. Dada la similitud con Javascript, la reproducción de los índices de EO Browser resulta sencilla.

A continuación, se aplicarán los distintos índices relacionados con la calidad del agua que encontramos en Sentinel Hub a nuestro caso en el Mar Menor, relacionándolos entre ellos y finalmente obteniendo medidas cuantitativas.

### 7.4 Índice se2waq

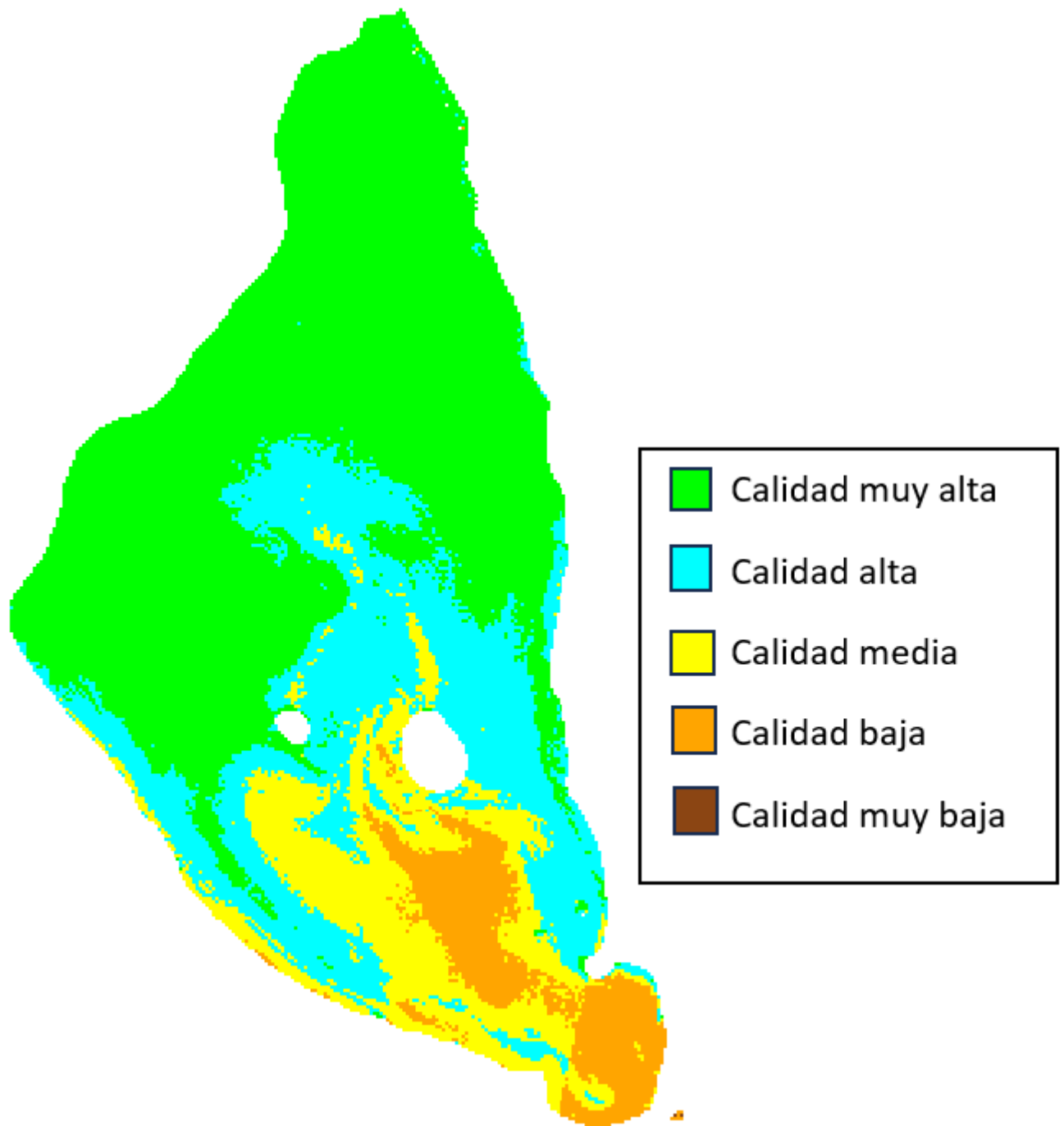
El índice Se2WaQ (Pereira N, 2022) muestra la distribución de seis parámetros que afectan la calidad del agua:

- Concentración de clorofila
- Densidad de cianobacterias
- Turbidez
- Materia orgánica disuelta
- Carbono orgánico disuelto
- Color del agua

Por lo que es configurable. Con un parámetro de control, es posible seleccionar qué tipo de resultado se quiere obtener de todos los de la lista anterior.

Este índice utiliza modelos empíricos a partir de datos in-situ y combinaciones de bandas de Sentinel-2.

Para poder comparar este índice junto al resto del estudio, se escoge la concentración de clorofila A como valor para este índice.



*Ilustración 16: Índice Se2WaQ en modo clorofila A para la imagen del 2019*

La similitud de la Ilustración 16 con la Ilustración 14 permite afirmar que los índices funcionan correctamente. Es evidente una mayor concentración de clorofila que se muestra tanto en RI como en Se2WaQ en el extremo sur del Mar Menor.

### 7.5 Índice Maximum Peak Height Bloom Index

El índice “Maximum Peak Height Bloom Index” (MPHBI para simplificar) es un índice sin unidades. Tiene como objetivo visualizar algas flotantes sumergidas y floraciones de cianobacterias en lagos. Este algoritmo es la combinación de otros dos, llamados “Maximum Chlorophyll Index” (Gower et al., 2008) y “Floating Algal Index” (Hu, 2009).

El funcionamiento interno del índice es el siguiente: Primero se calcula el Floating Algal Index, que es un índice que calcula la diferencia entre la reflectancia a los 859nm (banda B8a de Sentinel-2) y una referencia entre la banda roja e infrarrojo de onda corta.

Tras calcular el FAI, se calcula el MCI, que mide el pico de radiancia a los 709nm, que indica la presencia de alta concentración superficial.

Finalmente, se compara para cada píxel el FAI y el MCI, escogiéndose el más alto de estos dos valores.

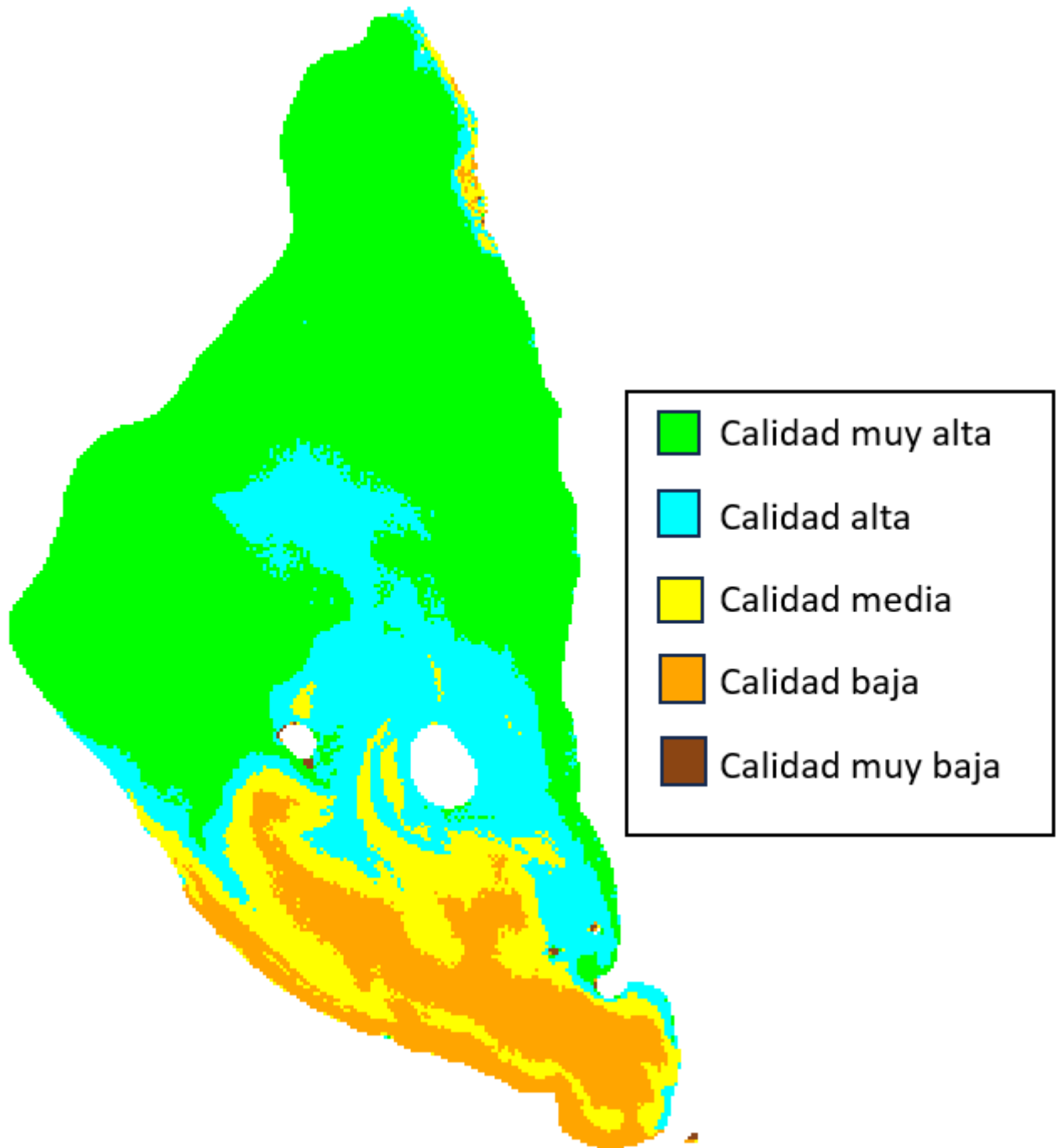


Ilustración 17: Índice MPHBI para la imagen de 2019

### 7.6 Índice Ulyssys Water Quality Viewer

El índice Ulyssys (Zlinszky et al., 2020) sirve para visualizar la concentración de clorofila y de sedimentos suspendidos en el agua. Todos los píxeles identificados como agua son coloreados con un algoritmo que mezcla la proporción de clorofila y sedimentos detectados en ese píxel, por lo que no tiene unidades y se trata de un índice cualitativo. La capa de sedimentos es semitransparente, por lo que puede opacar a la capa de clorofila. Es por esto por lo que píxeles con gran concentración de sedimentos se verán de un tono marrón oscuro, independientemente de su concentración de clorofila. Sin embargo, tras nuestra clasificación esta escala de colores se pierde, a favor de la que proponemos de verde a rojo.

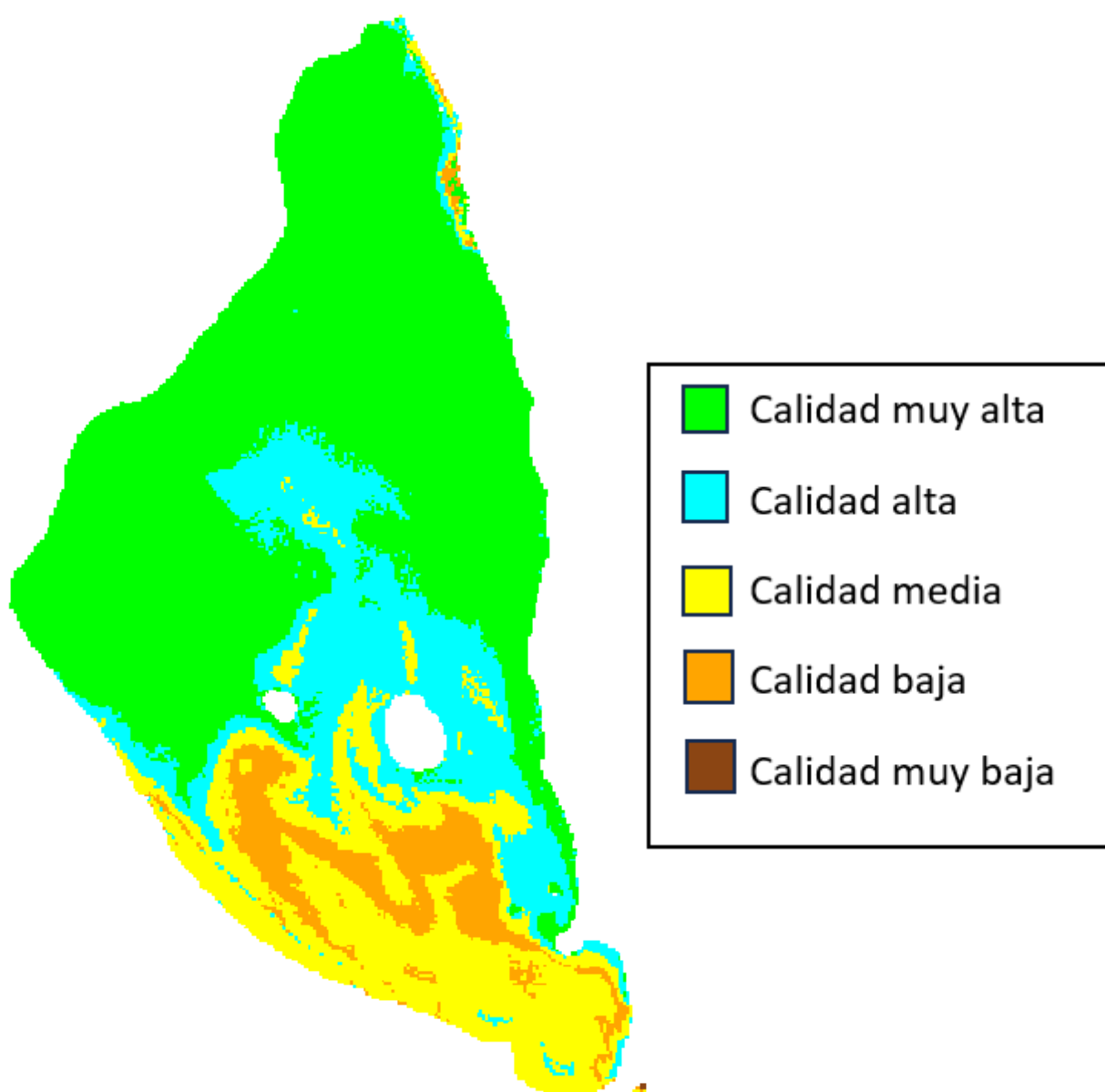


Ilustración 18: Índice Ulyssys para la imagen de 2019

## 8. Comparación de índices

Una vez se dispone de todos los índices calculados para todos los años que comprende el estudio, es hora de compararlos entre ellos, así como con medidas obtenidas del análisis del agua in-situ.

Mediante ambas comparaciones se podrá determinar cuál es el índice que mejor caracteriza la calidad del agua. Sin embargo, hay que tener en cuenta que cada índice proporciona valores para variables diferentes, en un caso puede ser la presencia de algas, en otro la turbidez del agua, los sedimentos, etc. Por ello, que dos índices salgan un poco diferentes no quiere decir que sean incorrectos.

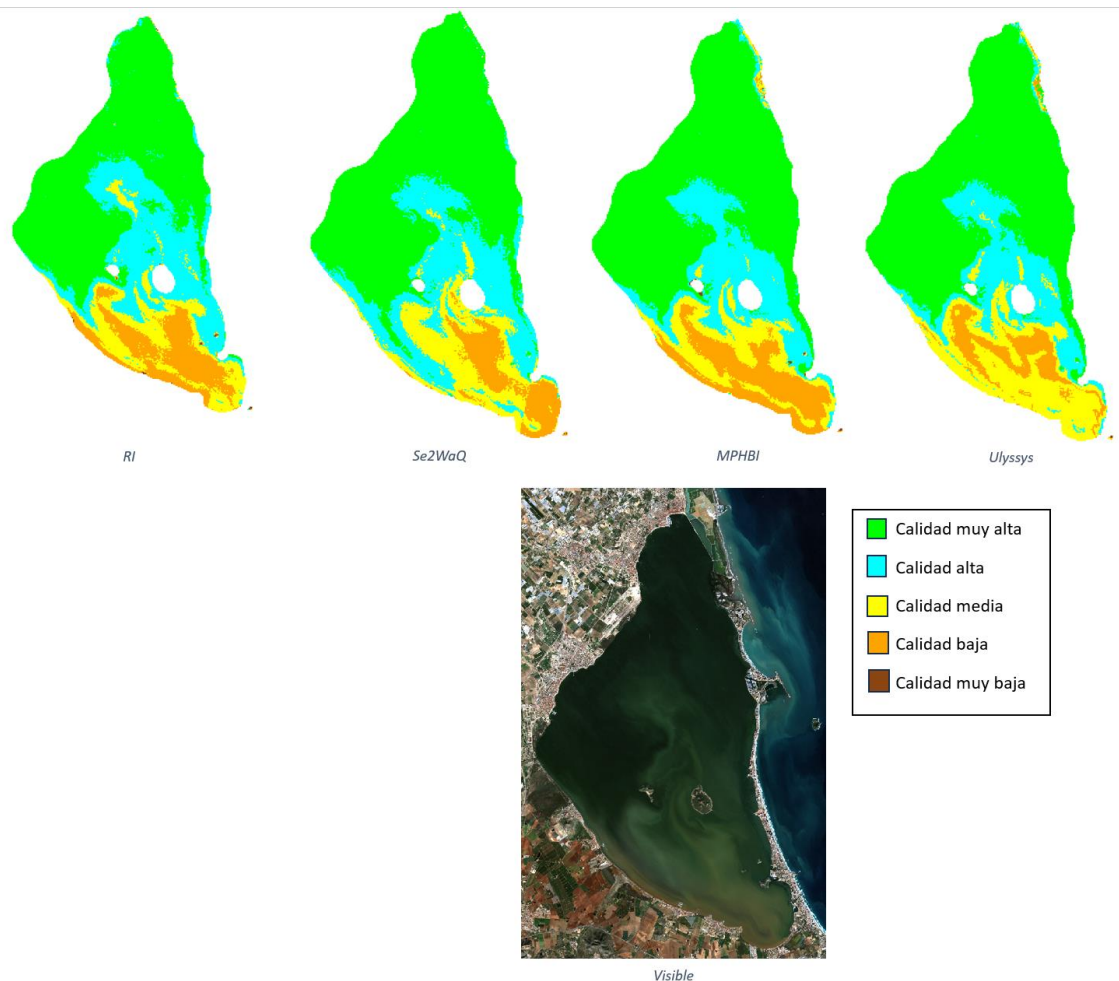


Ilustración 19: Comparación de los índices de 2019

Estas comparaciones entre índices se han presentado ya desde un punto de vista cualitativo al calcularse las imágenes de la superficie de la laguna con las bandas de colores que en cada caso proporcionan los valores para cada variable estimada por el índice correspondiente, y quedan recogidas en la Ilustración 19. En ella se aprecia la

similitud entre los índices, que muestran una mayor cantidad de clorofila en la parte sur de la laguna.

Para realizar la comparación cuantitativa entre índices y con los valores del análisis in-situ del agua, para cada índice, se obtiene el valor de la variable considerada en cada imagen y se compara su extensión geográfica con la del año siguiente. Así, se están considerando unos valores medios para toda la extensión geográfica de la laguna.

Para hacer esto basta con usar QGis, pues entre otras muchas utilidades, dispone de una que permite obtener una tabla de extensión por cada capa en formato HTML como muestra la Ilustración 20.

Archivo analizado: C:/Users/Eduardo/Downloads/Ulyssys/out/ulyssys\_2019\_clustering.tif (banda 1)

Extensión: -96430.5088996732520172,4523524.1323443064466119 : -78506.3315149125555763,4554132.9156709471717477

Proyección: EPSG:3857 - WGS 84 / Pseudo-Mercator

Anchura en píxeles: 229 (unidades por píxel 78.2715)

Altura en píxeles: 391 (unidades por píxel 78.2833)

Número total de píxeles: 89539

Número de píxeles SINDATOS: 0

Valor	Número de píxeles	Área (m <sup>2</sup> )
1	63959	391899514.5409428
2	13660	83699672.73768005
3	4785	29319394.87919466
4	4151	25434651.64964201
5	2984	18284028.07095441

*Ilustración 20: Tabla de extensión por capas*

Al tratarse de 4 años de estudio, se realiza el tratamiento de un conjunto de datos lo suficientemente pequeño como para poder manejarlo de forma manual en Excel, por lo que se usa una hoja de cálculo para obtener una gráfica que muestre la progresión de estos índices a lo largo del tiempo.

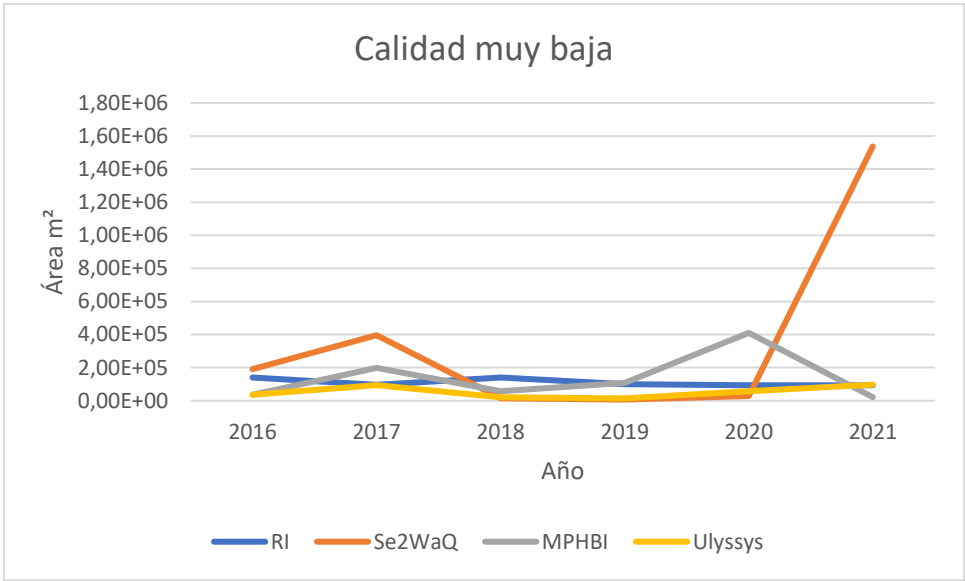


Ilustración 21: Tabla de resultados del nivel de calidad muy baja

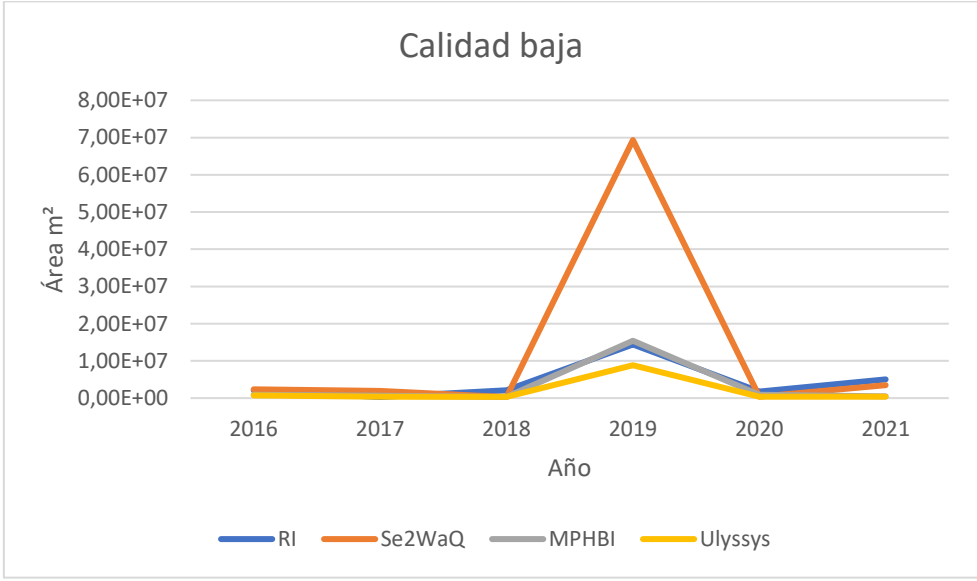


Ilustración 22: Tabla de resultados del nivel de calidad baja

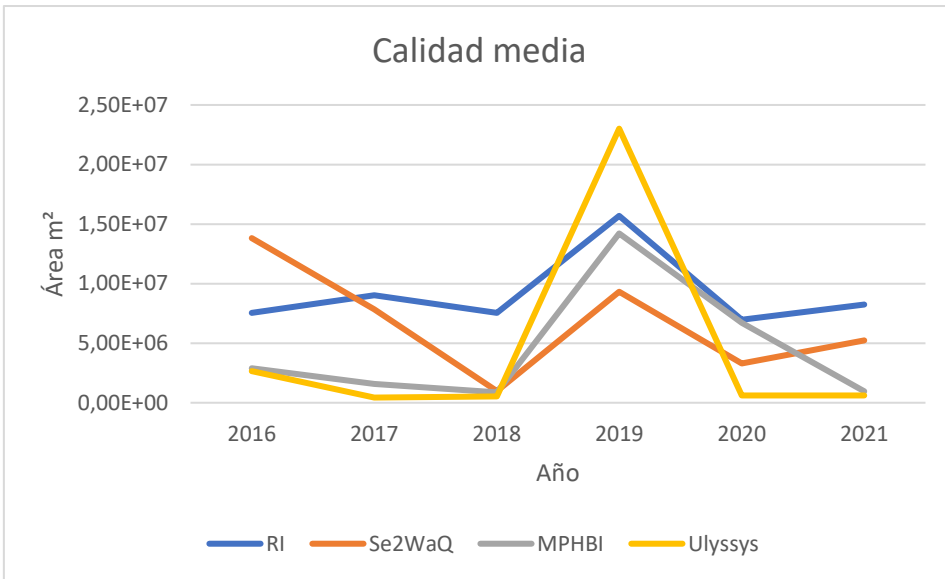


Ilustración 23: Tabla de resultados del nivel de calidad media

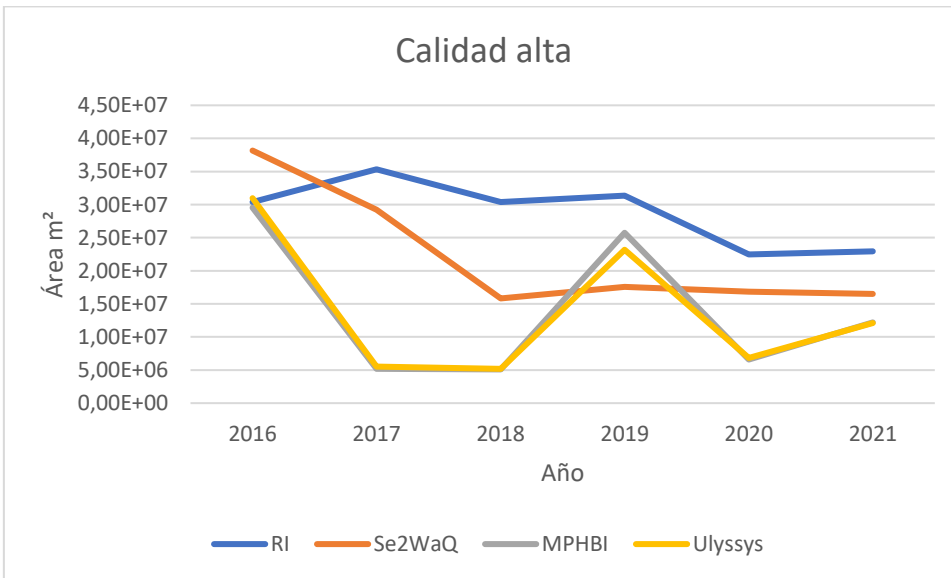


Ilustración 24: Tabla de resultados del nivel de calidad alta

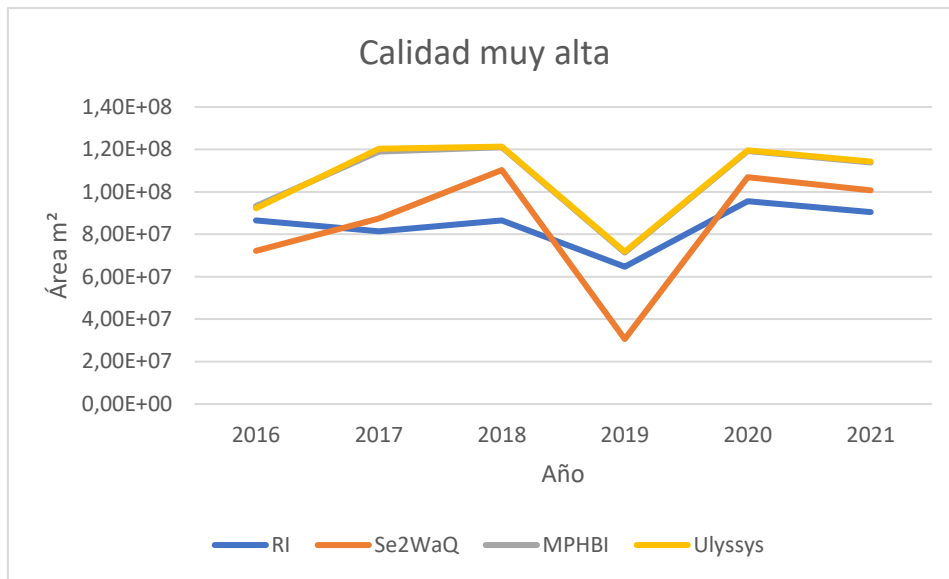


Ilustración 25: Tabla de resultados del nivel de calidad muy alta

En las tablas de esta sección, se muestra la evolución de la calidad del agua en el periodo considerado, según los 5 niveles diferentes que hemos considerado: calidad muy baja, calidad baja, calidad media, calidad alta y calidad muy alta. Para cada año se representa la superficie del agua (m<sup>2</sup>) que presenta la calidad del nivel correspondiente.

Podemos observar un pico muy notable de todos los índices (máximos en calidad baja y media, mínimos en calidad muy alta) en el que la calidad del agua empeora, correspondiendo con el año 2019. Este año coinciden con la mayor catástrofe medioambiental vivida en el Mar Menor en el intervalo comprendido por este estudio. Recordamos titulares como el de la Ilustración 26 en los cuales queda constatado el perjudicial efecto de la agricultura intensiva y posterior contaminación con abonos que proliferan la eutrofización. Esto es congruente con los resultados obtenidos, ya que el índice RI mide la floración de algas perjudiciales, que proliferan con el aumento de nutrientes que causa la eutrofización.

Aun así, vemos que el índice RI no tiene un pico tan pronunciado en 2019 como Se2WaQ. Hay zonas que el índice es capaz de detectar, y otras que no. Esto se debe a que el índice RI es un índice basado en la relación de las bandas verde y azul ya que la incertidumbre en la corrección de aerosol en estas bandas es muy significativa, como ya se había mencionado. Además, la absorción por materia orgánica en suspensión y demás sedimentos pueden influir en esta relación azul/verde, afectando al propio índice. Aun así, ha demostrado una gran precisión.

MEDIO AMBIENTE

# La asfixia del mar Menor

La contaminación por los abonos de la agricultura de regadío intensiva y el urbanismo desaforado están detrás de la catástrofe medioambiental que ha arruinado la mayor laguna salada de Europa



**ESTHER SÁNCHEZ**

San Pedro del Pinatar - 20 OCT 2019 - 00:28 | Actualizado: 20 OCT 2019 - 19:15 CEST



*Ilustración 26: Titular de El País de 2019 sobre el Mar Menor*

## 9. Validación de los resultados obtenidos

La teledetección se apoya en imágenes tomadas por satélites muy lejanos del objetivo que están capturando, por lo que resulta evidente que cualquier cálculo derivado de dichas mediciones, aparte de necesitar cierta calibración (como ha sido en este trabajo el caso de la corrección atmosférica), introduce cierta incertidumbre: ¿Cómo podemos medir lo buenas que son nuestras imágenes? ¿Cómo podemos asegurar que los resultados de aplicar ciertos algoritmos sobre ellas realmente reflejan la realidad?

En cuanto a la primera pregunta, el procesado de las imágenes es fundamentalmente manual. Si bien es cierto que se pueden filtrar las imágenes de Sentinel por su nubosidad, esta nubosidad se calcula en cuanto a toda la imagen, por lo que una imagen con un porcentaje bajo de nubosidad todavía debe ser estudiada a mano para corroborar que en la zona de estudio (que puede, y en nuestro caso es muy reducida) está libre de nubes. No obstante, también se puede hacer uso de la capa de clasificación de escenario.

La capa de clasificación de escenario o SCL es una capa de resolución espacial de 60 metros que como su propio nombre indica, clasifica cada píxel en función del terreno al que corresponde, ya sean nubes, vegetación, agua, o sombras producidas por nubes, entre otras clases. Para nuestro estudio nos interesa la clase de agua, ya que se puede cortar esta capa con el fichero vectorial Shapefile del Mar Menor y corroborar que detecta como agua la totalidad de su extensión.

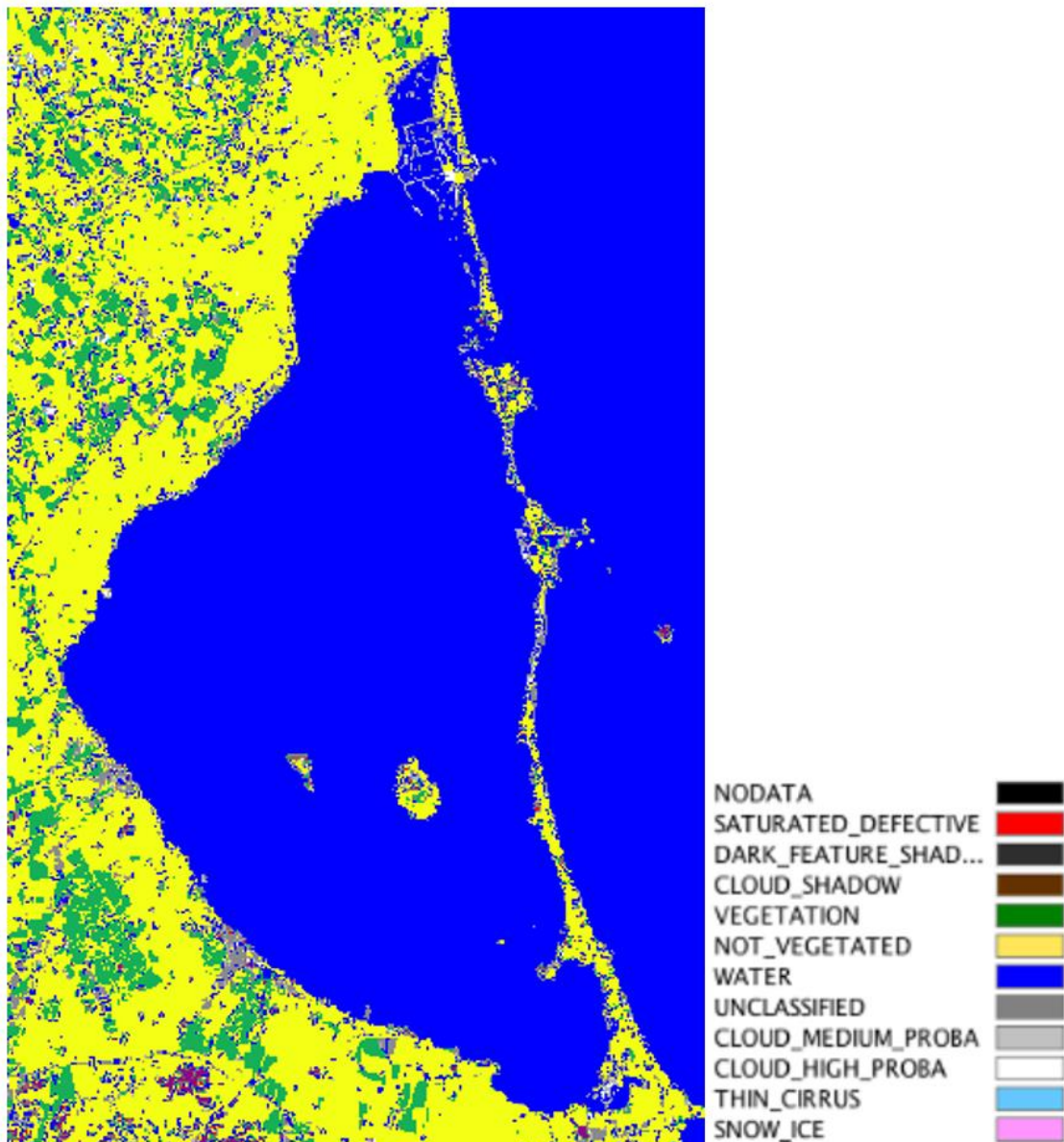


Ilustración 27: Capa SCL de Sentinel-2

Una vez se valida la imagen, se puede concluir que es seguro proseguir con la aplicación de los algoritmos que se considere.

### 9.1 Comparación con datos in-situ

Los datos in-situ son mediciones tomadas mediante el análisis químico del agua para determinados valores, como pueden ser el nivel de clorofila, de sedimentación, o de oxígeno en el agua. Estas mediciones son de gran utilidad; primero porque tienen unidades, esto permite utilizarlas en un análisis cuantitativo, y segundo por su exactitud. Se pueden usar los datos in-situ como referencia de lo que es posible esperar en un estudio basado en teledetección, ya que muchas veces esos datos son precisamente la misma medida que se está estimando, por lo que la correlación es directa.

En nuestro caso, la Universidad Politécnica de Cartagena comparte una colección de datos in-situ del Mar Menor medidos por diferentes estaciones. Es posible encontrar medidas de clorofila, oxígeno, salinidad, temperatura, transparencia y turbidez. Algunas de estas medidas se han obtenido de índices estudiados en este trabajo.

Si se elige el fichero de Clorofila, que tiene una correspondencia directa con el índice RI y Se2WaQ. Al descargarlo, se observa que se trata de un fichero NetCDF. Este fichero tiene cuatro dimensiones, siendo dos de ellas la posición (latitud y longitud), la fecha, y el nivel de profundidad de la medición. Por lo que es posible acceder al nivel de clorofila en  $\text{mg}/\text{m}^3$  para cada posición.

Como última comprobación, se van a comparar los datos obtenidos en el análisis anterior con estos datos in-situ. Se utilizan los datos de presencia de clorofila a dos metros de profundidad obteniéndose la media, que se representa en la Ilustración 28.

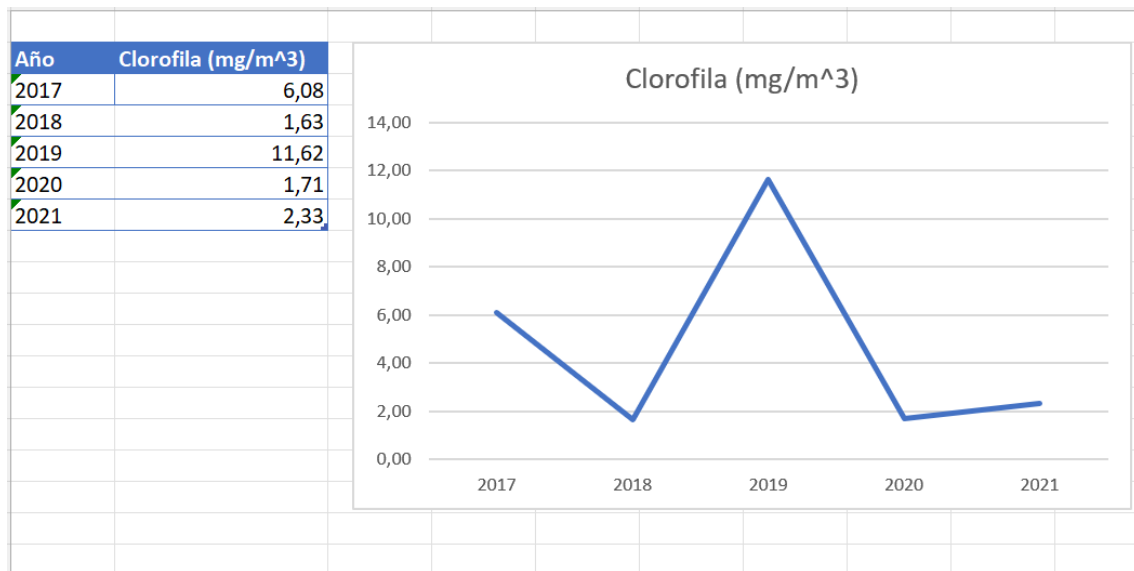
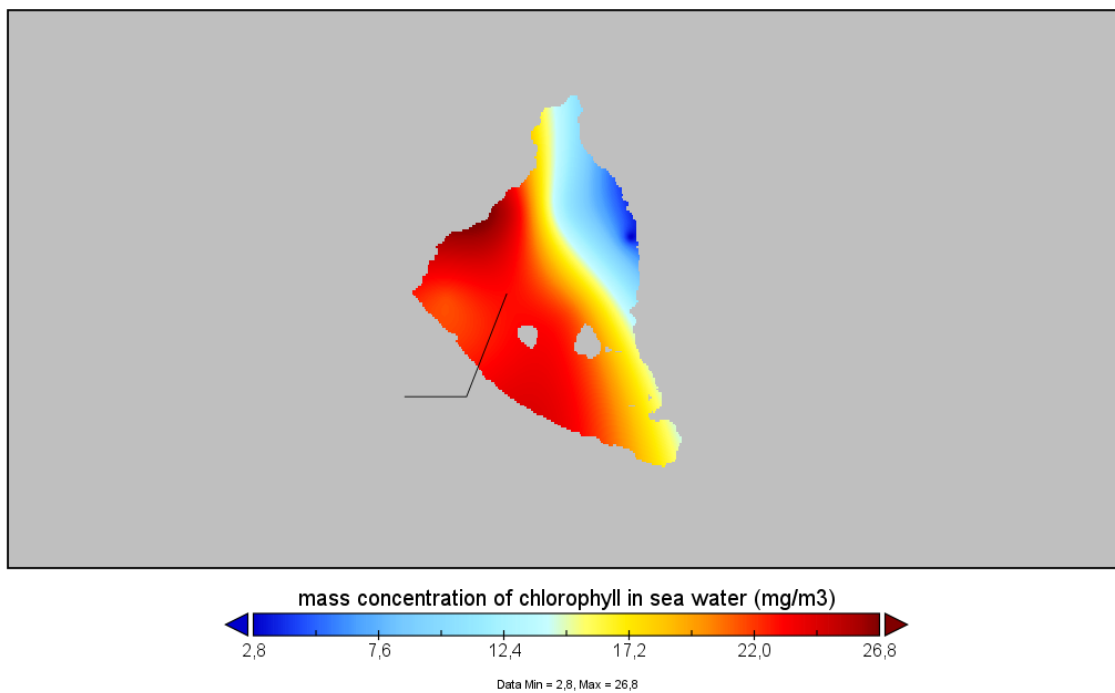


Ilustración 28: Datos In situ sobre clorofila

La gráfica adopta una forma muy parecida a las de calidad baja y pobre obtenidas con el índice RI y Se2WaQ, por lo que se puede concluir que hacen un buen trabajo detectando algas.

mass concentration of chlorophyll in sea water



*Ilustración 29: Mapa de datos in-situ de clorofila de 2019*

Para concluir la comparación, se aporta una imagen del Mar Menor con los datos in-situ sobre clorofila del año 2019, de la cual se han extraído los valores numéricos para elaborar la Ilustración 28.

## 9.2 Comparación usando el coeficiente de silueta

El coeficiente de silueta (Silhouette) es una métrica que nos permite determinar en un agrupamiento o clústering, lo bien que cada objeto se encuentra dentro de su clúster comparado con otros. Este coeficiente va de -1 a 1, y cuanto mayor sea su valor, decimos que el objeto está bien emparejado con su clúster y mal con el resto, por lo que significa un mejor agrupamiento.

Como ya hemos visto, el agrupamiento de índices en este trabajo aporta un entendimiento valioso de las tan cambiantes condiciones presentes en el Mar Menor. No obstante, debemos evaluar la eficacia de este agrupamiento para validar su precisión y utilidad, por lo que dedicaremos esta sección a evaluar la calidad del agrupamiento realizado utilizando el coeficiente de silueta.

### 9.2.1 Cálculo del coeficiente de silueta

Definimos el coeficiente de silueta como sigue:

$$\frac{b - a}{\max(a, b)}$$

Siendo “a” la media de la distancia entre cada punto del agrupamiento y “b” la media de la distancia entre todos los agrupamientos.

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
RI	0,529	0,551	0,529	0,561	0,553	0,566
Se2WaQ	0,535	0,646	0,6	0,61	0,685	0,622
MPHBI	0,572	0,555	0,903	0,622	0,547	0,74
Ulyssys	0,556	0,543	0,855	0,644	0,524	0,726

*Ilustración 30: Coeficiente de silueta para todos los índices*

Tras calcular el coeficiente de silueta para todos los índices en todos los años del estudio, podemos observar que las clases tienen un coeficiente de silueta aceptable. Esto quiere decir que la clasificación que hemos hecho es válida y que lo que vemos en la imagen clasificada se corresponde con la realidad.

## 10. Conclusiones

En este proyecto se ha establecido un marco de trabajo con imágenes satelitales capaz de extraer medidas cualitativas de un área geográfica de estudio por combinación de bandas. Cualquier estudiante que tenga como objetivo analizar coberturas terrestres con imágenes multiespectrales, encontrará en este estudio un punto de partida en cuanto a cómo trabajar con este tipo de imágenes y el tratamiento que necesitan.

La aplicación de diversos índices, según los objetivos del estudio, permiten cuantificar de forma precisa diferentes características del terreno en análisis, según se trate de zona terrestre o acuática.

Este marco se ha utilizado para estudiar la evolución de la calidad del agua del Mar Menor en los últimos años, gracias a las imágenes de Sentinel-2 proporcionadas por la ESA y a diferentes programas y bibliotecas de libre distribución que hemos usado a lo largo de todo el trabajo.

Finalmente, se han comparado los resultados obtenidos mediante las imágenes con las medidas realizadas in-situ mediante análisis del agua, obteniéndose un alto nivel de correlación.

Estos resultados están totalmente de acuerdo con las noticias de los medios de información y los estudios realizados por otros investigadores sobre el Mar Menor, con la conclusión última ya constatada de que la calidad del agua del Mar Menor se ve empobrecida por el factor humano tan presente en la zona, y que en el periodo de un año, ya es posible ver bastante evolución respecto del anterior, lo que debería servir como aviso a las autoridades competentes sobre la necesidad de actuar para frenar este paulatino deterioro de la calidad del agua del Mar Menor, que a su vez perjudica a todos los seres vivos a los que sirve de hogar.

En cuanto a los índices estudiados, destacamos el índice Se2WaQ como el que mejor se ajusta a las medidas in-situ obtenidas, por lo que podemos considerarlo el índice que mejor caracteriza la clorofila en este caso particular, y en comparación con el resto de los índices.

Por todo lo expuesto anteriormente, podemos considerar la teledetección como una poderosa herramienta para analizar y proteger ya no solo nuestros ecosistemas marinos, sino cualquier parte de la extensión de la tierra, ya sea para la prevención de su deterioro como en este caso, para el análisis del daño ya causado como puede ser un incendio, o para optimizar procesos como pueden ser la agricultura. Las misiones espaciales de observación de la tierra como pueden ser Sentinel y Landsat proporcionan información con un enorme valor para la sociedad.

A nivel personal, este trabajo me ha hecho profundizar en el aprendizaje de la teledetección y el uso de herramientas SIG. En este sentido, quiero destacar que ha sido la primera vez que me he enfrentado a tareas como la corrección atmosférica o el cálculo

de índices a partir de imágenes multiespectrales. Por último, me ha exigido trabajar con orden y limpieza, ya que en este proyecto manejamos una gran cantidad de ficheros que hay que etiquetar y clasificar correctamente.

## 11. Trabajo futuro

El proyecto podría beneficiarse de ciertas mejoras en su ejecución. Por ejemplo, el contar con un programa automático que realice todo el análisis, incluida la descarga de las imágenes, y producción de medidas numéricas ahorraría bastante tiempo a un investigador que se decida a utilizar este método para el análisis del Mar Menor o de cualquier otra zona.

Otra mejora sería el uso de otro tipo de imágenes, como pueden ser las de Landsat-8, o incluso otros satélites que se lancen en el futuro, pues el marco que se ha establecido es lo suficientemente flexible como para cambiar de plataforma y que esto no suponga un cambio en la metodología. Realmente siempre que contemos con más resolución espacial, el estudio va a ser más preciso. Desgraciadamente, para conseguir una resolución espacial menor a los 10 metros que ofrece Sentinel-2 (dependiendo de la banda) debemos recurrir a satélites comerciales, con el incremento en el coste de las imágenes que eso conlleva. Algunos proveedores ofrecen acceso gratuito o “patrocinado” a ciertos investigadores, aunque si el objetivo es la protección de los ecosistemas, prevemos que acarreará algún coste.

A partir de ahí, ya estaríamos tratando de “ampliar” el trabajo, aplicando éste a diferentes zonas, con la elaboración de una lista de zonas de interés a las cuales aplicar periódicamente esta metodología con el fin de escalar horizontalmente la dimensión del análisis.

## 12. Impacto social y medioambiental

El impacto social de este proyecto radica principalmente en advertir sobre la situación del Mar Menor. En la sociedad y orden de cosas actual, no es un tema del que se hable lo suficiente. Utilizando herramientas como Google Trend, podemos ver el interés general por el Mar Menor a lo largo de los años del estudio.

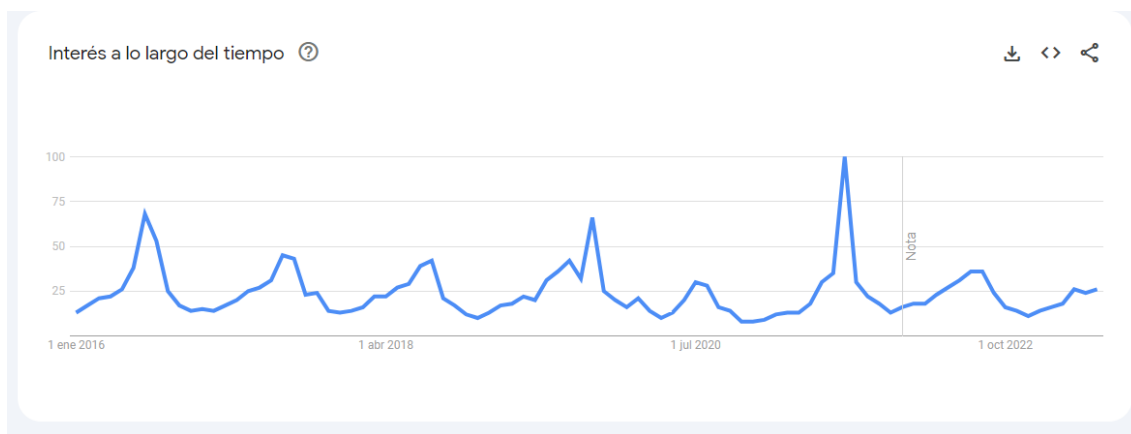


Ilustración 31: Resultado de Google Trend para el Mar Menor desde 2016 hasta 2023

Se pueden ver ciertos picos, el primero en julio de 2016, el segundo en octubre de 2019 y el tercero y más pronunciado en agosto de 2021.

Centrémonos primero en el pico más pronunciado, de agosto de 2021. Haciendo una búsqueda se observa que el suceso que se reportó en esa ocasión fue la retirada de 4,5 toneladas de peces muertos. Este suceso fue provocado por la falta de oxígeno en el agua, que a su vez fue causada por la liberación sin control de nitratos provenientes de la agricultura de las zonas aledañas. El mismo suceso fue lo que provocó el pico de búsquedas de 2019.

El campo de Cartagena se ha convertido en el depredador natural del Mar Menor, la agricultura intensiva que se practica en la zona es la principal causa del paulatino deterioro de la calidad del agua de la laguna. Resulta evidente que la responsabilidad de los agricultores de la zona junto a la regulación por parte de la administración pública es necesaria para reducir la velocidad del deterioro de la calidad del agua.

Asimismo, durante los dos años en los que se ha desarrollado este trabajo, cada vez que realizamos una búsqueda en internet con las palabras “Mar Menor”, cosa que se ha hecho regularmente durante este periodo de tiempo, siempre encontramos titulares recientes que alertan sobre su situación tan cambiante. Mientras escribimos estas líneas, en mayo de 2023, observamos titulares de hace dos días sobre una masa de agua blanquecina que el CSIC está estudiando. Sin embargo, la repercusión social de estas noticias es muy limitada y nunca llegan a los titulares principales.

En cuanto al impacto medioambiental del proyecto, se ha tratado de reducir todo lo posible. No hemos impreso ninguna página de este trabajo para así luchar contra la deforestación y contaminación. También, nuestras reuniones para hablar sobre el proyecto han sido de forma telemática, evitando así la utilización del vehículo privado,

que es la forma que tenemos de ir a la ETSISI. No hemos necesitado de ningún otro desplazamiento ni de ningún tipo de computación intensiva que haya consumido picos de energía eléctrica fuera del uso normal de nuestros hogares.

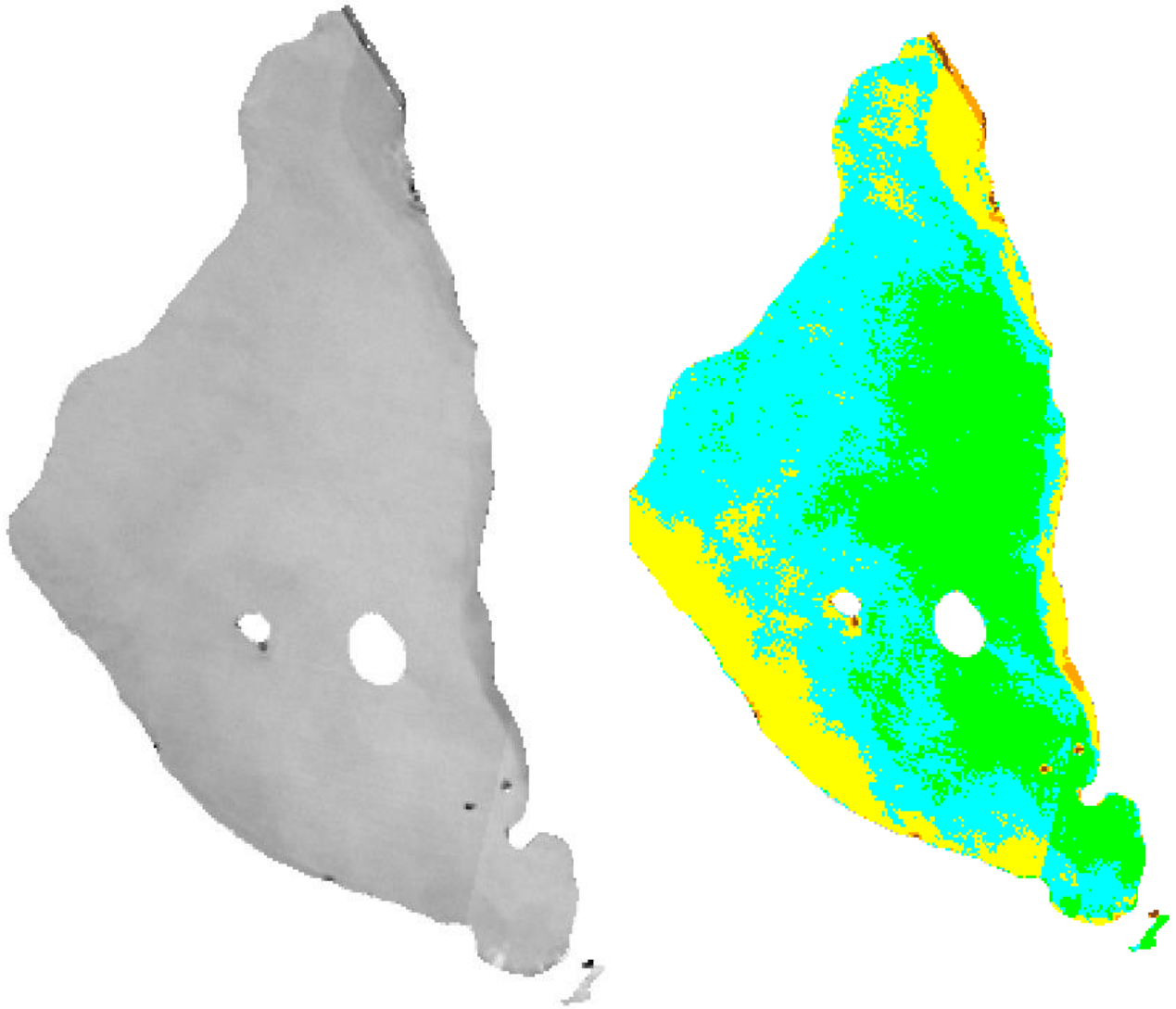
### 13. Bibliografía

- Renosh, P. R., Doxaran, D., Keukelaere, L. D., & Gossn, J. I. (2020). Evaluation of Atmospheric Correction Algorithms for Sentinel-2-MSI and Sentinel-3-OLCI in Highly Turbid Estuarine Waters. *Remote Sensing*, 12(8), 1285. MDPI AG. Doi: <http://dx.doi.org/10.3390/rs12081285>
- Chuanmin Hu. (2009). A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>
- Pereira, Nuno. (2022). Se2WaQ v2. Doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14702.69449>
- Gower, J. King, S. Goncalves, P. (2008). Global monitoring of plankton blooms using MERIS MCI. *International Journal of Remote Sensing*. 29. 6209-6216. Doi: <https://doi.org/10.1080/01431160802178110>
- Yu-Hwan A, Palanisamy, S. Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment*. Volume 103, Issue 4. 419(18). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.04.007>
- Zlinszky, A. Padányi-Gulyás, G. (2020). Ulyssys Water Quality Viewer Technical Description Supplementary. Doi: <https://doi.org/10.20944/preprints202001.0386.v1>
- Sánchez, E. (2021). La agricultura intensiva asfixia el mar Menor ante la pasividad oficial. *El País*. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2021-08-29/la-agricultura-intensiva-asfixia-el-mar-menor-ante-la-pasividad-de-las-administraciones.html>
- Sánchez, E. (2019). La asfixia del mar Menor. *El País*. [https://elpais.com/sociedad/2019/10/18/actualidad/1571415252\\_866797.html](https://elpais.com/sociedad/2019/10/18/actualidad/1571415252_866797.html)
- Congedo, Luca, (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>

## Anexo 1 – Imágenes de 2016-2021

En este anexo se presentan las imágenes clasificadas con los distintos índices para todos los años del estudio.

Índice RI

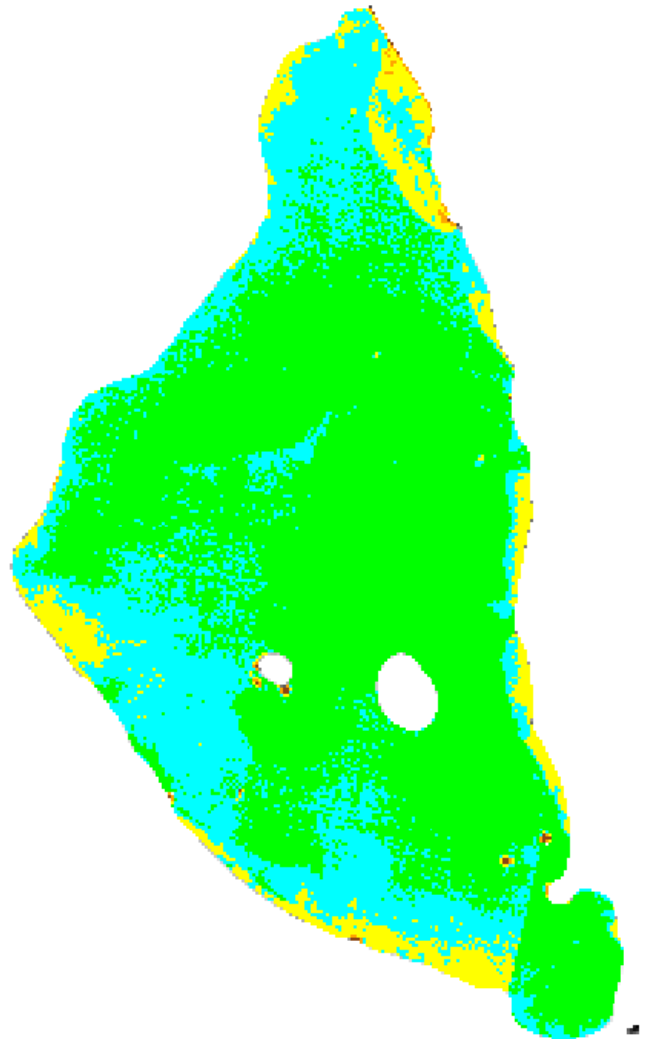


*Ilustración 33: Índice RI aplicado al año 2016*

*Ilustración 32: Índice RI aplicado al año 2016 clasificado*



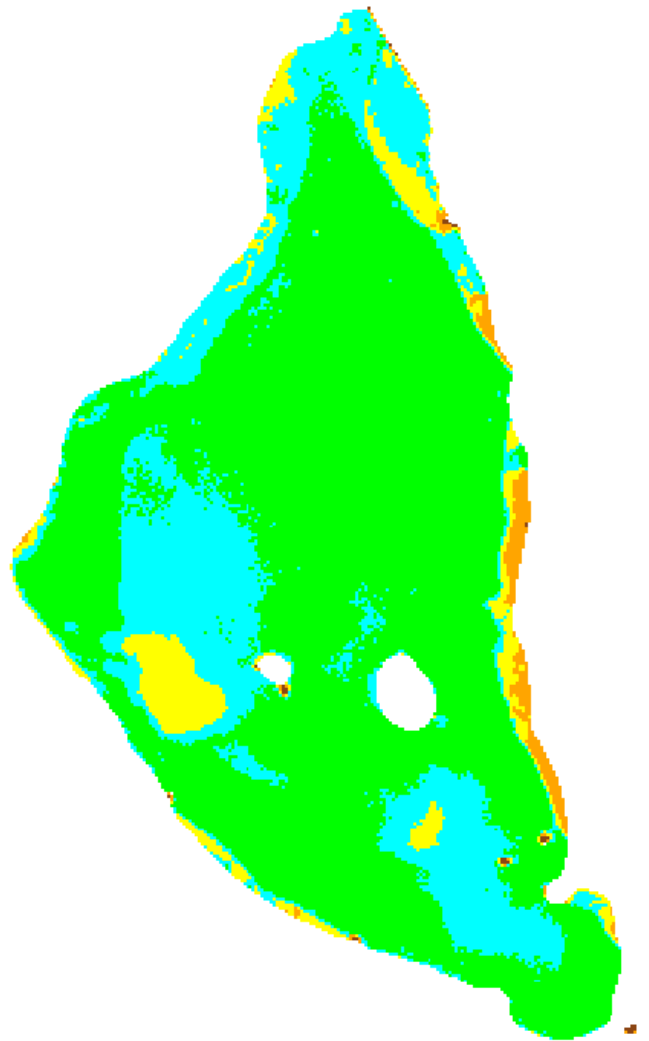
*Ilustración 35: Índice RI aplicado al año 2017*



*Ilustración 34: Índice RI aplicado al año 2017 clasificado*



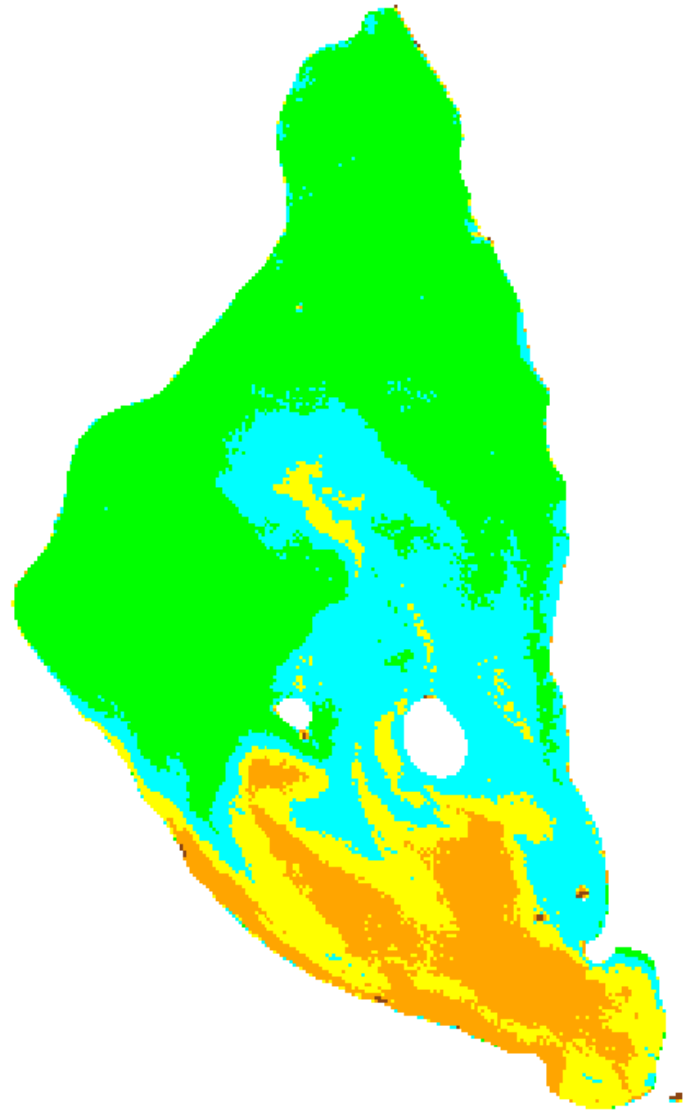
*Ilustración 37: Índice RI aplicado al año 2018*



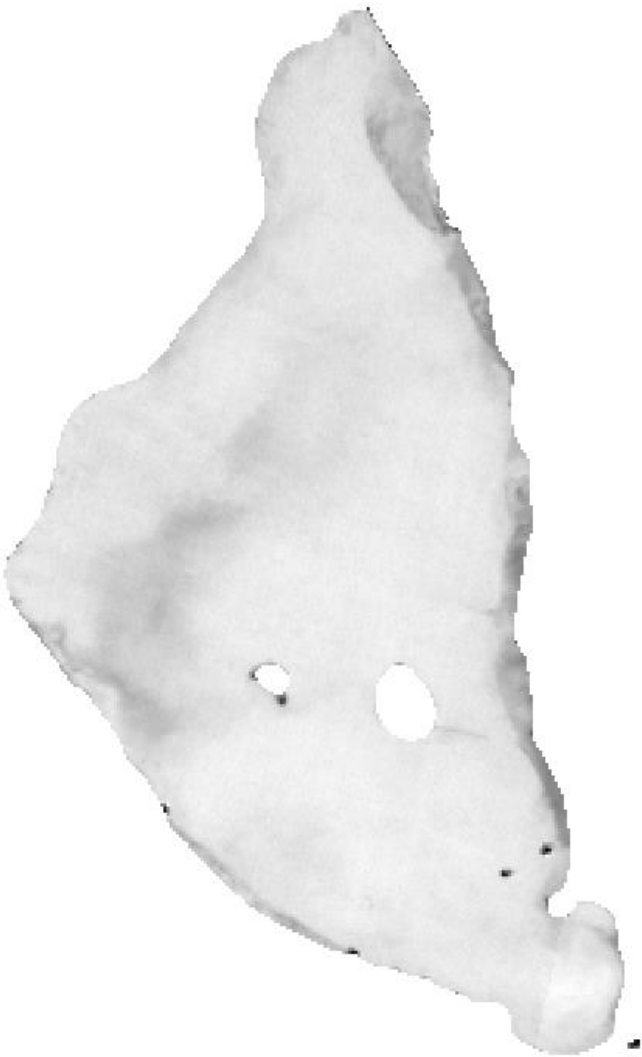
*Ilustración 36: Índice RI aplicado al año 2018 clasificado*



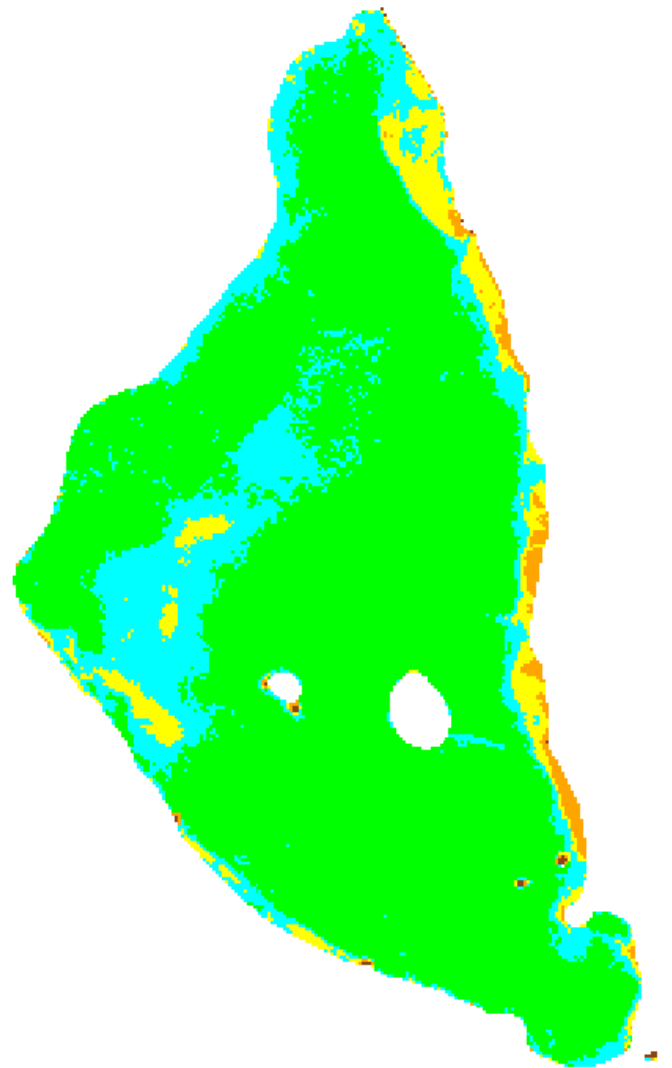
*Ilustración 39: Índice RI aplicado al año 2019*



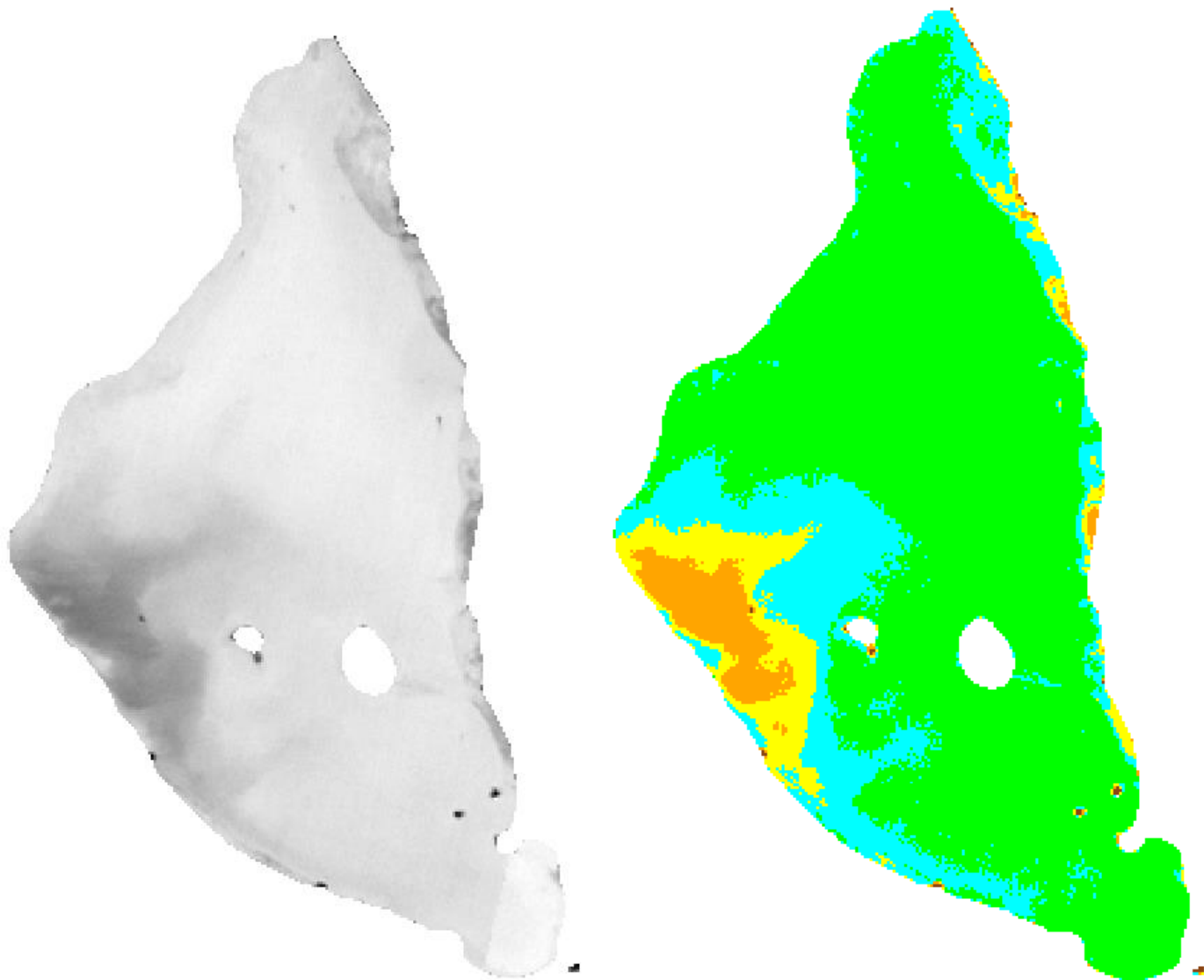
*Ilustración 38: Índice RI aplicado al año 2019 clasificado*



*Ilustración 41: Índice RI aplicado al año 2020*



*Ilustración 40: Índice RI aplicado al año 2020 clasificado*



*Ilustración 43: Índice RI aplicado al año 2021*

*Ilustración 42: Índice RI aplicado al año 2021 clasificado*

## Índice Se2WaQ



Ilustración 44: Índice Se2WaQ aplicado al año 2016

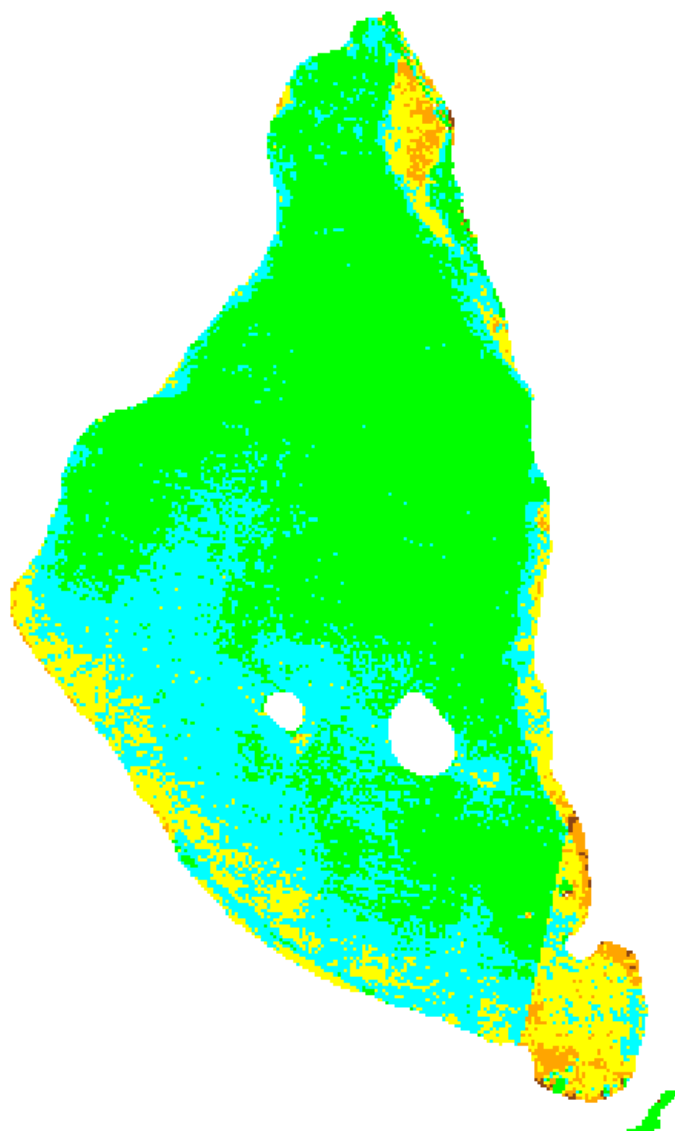
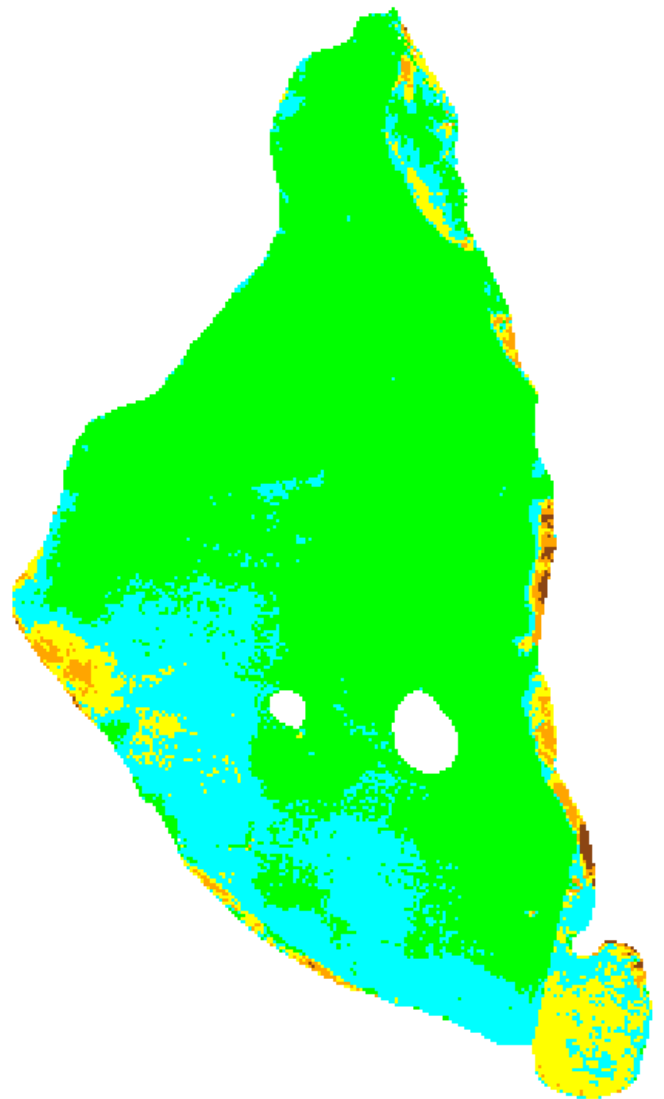


Ilustración 45: Índice Se2WaQ aplicado al año 2016 clasificado



*Ilustración 46: Índice Se2WaQ aplicado al año 2017*



*Ilustración 47: Índice Se2WaQ aplicado al año 2017 clasificado*



Ilustración 48: Índice Se2WaQ aplicado al año 2018

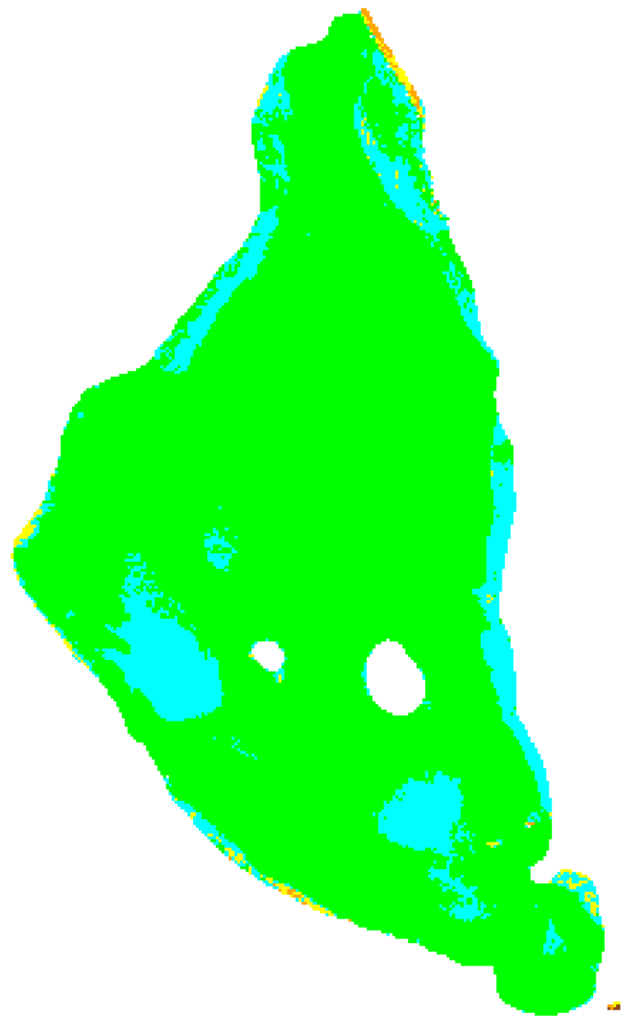
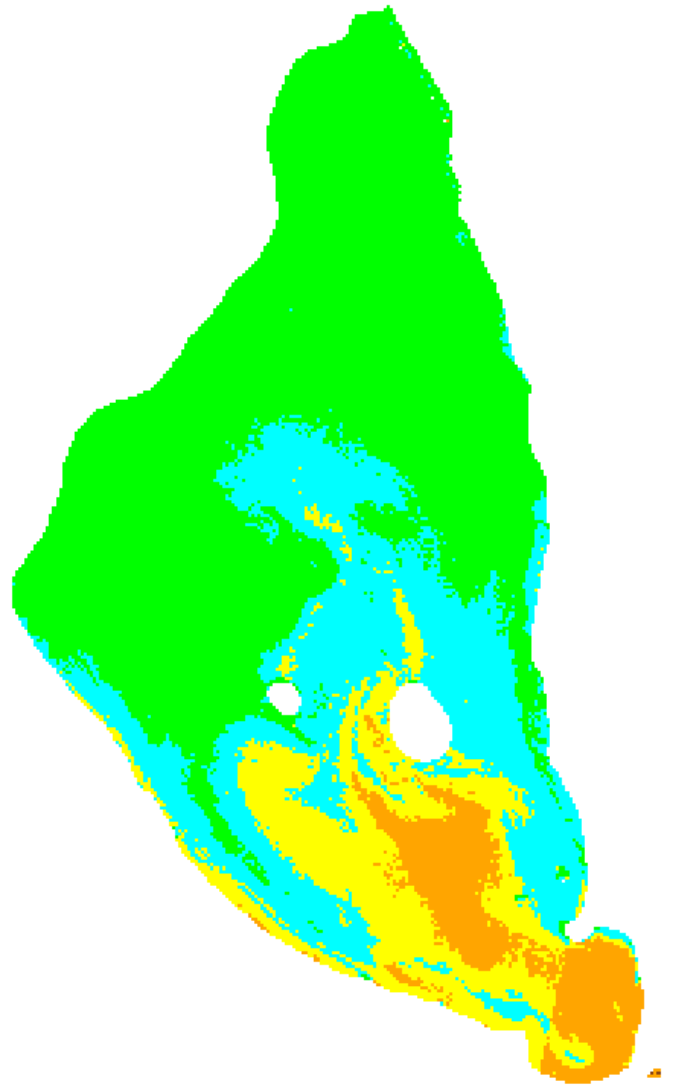


Ilustración 49: Índice Se2WaQ aplicado al año 2018 clasificado



*Ilustración 50: Índice Se2WaQ aplicado al año 2019*



*Ilustración 51: Índice Se2WaQ aplicado al año 2019 clasificado*



Ilustración 52: Índice Se2WaQ aplicado al año 2020

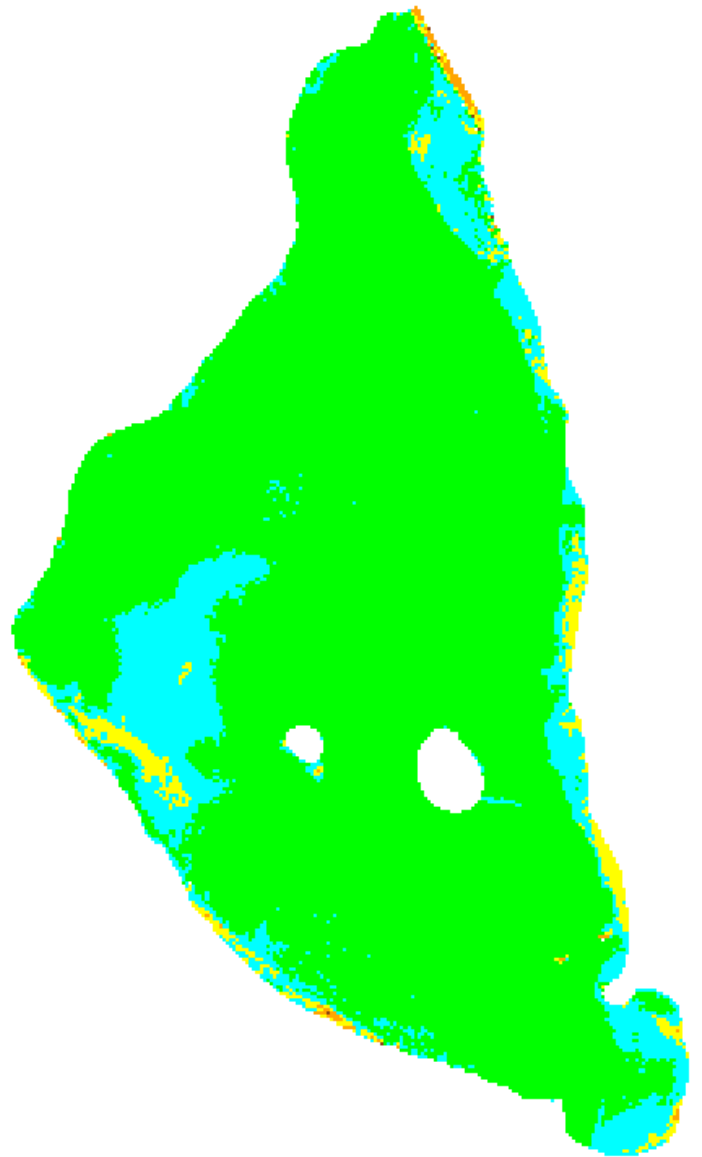
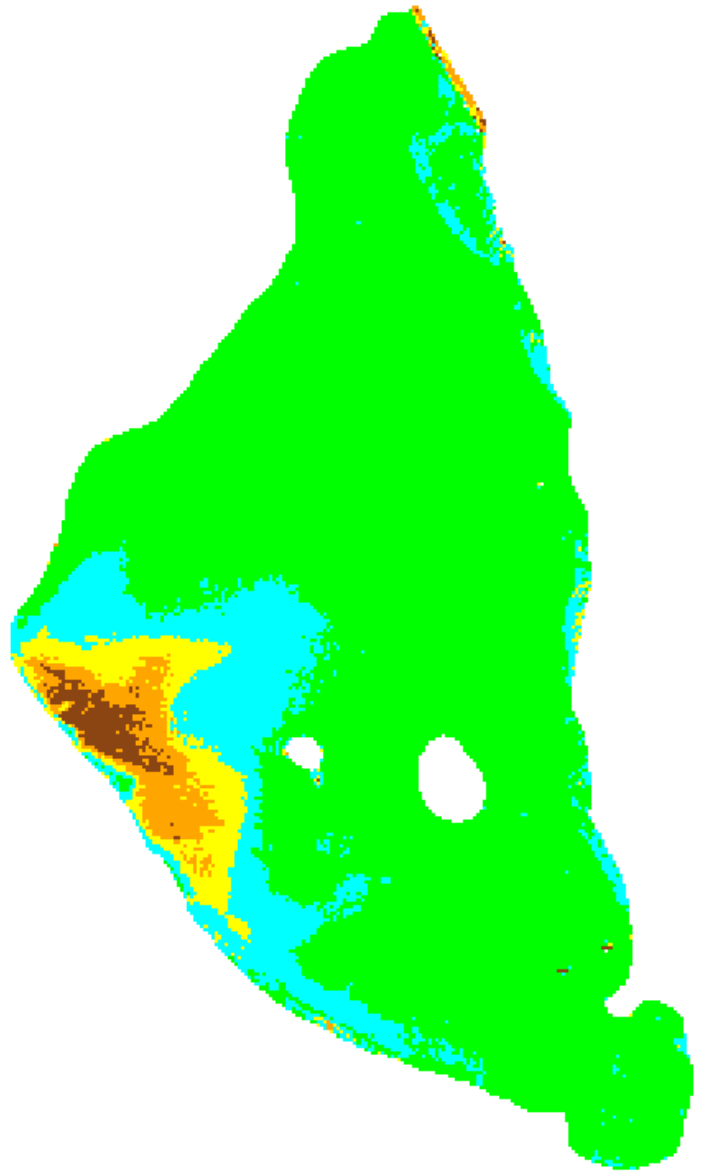


Ilustración 53: Índice Se2WaQ aplicado al año 2020 clasificado



*Ilustración 54: Índice Se2WaQ aplicado al año 2021*

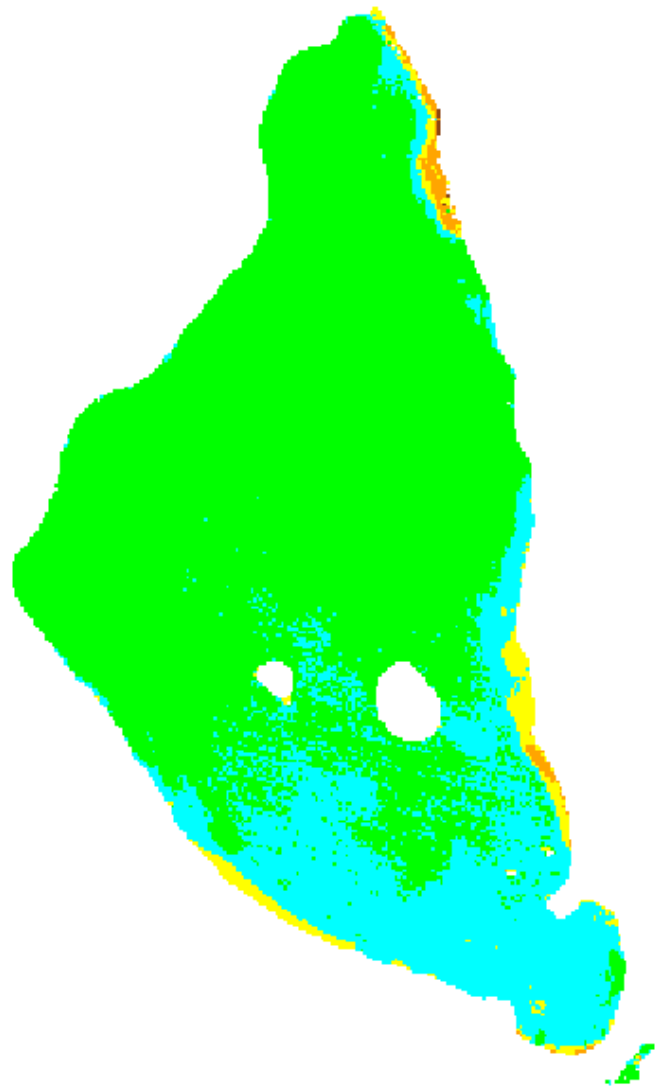


*Ilustración 55: Índice Se2WaQ aplicado al año 2021 clasificado*

## Índice MPHBI



*Ilustración 57: Índice MPHBI aplicado al año 2016*



*Ilustración 56: Índice MPHBI aplicado al año 2016 clasificado*



*Ilustración 59: Índice MPHBI aplicado al año 2017*



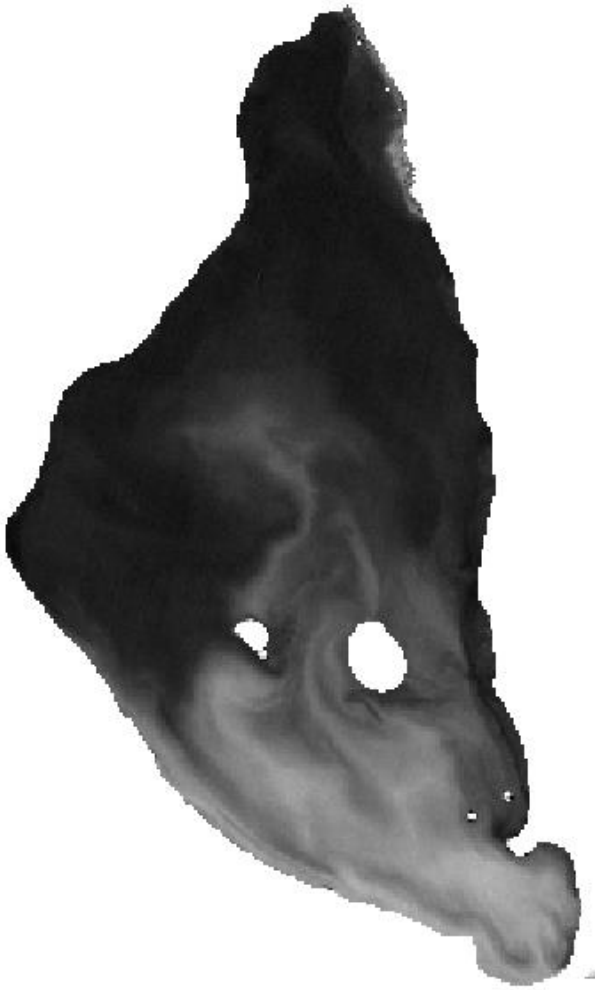
*Ilustración 58: Índice MPHBI aplicado al año 2017 clasificado*



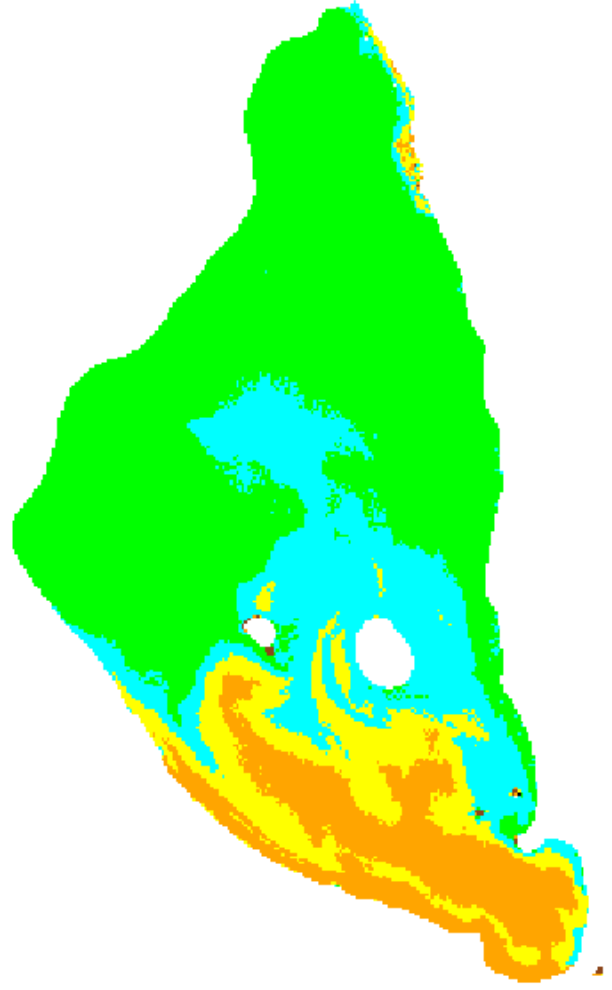
*Ilustración 61: Índice MPHBI aplicado al año 2018*



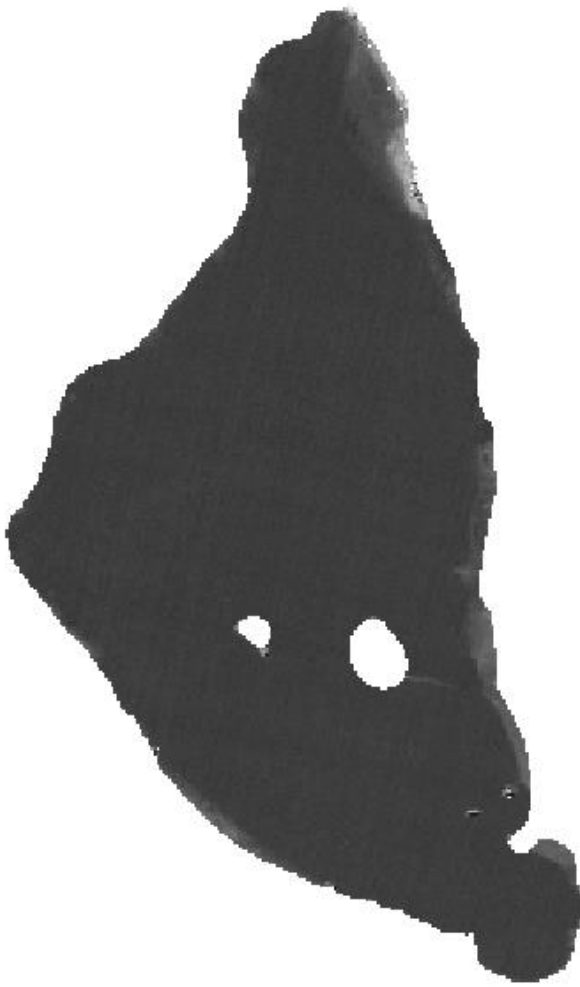
*Ilustración 60: Índice MPHBI aplicado al año 2018 clasificado*



*Ilustración 63: Índice MPHBI aplicado al año 2019*



*Ilustración 62: Índice MPHBI aplicado al año 2019 clasificado*



*Ilustración 65: Índice MPHBI aplicado al año 2020*



*Ilustración 64: Índice MPHBI aplicado al año 2020 clasificado*



*Ilustración 66: Índice MPHBI aplicado al año 2021*

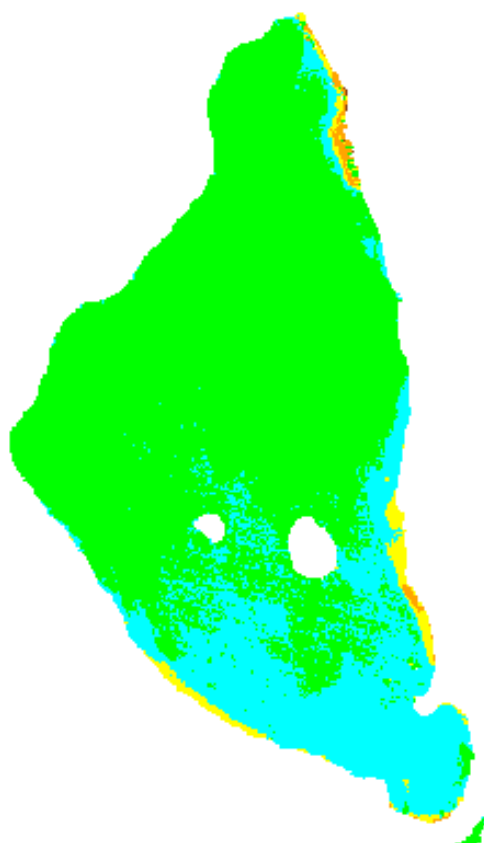


*Ilustración 67: Índice MPHBI aplicado al año 2021 clasificado*

## Índice Ulyssys



*Ilustración 69: Índice Ulyssys aplicado al año 2016*



*Ilustración 68: Índice Ulyssys aplicado al año 2016 clasificado*



*Ilustración 71: Índice Ulyssys aplicado al año 2017*



*Ilustración 70: Índice Ulyssys aplicado al año 2017 clasificado*



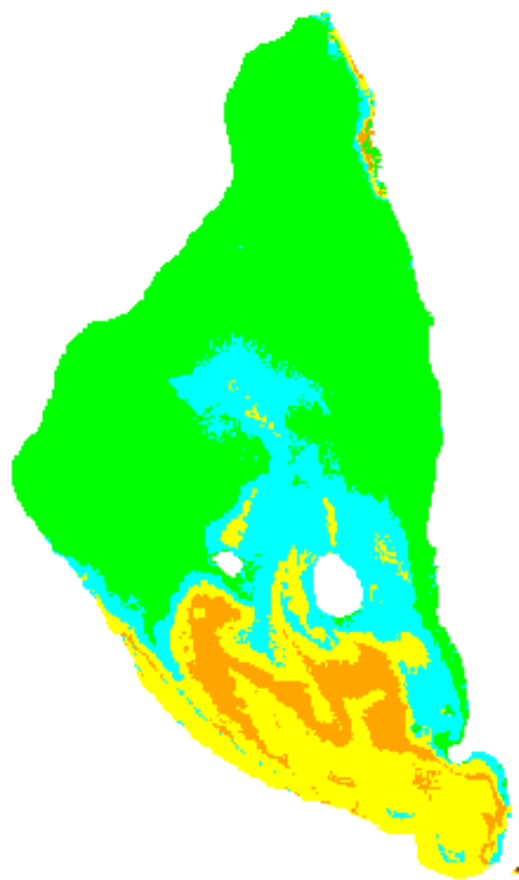
*Ilustración 72: Índice Ulyssys aplicado al año 2018*



*Ilustración 73: Índice Ulyssys aplicado al año 2018 clasificado*



*Ilustración 75: Índice Ulyssys aplicado al año 2019*



*Ilustración 74: Índice Ulyssys aplicado al año 2019 clasificado*



*Ilustración 76: Índice Ulyssys aplicado al año 2020*



*Ilustración 77: Índice Ulyssys aplicado al año 2020 clasificado*



*Ilustración 79: Índice Ulyssys aplicado al año 2021*



*Ilustración 78: Índice Ulyssys aplicado al año 2021 clasificado*

