

# TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN APLICADAS AL ESTUDIO DE LAGUNAS DE CASTILLA LA-MANCHA A LO LARGO DE UNA SERIE TEMPORAL

REMOTE SENSING TECHNIQUES APPLIED TO THE STUDY OF LAGOONS IN CASTILLA LA-MANCHA OVER A TIME SERIES

Trabajo Fin de Máster



Convocatoria:  
Septiembre 2022

CURSO 2021-2022

Universidad Complutense de Madrid  
Facultad de Historia y Geografía

Máster en Tecnologías de la Información  
Geográfica



Autor:  
Juan Molina García

Tutora:  
María Eugenia Pérez González

## **RESUMEN**

El presente trabajo recopila distintas técnicas de teledetección para hallar información relevante sobre dos lagunas continentales de la Mancha Húmeda, la laguna de Manjavacas y la laguna de Pedro Muñoz. Para ello se ha procedido a la recopilación de diversas imágenes en distintas estaciones y durante un periodo de 50 años a través de los satélites Landsat y Sentinel. Estas imágenes han sido analizadas en distintas combinaciones de bandas de forma visual pero también de forma analítica sacando perfiles espaciales, estudios de temperaturas superficiales e índices de vegetación. Además se han incluido análisis químicos del agua para ambas lagunas en distintos puntos para el año 2022. Todos estos análisis han proporcionado un gran número de resultados en los que se muestra la gran variabilidad intra e interanual de las lagunas pudiendo percibir diferentes conclusiones acerca de los efectos de estas lagunas en la temperatura superficial, pudiendo apreciar su influencia en la creación del efecto “isla de frío”; de las variaciones que suceden tanto en la lámina de agua como en la orla de vegetación que la rodea, ya sea a lo largo de los años, en relación a las estaciones del año, o durante eventos meteorológicos concretos; o sobre el aporte de contaminantes, concretamente mediante el proceso de eutrofización producido por el exceso de nutrientes.

**PALABRAS CLAVE:** Satélite, NDVI, Análisis temporal, Teledetección, Landsat, Sentinel.

## **ABSTRACT**

The present work collects different remote sensing techniques to find relevant information on two continental lagoons of the Castilla La-Mancha, the Manjavacas' lagoon and Pedro Muñoz's lagoon. For this purpose, various images have been collected in different seasons and over a period of 50 years through the Landsat and Sentinel satellites. These images have been analyzed visually in different combinations of bands but also analytically by taking spatial profiles, surface temperature studies and vegetation index. In addition, in 2022 chemical analyses of water have been made for both lagoons in different collection points. All these analyses have yielded a large number of results showing the large intra and interannual variability of the lagoons, with different conclusions about the effects of these lagoons on surface temperature, being able to appreciate its influence in the creation of the effect "cold island"; of the variations that happen both in the sheet of water and in the edge of vegetation that surrounds it, either throughout the years, in relation to the seasons of the year, or during specific weather events; or on the contribution of pollutants, specifically through the eutrophication process produced by excess nutrients.

**KEY WORDS:** Satellite, NDVI, temporal analysis, remote sensing, Landsat, Sentinel.

# ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....   | 3  |
| 2. OBJETIVOS .....   | 4  |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS .....  | 4  |
| 3.1. Obtención y características de las imágenes .....                               | 4  |
| 3.2. Cálculo del índice del NDVI .....   | 6  |
| 3.3. Metodología para el análisis fisicoquímico del agua .....                       | 6  |
| 3.4. Metodología para el análisis de la temperatura superficial del terreno .....    | 7  |
| 4. RESULTADOS .....  | 8  |
| 4.1. ÁMBITO DE ESTUDIO .....   | 8  |
| 4.1.1. Laguna de Manjavacas .....  | 9  |
| 4.1.2. Laguna de Pedro Muñoz .....   | 12 |
| 4.2. RESULTADOS PARA LA LAGUNA DE MANJAVACAS .....                                   | 14 |
| 4.2.1. Resultados de los gráficos del índice NDVI sobre los puntos de medición... .. | 14 |
| 4.2.2. Resultados de los gráficos del índice NDVI en las estaciones del año .....    | 17 |
| 4.2.3. Resultados imágenes sobre eutrofización .....                                 | 19 |
| 4.2.4. Resultados de las imágenes sobre la vegetación lagunar .....                  | 24 |
| 4.2.5. Resultados de las imágenes sobre la variación de la lámina de agua .....      | 29 |
| 4.2.6. Perfiles espaciales .....   | 32 |
| 4.2.7. Análisis del agua .....   | 37 |
| 4.2.8. Análisis de las temperaturas .....  | 39 |
| 4.3. RESULTADOS PARA LA LAGUNA DE PEDRO MUÑOZ .....                                  | 45 |
| 4.3.1. Resultados de los gráficos del índice NDVI sobre los puntos de medición... .. | 45 |
| 4.3.2. Resultados de los gráficos del índice NDVI en las estaciones del año .....    | 48 |
| 4.3.3. Resultados imágenes sobre eutrofización .....                                 | 50 |
| 4.3.4. Resultados imágenes sobre vegetación .....                                    | 54 |
| 4.3.5. Resultados de las imágenes sobre la variación de la lámina de agua .....      | 58 |
| 4.3.6. Perfiles espectrales .....  | 62 |
| 4.3.7. Análisis del agua .....   | 64 |
| 4.3.8. Análisis de las temperaturas .....  | 65 |
| 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....  | 72 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA .....  | 79 |
| ANEXO I: .....   | 82 |

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los humedales y lagunas endorreicas son ecosistemas muy valiosos, debido a que han sido utilizados por el ser humano para la obtención de agua para el cultivo o para el ocio, siendo destino vacacional para muchas personas en épocas no muy lejanas, como ocurría en la laguna de las Celadillas en el municipio de El Pedernoso, no muy lejos del área de estudio, dónde incluso se utilizaba la laguna para realizar baños de barro a los que se les atribuía propiedades medicinales. La importancia histórica y cultural de estos enclaves se ha ido perdiendo en los últimos años, debido en parte a la desaparición de estos, como es el caso de las múltiples lagunas que existían en el municipio de Las Pedroñeras, a pocos kilómetros del área de estudio. Otras lagunas, sin embargo, han podido resistir, en parte a la acción humana, mediante aportes provenientes de depuradoras, es el caso de las dos lagunas de estudio, la laguna de Pedro Muñoz de carácter más urbano debido a su gran proximidad con el municipio homónimo, y la laguna de Manjavacas con un carácter más natural. Ambas lagunas constituyen hoy en día un enclave indispensable para la avifauna de la zona, siendo lugar de refugio y nidificación para diversas especies de aves, constituyendo uno de los principales motivos de su conservación y uno de los principales intereses de su estudio. En este caso su estudio ha sido enfocado mayormente mediante las imágenes por satélite, las cuales han sido recopiladas sobre una extensa serie temporal, que abarca en cierta medida, desde los primeros satélites Landsat hasta la actualidad.

Una de las mayores ventajas de la teledetección es su uso para el estudio de diferentes fenómenos a lo largo del tiempo, viendo los cambios que se producen y pudiendo obtener así, información relevante. Esta ventaja ha sido muy utilizada en medio ambiente, ya sea para ver el cambio de las masas forestales o de las masas de agua, o para seguir los procesos de recuperación tras un incendio o tras el vertido de un contaminante. También se pueden seguir procesos a largo plazo, en relación con el cambio climático, como es el caso de la desertificación. Estos estudios requieren una selección de imágenes, una escala concreta de trabajo y una serie de métodos de análisis. Este estudio se encuentra a caballo entre los dos grandes grupos con objetivos de estudios multitemporales definidos por Chuvieco en 1998, por un lado el grupo con el objetivo de seguir la evolución fenológica de una cubierta vegetal, en este caso la orla de vegetación lagunar y también la aparición de eutrofización, estos estudios ponen el énfasis en los cambios por estaciones, mismo proceso que se realiza con las láminas de agua. Y por otro lado, se encontraría el otro grupo, cuyo objetivo trata de determinar los cambios producidos entre diferentes fechas, con lapsos de tiempo de varios años pero siendo siempre en la misma época o estación, observando así procesos a largo plazo como la expansión agrícola o el crecimiento urbano, pero en este estudio estaría orientado a los cambios en las lagunas y en sus entornos próximos.

Según el Convenio Ramsar sobre las zonas húmedas, se establecen como zonas húmedas, las extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de agua, ya sean naturales, artificiales, permanentes, dulces o saladas y cuya profundidad no sea mayor a 6 metros. Estos son unos criterios que se cumplen con ambas lagunas de estudio, en

cuanto a la profundidad, otros estudios reducen este parámetro para referirse a los humedales de interior. Los humedales del interior peninsular no suelen superar los dos metros de calado lo que permite que muchas de sus características puedan ser vistas por las imágenes de satélite, como la vegetación, la contaminación o la eutrofización, siendo el verano la época idónea para observar estas últimas, y por el contrario, el invierno, resulta útil para la observación de la máxima extensión de las láminas de agua (García Rodríguez & Pérez González, 2010). Además, el estudio de las masas de agua naturales mediante las imágenes de satélite puede dar información relevante en cuanto a los contrastes térmicos a pequeña escala, estos análisis se hacen posibles gracias a las bandas térmicas de los sensores que poseen algunos satélites como Landsat con TM y ETM+ (Pérez González & García Rodríguez, 2000).

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es conocer las múltiples herramientas que ofrece la teledetección para el estudio de dos lagunas de Castilla la Mancha a lo largo de una serie temporal que comprende desde 1972 a 2022, este objetivo se desarrollará en otros objetivos secundarios que son:

- El estudio de la evolución de las lagunas y su vegetación a través del índice de NDVI
- El estudio visual de la evolución de las lagunas a través de las bandas del espectro visible con especial atención al proceso de contaminación, concretamente a la eutrofización.
- El estudio visual de las lagunas y su vegetación a través de la combinación (4-3-2 o similar) en la que se encuentra la banda del infrarrojo cercano, con especial atención a la respuesta clorofílica de la vegetación.
- El estudio visual de las lagunas y de la extensión de estas por medio de las bandas del infrarrojo de onda corta y el cercano, con la combinación 6-5-4 o similar.
- El estudio de los perfiles espaciales de las escenas más representativas.
- El estudio de la composición fisicoquímica de las lagunas en 2022.
- El estudio de las diferencias de temperatura superficial a partir de imágenes Landsat 8, observando el posible efecto de isla de frío.

## **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1. Obtención y características de las imágenes**

Se han seleccionado múltiples imágenes desde 1972 a 2022 en diferentes estaciones y atendiendo a criterios de disponibilidad, interés por motivos meteorológicos, escasa presencia de nubosidad y obtención de la mayor parte de estaciones para un mismo año.

Teniendo especial interés por las imágenes de los años más recientes debido a la mayor calidad de las mismas y al menor número de estudios sobre los años más recientes.

Las misiones escogidas fueron por un lado, el Sentinel 2 compuesto por dos satélites idénticos, el Sentinel-2A y el Sentinel-2B cuyos lanzamientos se realizaron en junio de 2015 y en marzo de 2017, respectivamente, por la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Unión Europea dentro del programa *Copernicus*. Ambos satélites cuentan con una cámara multispectral con 13 bandas y una alta resolución espacial que pasa de los 60 metros hasta los 10 metros en las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano. Por otro lado, está la misión Landsat compuesta por una serie de satélites lanzados por los Estados Unidos que comienzan en 1972 con el Landsat 1, utilizado en el presente estudio, además del Landsat 2 (1975), el Landsat 5 (1984), el Landsat 7 (1999) y por último el Landsat 8 lanzado en el 2013. El Landsat 1 conocido como ERTS contaba con dos instrumentos principales, un sistema de cámara llamado RBV (*Return Beam Vidicon*) y un escáner multispectral (MSS) el cual contaba con 2 bandas del espectro visible (rojo y verde) y 2 bandas infrarrojas, su resolución espacial era de 80 metros; el Landsat 2 contaba con la misma resolución espacial y mismos instrumentos aunque con 3 bandas, una del espectro visible del azul al verde, otra del visible del naranja al rojo y otra del visible del rojo al infrarrojo cercano; el Landsat 5 amplió las bandas y la resolución, teniendo 3 bandas del visible y 2 del infrarrojo cercano con 30 metros de resolución y una adicional térmica con 120 metros de resolución espacial, este satélite contaba pues, con el sensor MSS, pero también con el sensor TM (*Thematic Mapper*); el Landsat 7 ya contaba con 8 bandas, teniendo en cuenta la pancromática y otra banda del térmico, y contando con un nuevo sensor además del TM, el ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), su resolución era de 30 metros excepto la banda pancromática que era de 15 metros; por último, el satélite Landsat 8 el cual tiene los sensores OLI (*Operational Land Imager*) con 9 bandas espectrales con resolución de 30 metros excepto para la pancromática que tiene 15 y TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) con dos bandas térmicas con una resolución espacial de 100 metros.

Las imágenes se han descargado de la web del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (*United States Geological Survey*) y de la web de la Agencia Espacial Europea, *EO Browser*, obteniendo los paquetes completos de las imágenes junto a sus metadatos. Estas imágenes se introducían en el software *Erdas Imagine* mediante el *Layer Stack*, escogiendo las bandas de interés, y creando así la imagen espectral, pudiendo hacer las combinaciones para los análisis visuales y también los análisis de los índices como el del NDVI. Además del software de *Erdas Imagine* también se utilizaros otros softwares del campo de los Sistemas de Información Geográfica, *ArcMap* y *ArcGis Pro*.

En la siguiente tabla se exponen las bandas utilizadas por cada satélite en cada una de las combinaciones realizadas para el análisis visual. Teniendo en cuenta que el espectro electromagnético en el que puede ver el ser humano es por lo general de entre 380nm a 750nm; y que el espectro del infrarrojo entre el cercano y el de onda corta es de 750-1.700nm.

|                               | <b>Landsat 2</b>         | <b>Landsat 5</b>           | <b>Landsat 7</b>           | <b>Landsat 8</b>           | <b>Sentinel 2</b>                          |
|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| <b>Color natural</b>          | 1 – 2 – 3<br>(475-830nm) | 1 – 2 – 3<br>(450-690nm)   | 1 – 2 – 3<br>(452-692nm)   | 2 – 3 – 4<br>(450-670nm)   | 2 – 3 – 4<br>(458-680nm)                   |
| <b>Falso color infrarrojo</b> | ---                      | 2 – 3 – 4<br>(520-900nm)   | 2 – 3 – 4<br>(520-900nm)   | 3 – 4 – 5<br>(530-880nm)   | 3 – 4 – 8<br>(543-680nm;<br>785-899nm)     |
| <b>Infrarrojos</b>            | ---                      | 4 – 5 – 7<br>(760-2.350nm) | 4 – 5 – 7<br>(770-2.350nm) | 5 – 6 – 7<br>(850-2.290nm) | 8 – 11 – 12<br>(785-899nm;<br>1.565-2.280) |

Fig.1. Tabla de combinaciones de bandas por satélite

Las imágenes utilizadas se exponen en el Anexo I.

### 3.2. Cálculo del índice del NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) expuesto por Rouse et al., en 1974, es usado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias del rojo y del infrarrojo cercano, otorgando una medida sobre la cantidad, calidad, vigorosidad y desarrollo de la vegetación a partir de las imágenes de satélite. Este cociente se basa en el comportamiento de las firmas espectrales en las bandas roja (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) y el infrarrojo cercano (0,7 a 1,1  $\mu\text{m}$ ), el contraste espectral que se produce en la vegetación indica la vigorosidad de esta en diferentes grados, traduciéndose en una escala que va del -1 al 1, siendo el valor máximo, 1, el que indica la mayor vigorosidad posible, por ejemplo un cultivo que se ha regado, y conforme el valor va llegando a 0, se corresponde con las superficies desnudas o con vegetación rala o enferma. A partir de los valores por debajo de 0, se trata de la presencia de agua. Esto se debe a que la respuesta espectral de la vegetación sana es más alta que la vegetación seca o enferma para la banda del infrarrojo, y más baja para la banda del rojo, por lo que al aplicar la fórmula del NDVI, a mayor vigorosidad de la vegetación más cercano será el valor a 1 y viceversa, acercándose el valor a 0. El agua debido a su baja reflectancia en la banda del rojo y a la aún más baja en la del infrarrojo, obtiene valores negativos que aumentan negativamente con la profundidad. La fórmula del NDVI es la siguiente:

$$\text{NDVI} = (\text{Banda 5} - \text{Banda 4}) / (\text{Banda 5} + \text{Banda 4})$$

### 3.3. Metodología para el análisis fisicoquímico del agua

El estudio de las muestras de agua, comienza con su recogida, realizada el 11 de mayo de 2022 a una temperatura ambiental de 26°C, la recogida se hizo con recipientes de laboratorio que se llenaron completamente evitando al máximo la presencia de aire y disponiéndolos en un frigorífico en menos de 12 horas para su mayor conservación. Los análisis se realizaron en el laboratorio del departamento de Geografía Física por la técnico

responsable, y se analizaron diversos parámetros fisicoquímicos mediante kits (*La Motte Chemical*):

- Nitratos: se realizaron con un blanco compuesto por 5 ml de muestra + 5 ml de ácido (React.1); y con un blanco para reactivos compuesto de 5ml de agua destilada + 5 ml de ácido (React1) + (React.2). Utilizando una longitud de onda de 535 nm. Multiplicando el resultado del N hallado por 4,4.
- Nitritos: se utilizó la misma composición para el blanco y para el blanco de los 78 pero en este caso al tratarse de nitritos, se multiplicó por 3,3 para hallar la concentración final. La longitud de onda de lectura fue la misma que con los nitratos, 535 nm.
- Fosfatos: se utilizó la muestra problema como blanco y agua destilada + reactivos como blanco para reactivos. La longitud de onda utilizada fue de 640 nm.
- Sulfatos: se utilizó como blanco la muestra problema y la longitud de onda fue de 415 nm.
- Cloruros: se utilizó el método de lectura directa.
- Amoniaco: se utilizó la muestra problema como blanco y el agua destilada + reactivos empleados como blanco para reactivos. La longitud de onda de lectura fue de 415 nm.

Para el resto de parámetros se utilizó una sonda multisensor calibrada HI929898, HANNA Instruments® que cumplía las siguientes especificaciones para los siguientes parámetros:

- pH: rango de medida de 0,00 a 14,00 pH.
- Conductividad eléctrica: rango de medida de 0,000 a 200,000 mS/cm µS/cm.
- Temperatura: rango de medida de -5,00 a 55,00°C.

### **3.4. Metodología para el análisis de la temperatura superficial del terreno**

Para el estudio de la temperatura, especialmente de las diferencias entre la temperatura de la laguna y su entorno, se han utilizado las imágenes del satélite Landsat 8, en su colección del nivel 1 adquiridos por los sensores OLI (*Operational Land Imager*) y TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), utilizando la banda 10 como banda térmica y las bandas 4 y 5 para el cálculo del NDVI (Índice Diferencial Normalizado de Vegetación).

Se comienza mediante el cálculo de la radiancia espectral TOA (*Top Of Atmospheric*):

$$TOA = M_L * Q_{cal} + A_L$$

Dónde  $M_L$  es un factor de re-escalamiento multiplicativo específico de banda (valor disponible en el archivo de metadatos “MTL”, en la línea *RADIANCE\_MULT\_BAND\_x*, dónde x es igual al número de la banda, en este caso la 10=  $Q_{cal}$ ); y  $A_L$  corresponde al factor de re-escalamiento aditivo específico de la banda (valor disponible también en el

“MTL” en la línea *RADIANCE\_ADD\_BAND\_x*, donde x es igual al número de la banda, también de la 10).

Después se procede a la conversión de la radiancia espectral TOA a la temperatura de brillo mediante el siguiente cálculo:

$$BT = (K_2 / (\ln (K_1 / TOA) + 1)) - 273,15$$

En este cálculo  $K_1$  y  $K_2$  corresponden a constantes de conversión térmica específicas de la banda 10, a partir de los metadatos. La resta de los 273,15 es referente al cero absoluto para obtener así la conversión a grados Celsius.

Después se realiza el cálculo del NDVI con la misma fórmula expuesta anteriormente:

$$NDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4)$$

A partir de este índice se calcula la proporción de vegetación la cual está muy relacionada con la emisividad ( $\epsilon$ ). Para el cálculo de la proporción de vegetación ( $P_v$ ) se utiliza la siguiente fórmula, cuyos datos son extraídos de las propiedades de las imágenes ráster del NDVI (metadatos):

$$P_v = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{m\acute{a}x} - NDVI_{min}))^2$$

De esta proporción se saca el cálculo de la emisividad:

$$\epsilon = 0,004 * P_v + 0,0986$$

Obteniendo así como resultado final la temperatura de la superficie terrestre (LST, *Land Surface Temperature*), que no se debe confundir con la temperatura del ambiente, mediante la siguiente fórmula:

$$LST = (BT / (1 + (0,00115 * BT / 1.4388) * \ln (\epsilon)))$$

Este proceso se puede obtener de forma casi automática con el uso de la herramienta *L8 LST Tool* creada por Yousif Almamalachy en el Centro Nacional de Recursos Hídricos de Irak, pudiendo ser utilizada en el software de ArcMap, teniendo en cuenta que la imagen debe descargarse en una carpeta exclusiva para ella con todas las capas y archivos originales y sin modificaciones y con una ruta de carpeta lo más corta posible.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. ÁMBITO DE ESTUDIO

El ámbito de estudio se encuentra inmerso en la Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda, la cual se localiza en la cuenca alta del río Guadiana, un territorio que pretende aunar la conservación y biodiversidad ecológica con el desarrollo social y económico de los municipios existentes, representando un lugar único por sus características biológicas, sus ecosistemas únicos, su integración, mezcla con la historia y cultura de la región, y con

el desarrollo de la cada vez más cambiante actividad humana. Esta Reserva de la Biosfera abarca un total de unas 294.000 ha divididas en 3 zonas: la zona núcleo con unas 9.000 ha dónde se encuentran los espacios protegidos con alguna figura concreta; la zona tampón, con casi 40.000 ha que rodea a la zona núcleo; y la zona de transición con unas 245.000 ha dónde se encuentra el paso de las áreas protegidas a las zonas más antropizadas (García Jerez & de la Cruz, 2016).

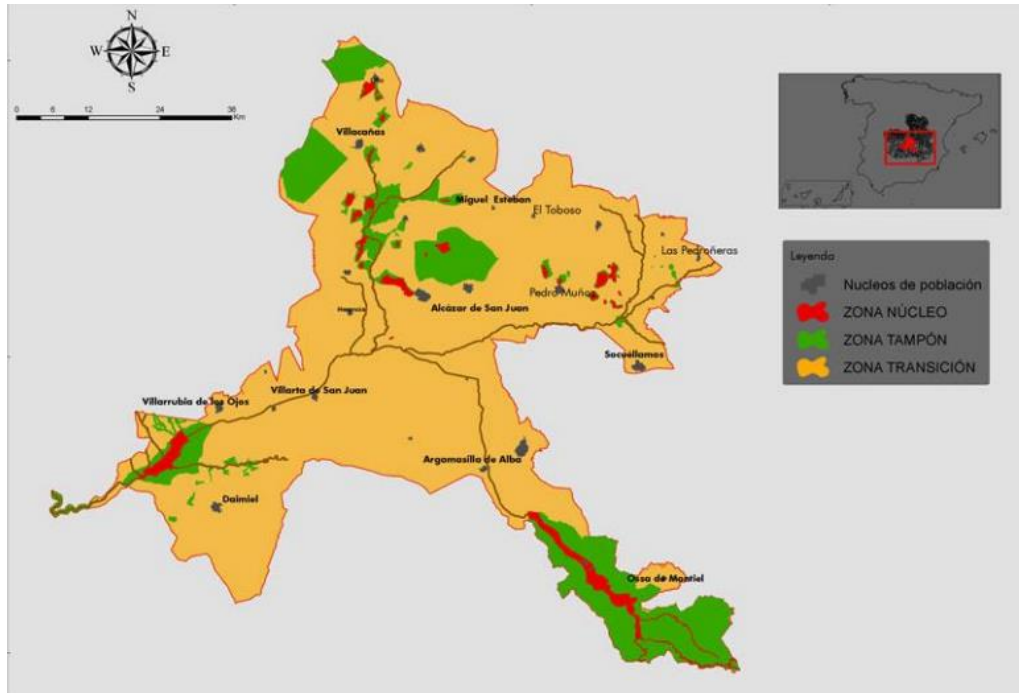


Fig.2. Reserva de la Biosfera. Fuente: Pérez Ortega, 2011

Los principales valores ambientales y culturales de esta Reserva de la Biosfera son los humedales, destacando el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel y el Parque Natural de las Lagunas de Ruidera.

Las precipitaciones se caracterizan por estar por debajo de los 350 mm anuales y con una elevada evaporación y evapotranspiración potencial. En cuanto a la temperatura, existen lugares con una gran amplitud térmica, llegando a los 23°C entre la media del mes más frío y el más cálido (García Jerez, 2014). En cuanto al sustrato litológico, predominan los materiales calcáreos (García Jerez, 2014).

De todas las lagunas que componen esta Reserva, el presente trabajo se centra en dos lagunas cercanas entre sí y situadas al este de la Reserva de la Biosfera, a saber, la laguna de Manjavacas, y la laguna del Pueblo o laguna de Pedro Muñoz, situadas cerca del límite provincial de Cuenca y Ciudad Real.

#### 4.1.1. Laguna de Manjavacas

La Reserva Natural del complejo lagunar de Manjavacas (Cuenca-Ciudad Real) incluye cuatro lagunas, una de ellas la de Pedro Muñoz en Ciudad Real, y el resto en Cuenca, al

sur de Mota del Cuervo, encontrándose la laguna de Sánchez Gómez, la de La Dehesilla, la del Alcahozo y la laguna de Manjavacas. Entre todas suman una extensión total de 300 ha y tienen una profundidad máxima de 100 cm (Gosálvez et al., 2012). La laguna de Manjavacas constituye un humedal de interior de una cuenca de sedimentación de mineralización alta o muy alta, además constituye uno de los humedales de la Lista Ramsar, (Hera Portillo et al., 2011). La laguna de Manjavacas se encuentra en el término municipal de Mota del Cuervo (Cuenca) con una latitud entre 39° 25' N y 39° 24' N y una longitud entre 2° 52' O y 2° 51' O. Su altitud es de 670 m y su superficie de 231 ha (Asencio & Martín, 1988). El Complejo Lagunar de Manjavacas presenta valores faunísticos, florísticos, geomorfológicos y paisajísticos, muchos de ellos considerados de conservación prioritaria por la Ley 9/1999, las Directivas Comunitarias 92/43/CEE de Conservación de los Hábitat Naturales y la Flora y Fauna Silvestres y 79/409/CEE de Conservación de las Aves Silvestres, y por el Plan de Conservación del Medio Natural de Castilla-La Mancha, aprobado en 1994. Por otro lado, desde un punto de vista paisajístico, los humedales endorreicos destacan como elemento singular en la llanura manchega y constituyen, por su localización y temporalidad, elementos estratégicos en las rutas de aves migratorias y zonas de cría de aves acuáticas.



Fig.3. Mapa Laguna de Manjavacas

La existencia de sinclinales que funcionan como una pequeña cuenca en la que acaban drenando muchos arroyos desde las laderas de los anticlinales adyacentes, creando así acumulaciones de agua en los puntos más bajos, son el proceso por el que se crea la laguna de Manjavacas, como sucede con la denominada Acequia Madre. Esta laguna tiene además un aporte antrópico, ya que recibe las aguas residuales de Mota del Cuervo, atenuando así la estacionalidad, pero provocando la contaminación de las aguas a través de la eutrofización (Peinado, 1994). Desde un punto de vista hidrogeológico, el Complejo Lagunar de Manjavacas se asienta sobre un variado grupo de sedimentos, fundamentalmente margas, yesos, arcillas, limos, areniscas, calizas y conglomerados,

siendo todos ellos de bajo interés hidrogeológico. Únicamente destacan pequeños acuíferos colgados en los materiales detríticos o calcáreos de determinada permeabilidad (Amado Pool, 2010).

Actualmente, las aguas residuales, tras ser tratadas en la EDAR, son vertidas a la Laguna de Manjavacas a través de la Acequia Madre. Este hecho supone una importante entrada de nutrientes al sistema, fundamentalmente fósforo y nitrógeno, lo que puede ocasionar un incremento en la biomasa algal y un descenso en los niveles de oxígeno del agua. Este proceso puede repercutir en todo el ecosistema, ya que al sobrepasarse la capacidad de mineralización del sistema, se provocan fases anóxicas en el sedimento, pudiendo dar lugar a alteraciones en las comunidades vegetales y faunísticas ligadas a la laguna. Manjavacas puede considerarse, por tanto, una laguna hipertrófica (Decreto 185/2001).

Tiene un origen kárstico-carbonatado, con aguas cloruradas-sulfatadas y magnésicas. Se trata de un humedal de carácter temporal y con gran dependencia de las aguas subterráneas (Durán et al., 2003). Existe una teoría que hipotetiza la gran dependencia de la laguna de Manjavacas de las aguas subterráneas y que la causa de su deterioro es debido a la desconexión con el acuífero (Hera Portillo et al., 2011).

Las comunidades de helófitos quedan limitadas por la gran presión agraria y la alta salinidad de las lagunas, apareciendo con más facilidad en las zonas con aporte de aguas residuales depuradas (Gosálvez et al., 2012). Los helófitos que dominan en la laguna de Manjavacas se componen del carrizo (*Phragmites australis*), las enneas (*Typha dominguensis*), los juncos de laguna (*Schoenoplectus lacustris*) y la castañuela (*Bolboschoenus maritimus*) (Gosálvez et al., 2012).

En cuanto a la fauna que alberga, la laguna de Manjavacas posee extensas playas para las aves limícolas, favoreciendo la presencia de estas. La laguna de Manjavacas ha albergado un buen número de especies objetivo, hasta ocho taxones, con un total de 7.431 aves, siendo una localidad de interés para el porrón europeo, la avefría europea y la grulla común (contando con un importante dormitorio) (Gosálvez et al., 2012).

El municipio dónde se encuentra la laguna de Manjavacas, Mota del Cuervo, es un municipio conquense con una población de unos 6.000 habitantes (INE, 2021), famoso por sus molinos de viento e históricamente ligado a la agricultura, especialmente al cultivo del cereal, del que sale, su famoso producto, el pan de la Mota. La laguna a unos 9 km del municipio representa otro de sus atractivos turísticos. El uso de suelos es principalmente agrícola, exceptuando algún pequeño pinar relicto, en las cercanías del humedal.

#### **4.1.2. Laguna de Pedro Muñoz**

La laguna de Pedro Muñoz, la cual también se conoce como Laguna del Pueblo o de la Vega (Peinado, 1994), ha sido una laguna estacional, ya Reyes Prosper en 1915 comentaba lo siguiente: “Las lagunas situadas cerca de Pedro Muñoz me dicen llevan desecadas ya algunos años, así en invierno como en la estación estival, después de la

época en que las visité. El nivel del agua de los pozos en aquella comarca ha bajado mucho”. Pero desde 1973, la laguna de Pedro Muñoz ha ido perdiendo el carácter estacional, y con ello su salinidad, mayoritariamente por el aporte de aguas residuales, además de otras graves alteraciones como el vertido de industrias químicas y el de escombros y basuras (Peinado, 1994). La laguna tiene una superficie de 41 ha y una profundidad de 80 cm (Gosálvez et al., 2012). Se encuentra sobre los 39° 24´ N de latitud y los 2° 56´ O de longitud.



Fig.4. Mapa Laguna de Pedro Muñoz

La Reserva Natural del Complejo lagunar de Pedro Muñoz en Ciudad Real, está formada por dos lagunas, la de Retamar y la del Pueblo o Pedro Muñoz, la cual se encuentra limítrofe al núcleo urbano en su parte norte, y está formada por aguas de tipo iónico mixto sulfatado clorurado-magnésico cálcico. Desde el punto de vista geomorfológico se consideran lagunas formadas por depresiones endorreicas donde se produce la acumulación del agua precipitada.

En lo relativo a la vegetación, existe vegetación higrófila como el carrizo (*Phragmites australis*) y una interesante comunidad de quenopodiáceas como *Salicornia ramosissima* y *Cressa cretica*, en pequeñas porciones alejadas del impacto antrópico, una planta que solo se encuentra en esta laguna junto a la de Manjavacas y la del Camino de Villafranca en Alcázar de San Juan (Peinado, 1994). La laguna del Pueblo posee formaciones de tarayes (*Tamarix canariensis Willd*) debido a repoblaciones realizadas. Además, posee, como la laguna de Manjavacas, varias especies de helófitos, además del carrizo (*Phragmites australis*), las eneas (*Typha dominguensis*), los juncos de laguna (*Schoenoplectus lacustris*) y la castañuela (*Bolboschoenus maritimus*) (Gosálvez et al., 2012). Otra especie a señalar serían los coraliillos rojos (*Microcnemum coralloides*) que empiezan a aparecer a principios de verano hasta el final de la estación (Donaire, 2005).

El gran aporte de nutrientes con el vertido de las aguas residuales ha proporcionado un lugar idóneo para mucha avifauna. Esta laguna constituye un lugar de nidificación o internada para muchas especies de aves como la malvasía cabeciblanca, la cual anidó por primera vez en esta laguna en 1990 (Jiménez et al, 1992), el pato colorado, el zampullín cuellinegro o el flamenco (Donaire, 2005).

El municipio de Pedro Muñoz en el que se encuentra la laguna, prácticamente unido a él, es un municipio de la provincia de Ciudad Real, a una altitud de 656 metros, como la laguna. Tiene una población de aproximadamente 7.600 habitantes (INE, 2016) con una extensión de 101,3 km<sup>2</sup>. Se trata de un municipio históricamente agricultor, incluso fue famoso por el cultivo de la patata a comienzos del siglo XX, llevando una variedad de patata el nombre de Pedro Muñoz. Actualmente domina la producción de la vid, principalmente de uva blanca, aunque también cuenta con una notable industria en comparación con el tamaño del municipio, además de un desarrollo del sector terciario como muestra el centro de interpretación abierto en 2010 y llamado El Humedal de Don Quijote, el cual hace referencia a la laguna de Pedro Muñoz que cuenta además con varios miradores.

## **4.2. RESULTADOS PARA LA LAGUNA DE MANJAVACAS**

### **4.2.1. Resultados de los gráficos del índice NDVI sobre los puntos de medición**

Antes de ver los gráficos del índice de vegetación se adjunta un mapa en el que se señalan los puntos de medición del NDVI, además de los puntos de muestreo de agua que se verán en apartados sucesivos.

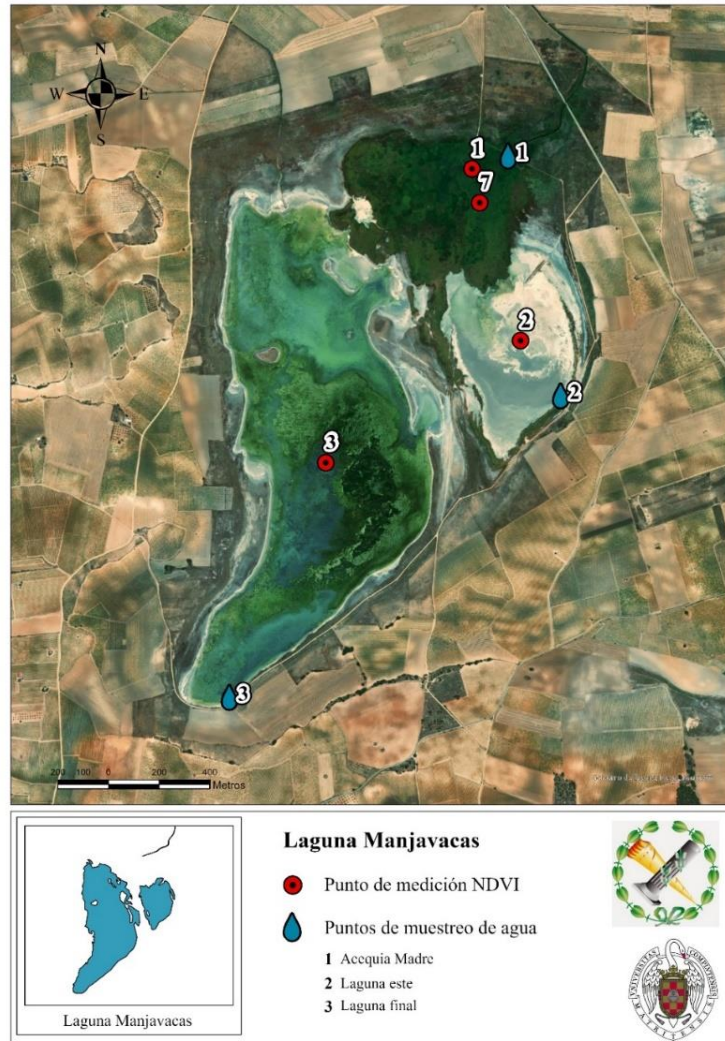


Fig.5. Mapa con los puntos de medición del NDVI y de agua (Laguna Manjavacas)

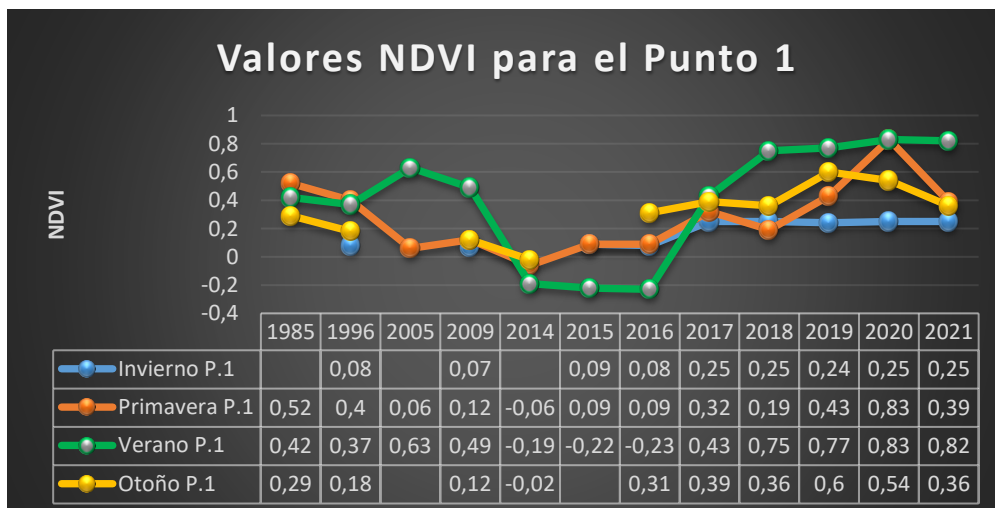


Fig.6. Gráfico NDVI P.1. (Canal Acequia Madre)

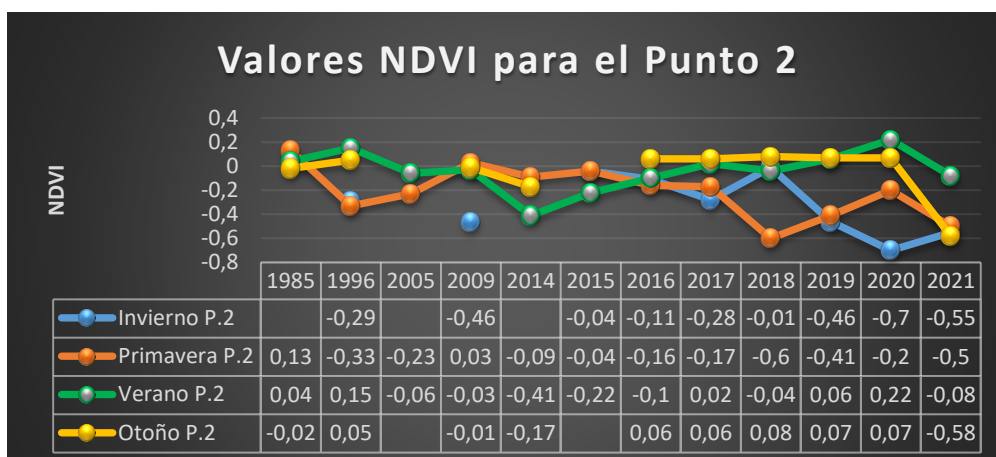


Fig.7. Gráfico NDVI P.2. (Laguna Grande)

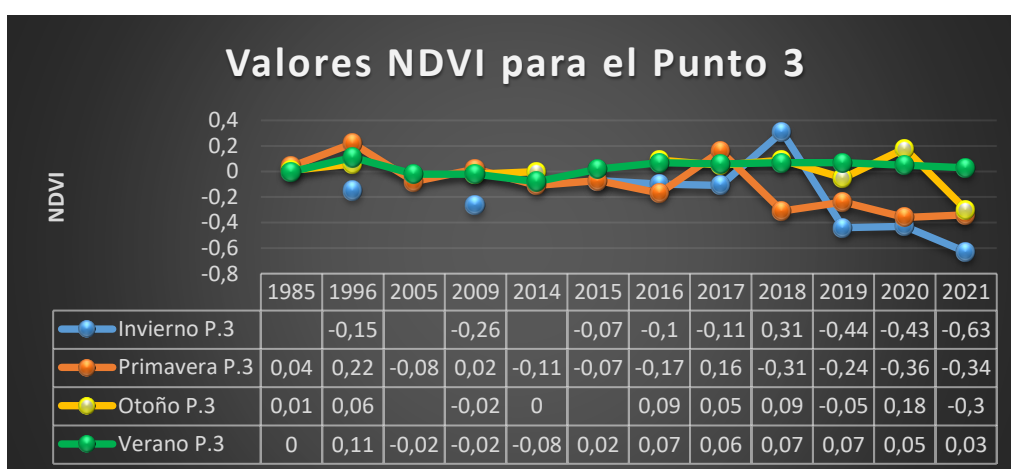


Fig.8. Gráfico NDVI P.3. (Laguna Pequeña Este)

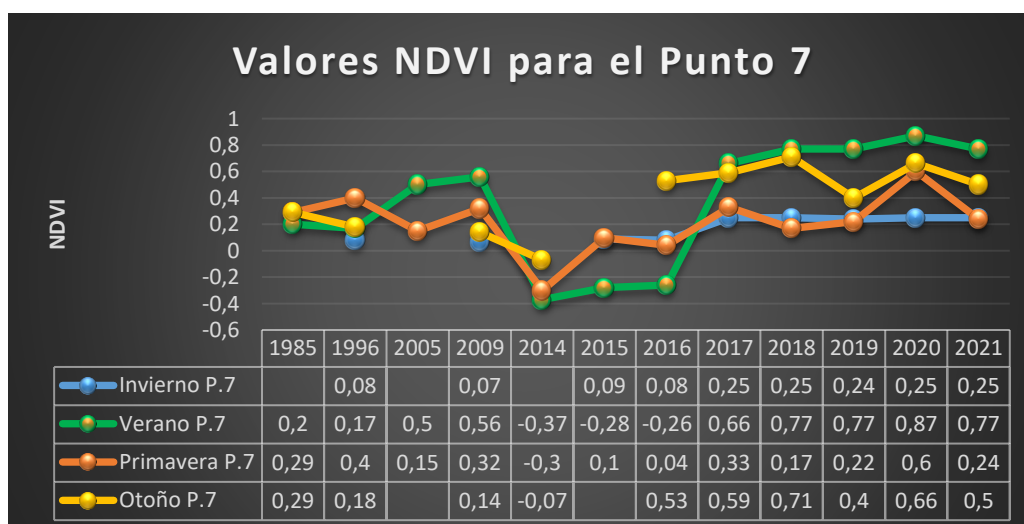


Fig.9. Gráfico NDVI P.7. (Vegetación Acequia Madre)

Podemos observar en estos datos que para los puntos 1 y 7 (Acequia Madre) existe un incremento del NDVI hasta 0.8, valor correspondiente a la vegetación vigorosa, especialmente en los veranos de 2005 y 2009, y desde 2018 a 2021, posiblemente debido

a un aporte de agua que hace que se mantenga cierta vigorosidad en la vegetación durante la estación seca.

En los puntos 2 y 3 correspondientes a las lagunas, se observa un descenso en el NDVI, especialmente bajo en los años 2018 y 2021, con el NDVI= -0.6, en el caso de la primavera y del otoño de 2021, pero también con el mayor pico descendiente para el invierno con -0.7 en 2020 y para 2021 en la laguna pequeña, el verano en cambio no sufre esta tendencia. Esto puede darse a un menor aporte de fertilizantes que aumenten los nutrientes provocando eutrofización, posiblemente subsanado por una mejora en la depuración de las aguas que se vierten, o también podría ser por un mayor aporte de agua que le otorga mayor profundidad, o un incremento de las lluvias otoñales e invernales.

#### 4.2.2. Resultados de los gráficos del índice NDVI en las estaciones del año

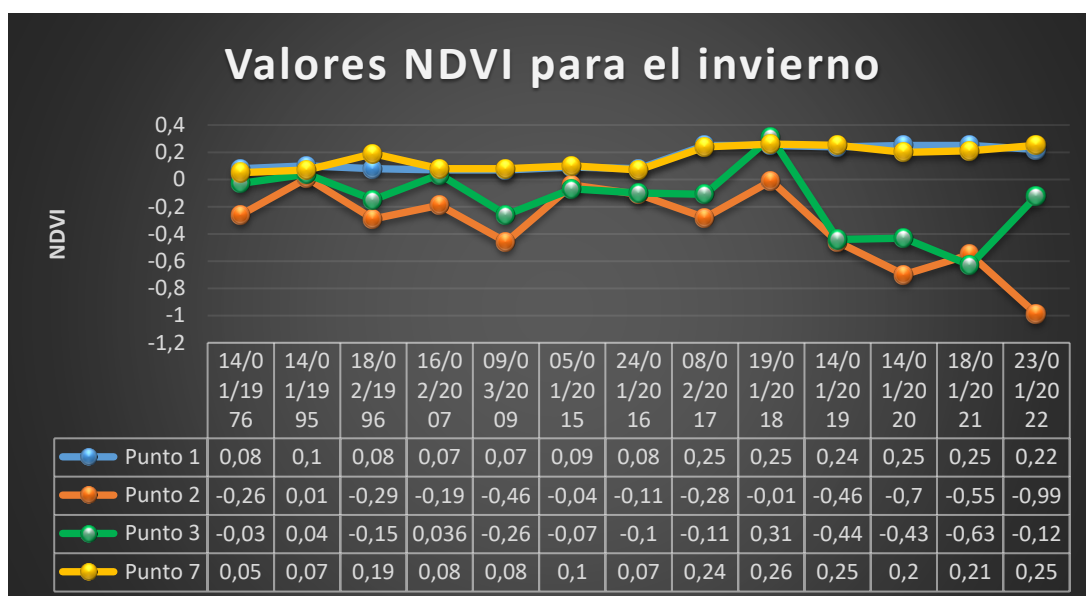


Fig.10. Gráfico NDVI invierno (Laguna de Manjavacas)

Teniendo en cuenta que los valores negativos son propios del agua, vemos como en el invierno se muestran valores mayoritariamente estables que oscilan entre -0.3 y 0.2 con alguna excepción, hasta el año 2019 dónde se produce un descenso de los valores correspondientes a los puntos de las dos lagunas, con una subida en 2022 para la laguna este, posiblemente por cambios en el volumen de agua o por crecimiento de algunas plantas higrófilas, al encontrarse seco.

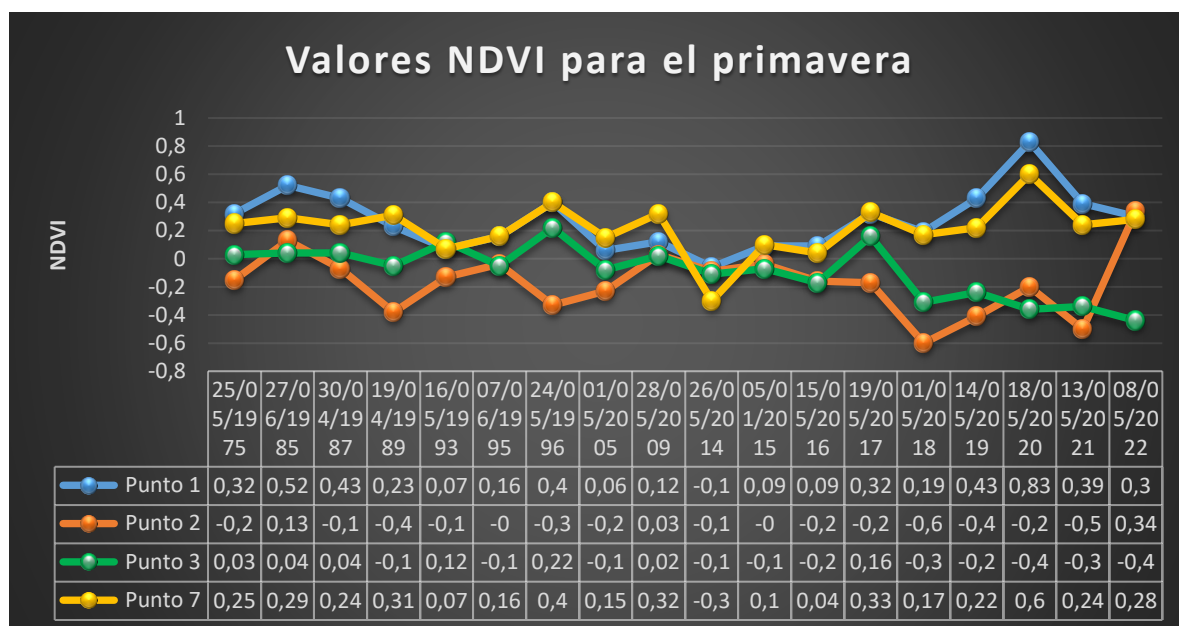


Fig.11. Gráfico NDVI primavera (Laguna de Manjavacas)

En la primavera se oscila a lo largo de los años desde 0.5 a -0.4 produciéndose los valores extremos a partir de los últimos años de medición. En 2018 se alcanza -0.6 para la laguna grande, seguida del segundo pico más bajo de -0.5 en 2021 y seguidamente el más alto de toda la serie con casi 0.4 en 2022, posiblemente se presentarían años con más lluvias o más aporte de agua y en el 2022 se incrementaría la eutrofización. Los otros dos valores extremos que se dan son para el año 2020 en los puntos correspondientes a la Acequia Madre, con valores de 0.6 para la vegetación y 0.8 para el canal debido o a una alta eutrofización o al crecimiento de carrizos, masiega o similar.

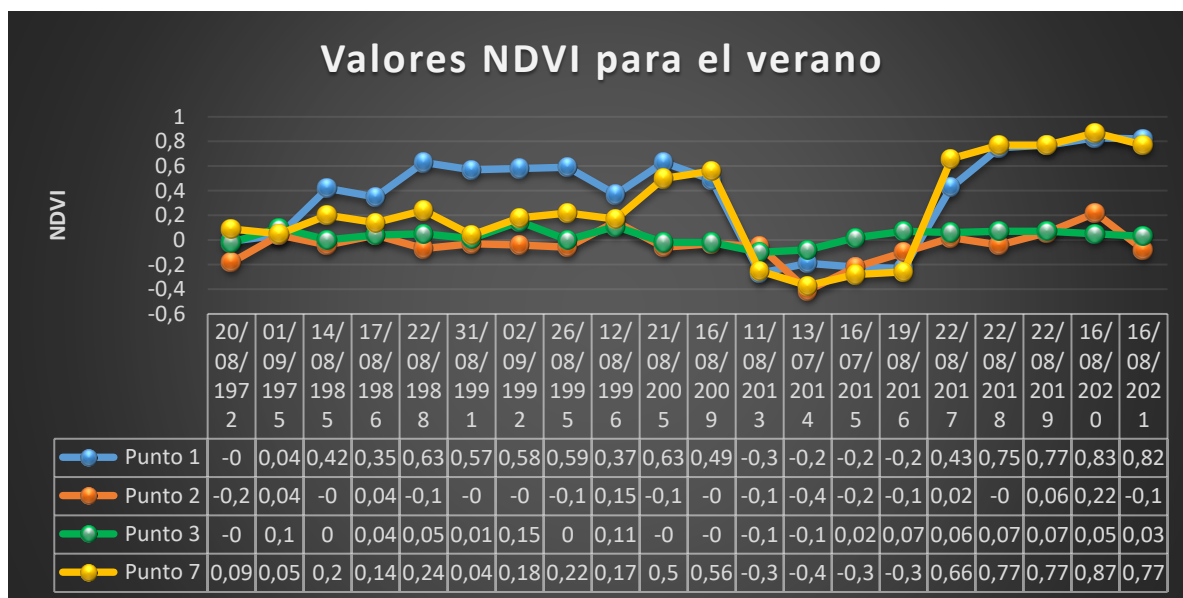


Fig.12. Gráfico NDVI verano (Laguna de Manjavacas)

En el verano, aunque los puntos de las lagunas de la vegetación se mantienen estables hasta 1996, en el caso del canal de la Acequia, se produce ya un incremento en 1985 que

prosigue alrededor de 0.6 hasta que desciende bruscamente en 2013 y se mantiene así hasta 2016 incluido, alrededor del -0.2, es entonces cuando vuelve a subir alcanzando valores récord desde 2018 a 2021, teniendo el punto de vegetación de la Acequia una tendencia muy similar desde 2005. Los valores de las lagunas se mantienen entre 0.2 y -0.1, siendo bastante estables, seguramente por la sequía.

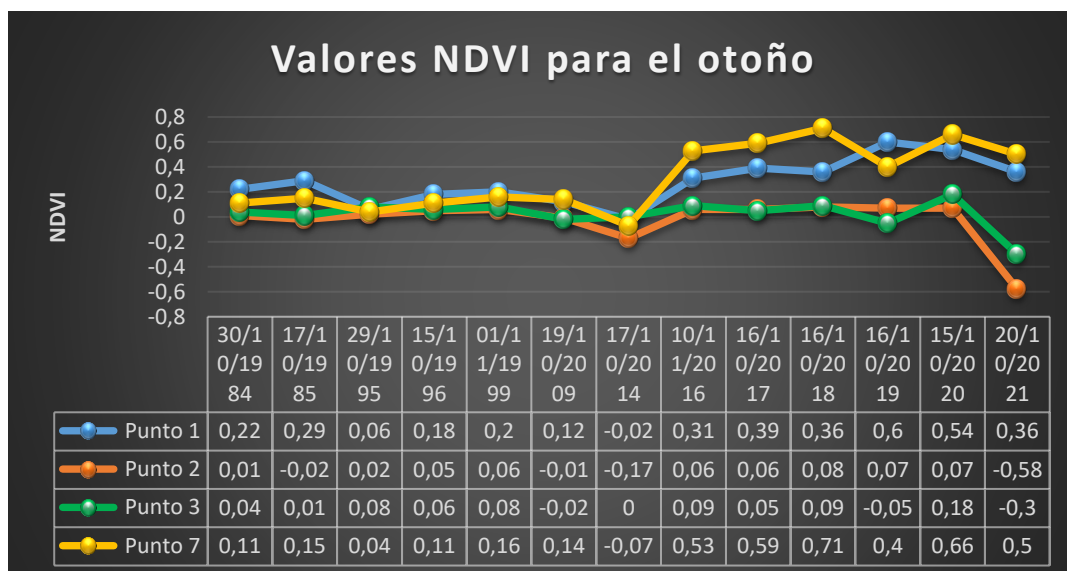


Fig. 13. Gráfico NDVI otoño (Laguna de Manjavacas)

Por último para el otoño, se mantiene muy estable entre 0.3 y -0.1, indicando desde suelo desnudo hacia una ligera presencia de agua, hasta 2014 dónde se empieza a producir un incremento de los valores de NDVI para los puntos de la Acequia Madre teniendo en 0.71 el valor más alto, siendo así evidente la presencia de vegetación o de eutrofización. También se produce un descenso récord en 2021 en los puntos de la laguna hasta -0.58 en la laguna grande.

#### 4.2.3. Resultados imágenes sobre eutrofización

En este apartado se muestran las imágenes en color natural obtenidas por los satélites de Sentinel 2 para fechas posteriores a 2015 y de Landsat 8, 7 y 5 para las anteriores a dicho año. Se han escogido las imágenes con las que se pueda llegar a conocer la variabilidad hídrica del humedal y dar respuesta a los valores dispares que aparecen en los gráficos de NDVI, y también las imágenes que muestren más contrastes haciendo patente la utilidad de estas imágenes a la hora de detectar, en este caso, el estado de las aguas, ya que los colores verdes en la lámina de agua indican una gran presencia de algas, debido en parte a la eutrofización. También los colores más oscuros corresponden a una mayor cantidad de agua en la laguna, y los más claros, a momentos más secos o con menor humedad.

## INVIERNO

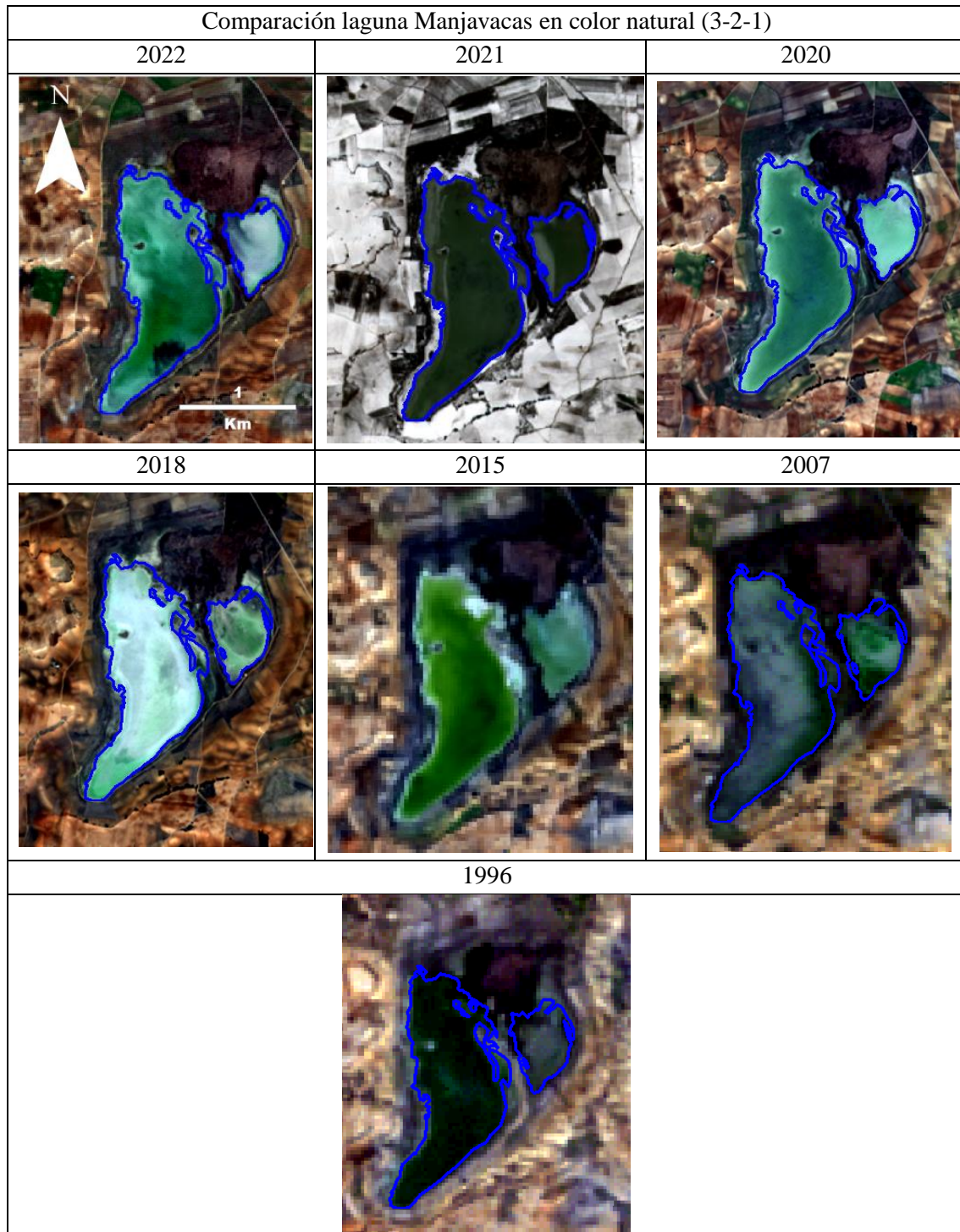


Fig.14. Imágenes de comparación laguna Manjavacas en color natural (3-2-1) en invierno

En primer lugar destaca la imagen de 1996 dónde se aprecia por los colores oscuros que posiblemente es el año que muestra la máxima profundidad y extensión de agua, pero también se aprecian los tonos verdes, en especial en el centro, debido a la eutrofización o a la vegetación higrófila.

Se puede observar que en 2022 a pesar del color verde de las aguas, los valores de NDVI (Fig.10) en esta estación del año indican agua profunda ya que alcanzan por primera vez en la serie el -1. También se puede observar que para años como 2015 y 2018, el valor del NDVI se establece en 0 y podemos ver por las imágenes que se puede deber a dos razones distintas, en el caso de 2015, parece tratarse de una fuerte eutrofización, ya que presenta un color verde muy potente, y en el caso de 2018, parece que simplemente la laguna está seca, apareciendo los afloramientos salinos.

2021 fue un año peculiar en cuanto al invierno debido a la gran nevada de Filomena, la cual supuso un importante aporte de agua, que se presenta en la tabla y que provoca record en el índice más bajo para la laguna pequeña, por debajo de -0.6, y para la laguna grande, se muestra su segundo valor más bajo, por encima de -0.6.

Es 2020 el año que presenta menor valor para el punto correspondiente a la laguna grande (-0.7), posiblemente, tal como se aprecia en la imagen es porque además de que la laguna tiene un nivel de agua considerable, en comparación con el resto de imágenes muestra un color poco verdoso, dando a conocer una menor concentración de algas.

### PRIMAVERA

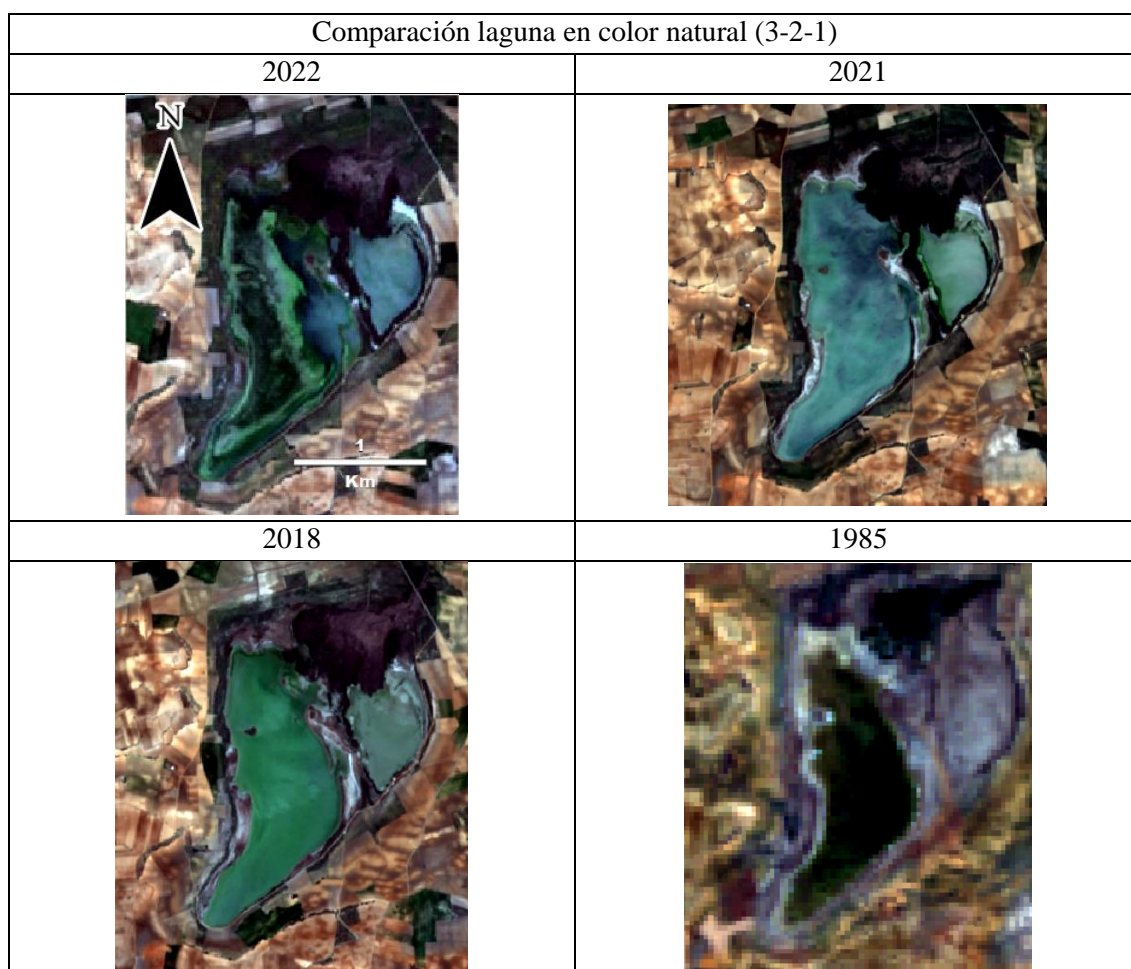


Fig.15. Imágenes de comparación laguna Manjavacas en color natural (3-2-1) en primavera

En la primavera el proceso de eutrofización puede darse a menudo, dependiendo de los aportes de nutrientes y también de las lluvias que se hayan producido, en cuanto a volumen y también en cuanto al momento de producirse. La imagen de 2022 concuerda con lo observado en campo al realizar los análisis de agua ((Fig.31 y 32), ya que la eutrofización, el notable incremento de algas que había en la fecha de toma de muestras, en mayo de 2022, mismo mes de la imagen, fue mayor a lo que se había observado en años anteriores en esta época del año, esta proliferación de algas se acumulaba más en la zona más al oeste, hacia el final de la laguna, y no tanto en la laguna pequeña del este, esto hace que en los valores del NDVI (Fig.11), se observen valores normales, incluso más bajos de lo habitual, alrededor de -0.45 para la laguna pequeña del este, y en cambio para la laguna grande lleguen hasta casi el 0.4, siendo el valor más alto de la serie.

En 2021 y 2018 son los años en los que menor es el NDVI para la laguna grande, algo que parece concordar con el menor color verde de la laguna en esos años.

### VERANO

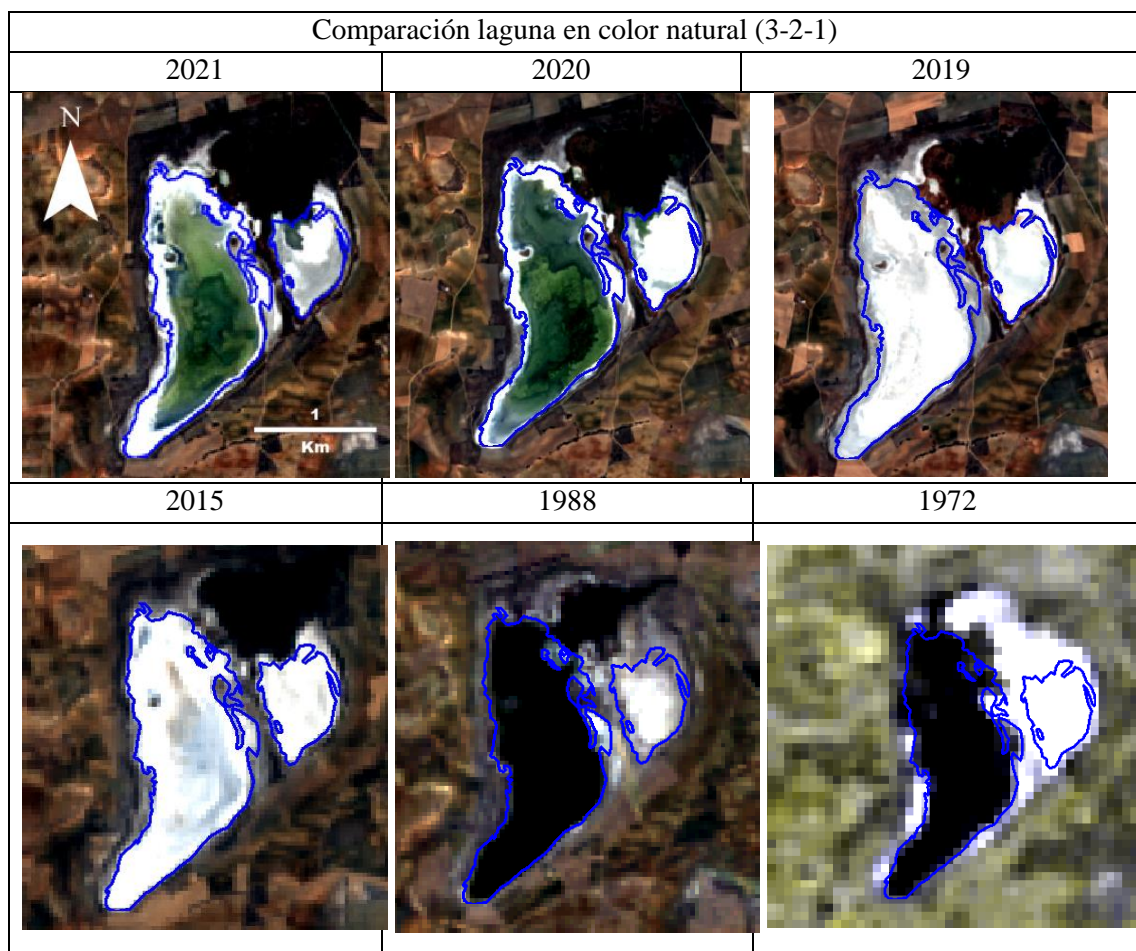


Fig.16. Imágenes de comparación laguna Manjavacas en color natural (3-2-1) en verano

Por lo que se puede observar en las imágenes la laguna pequeña del este es la parte más proclive a secarse, solo pareciendo tener presencia de agua durante 2021 y 2020, en cambio la laguna grande fluctúa desde una aparentemente importante lámina de agua en 1988 a estar completamente seca en 2015 o 2019. Por último, la Acequia Madre, parece

contener cierta cantidad de agua durante el verano, o al menos de humedad, a excepción de la imagen de 1972. El color blanquecino en las imágenes en color natural de los años o sectores secos se corresponde con las eflorescencias salinas que ascienden por capilaridad hasta la superficie y son las responsables del carácter salobre de la laguna.

En lo referente a la eutrofización, se trata de una época del año en la que se suele incrementar debido a la falta de lluvias, esto acaba provocando problemas a la fauna en ocasiones por la gran concentración de nutrientes y algas, provocando en ocasiones enfermedades como el botulismo a gaviotas o anátidas.

En relación con las gráficas del NDVI (Fig.12) vemos que es bastante estable la tendencia en lo que a las lagunas se refiere, con el mayor pico relativo en 2020 (0.2), concordante con la eutrofización que se puede observar.

En 2014 se produce el menor valor para la laguna grande (-0.4), en la imagen se corrobora viendo que además de que no está seca, el color verdoso no es muy potente como en otros años de la serie.

## OTOÑO

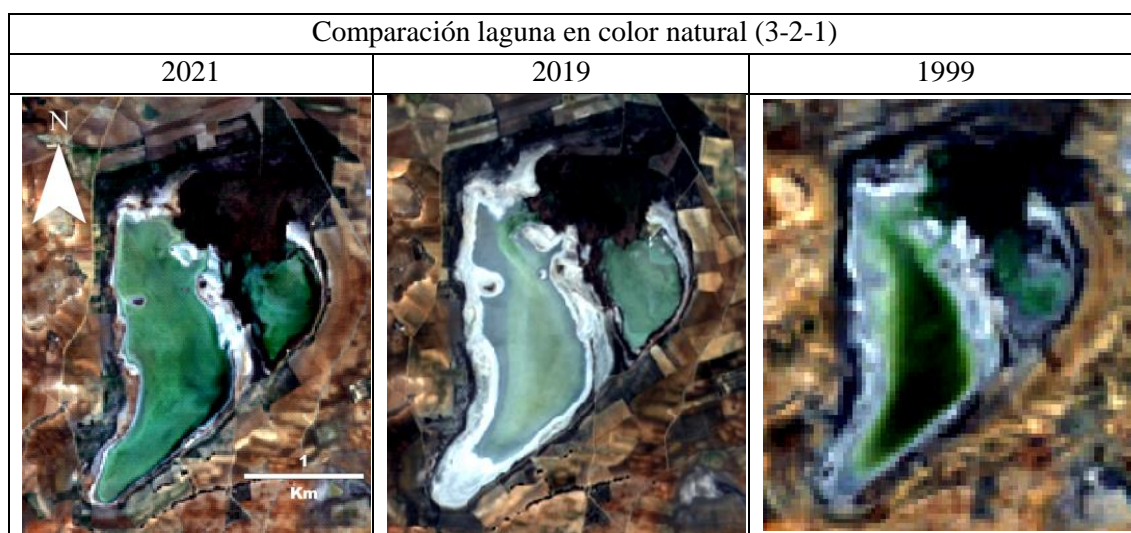


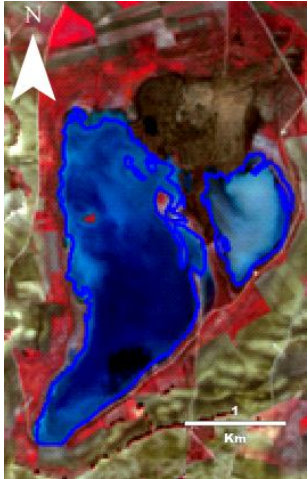
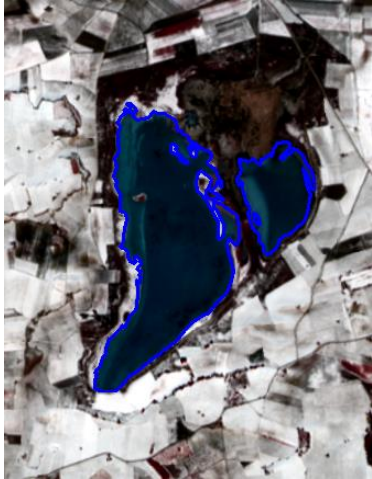

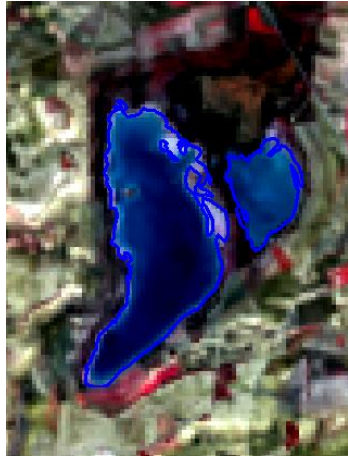
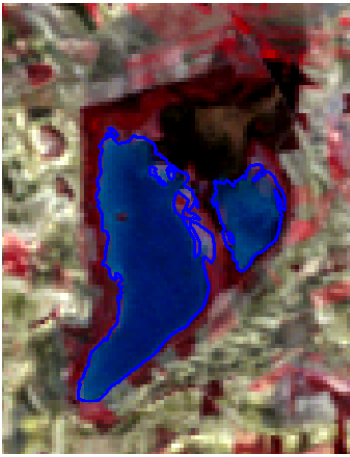
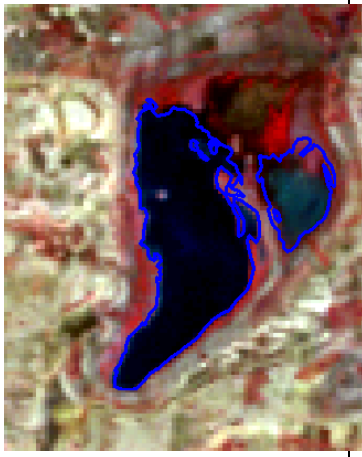
Fig.17. Imágenes de comparación laguna Manjavacas en color natural (3-2-1) en otoño

En el otoño, las variaciones pueden ser muchas, todo debido al aporte artificial de agua pero sobre todo a la estacionalidad de las lluvias, parece ser que en el año 2021 se produjeron abundantes lluvias pero no una gran eutrofización, es por ello que en lo relativo a las lagunas, el gráfico (Fig.13) se mantiene estable, alrededor de 0.2 y -0.2 hasta este año 2021 dónde baja hasta -0.6 para la laguna grande y a -0.3 para la pequeña del este. En el caso de 1999 es evidente, el intenso color verde que presenta la laguna grande y parte de la pequeña del este.

#### 4.2.4. Resultados de las imágenes sobre la vegetación lagunar

En este apartado se muestran las imágenes en falso color infrarrojo que puedan por un lado contestar a las incógnitas de los valores extremos de las gráficas del índice de vegetación, y por otro lado, para observar las diferencias que se pueden dar y que se pueden observar gracias a utilizar la banda del infrarrojo cercano. En el apartado anterior se utilizaron las bandas visibles, pero en este la banda del rojo se ha colocado en la banda del infrarrojo cercano, esta banda permite observar la actividad cloroflica de la vegetación, a mayor intensidad del rojo, mayor vigorosidad de la vegetación.

### INVIERNO

| Comparación laguna y vegetación False IR (4-3-2)                                    |   |   |
|---|---|---|
| 2022  | 2021  | 2018  |
|   |   |   |
| 2015  | 2009  | 1996  |
|  |  |  |

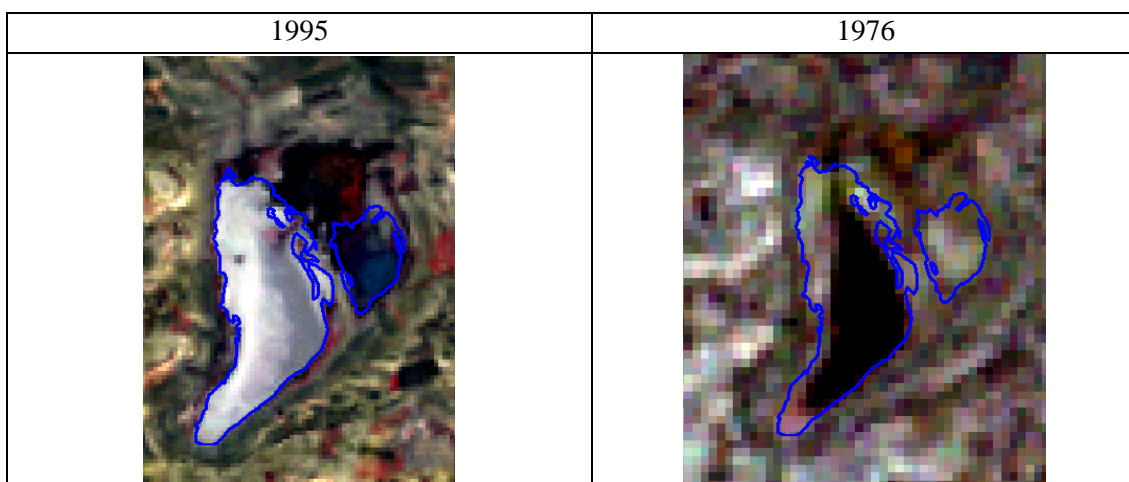
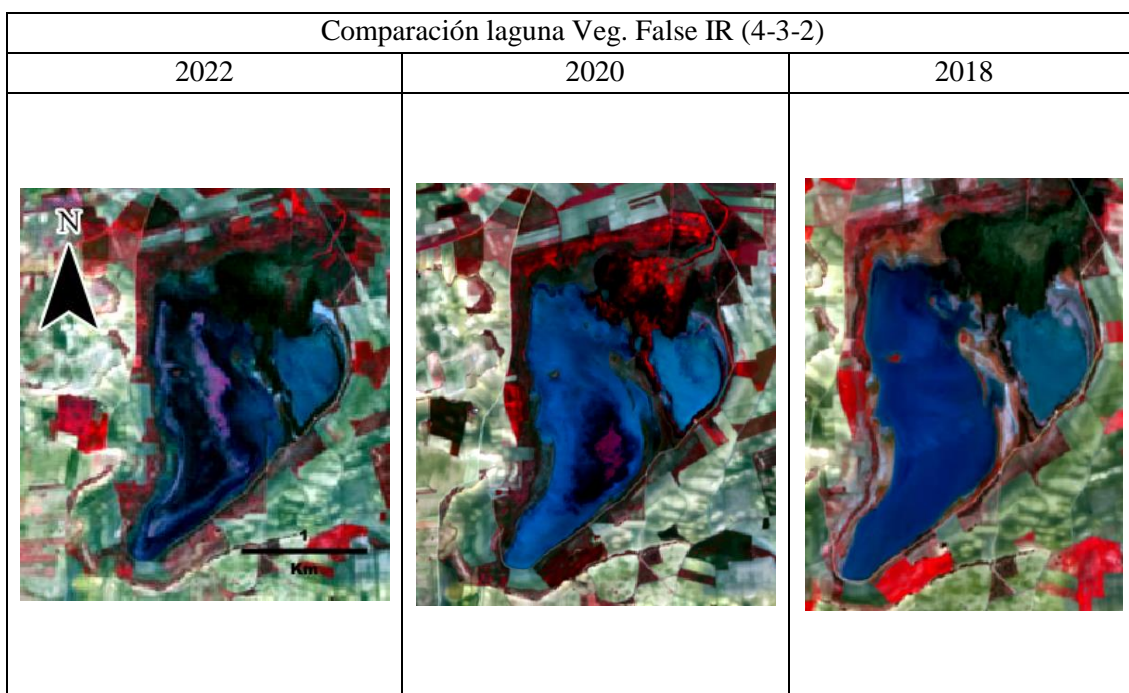


Fig.18. Imágenes de comparación laguna y vegetación False IR (4-3-2) en invierno

A pesar de que visualmente se aprecian cambios en la vigorosidad de la vegetación con rojos muy intensos en ocasiones en la Acequia Madre, los puntos donde se tomaron los valores del índice de vegetación no se encuentran en los puntos donde se observan los mayores contrastes. Pero visualmente se puede apreciar que, en los años con una extensa lámina de agua, la vegetación circundante de la laguna muestra una notable vigorosidad. Llama la atención la imagen de 2021, Filomena trajo un aumento de agua, pero una gran parálisis en la vegetación, que no merma, pues se recupera mucho el siguiente año. Algo similar sucede en el resto de años a excepción del 2022, 2009 y 1996, en los cuales hay una presencia importante de una orla de vegetación vigorosa que rodea la laguna, y en el caso de 1996 también se encuentra en los bordes de la Acequia Madre.

### PRIMAVERA



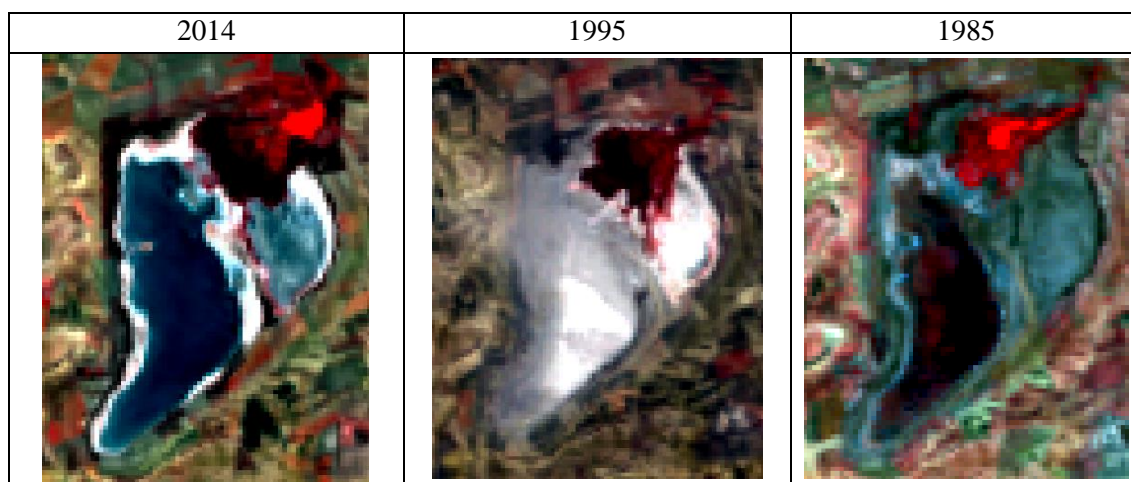


Fig.19. Imágenes de comparación laguna y vegetación False IR (4-3-2) en primavera

En la primavera se observan algunos contrastes en el punto del canal de la Acequia Madre, siendo los años 1985 y 2020, con cerca del 0.6 y por encima del 0.8, respectivamente, los años con los valores más altos en el NDVI (Fig.11), algo que se corrobora con las imágenes, ya que aunque en 2014 aparece también un rojo más intenso, se encuentra desplazado al noreste del punto de muestreo, lo que también ocasiona que se encuentre en este año el valor más bajo para 2014 en el punto de vegetación de la Acequia Madre. Posiblemente ese año se desbordase el canal y se estancara el agua, antes de llegar al lugar habitual en el que se dispersa el agua, o fue menor el aporte de esta.

También en relación con la eutrofización, se pueden observar situaciones que no se pudieron diferenciar con las bandas del espectro visible (Fig.15), es el caso de la diferencia entre 2020 y 2022 en el punto de la laguna grande, al estar en el centro vemos como existe una mayor concentración de algas que aparecen con un color más parecido al violeta, y en 2020 se concentra en el extremo sur de la laguna grande. También se puede ver como el valor que aparecía alto en 1985, en este caso destaca más frente a los tonos verdes del espectro visible, ya que de las imágenes escogidas, resulta ser la que tiene unas manchas más rojizas en el agua, de ahí el valor que se da a este punto en ese año por encima del 0. Llama también la atención a ausencia total de agua y de prácticamente vegetación vigorosa, a excepción de la Acequia Madre, en el año 1995, año en el que se produjo una gran sequía.

## VERANO

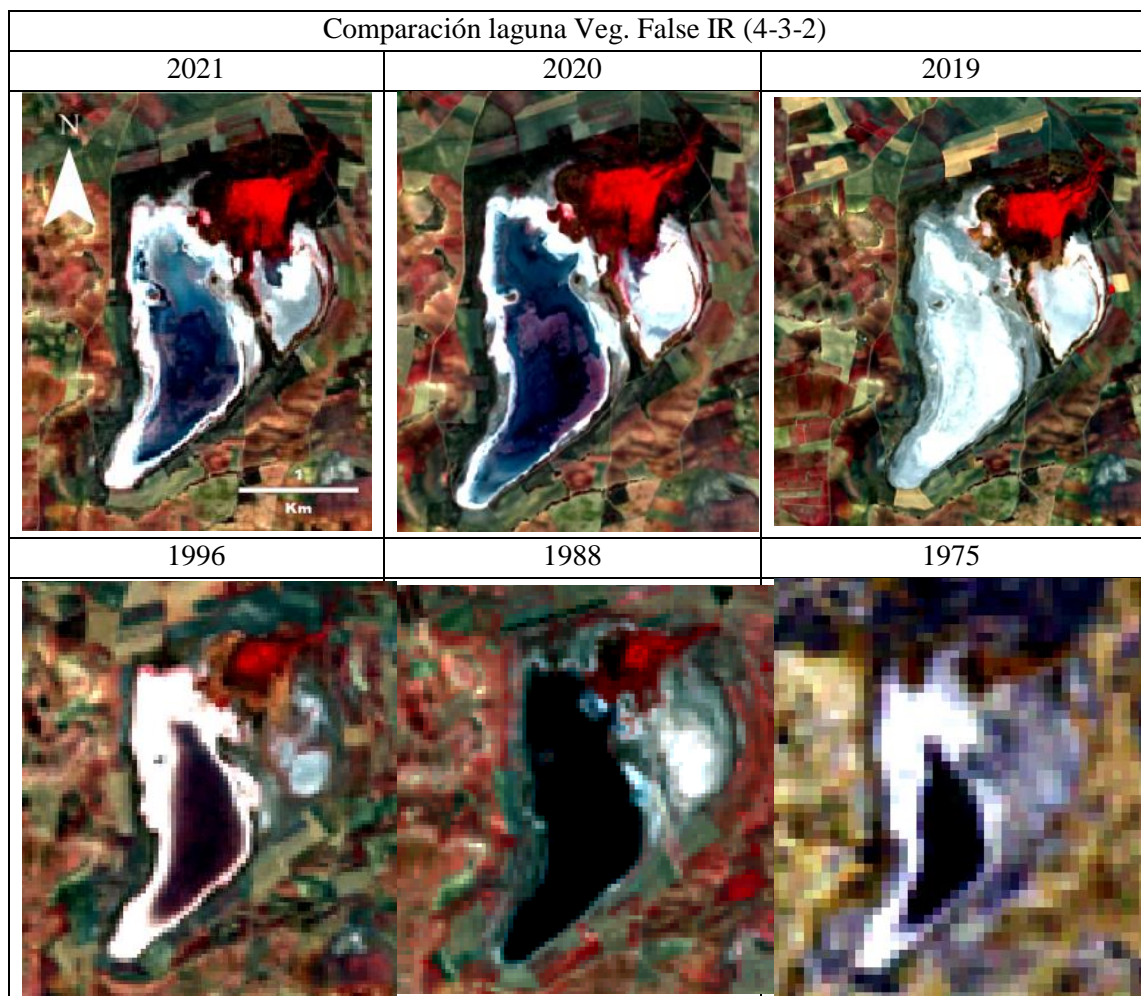


Fig.20. Imágenes de comparación laguna y vegetación False IR (4-3-2) en verano

Para el verano, es en la Acequia Madre dónde se mantiene la vigorosidad debido a la escasez de lluvias, en parte, por el aporte de aguas de forma artificial a través del canal. La serie comienza con un valor muy bajo (Fig.12) en 1972 y 1975, que se puede apreciar en la imagen y luego sube para el punto del canal hasta 2013 que se encuentra por debajo de 0 y no es hasta 2017 que vuelve a subir junto al punto cercano de la vegetación que va siguiendo la misma tendencia desde 2005, estos cambios visualmente son difíciles de observar porque la intensidad del rojo no parece variar mucho, por ello son importantes además de los análisis visuales, los análisis analíticos para conocer los valores exactos de los índices calculados.

Se pueden apreciar las concentraciones de algas en 2020 y 2021 dentro de la laguna con colores violáceos, algo que con peor calidad se puede ver también en 1996. La vigorosidad de la vegetación en la Acequia Madre es patente en todas las imágenes a excepción de 1975. También es patente la desnudez del suelo de la pequeña laguna del este a excepción de 1996 dónde parece apreciarse cierto crecimiento de vegetación higrófila.

## OTOÑO

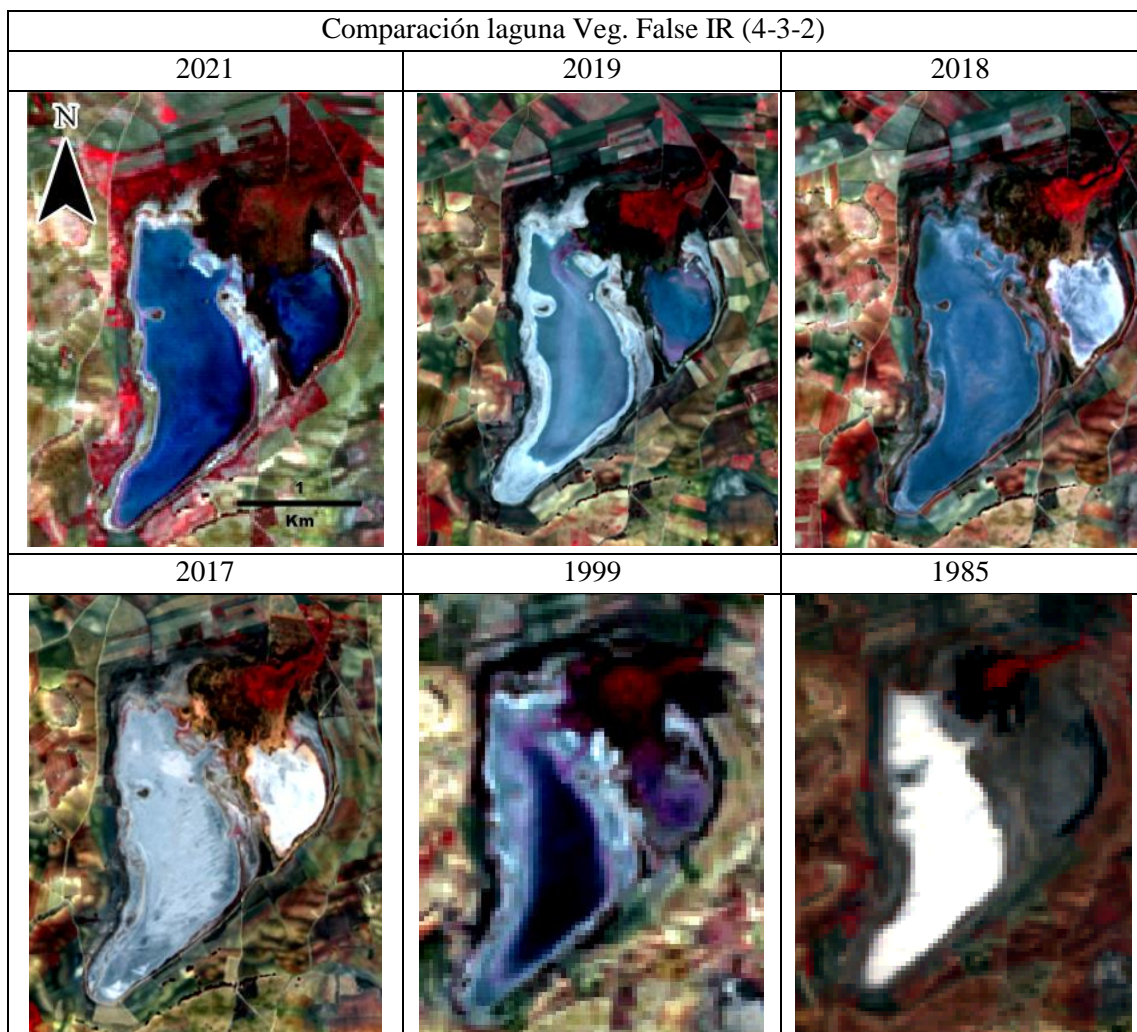


Fig.21. Imágenes de comparación laguna y vegetación False IR (4-3-2) en otoño

Por último, en el otoño se puede ver como se produce un incremento en los valores de NDVI (Fig.13) a partir de 2016, algo que se puede apreciar parcialmente en las imágenes expuestas, pero no como para no necesitar el análisis expuesto en el gráfico. Además, en las imágenes se pueden apreciar variaciones significativas en la orla de vegetación, habiendo años como 1999 o 2017 dónde la vegetación vigorosa se queda reducida al centro de la Acequia Madre y otros años como 2021 dónde se crea un cerco alrededor de la laguna de vegetación vigorosa.

Se puede apreciar muy bien las coladas de algas a modo de abanicos que se introducen en ambas lagunas desde la Acequia Madre en 1999 y 2019, especialmente, debido al aporte de nutrientes provenientes de la depuradora de Mota del Cuervo.

#### 4.2.5. Resultados de las imágenes sobre la variación de la lámina de agua

Con la combinación de bandas en las que se utilizan las dos bandas de infrarrojo de onda corta y la banda del infrarrojo cercano, se puede apreciar en tonos azules la humedad edáfica o el leve encharcamiento, característico de parcelas en regadío, suelos inundados o del vaso lagunar; y en negro la lámina de agua de mayor profundidad (> 20-25 cm, aproximadamente), pudiendo así distinguir el alcance de la lámina de agua. El contorno de referencia es un poco aleatorio, ya que en principio se quería escoger el año en el que hubiera mayor lámina de agua, pero la calidad de la imagen de esos años dificultaba la digitalización por lo que se escogió el año 2020.

#### INVIERNO

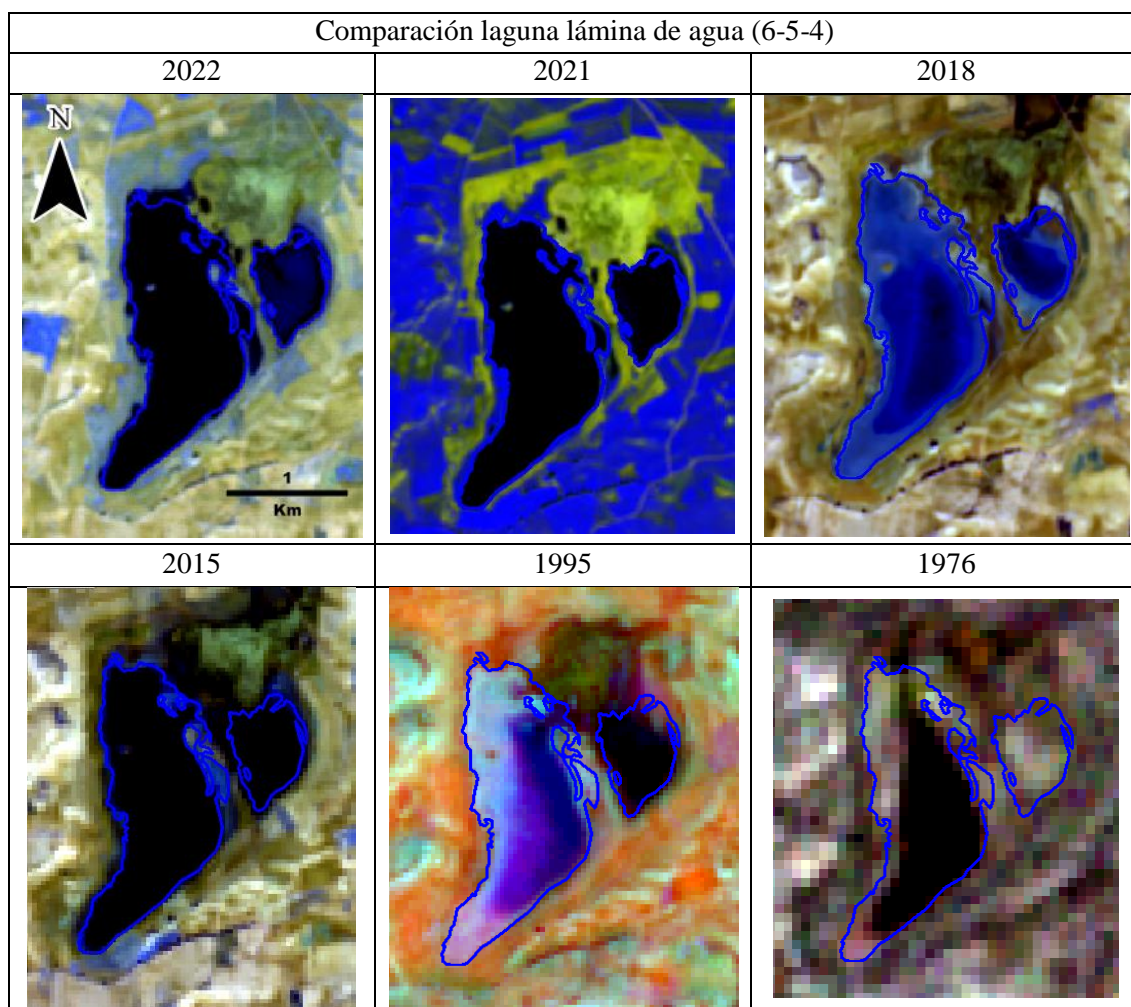


Fig.22. Imágenes de comparación laguna lámina de agua (6-5-4) en invierno

En primer lugar, podemos observar la variación entre el año 2021 y 2022 en la laguna pequeña del este, viendo como la lámina de agua que aparece negra en 2021 tiene un valor (Fig.10) por debajo de -0.6, y en 2022 aparecen tonos azules en la superficie, debido a una menor profundidad de la lámina de agua, lo que da un valor de NDVI de -0.1. En 1995, al ser un año de gran sequía se puede apreciar la escasa lámina de agua en la laguna grande y los tonos rojizos alrededor del complejo lagunar. Por último, llama la atención el año 2021 por el fenómeno de filomena apareciendo todo muy húmedo por la presencia

de nieve y en el caso de la vegetación aparece con un color verde amarillento que solo se puede apreciar ligeramente en la Acequia Madre en el resto de imágenes.

### PRIMAVERA

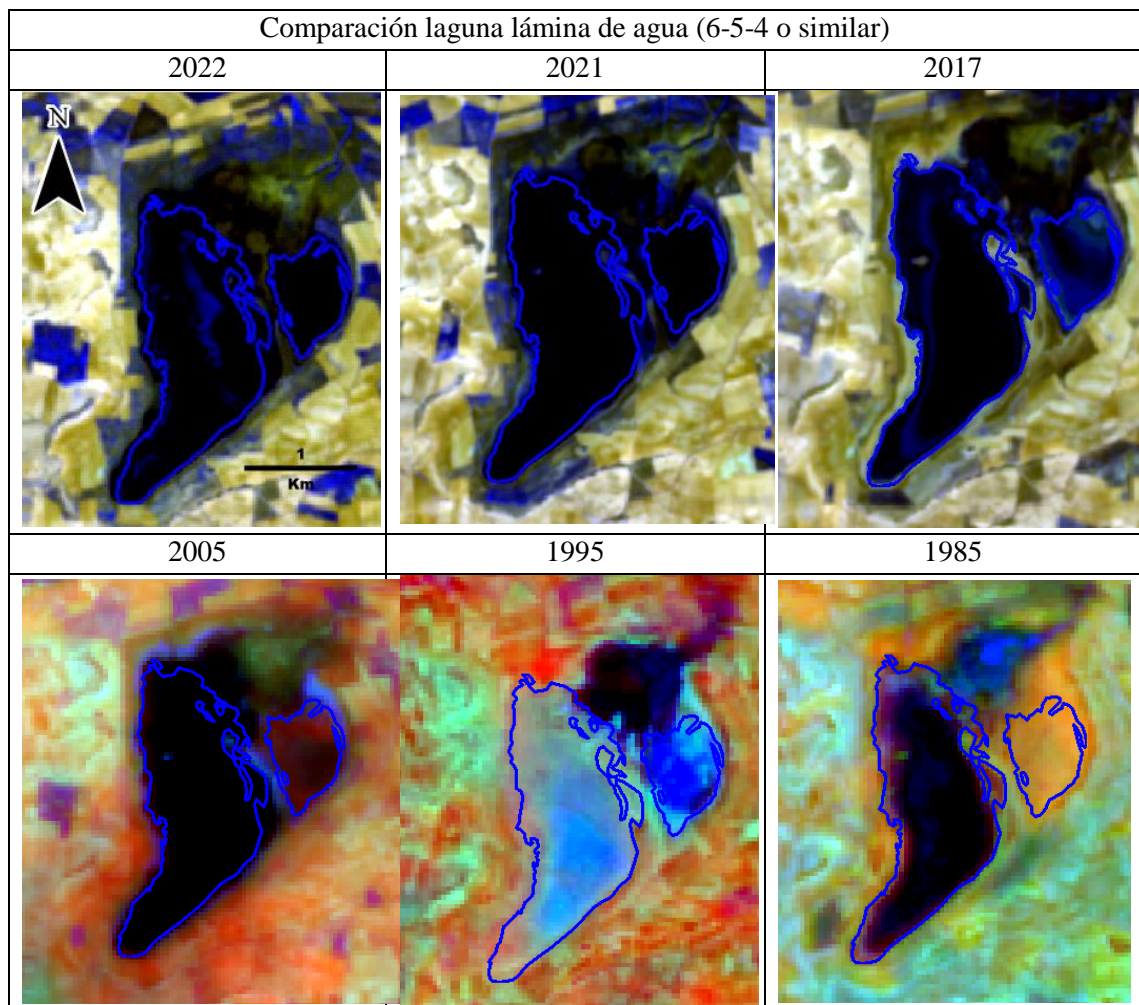


Fig.23. Imágenes de comparación laguna lámina de agua (6-5-4) en primavera

La laguna pequeña del este aparece con poca o ninguna humedad, y no es hasta 2016 y de 2018 en adelante cuando aparece con valores (Fig.11) por debajo de  $-0.2$ , algo que se puede apreciar en el mayor aporte de agua que parece obtener la laguna para estos años.

En 2022, se produce el mayor aumento del NDVI hasta casi  $0.4$  en la laguna, esto es debido a que el punto de muestreo se encuentra en la zona azul, en el centro de la laguna grande, posiblemente debido a la gran cantidad de algas vistas en combinaciones anteriores, algo que también se puede apreciar en 2017 y 1985.

Por último, vuelven a aparecer los colores rojizos en los años más secos, con menos precipitaciones, como es el caso de 2005 y 1995, en el que en el último año parece prácticamente vacía la laguna conservando cierta humedad, especialmente en la laguna pequeña.

### VERANO

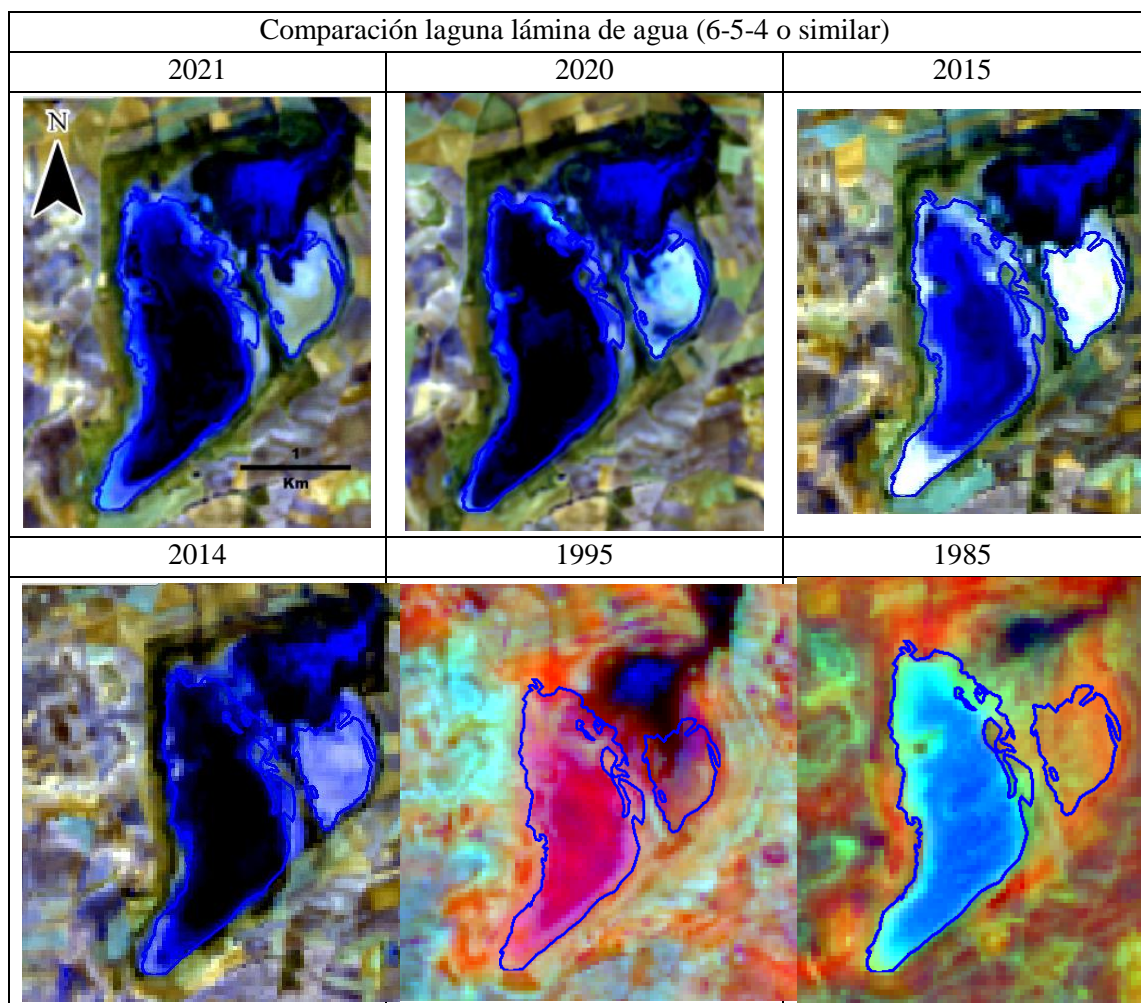


Fig.24. Imágenes de comparación laguna lámina de agua (6-5-4) en verano

En verano hay una gran cantidad de fluctuaciones que se aprecian visualmente, aunque no se puedan ver en los gráficos del NDVI (Fig.12), existen algunas relaciones coincidentes como es el caso de 2014 que hay un valor de -0.4, pudiendo ver que es de las imágenes expuestas, es la que más oscura se ve la lámina de agua. También se puede observar con el valor más alto para el punto de la laguna grande en 2020, que por el sitio dónde está tomado coincide con la zona azulada que se encuentra en el centro de la laguna y que corresponde seguramente a un afloramiento de algas, lo que le otorga el valor de NDVI de 0.2. Para la laguna pequeña del este, los valores a lo largo de los años son similares, cercano a 0 debido a que no se acaba llenando de agua en ninguno de los años por lo que sus valores del índice de NDVI corresponden al suelo desnudo.

Se vuelven a observar con más intensidad los tonos rojizos, llegando al fucsia en la laguna grande del año de la sequía de 1995, con tonos muy intensos mostrando la gran sequedad del suelo. Y en 1985 se ven casi desligadas las lagunas de la Acequia Madre, reduciéndose la humedad de esta, al menos en lo visual, al compararse con las imágenes de años posteriores.

## OTOÑO

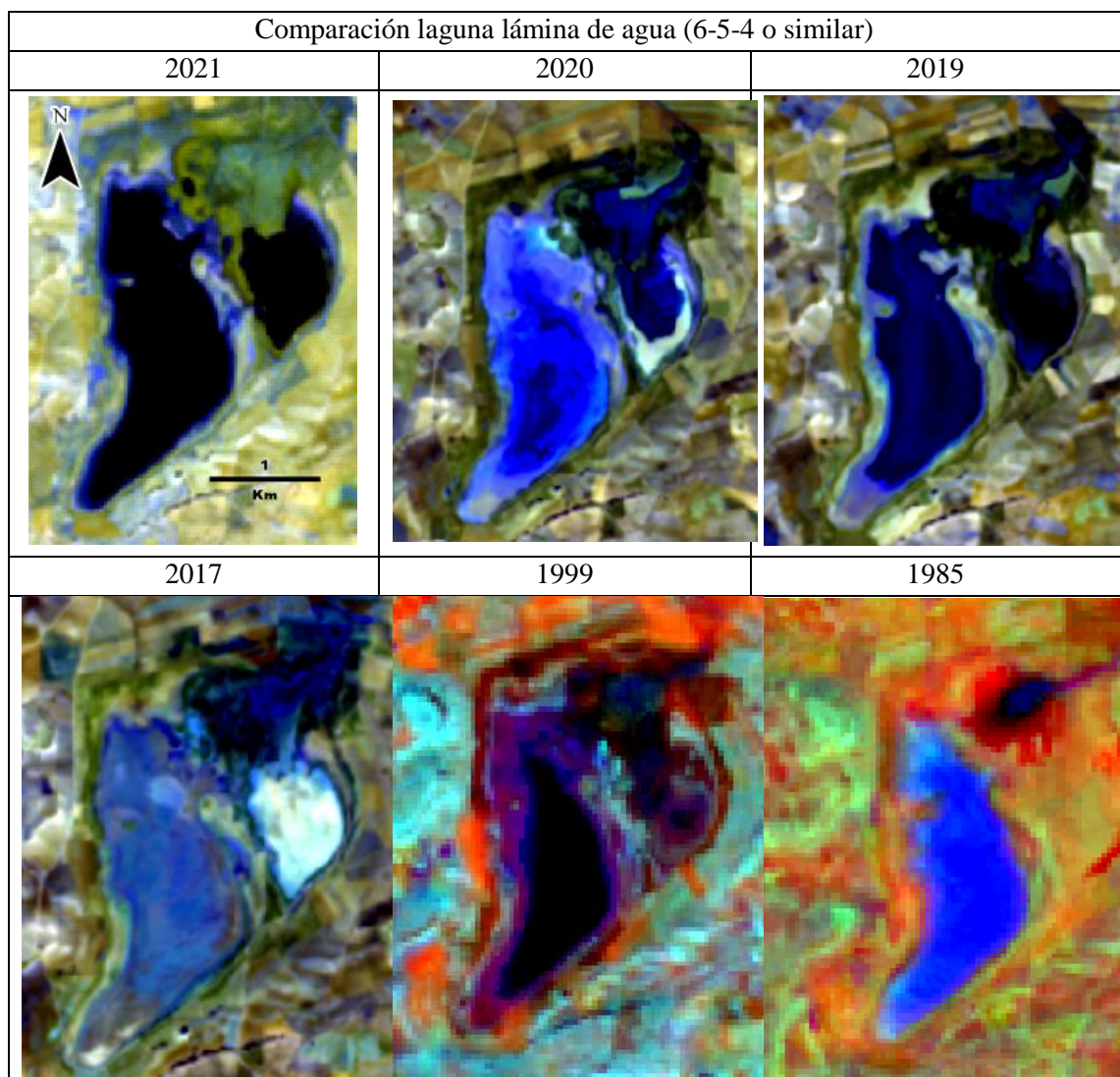


Fig.25. Imágenes de comparación laguna lámina de agua (6-5-4) en otoño

Por último, en el otoño se produce una estabilidad de los valores del índice de vegetación (Fig.13) exceptuando 2021, dónde un aporte extraordinario de agua hace que los valores que llevaban rondando el 0, descendan hasta -0.6 para la laguna grande y -0.4 para la pequeña del este, algo que se puede apreciar en la imagen de este año con respecto al resto. En 2020 y 2019 vuelven a sucederse cambios de tonos del azul que pueden indicar presencia de algas. Y en 1999 y 1985 se siguen apreciando los colores rojizos-anaranjados, en los alrededores de la laguna, además la desconexión de las lagunas con la Acequia en 1985 sigue patente, aunque con menor intensidad.

### 4.2.6. Perfiles espaciales

A continuación se analizan algunos perfiles espaciales de la banda 4 del infrarrojo cercano, considerados relevantes para complementar los análisis, y se dibuja la dirección y ubicación de la medición del perfil espacial (Fig.26).

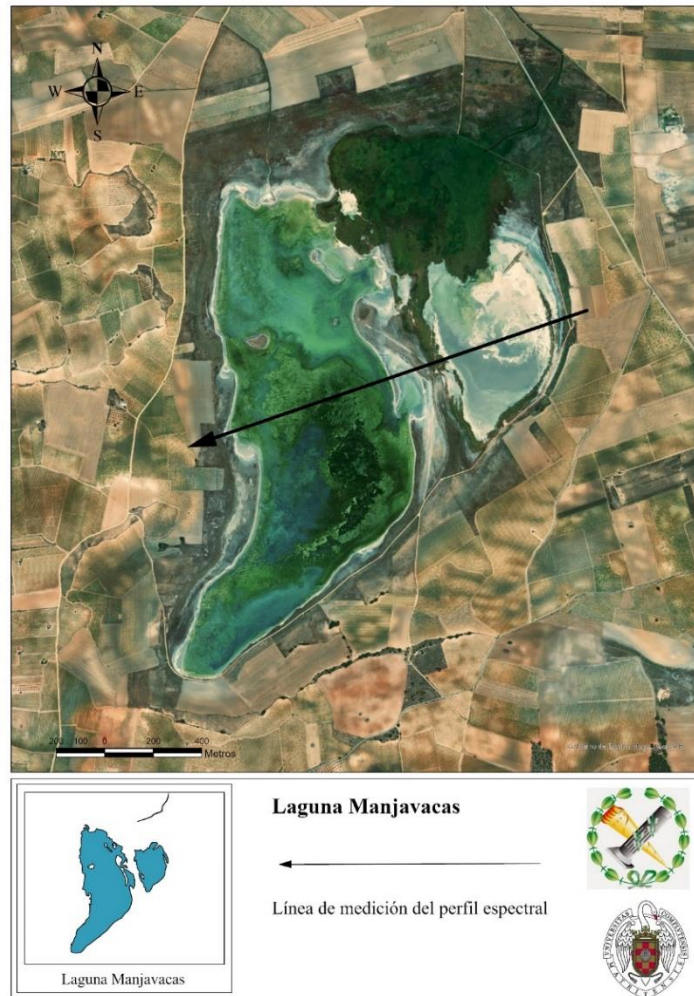
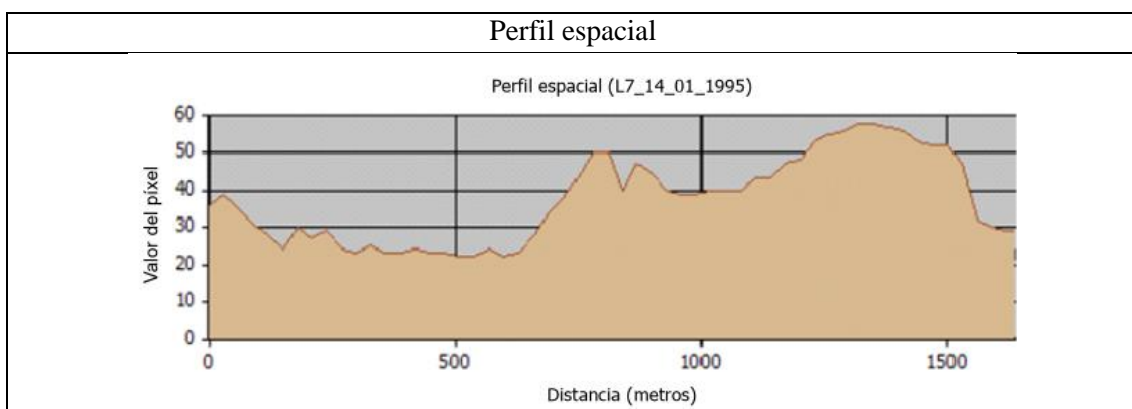


Fig.26. Mapa con línea de medición del perfil espacial (Laguna Manjavacas)

## INVIERNO



En el perfil de 1995 se puede observar en relación con la imagen de dicho año con las bandas del infrarrojo de onda corta y cercano (Fig.22), se aprecia el descenso de la banda 4 en la que está medida, en los primeros 600 metros por la presencia de agua, después se sucede la orilla con cierta vegetación que separa ambas lagunas, dándose paso a un descenso debido a la fina lámina de agua que hay al este de la laguna grande, terminando con el incremento de la reflectancia debido a las afloraciones de sales.

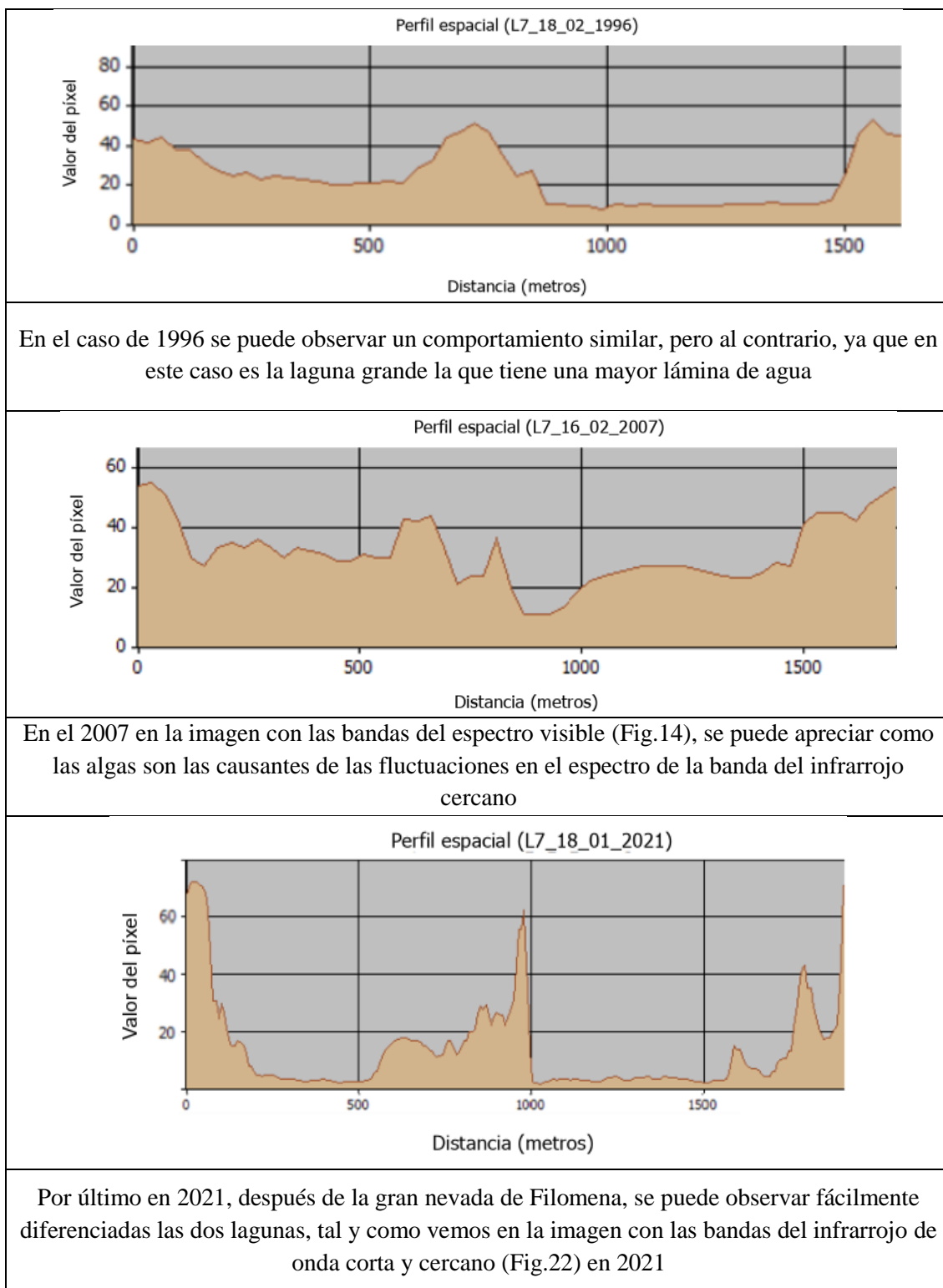


Fig.27. Perfiles espaciales para la laguna de Manjavacas en invierno

## PRIMAVERA

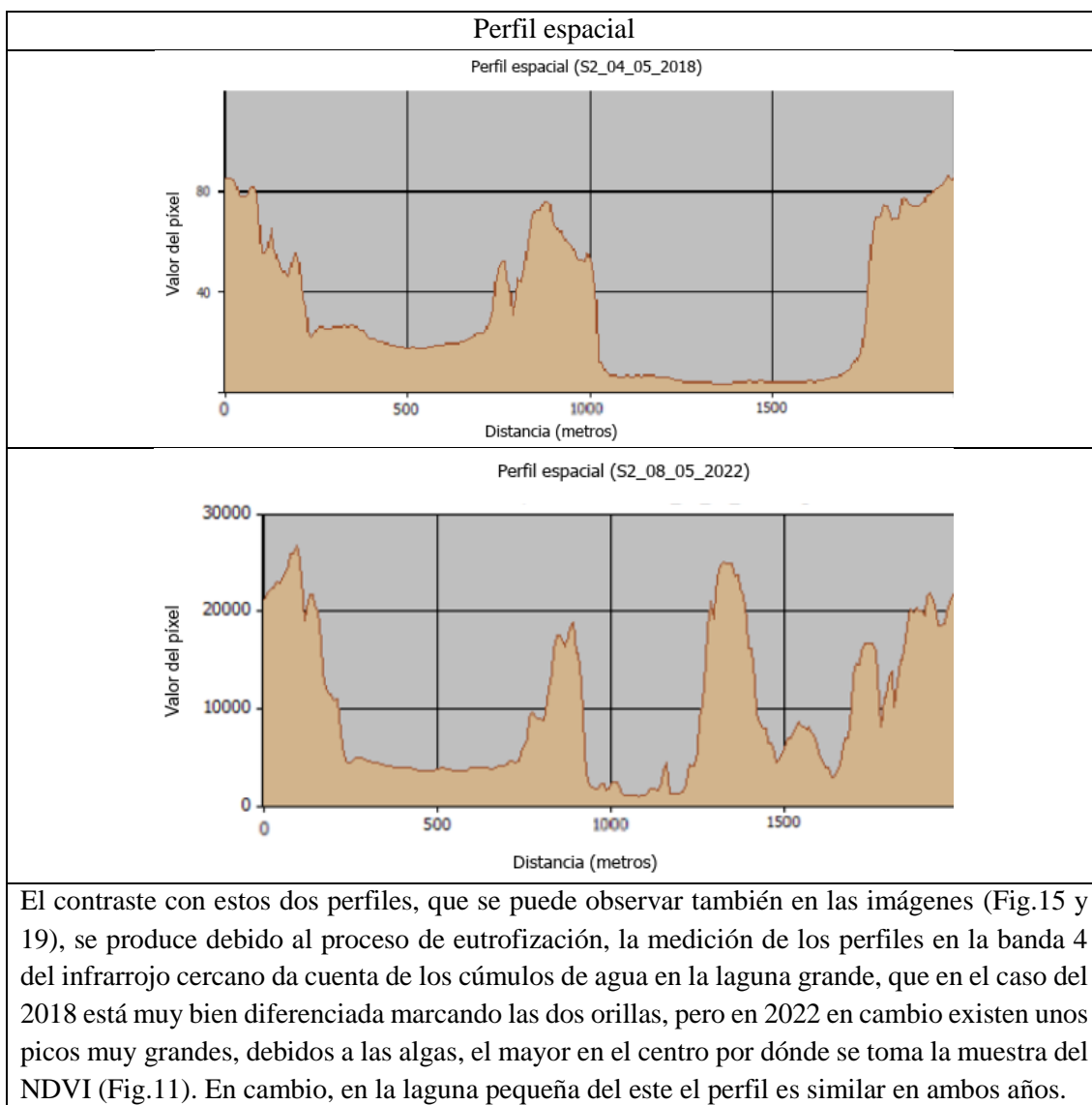
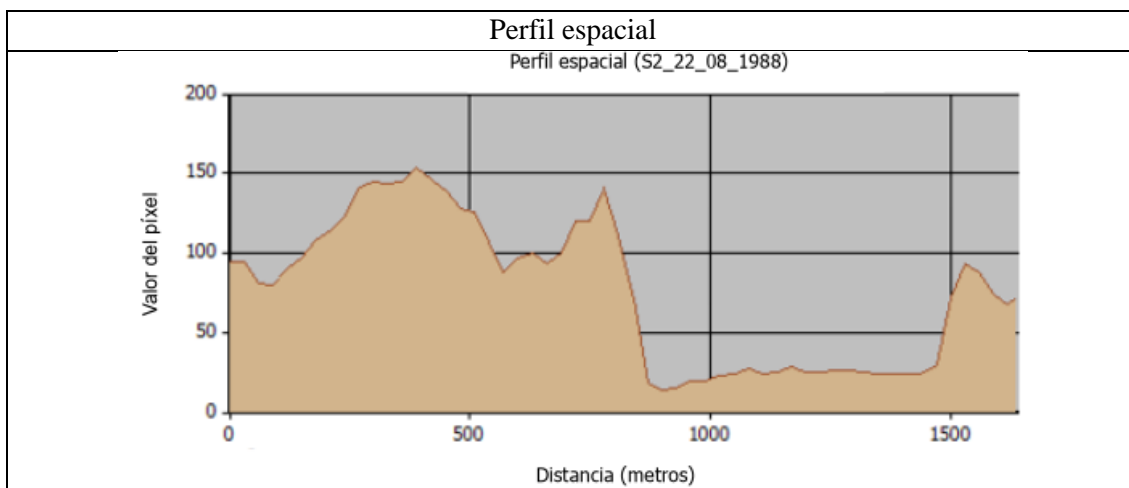
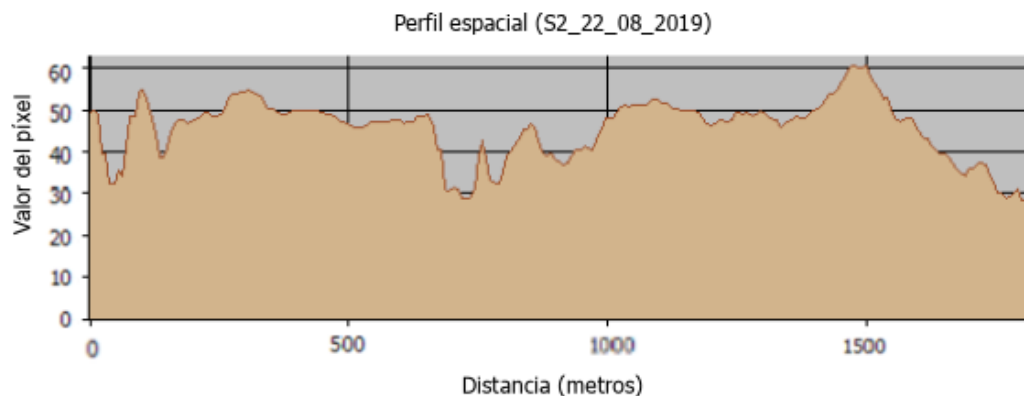


Fig.28. Perfiles espaciales para la laguna de Manjavacas en primavera

## VERANO



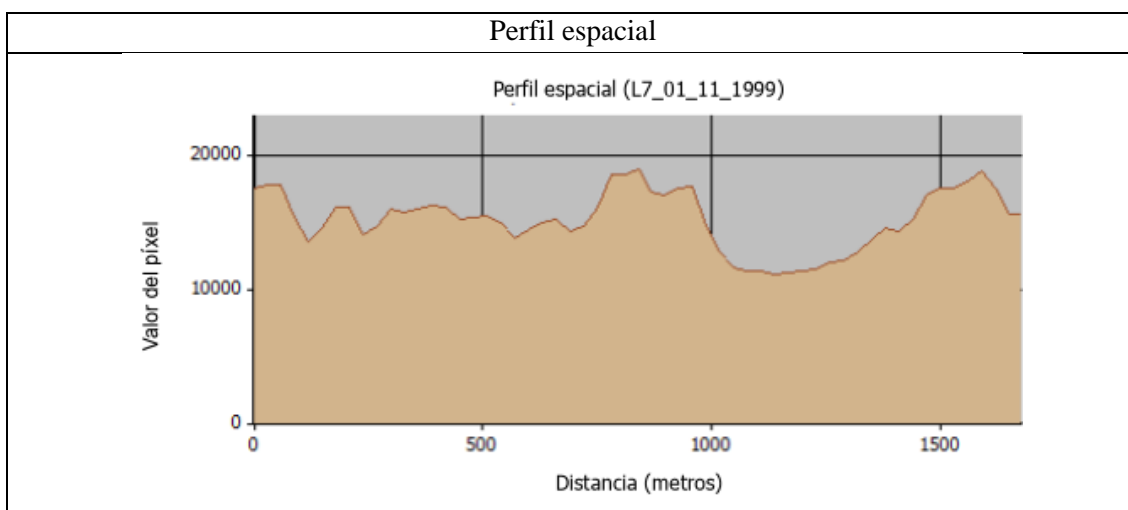
En la imagen del infrarrojo cercano (Fig.20) se puede ver el comportamiento de este perfil espacial de 1988, en el cual la reflectancia para la laguna pequeña, vacía, con afloramientos salinos es muy alta, y en cambio para la laguna con agua, la grande, desciende, dibujando una cuenca bien delimitada



En este perfil espectral de 2019 se puede observar como al estar vacías las lagunas no se distinguen las cuencas lagunares y solo se aprecian los picos de reflectancia de los afloramientos salinos

Fig.29. Perfiles espaciales para la laguna de Manjavacas en verano

### OTOÑO



En este perfil se puede ver la laguna pequeña del este que no tiene agua, y en el caso de la segunda laguna aunque tenga agua, existe una gran eutrofización como se puede ver en la imagen con las bandas del espectro visible (Fig.17), por ello aunque se aprecie la cuenca lagunar está más elevada que en casos vistos anteriormente.

Fig.30. Perfiles espaciales para la laguna de Manjavacas en otoño

#### 4.2.7. Análisis del agua

Las muestras de agua se tomaron en mayo de 2022 cerca de las orillas para intentar no perturbar a la fauna, y mediante el equipo especializado para ello. Estas muestras se tomaron en los lugares marcados en el mapa expuesto anteriormente (Fig.5) junto a los puntos de medición del NDVI. Las diferentes muestras serán comparadas con estudios anteriores (CHG, 2022; Gómez, 2014; Gosálvez et al., 2012; Peinado, 1994; Pérez Ortega, 2011) y también con el libro de referencia sobre análisis de aguas de J. Rodier, 1981.



Fig 31 y 32. Acequia Madre (Izquierda), Final de la laguna (Derecha). Mayo 2022

| Laguna Manjavacas (Acequia Madre) |                   |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Año                               | Nutrientes (mg/l) |          |          |          |          |          |
| 2022                              | Nitratos          | Nitritos | Fosfatos | Sulfatos | Cloruros | Amoniaco |
|                                   | 3,08              | 0,594    | 0,73     | 552,8    | 44       | 1,45     |

Fig.33. Tabla Nutrientes análisis de Agua

| Laguna Manjavacas (Acequia Madre) |                           |  |               |
|-----------------------------------|---------------------------|--|---------------|
| Año                               | Parámetros fisicoquímicos |  |               |
| 2022                              | pH a 17,7°C               | Conductividad eléctrica (mS/cm) a 21,4°C | Observaciones |
|                                   | 8,21                      | 2,65                                     |               |

Fig.34. Tabla Parámetros fisicoquímicos análisis de Agua

En estas primeras medidas de la laguna de Manjavacas, procedentes de la Acequia de la cual proviene el principal aporte de agua de la laguna, se puede observar la elevada

concentración de nitratos, triplicando el límite normal establecido para aguas naturales (1 mg/L); lo mismo ocurre con el nitrito aunque en este caso se quintuplica esa concentración establecida como normal de 0,1 mg/L; y aún se supera más con los fosfatos, septuplicando el valor límite en aguas naturales de 0,1 mg/L; en cuanto a los cloruros, se puede observar una concentración un poco alta, debido a las aguas residuales, ya que las concentraciones de cloruros en aguas no contaminadas es de 10 mg/L llegando a los 40-63 mg/L tras los procesos de cloración (García Vargas et al., 2012).

La concentración de sulfatos que se encuentra en esta muestra es mucho mayor a la aceptable para consumo humano que ese establece en 25 mg/L (Bolaños-Alfaro, 2017). En cuanto al amoniaco, se encuentra rozando el límite establecido para el consumo humano de 1,5 mg/L (Chuquimez, 2021). El pH indica que el medio es más bien alcalino y la conductividad no es alta.

| Laguna Manjavacas (Laguna Mirador) |                   |          |          |          |          |          |
|------------------------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Año                                | Nutrientes (mg/l) |          |          |          |          |          |
| 2022                               | Nitratos          | Nitritos | Fosfatos | Sulfatos | Cloruros | Amoniaco |
|                                    | 0,22              | 0,33     | 0,25     | 764      | 200      | 0,75     |

Fig.35. Tabla Nutrientes análisis de Agua

| Laguna Manjavacas (Laguna Mirador) |                           |  |   |
|------------------------------------|---------------------------|--|---|
| Año                                | Parámetros fisicoquímicos |  |   |
| 2022                               | pH a 18,3°C               | Conductividad eléctrica (mS/cm) a 20,8°C | Observaciones   |
|                                    | 8,14                      | 11,32                                    | Varios organismos rojos (posiblemente <i>Artemia salina</i> ) |

Fig.36. Tabla Parámetros fisicoquímicos análisis de Agua

En esta primera laguna, la más cercana a la Acequia Madre, podemos observar una reducción de todos los nutrientes, a excepción de los cloruros y sulfatos, aun así los fosfatos y nitritos siguen superando el límite establecido. En cuanto al pH, no varía demasiado, indicando que es un valor alcalino, característico de las aguas sulfatadas o ricas en sales (cloruros y sulfatos), además se puede observar el incremento de la conductividad eléctrica. En los cloruros, se observa el incremento frente a la concentración de la Acequia, aunque la Guía para la Calidad del Agua Potable de 1993 de México, establece en 250 mg/L la concentración para consumo humano. Los sulfatos por su parte también se han incrementado, siendo a partir de una concentración de 200 mg/L cuando ya cambia el sabor al agua o actúa como corrosivo de metales (Bolaños-Alfaro et al., 2017). El amoniaco se va reduciendo, no encontrándose ya en el límite de concentración de este compuesto para el ser humano.

Además, se pueden observar unos organismos rojos que posiblemente puedan ser *Artemia salina*, un crustáceo típico de lagunas salobres como estas y que son parte de la alimentación de los flamencos rosas, otorgándoles ese color rosado del que proviene su nombre.

| Laguna Manjavacas (Final laguna) |                   |          |          |          |          |           |
|----------------------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Año                              | Nutrientes (mg/l) |          |          |          |          |           |
| 2022                             | Nitratos          | Nitritos | Fosfatos | Sulfatos | Cloruros | Amoniacos |
|                                  | 0                 | 0,297    | 0,05     | 448      | 500      | 0,25      |

Fig.37. Tabla Nutrientes análisis de Agua

| Laguna Manjavacas (Final laguna) |                           |  |   |
|----------------------------------|---------------------------|--|---|
| Año                              | Parámetros fisicoquímicos |  |   |
| 2022                             | pH a 19,2°C               | Conductividad eléctrica (mS/cm) a 18,2°C | Observaciones   |
|                                  | 9,2                       | 17,86                                    | Muchos organismos rojos, más que en la laguna Mirador (posiblemente <i>Artemia salina</i> ) |

Fig.38. Tabla Parámetros fisicoquímicos análisis de Agua

Por último, los análisis en la laguna más alejada del foco de emisión de aguas, encontramos unos valores mucho más bajos en todos los nutrientes, exceptuando los cloruros y teniendo solamente los nitritos superando el límite establecido. En cuanto a la alcalinidad, se ha incrementado, al igual que la conductividad, y en base a esto y a la gran concentración de cloruros, se estima el incremento de la salinidad. El número de los organismos vistos en la laguna anterior se ha incrementado notablemente. Además, el amoniacos sigue reduciéndose.

#### 4.2.8. Análisis de las temperaturas

En este apartado se ha utilizado la banda térmica del satélite Landsat 8 para ver las diferencias térmicas de las lagunas con su entorno en diversos años y estaciones desde 2014 a 2022, observando el posible fenómeno de la isla de frío que puede crear las lagunas. Se expondrán imágenes junto a sus leyendas específicas y junto a los comentarios explicativos sobre lo que se puede observar.

## INVIERNO

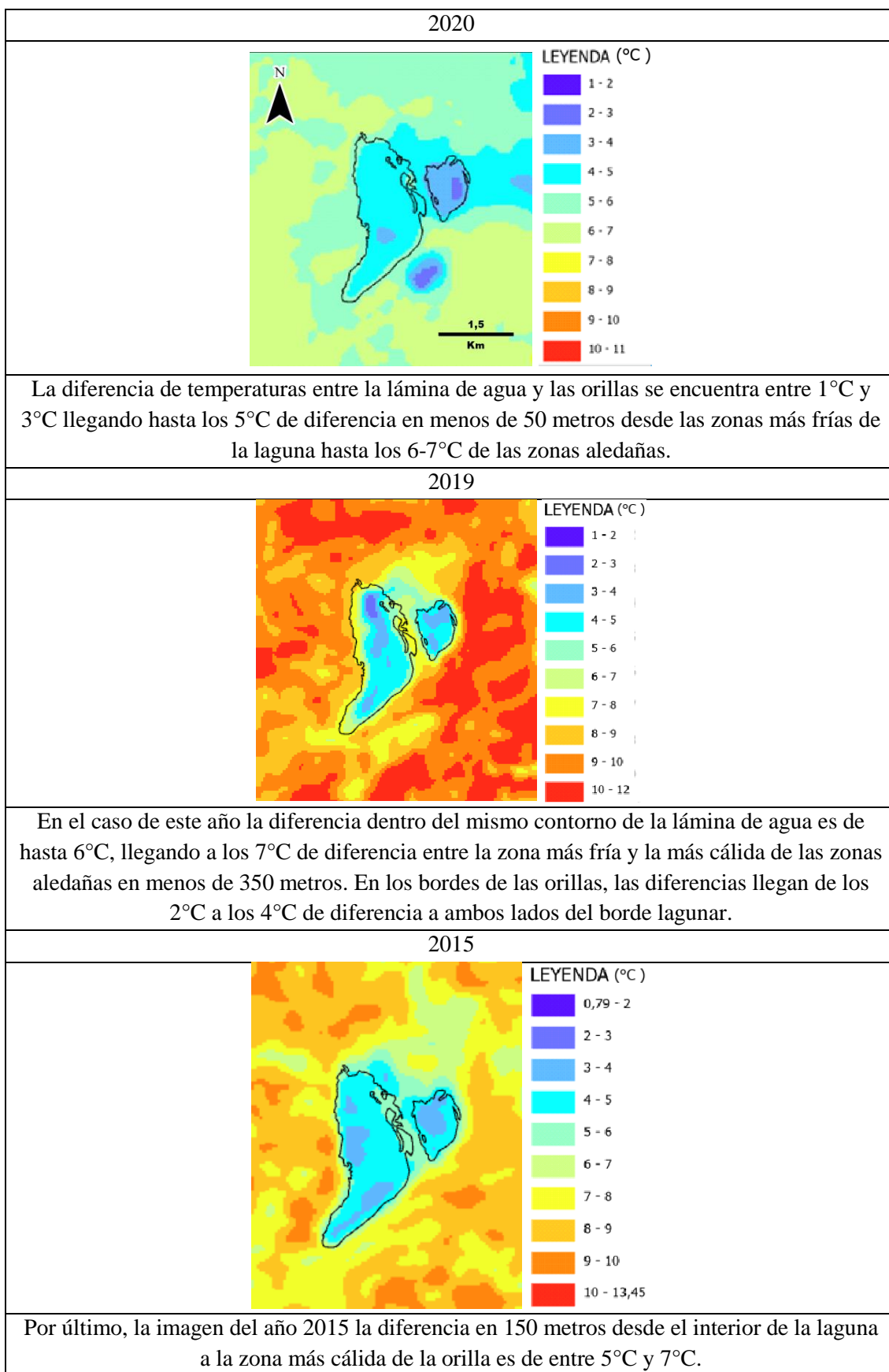
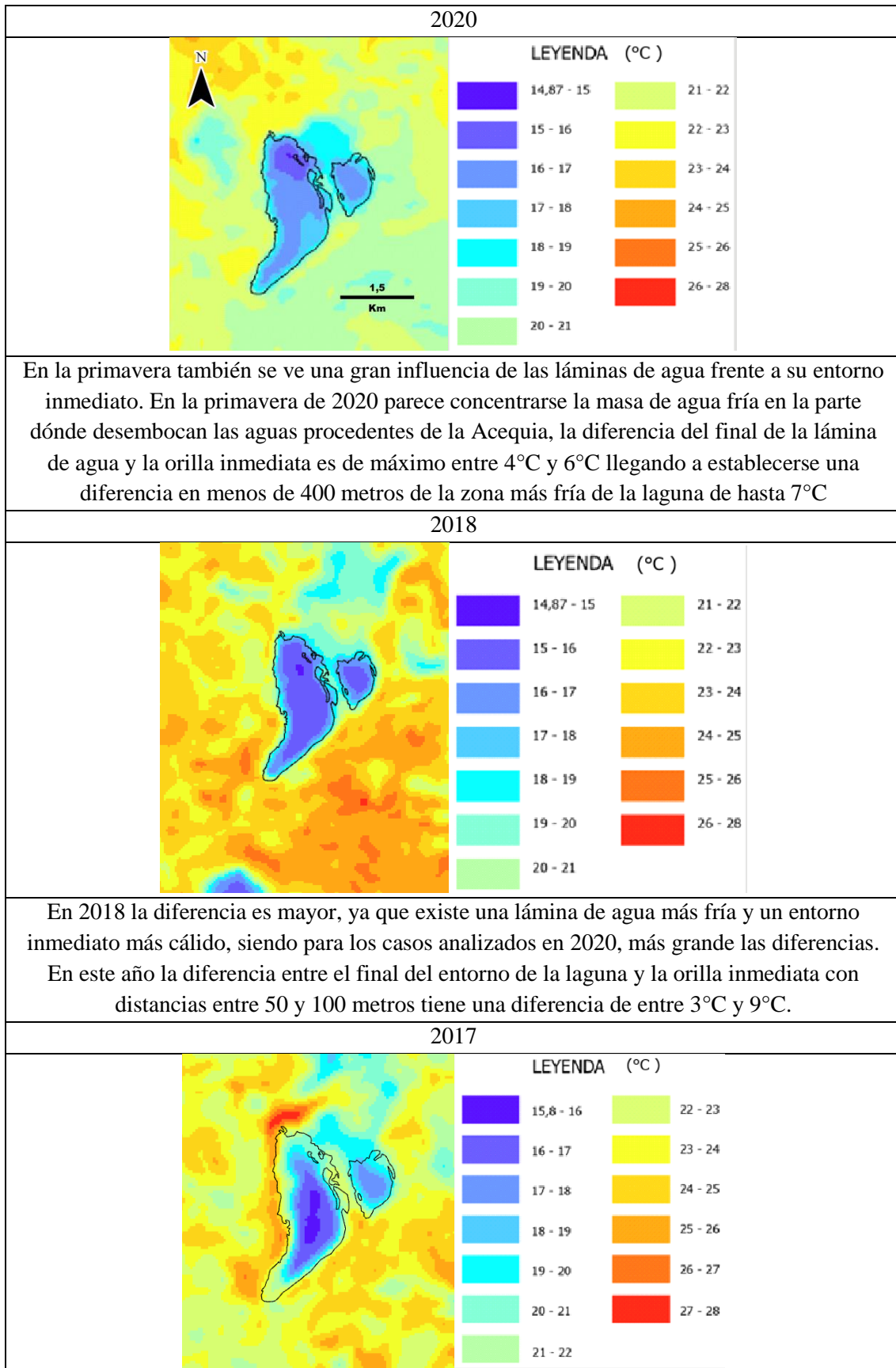


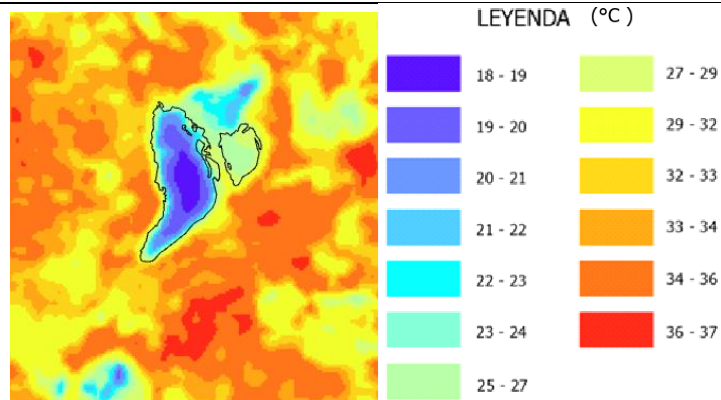
Fig.39. Imágenes de análisis de temperatura en invierno

## PRIMAVERA



En 2017 la lámina de agua se va calentando a medida que se aleja del centro de la laguna hasta llegar a diferencias casi en el borde de la parte norte de hasta 12°C o de entre 5°C y 8°C desde el borde de la laguna.

2014

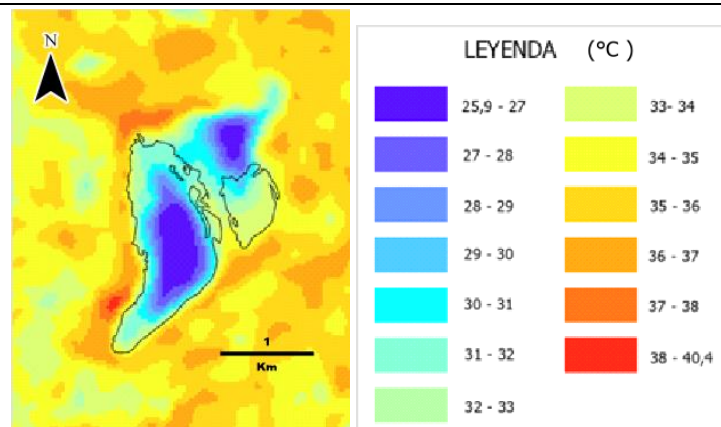


Por último, en 2014 ocurre algo similar solo que existiendo una diferencia mayor entre los bordes de la laguna y sus orillas llegando a los 15°C en los lugares con mayor contraste, además en este año toma mayor relevancia tanto las temperaturas bajas de la Acequia Madre como las de la laguna del Alcahozo al sureste de la imagen. También es notable como en el resto de imágenes el efecto de enfriamiento que produce la vegetación circundante a la Acequia Madre.

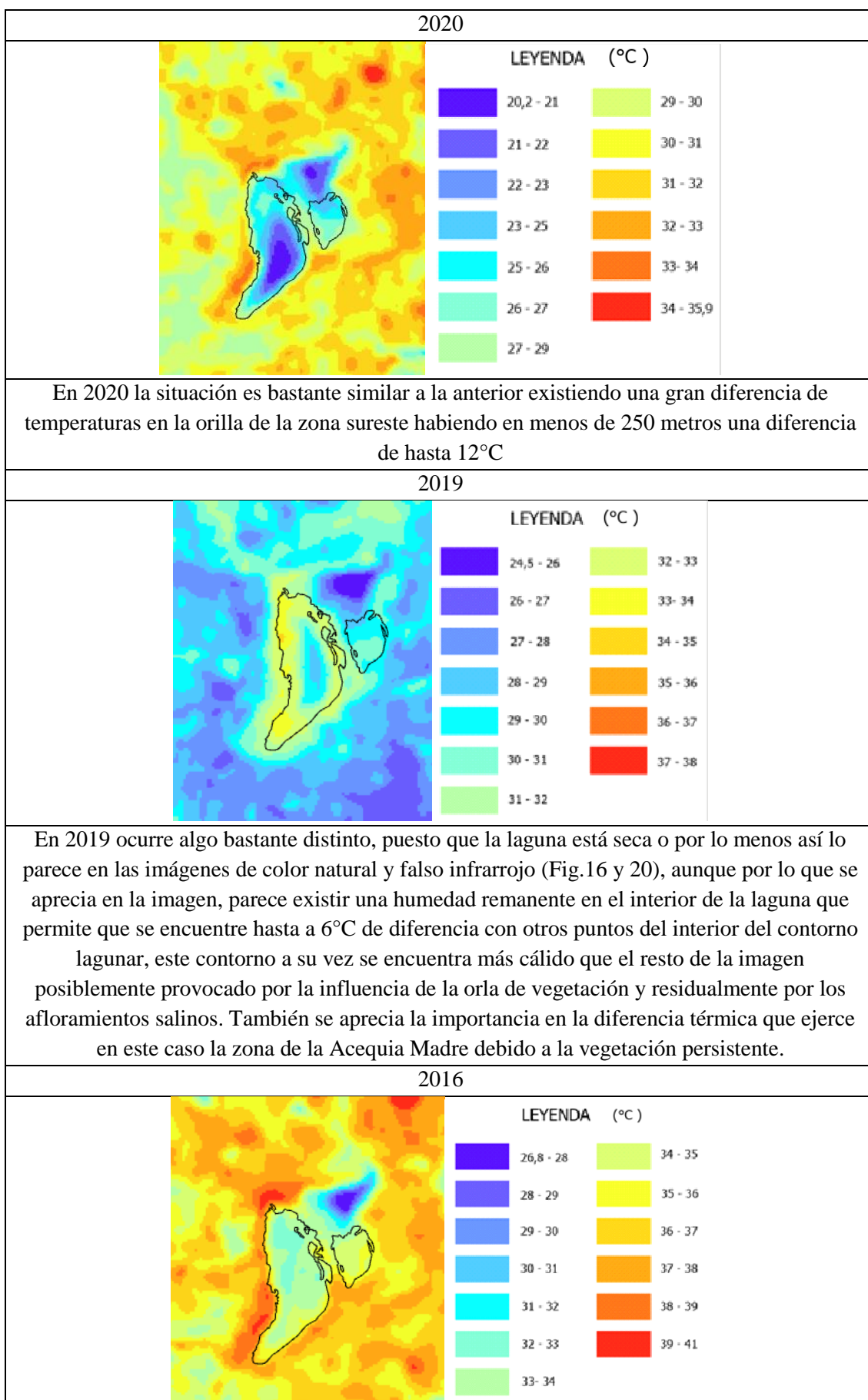
Fig.40. Imágenes de análisis de temperatura en primavera

## VERANO

2021

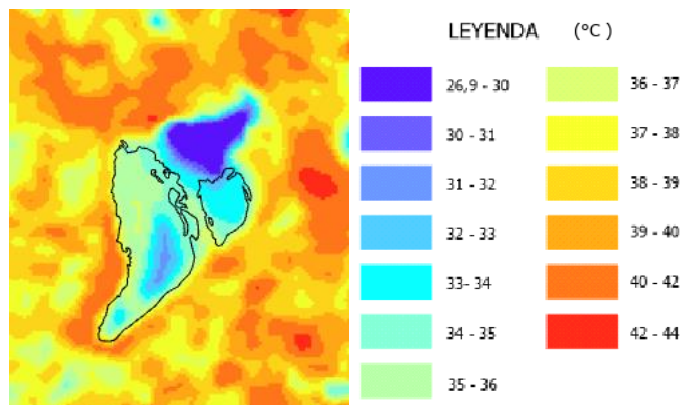


En verano, se aprecia una importancia mayor en la diferencia de temperaturas de la Acequia Madre, en comparación con la primavera, debido en gran medida a la presencia de vegetación vigorosa. En los años dónde existe agua en la laguna como se puede ver en las imágenes a color, que además se aprecia que aparte del agua contiene gran concentración de algas, la diferencia resulta muy grande con las zonas donde ya no hay agua, dentro del contorno de la laguna entre las zonas con agua y sin ella. La diferencia puede ser de hasta 7°C y si se compara la temperatura dentro del contorno, pero en la parte seca con las zonas inmediatamente aledañas, la diferencia de temperatura va desde los 2°C a los 7°C.



En 2016 destacan dos cosas, la isla de frío alrededor de la acequia madre existiendo diferencias de hasta 10°C con su entorno; y el salto de temperatura entre la cuenca lagunar que se encuentra seca pero aparentemente con cierta humedad, y las orillas pegadas a este límite dónde se eleva bastante la temperatura creándose diferencias térmicas de entre 4°C y 9°C.

2014

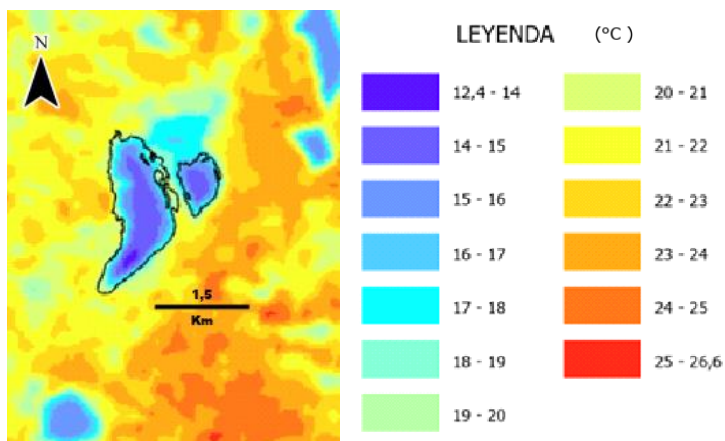


Por último, en 2014 destaca otra vez la isla de frío de la Acequia y la diferencia térmica dentro de laguna y con sus inmediaciones, siendo las diferencias similares a 2016

Fig.41. Imágenes de análisis de temperatura en verano

## OTOÑO

2021



En el otoño de 2021 se aprecia el enfriamiento dentro de las lagunas, las cuales se encuentran ambas llenas; una reducción de este enfriamiento en la Acequia Madre, posiblemente a la reducción de la influencia de la vegetación; y una diferencia térmica entre los bordes lagunares y las orillas de entre 4°C y 8°C

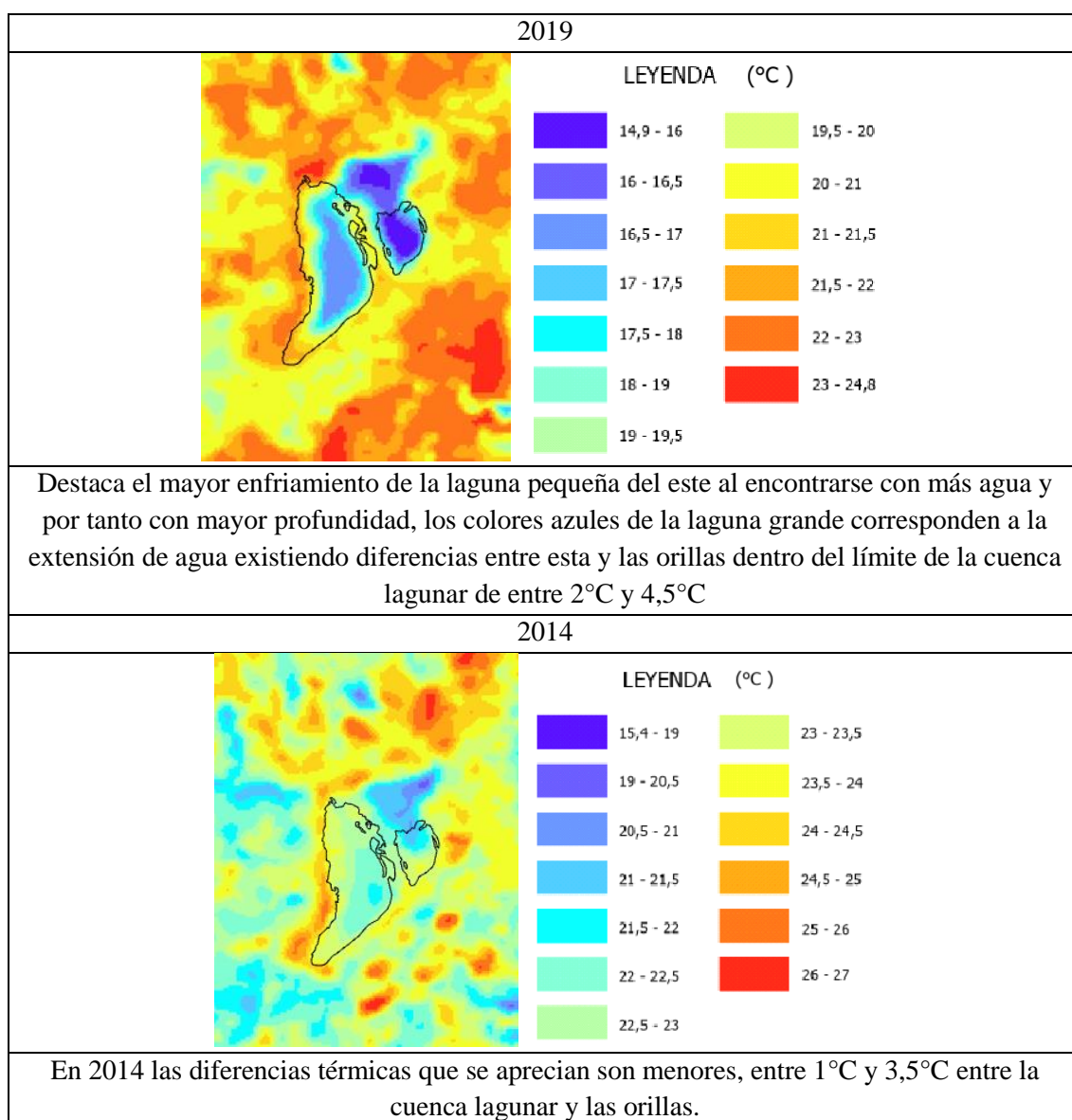


Fig.42. Imágenes de análisis de temperatura en otoño

### 4.3. RESULTADOS PARA LA LAGUNA DE PEDRO MUÑOZ

#### 4.3.1. Resultados de los gráficos del índice NDVI sobre los puntos de medición

En cuanto a los puntos de muestreo del NDVI en la laguna de Pedro Muñoz, el punto 4 corresponde a la laguna grande del sur, el punto 5 para la laguna pequeña del norte y el punto 6 para la vegetación lagunar que separa la laguna grande.



Fig.43. Mapa con los puntos de medición del NDVI y de agua (Laguna Pedro Muñoz)

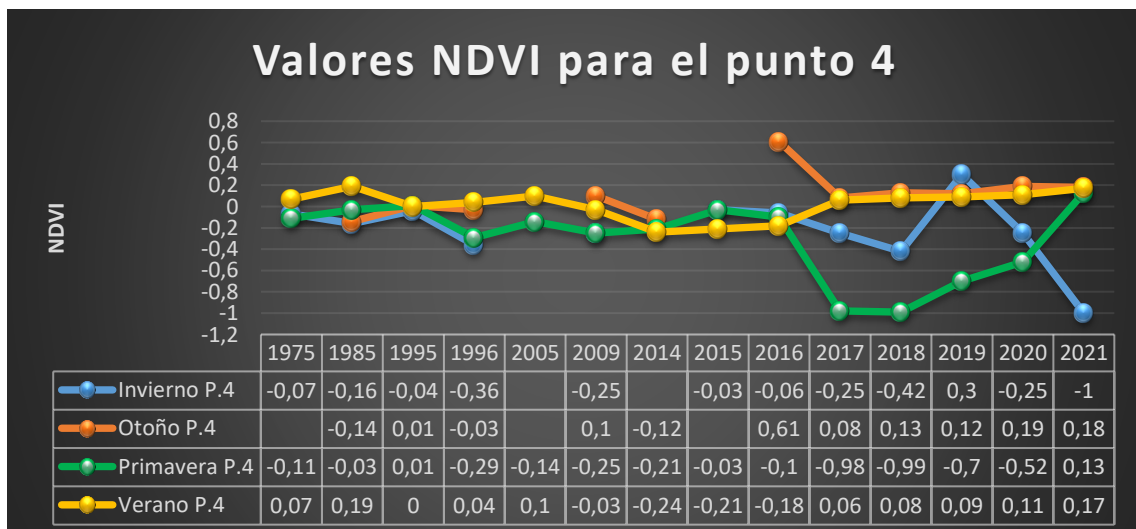


Fig.44. Gráfico NDVI P.4. (Laguna Sur)

Con los valores obtenidos en Pedro Muñoz se puede observar que se produce un descenso de los valores de NDVI desde 2017 en el punto 4 perteneciente a la laguna grande para la primavera, y que se mantiene hasta 2018, y a partir de 2019 va subiendo hasta llegar a la

posición inicial en 2021, pudiendo coincidir con un mayor aporte de agua, bien por razones meteorológicas o por la EDAR adyacente. En el invierno en el punto 4, se mantiene estable alrededor de 0 hasta que se acerca a -0.4 en 1996 y 2018, en 2019 tiene su valor máximo con 0.3, y desciende hasta 2021 con su valor mínimo en -1, posiblemente debido al temporal de Filomena. El verano se mantiene estable y en el otoño se produce un valor máximo en 2016 con 0.61, pudiendo tratarse de vegetación higrófila o una alta concentración de algas.

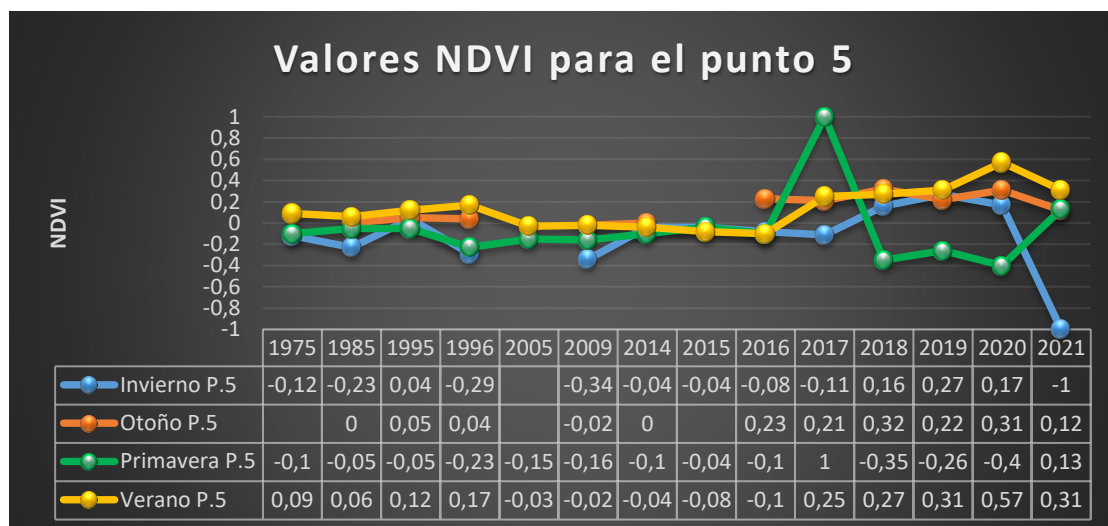


Fig.45. Gráfico NDVI P.5. (Laguna Norte)

En el caso del punto 5, existe una pequeña subida gradual para el otoño y el verano, apareciendo un pico máximo en el verano de 2020 con un valor de 0.57, pudiendo tratarse de años en los que hay un crecimiento de la vegetación higrófila al mantenerse la humedad. En el invierno, hay cierta estabilidad hasta 2021 dónde se produce un mínimo del valor del NDVI a -1, también provocado por las nevadas de ese año. Por último, para la primavera, sigue una relativa estabilidad alrededor de 0 hasta 2017 que tiene su valor máximo con un NDVI igual a 1, y a partir de ahí desciende en 2018 a -0.35 y sigue esa tendencia en los dos años posteriores hasta volver a acercarse a 0 en 2021.

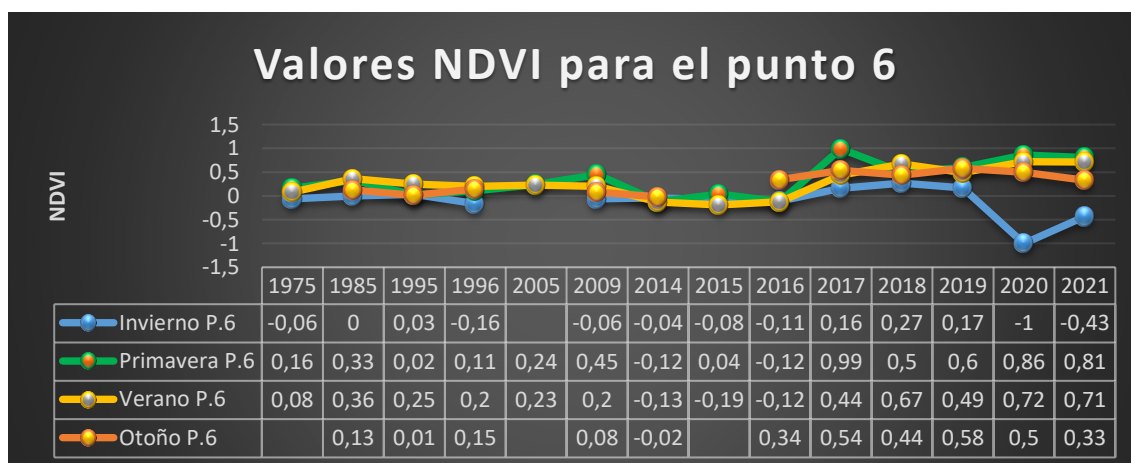


Fig.46. Gráfico NDVI P.6. (Vegetación)

Y por último, el caso del punto 6 de vegetación, en el invierno se mantiene alrededor de 0 hasta 2018 que tiene un valor más alto de lo habitual (0,27), pero es en 2020 cuando alcanza el mínimo valor, -1, debido seguramente a una inundación de la isla de vegetación dónde se calcula este punto, que luego remonta a -0.43 en 2021. Para la primavera se mantienen los valores estables a excepción de una subida a 0.45 en 2009, pero no es hasta 2017 cuando se produce un verdadero aumento hasta prácticamente el máximo valor, 1, los años siguientes siguen una tendencia alta de 2018 a 2021. En el verano ocurre una tendencia similar a la primavera, aunque con valores inferiores y con el pico máximo en 2020 con 0.72, corresponde con la menor vigorosidad de la vegetación en la época veraniega. Y por último, el otoño comienza antes su ascenso, en 2016, y se queda en torno al 0.5 de 2017 a 2020. Todos estos ascensos se pueden deber a un aumento del aporte de agua, especialmente durante el invierno en los últimos 2 años, de ahí que los valores sean más negativos, y este aumento de la humedad provoca mayor vegetación vigorosa que adquiere valores más elevados del NDVI.

### 4.3.2. Resultados de los gráficos del índice NDVI en las estaciones del año

Y estos serían los valores por estaciones para las lagunas de Pedro Muñoz:



Fig.47. Gráfico NDVI invierno

Se observa para el invierno una tendencia estable para la vegetación que aumenta ligeramente a partir de 2017. En el caso de la laguna grande obtiene un descenso en 2018 con -0.42, pero es en 2021 con Filomena dónde tiene su mínimo de la serie con -1, al igual que la laguna pequeña, debido a la nevada de Filomena, subiendo ligeramente a -0.62 y -0.43, respectivamente, en el año siguiente.

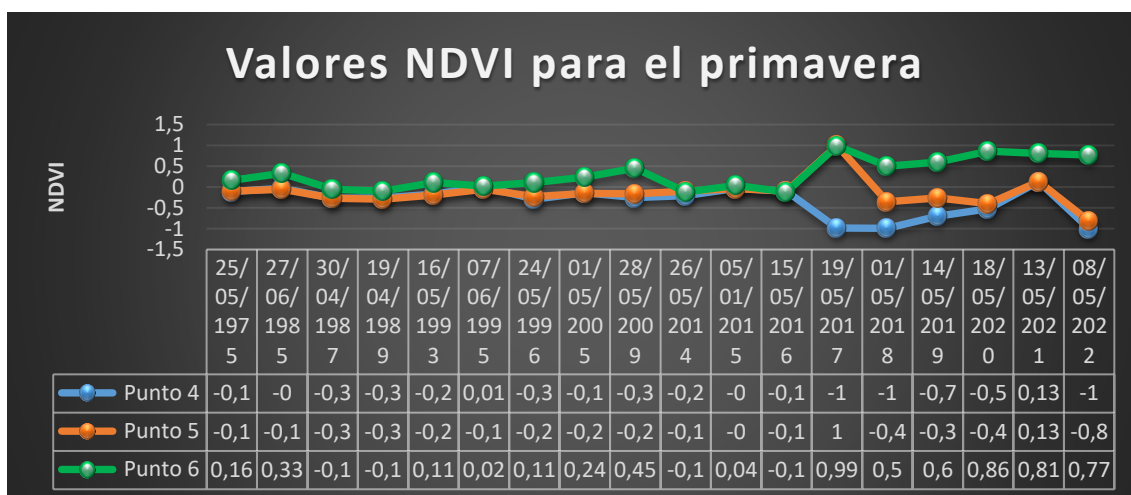


Fig.48. Gráfico NDVI para la primavera

Para la primavera, la tendencia vuelve a ser estable para la vegetación, encontrando el máximo en 2017 con un NDVI de 1, siguiendo después una tendencia alta entre 0.6 y 0.86. Para la laguna grande la tendencia se desarrolla en torno al 0 hasta 2017 que alcanza el valor mínimo con -1, valor que se repite en 2018 y 2022, y en 2019 y 2020 no se aleja demasiado, con 0.7 y 0.5, respectivamente. Por último para la laguna pequeña del norte, vuelve a perderse la tendencia en 2017 con una subida al 1, luego una bajada a 0.4 en 2018 y por último un gran descenso hasta -0.8 en 2022. Esta tendencia a partir de 2017, concretamente en los puntos 4 y 6 advierten de un posible aumento del aporte de agua, que disminuiría el NDVI en la cuenca lagunar y lo aumentaría en las zonas de vegetación, al estar más vigorosa por el mayor aporte de agua.

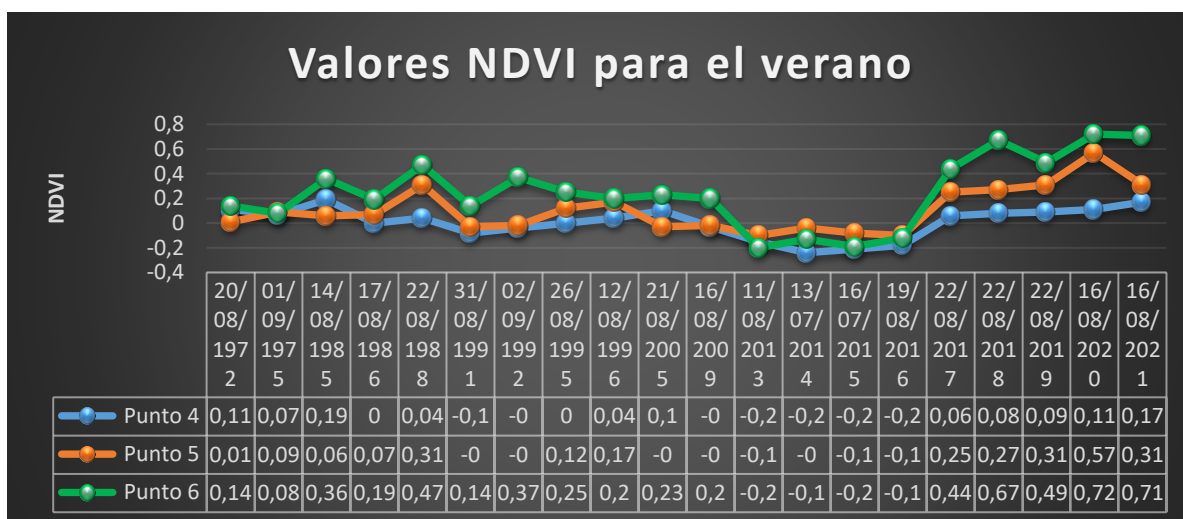


Fig.49. Gráfico NDVI para el verano

En el verano, los valores de la vegetación se encuentran entre 0.4 y -0.2 hasta que sube en 2017 alcanzando valores máximos en 2018, 2020 y 2021, con 0.67, 0.72 y 0.71, respectivamente, característicos de vegetación con alta reflectancia o con alta actividad clorofílica o superficie foliar. Para la laguna grande hay una estabilidad entre 0.2 y -0.2. Y para la laguna pequeña existe esa tendencia hasta 2017 a excepción de una subida a

0.31 en 1988, a partir de 2017 los valores suben en torno a 0.3 con el valor máximo en 2020 con 0.57, indicando esta tendencia que, aunque estos últimos años la laguna ha vuelto a estar vacía, ha mantenido la humedad suficiente para albergar vegetación higrófila, o bien se ha producido una gran eutrofización en la lámina de agua existente

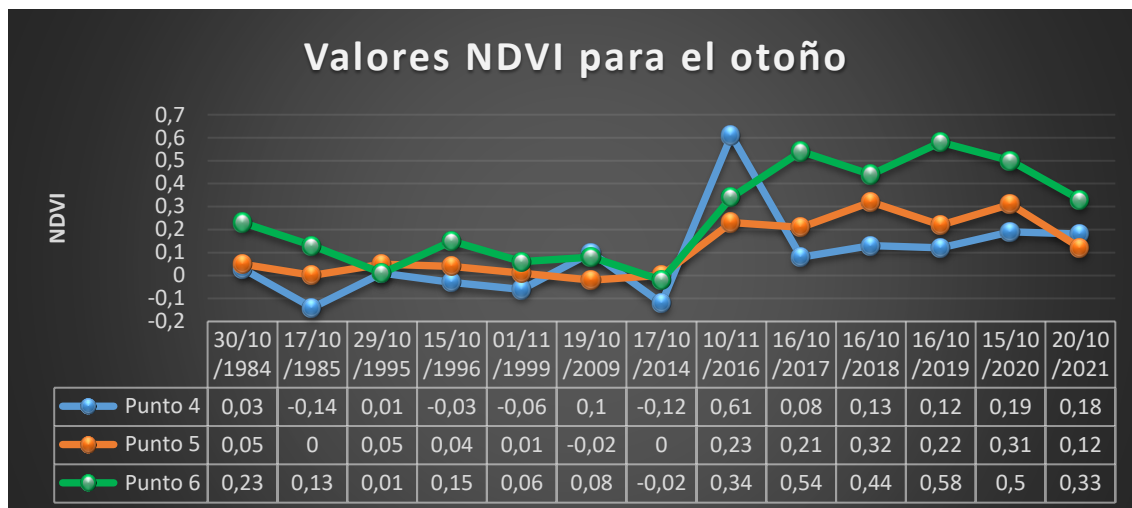


Fig.50. Gráfico NDVI para el otoño

Por último, el otoño en el que se aprecia una tendencia de la vegetación cercana a 0.1 hasta 2016 que comienza a subir, superando 0.5 en 2017 y alcanzando el máximo valor con 0.58 en 2019 volviendo a descender a 0,33 en 2021. Para la laguna grande la tendencia es en torno a -0.15 y 0.2 excepto en 2016 con el valor máximo de todos los puntos con 0.61, pudiendo tratarse de una gran eutrofización en la lámina de agua. Por último, la laguna pequeña que comienza también sus fluctuaciones en 2016, aumentando el valor del NDVI en estos años, debido a un posible aumento de la humedad que permite el mantenimiento de cierta vegetación higrófila.

### 4.3.3. Resultados imágenes sobre eutrofización

Al igual que con la laguna de Manjavacas, se han escogido imágenes en color natural que justifiquen o visibilicen las variaciones de la laguna de Pedro Muñoz a lo largo de los años.

## INVIERNO

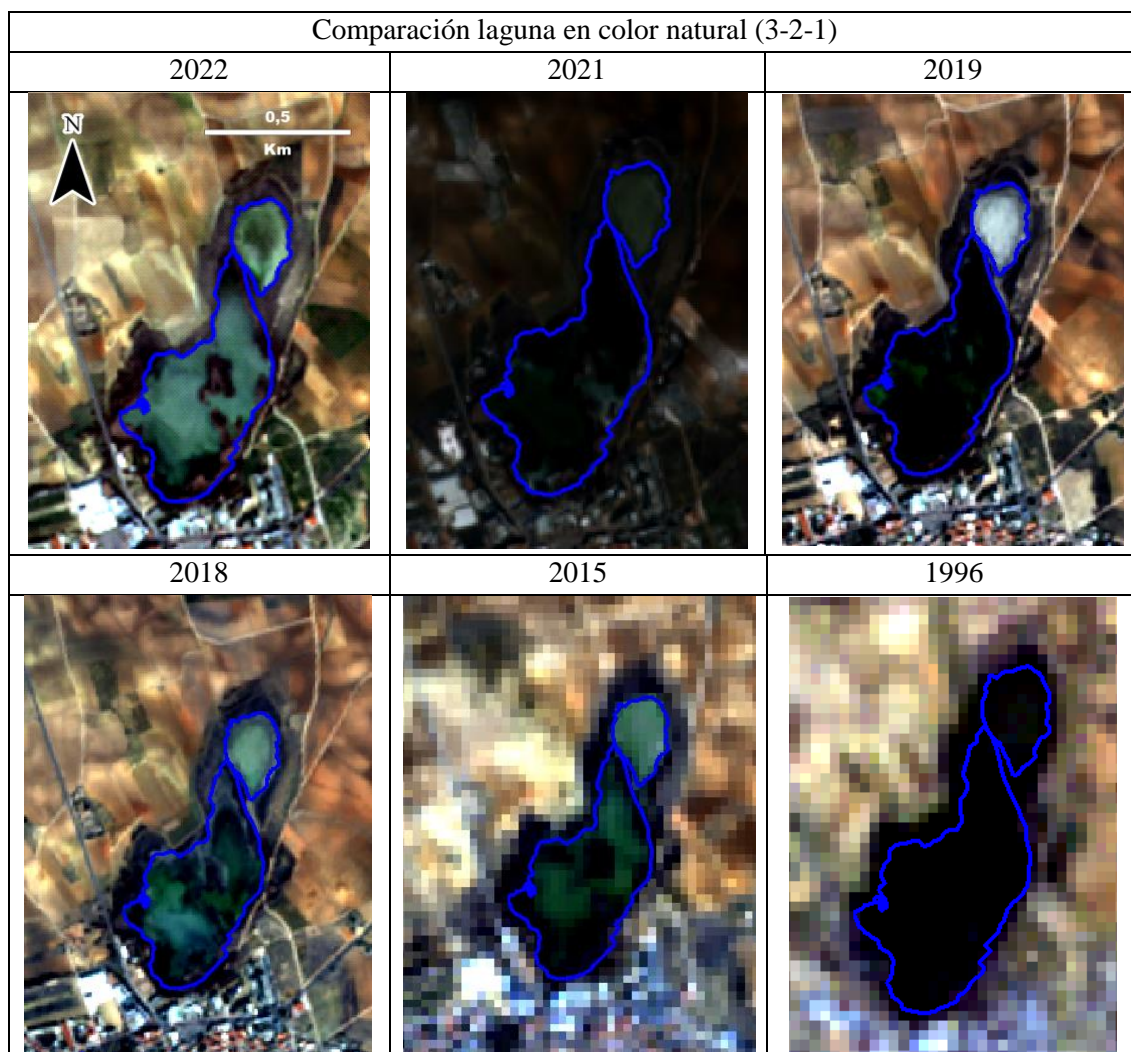


Fig.51. Imágenes de comparación laguna Pedro Muñoz en color natural (3-2-1) en invierno

En estas imágenes se puede ver el verdor del agua, siendo en 2015 cuando más se percibe, debido a una mayor eutrofización, aunque también se encuentran manchas de verde intenso en 2018 y 2019. También se puede apreciar la presencia de lámina de agua en la pequeña laguna del norte en 2015 y 2018, no siendo el caso por ejemplo para 2019. En 1996 se percibe la imagen muy oscura, por lo que en un análisis visual no se puede saber si es por presencia de una extensa lámina de agua.

### PRIMAVERA

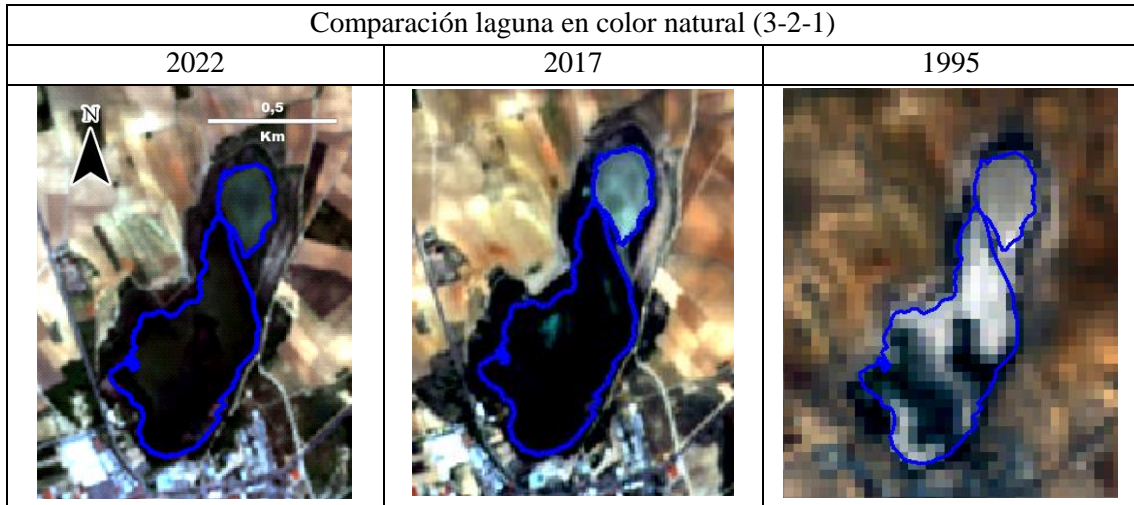
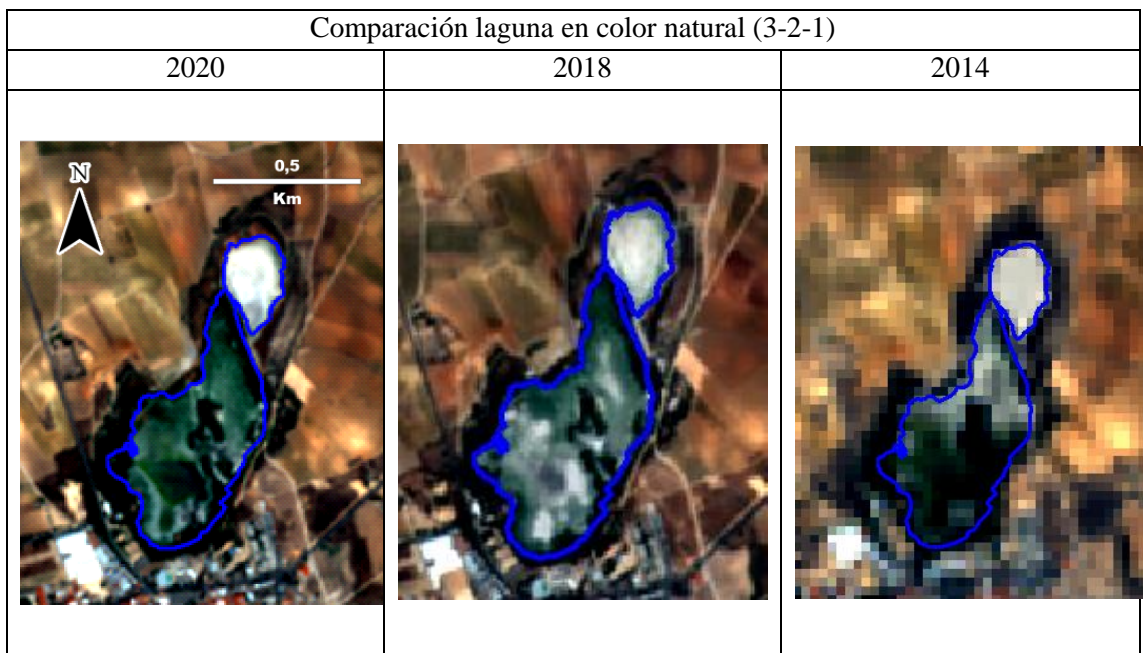


Fig.52. Imágenes de comparación laguna Pedro Muñoz en color natural (3-2-1) en primavera

Se aprecia aunque con dificultad, el verdor de la laguna norte en 2017 que le otorga el valor máximo de NDVI (Fig.48), y también la cantidad de agua que llena la cubeta en los próximos años en los que el valor de NDVI para la laguna grande es de -1. No siendo el caso de la imagen de 1995 con valores muy cercanos a 0, debido como se puede apreciar por los tonos blancos, a que la laguna se encuentra mayoritariamente seca, consecuencia de la intensa sequía acaecida en este año.

### VERANO



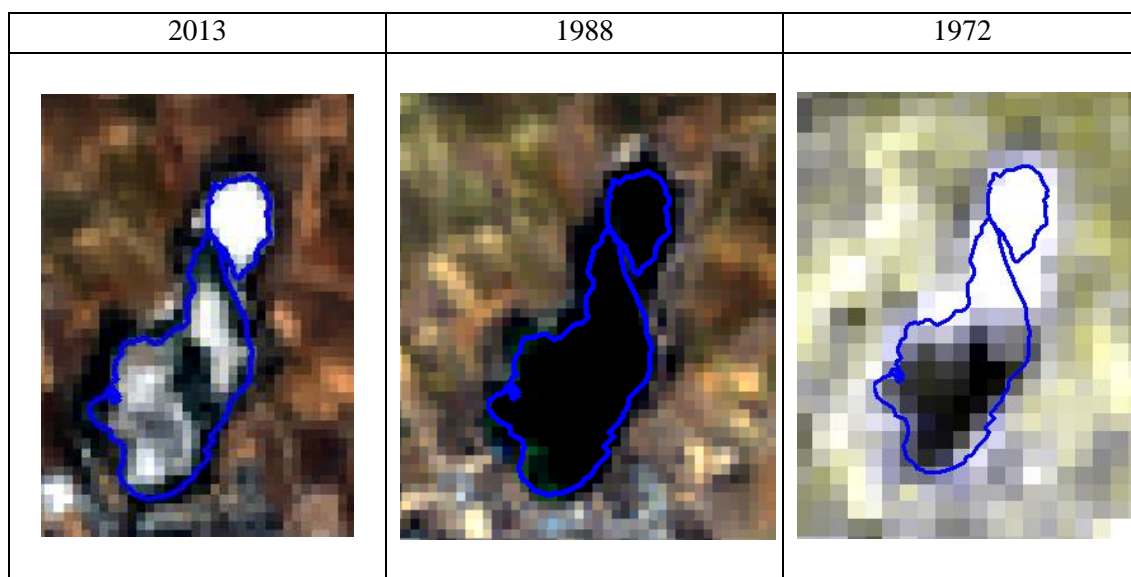


Fig.53. Imágenes de comparación laguna Pedro Muñoz en color natural (3-2-1) en verano

Se pueden observar los tonos verdosos para 2014, 2018 y 2020 que coinciden con valores altos de NDVI (Fig.49), y en cambio, los valores iguales o muy cercanos a 0 para la laguna pequeña en 1972, 2013 y 2014, observando en las imágenes el blanco de los afloramientos salinos, encontrándose cierto verdor, posiblemente ligado a vegetación higrófila en 2018. En 1988 se observa un tono verde intenso al sureste de la laguna y un ennegrecimiento en ambas cuencas lagunares, posiblemente debido a una extensa lámina de agua.

### OTOÑO

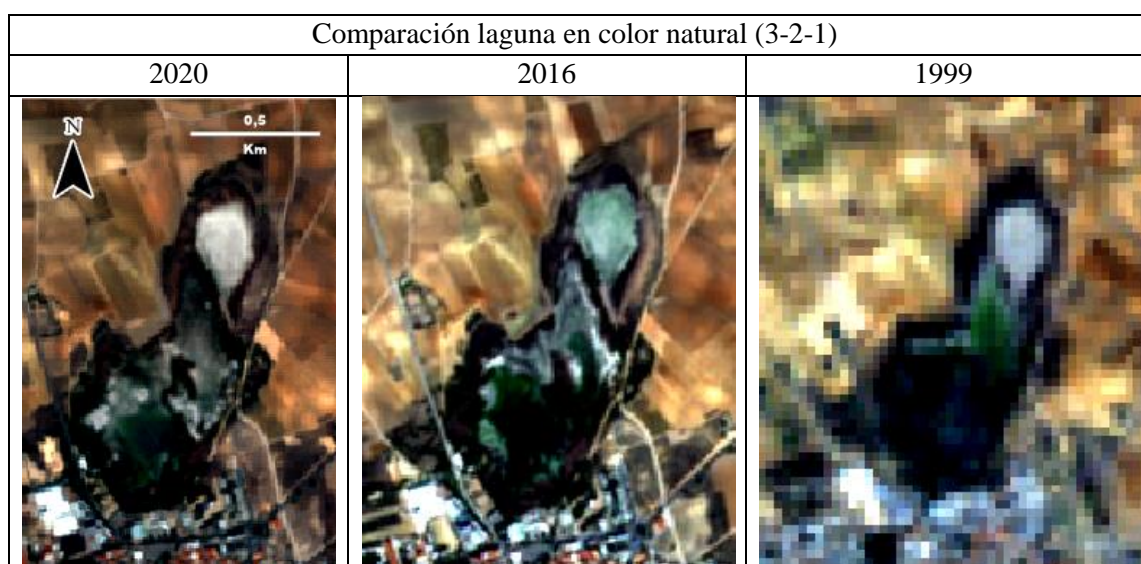


Fig.54. Imágenes de comparación laguna Pedro Muñoz en color natural (3-2-1) en otoño

En estas imágenes, se aprecia una alta concentración de algas en el interior de la cuenca lagunar, especialmente en el año 2016, el cual tiene el valor máximo de NDVI (Fig.50) de la laguna. Este verdor se aprecia también en la zona norte de la laguna grande en 1999. Estas masas de algas varían en concentración y ubicación, pareciendo tener una relación con la cantidad de agua que queda tras el verano pero también por el tipo de aportes,

lluvias o provenientes de las aguas residuales, de ahí el mayor o menor aporte de nutrientes que favorezcan la eutrofización.

#### 4.3.4. Resultados imágenes sobre vegetación

En las siguientes imágenes en falso color infrarrojo, como en las de la laguna de Manjavacas se han escogido las que muestren mayores contrastes o justifiquen posibles explicaciones a los valores atípicos, en estas imágenes se ha utilizado la banda del infrarrojo cercano para poder observar la vigorosidad de la vegetación circundante tanto alrededor de las lagunas como en su interior.

### INVIERNO

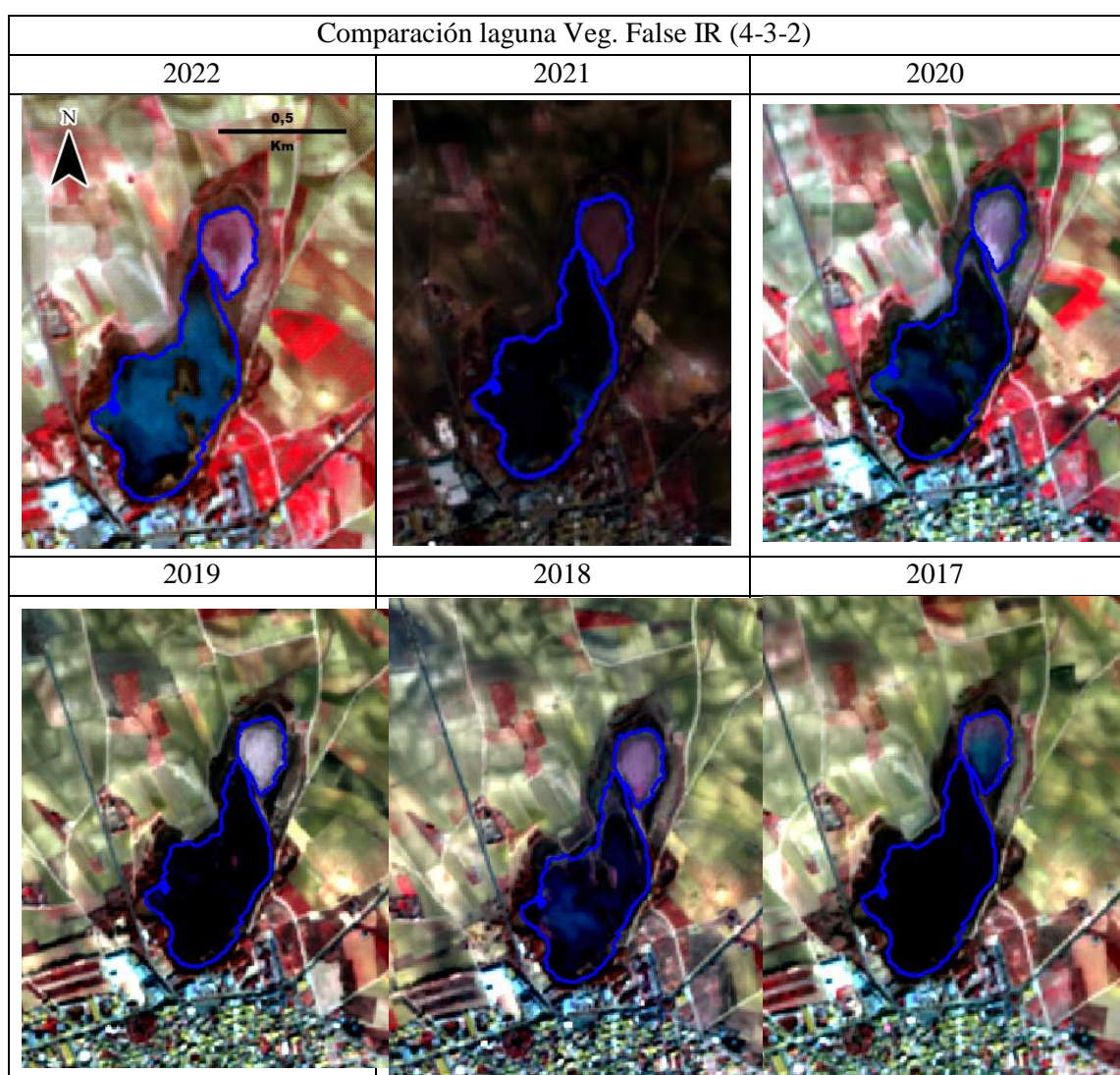


Fig.55. Imágenes de comparación laguna y vegetación False IR (4-3-2) en invierno

En esta serie de imágenes de 6 años consecutivos se puede apreciar los cambios en el régimen de regadíos de los cultivos aledaños, el posible aumento de los regadíos puede ocasionar un incremento del aporte de fertilizantes a la laguna (fosfatos y nitratos,

principalmente). En cuanto al interior de la laguna, se visualiza con cierta dificultad, aunque se pueden observar varios fenómenos. La laguna norte tiene varios estados, en 2017 permanece cierta cantidad de agua, al año siguiente cierta vegetación higrófila que le da un color rojizo, y en 2019 aparece blanca, constatando la ausencia de humedad y vegetación, el resto de años permanece en mayor o menor grado esa vegetación higrófila. Se consigue observar que el mínimo (Fig.47) de 2020 de -1, podría ser por la inundación de la vegetación en el punto de medición del NDVI, algo que también puede que sucediera, en menor grado en el 2021. También es visible una mancha roja de vegetación en la zona de la isla dentro de la laguna grande e 2019.

### PRIMAVERA

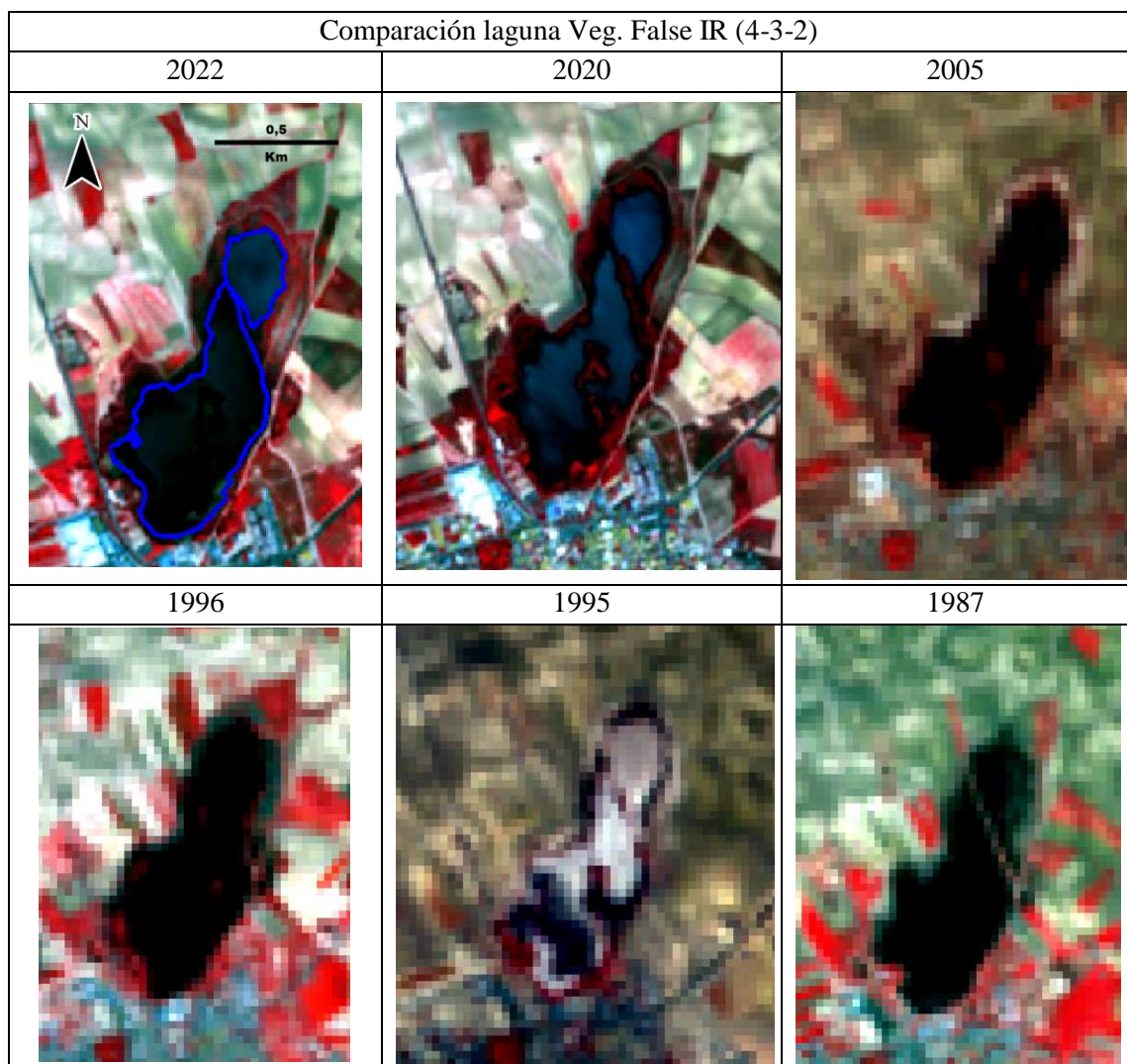


Fig.56. Imágenes de comparación laguna y vegetación False IR (4-3-2) en primavera

Se puede apreciar el color rojo en el centro de la laguna grande dónde se mide el NDVI (Fig.48) que tiene los máximos en los años dónde se aprecia, 2017 y 2020. También se puede apreciar la sequía que ocurrió durante el año 1995, apareciendo la laguna casi completamente seca. La orla de vegetación es variante de unas imágenes a otras, viendo casi su inexistencia en la mayor parte de la laguna en el año de la sequía, 1995 y, por el

contrario, apreciando su definición en el año 2020. La orla de vegetación cumple además un papel filtrador, pudiendo reducir el exceso de nutrientes de las lagunas. El regadío en los cultivos es variante, posiblemente ligado a las lluvias de cada año, viendo así las diferencias entre los años consecutivos 1995 y 1996. En el centro de las lagunas se distingue con tonos rojos la vegetación en 1996 y 2005. Y en 1987 se distingue con claridad el camino que cruzaba la laguna de Pedro Muñoz, antes de realizar los movimientos de tierra que separarían en dos esta laguna y que crearían una isla artificial para la nidificación de aves en el centro de la laguna grande.

### VERANO

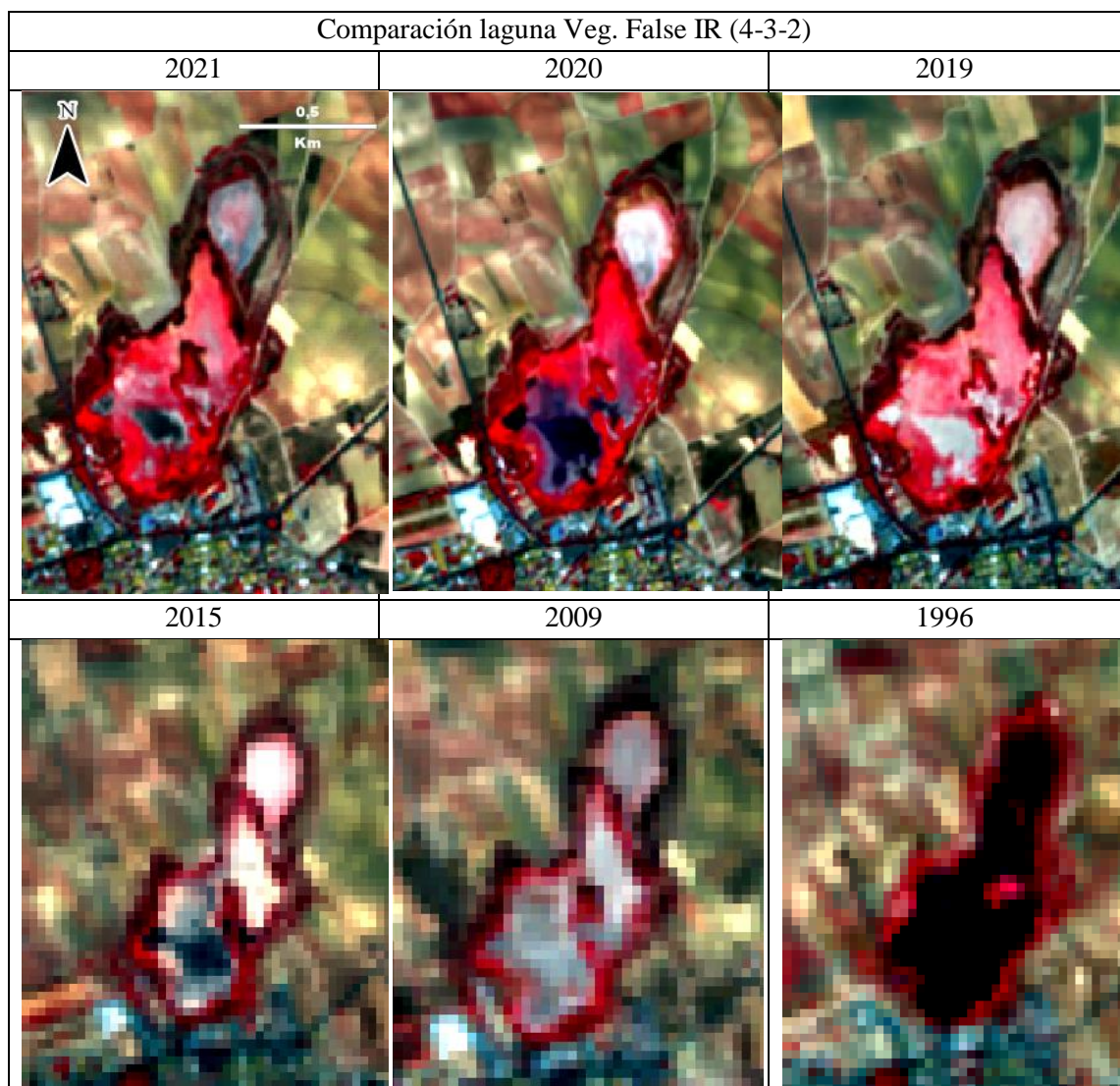


Fig.57. Imágenes de comparación laguna y vegetación False IR (4-3-2) en verano

Se puede observar en estas imágenes la diferencia entre las imágenes anteriores a 2017, que tienen valores de NDVI (Fig.49) alrededor de 0.2, a las imágenes posteriores a dicho año cuyos valores ascienden entre 0.5 y 0.7 aproximadamente, y dicha diferencia se puede apreciar bien mediante los colores rojos en las imágenes viendo que la cuenca lagunar se encuentra cubierta de vegetación, aparentemente. Esta vegetación en la cuenca lagunar aparece en los años en los que se mantiene la humedad o en los que hay aportes de aguas

de lavados agrícolas y urbanos con exceso de nutrientes, y aparecen con un tono rojizo debido a la presencia de vegetación halófila. En cuanto a la orla de vegetación que rodea la laguna es bastante fehaciente en todas las imágenes, encontrándose alrededor de las dos lagunas y en la isla interior de la laguna grande. En el año 1996 se aprecia lo que parece ser una gran lámina de agua que casi une ambas lagunas.

### OTOÑO

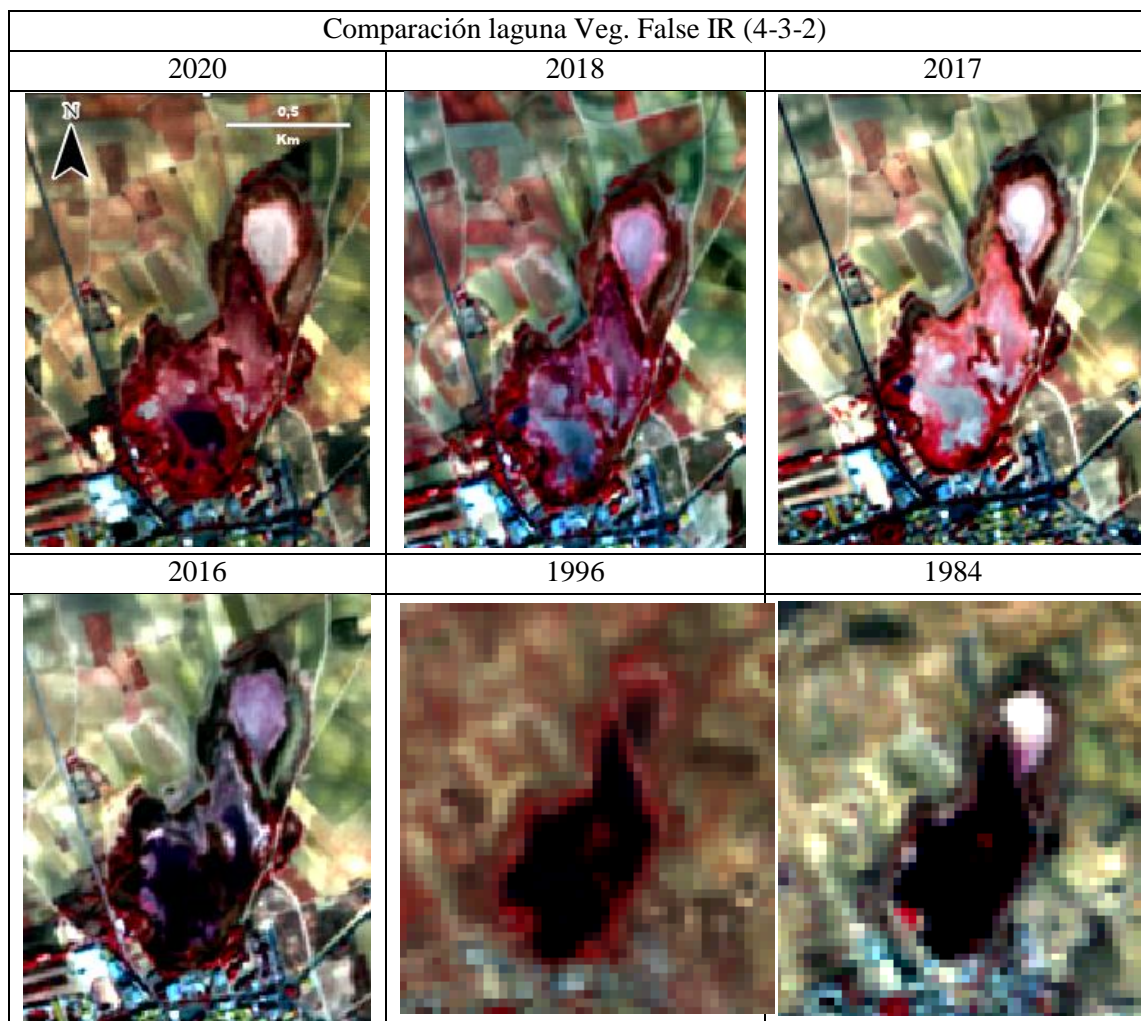


Fig.58. Imágenes de comparación laguna y vegetación False IR (4-3-2) en otoño

Al igual que con el verano, se puede apreciar como a partir de 2017 se produce un incremento del índice de NDVI (Fig.50) que se representa con los colores rojizos en el interior de la laguna debido a la presencia de vegetación. Salvo en 1996 la laguna pequeña del norte permanece seca y casi sin humedad, por ello no se encuentran apenas tonos rojizos ni por tanto, vegetación higrófila, algo que no sucede en las imágenes de 2016 y 2018, ya que aunque se seca la laguna, la humedad remanente permite cierta concentración de vegetación higrófila en el vaso lagunar. La orla de vegetación se mantiene aunque ligeramente en menor medida o con menor vigorosidad que en el verano.

#### 4.3.5. Resultados de las imágenes sobre la variación de la lámina de agua

Las siguientes imágenes en las que se utilizan las bandas del infrarrojo de onda corta y el cercano, pretenden visualizar de la mejor manera posible la lámina de agua apareciendo más oscura cuanto más profundidad sea esta.

#### INVIERNO

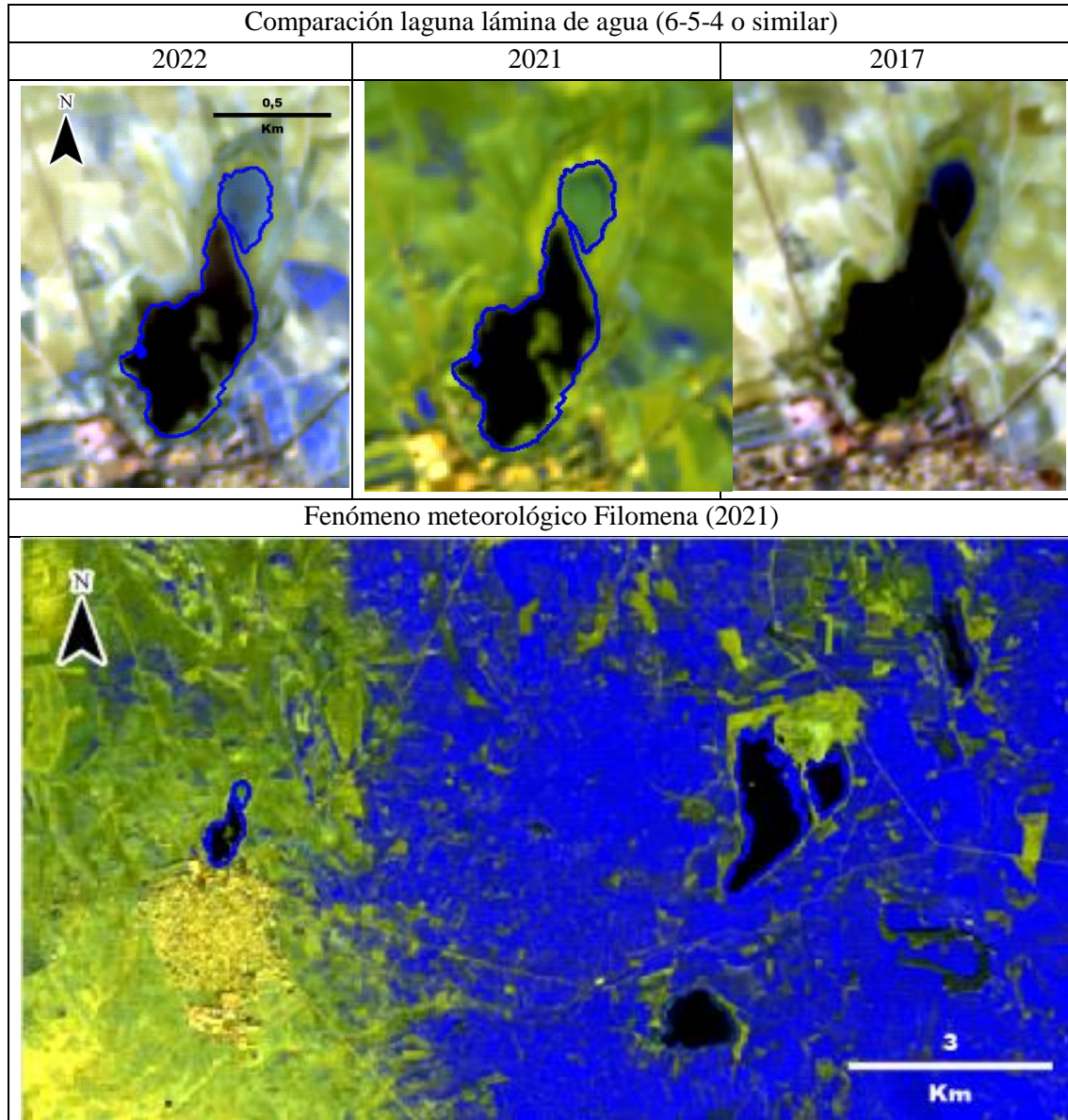


Fig.59. Imágenes de comparación laguna lámina de agua (6-5-4) en invierno

Es principalmente curioso el fenómeno meteorológico de Filomena de 2021 que, aunque la nieve no se mantuvo a partir de Pedro Muñoz hacia el oeste, como se aprecia en la imagen, siendo la nieve la humedad del suelo que se ve en azul, sí que contribuyó en ambas lagunas, al fundirse, a la mayor extensión y/o profundidad de la lámina de agua, y cubrió la vegetación, apareciendo con valores de NDVI (Fig.47) de -1 que indican presencia de agua.

Para el resto de las imágenes, la extensión de la laguna varía entre inundación o no de la isla central y la presencia de agua en la laguna pequeña del norte que sucede en 2017.

### PRIMAVERA

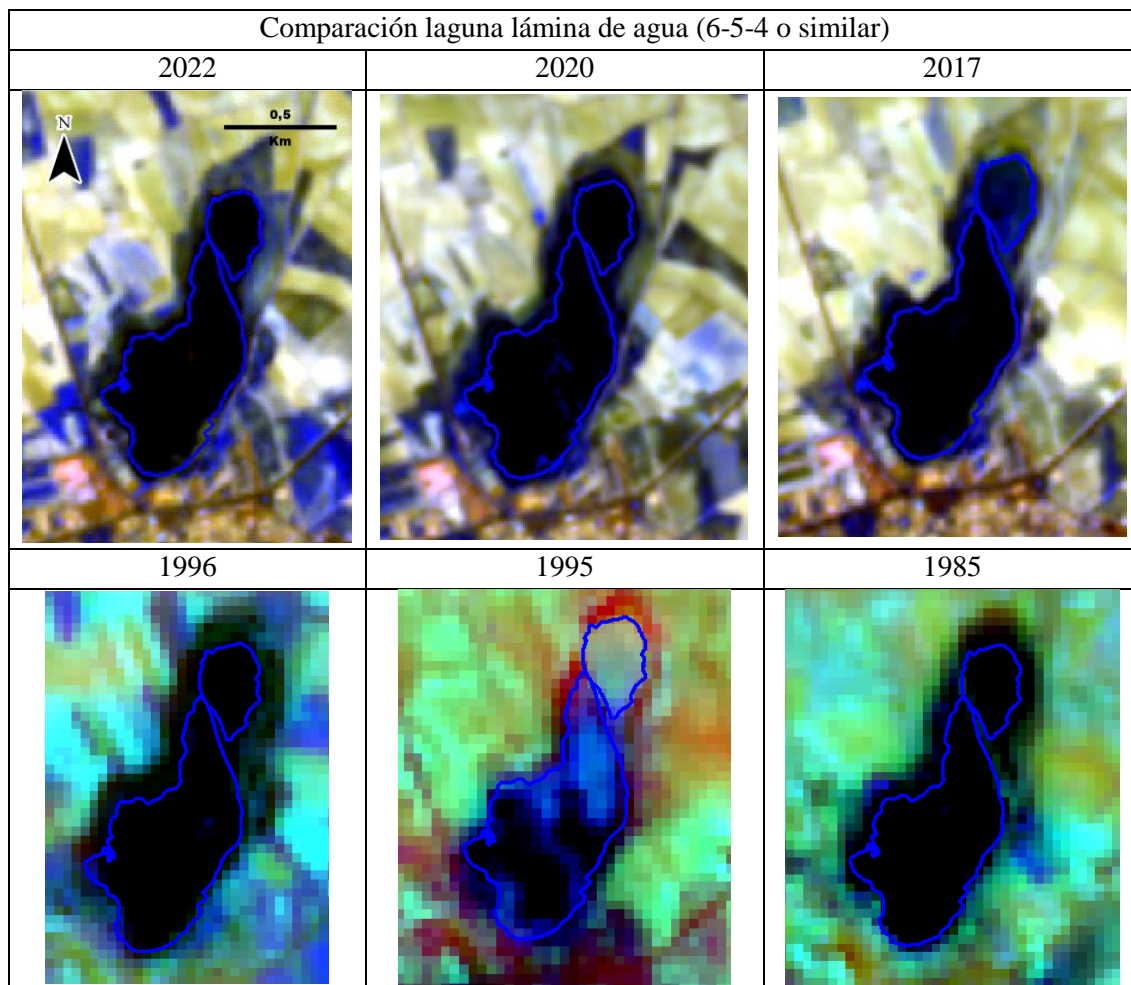


Fig.60. Imágenes de comparación laguna lámina de agua (6-5-4) en primavera

Se puede observar la diferencia que existe entre 2017 y 2022 en referencia a la laguna pequeña del norte, en 2017, mientras que el índice de NDVI (Fig.48) en la laguna grande era de -1, en la pequeña era de 1, posiblemente debido al efecto de la eutrofización, por el contrario en 2022, ambas lagunas tienen una lámina de agua considerable, apareciendo con un NDVI de -1. En 1985 y 1996 la extensión de la laguna parece sobrepasar notablemente el contorno dibujado, tratándose de años con una alta pluviosidad primaveral, algo que contrarresta con la sequía del año 1995, que incluso en primavera es bastante visible en comparación con el resto de años. En 2020 se aprecia la isla de la laguna grande, así como en 1996 y especialmente en 1995 debido a la sequía. La humedad de los cultivos se aprecia muy bien y se ve el incremento de esta en las 3 imágenes superiores.

## VERANO

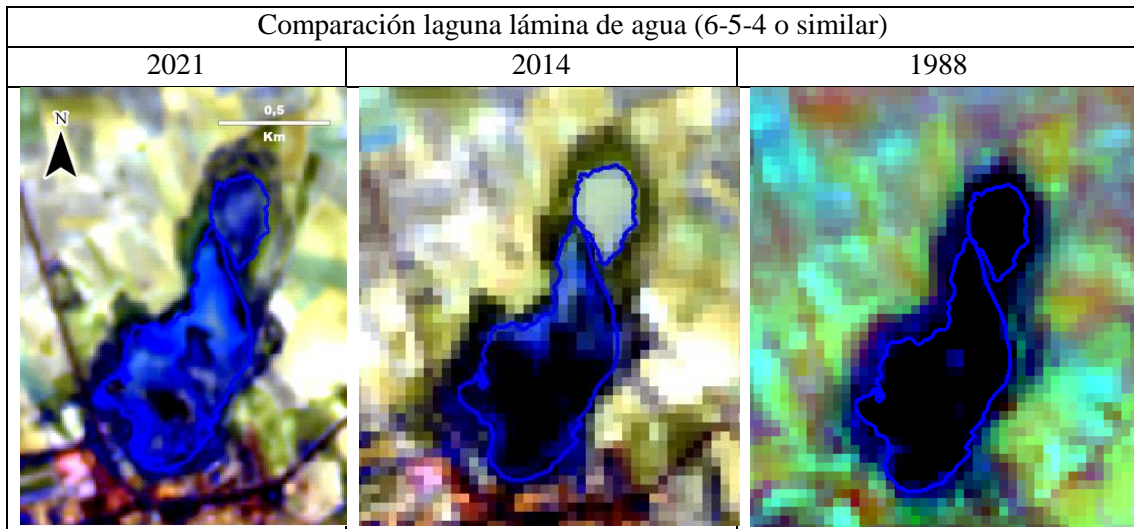
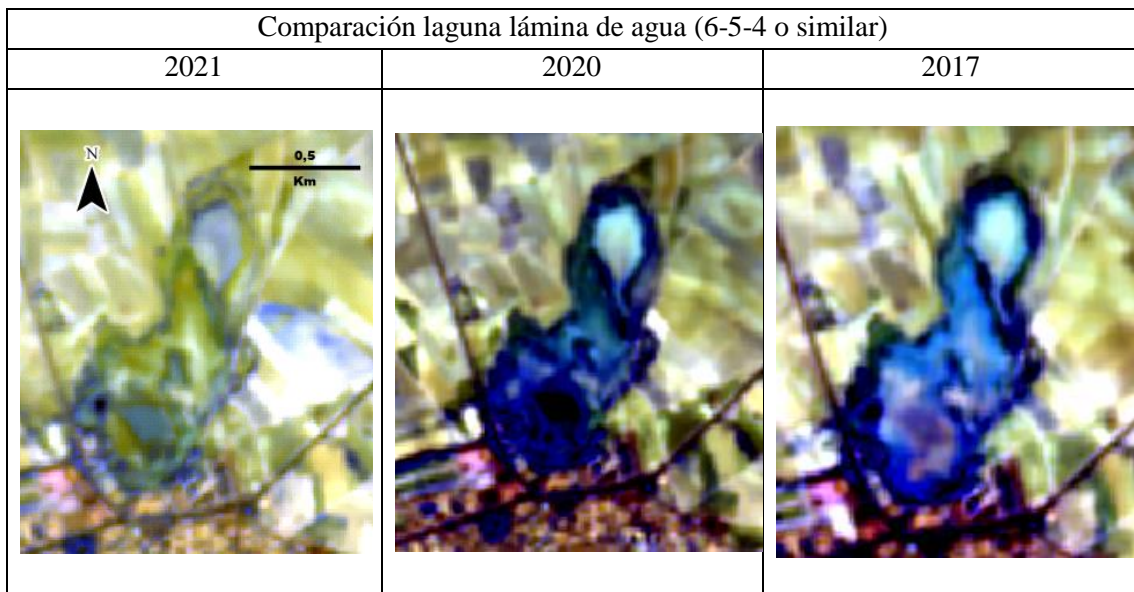


Fig.61. Imágenes de comparación laguna lámina de agua (6-5-4) en verano

Se aprecian diferencias en las láminas de las lagunas, como es la comparación de la laguna grande en 1988 y en 2021, o con los tonos muy claros presentes en la laguna pequeña del norte en 2014. Aunque aun quedándose seca se aprecia los colores azules que indican gran humedad, a excepción de la pequeña laguna en 2014.

## OTOÑO



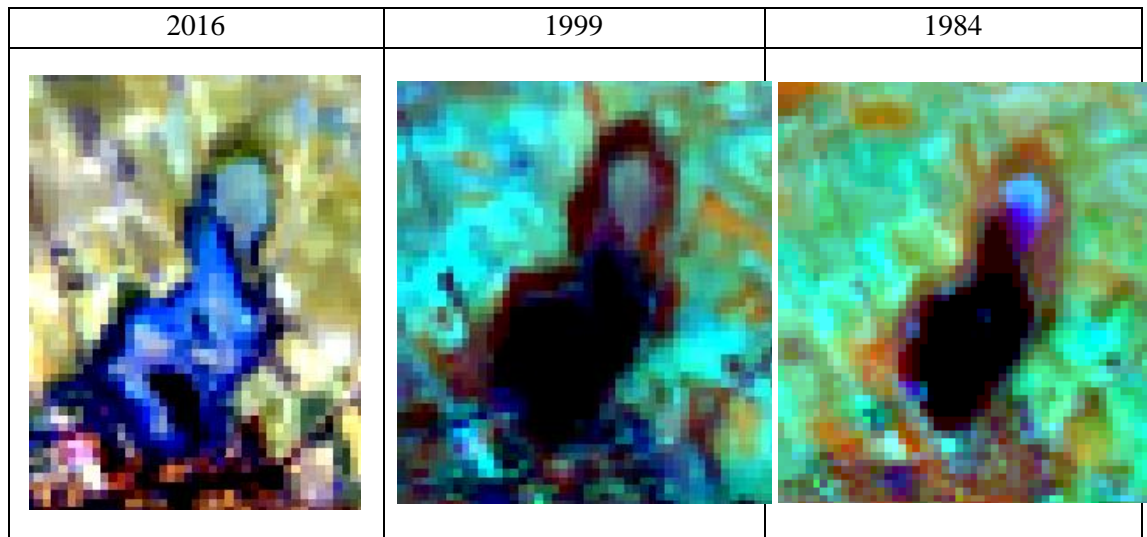


Fig.62. Imágenes de comparación laguna lámina de agua (6-5-4) en otoño

En esta serie temporal se puede apreciar una tendencia negativa en la presencia de agua, al menos en la extensión de la laguna, en la imagen de 1984 y 1999 la laguna grande se encuentra en su máxima extensión, sin embargo en los siguientes años se reduce drásticamente. En el caso de 2017 y 2021 no aparece ninguna extensión y en 2016 y 2020 es muy pequeña. Aunque sí se aprecia colores azules que indican la presencia de humedad y de vegetación higrófila, excepto en el año 2021 cuyos colores azules son muy escasos indicando una gran sequedad del terreno y de la orla de vegetación que sí presencia unos tonos azules en las imágenes de años anteriores.

### 4.3.6. Perfiles espectrales



Fig.63. Mapa con línea de medición del perfil espacial (Laguna Pedro Muñoz)

### INVIERNO

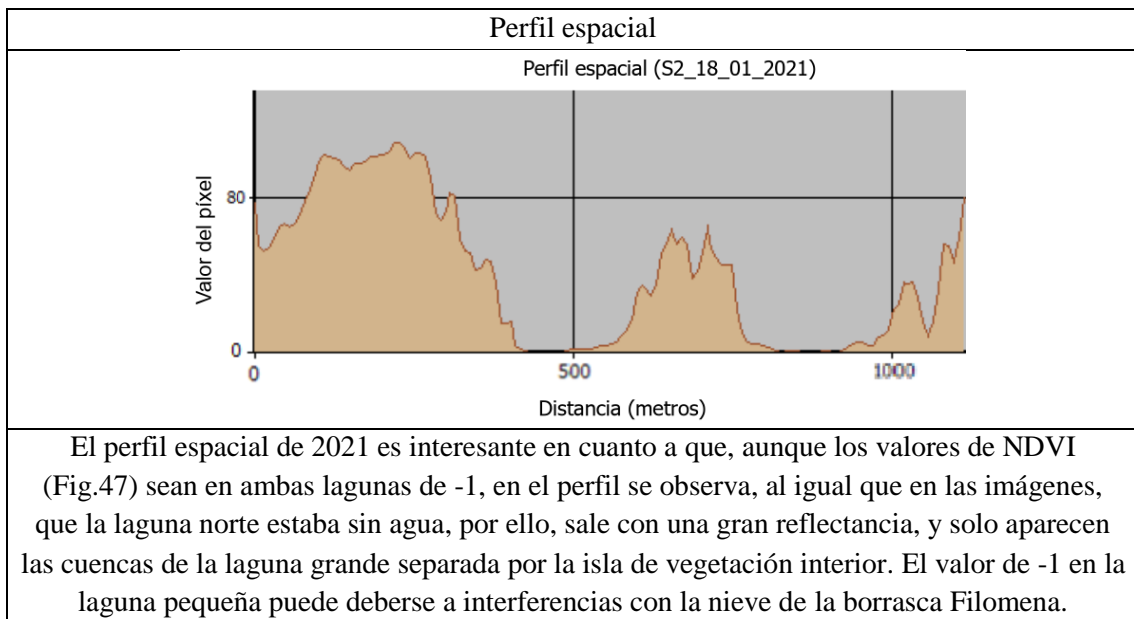


Fig.64. Perfiles espaciales para la laguna de Manjavacas en invierno

## PRIMAVERA

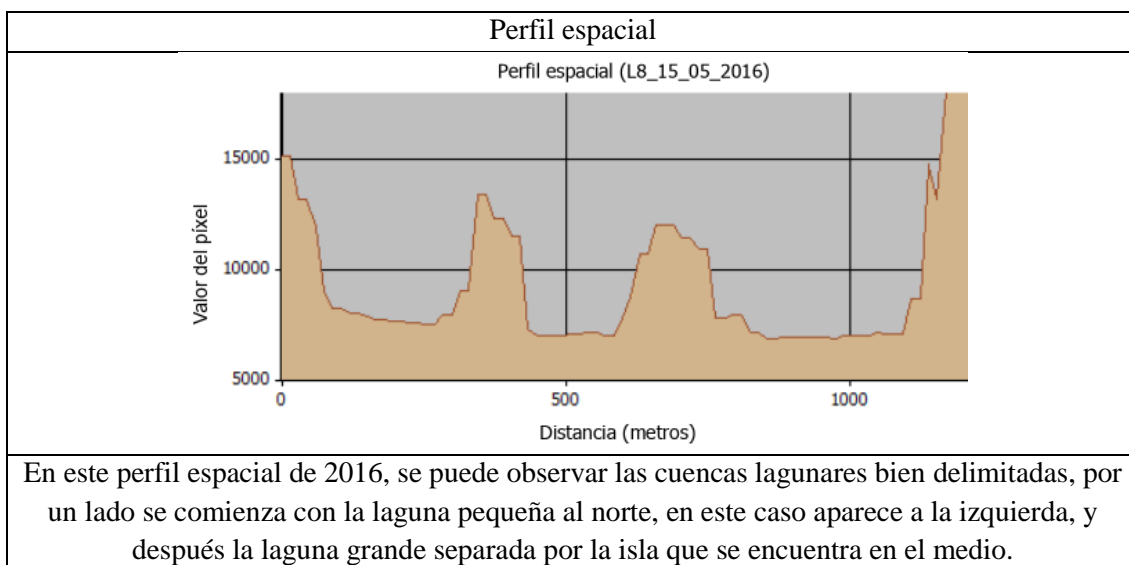


Fig.65. Perfiles espaciales para la laguna de Pedro Muñoz en primavera

## VERANO

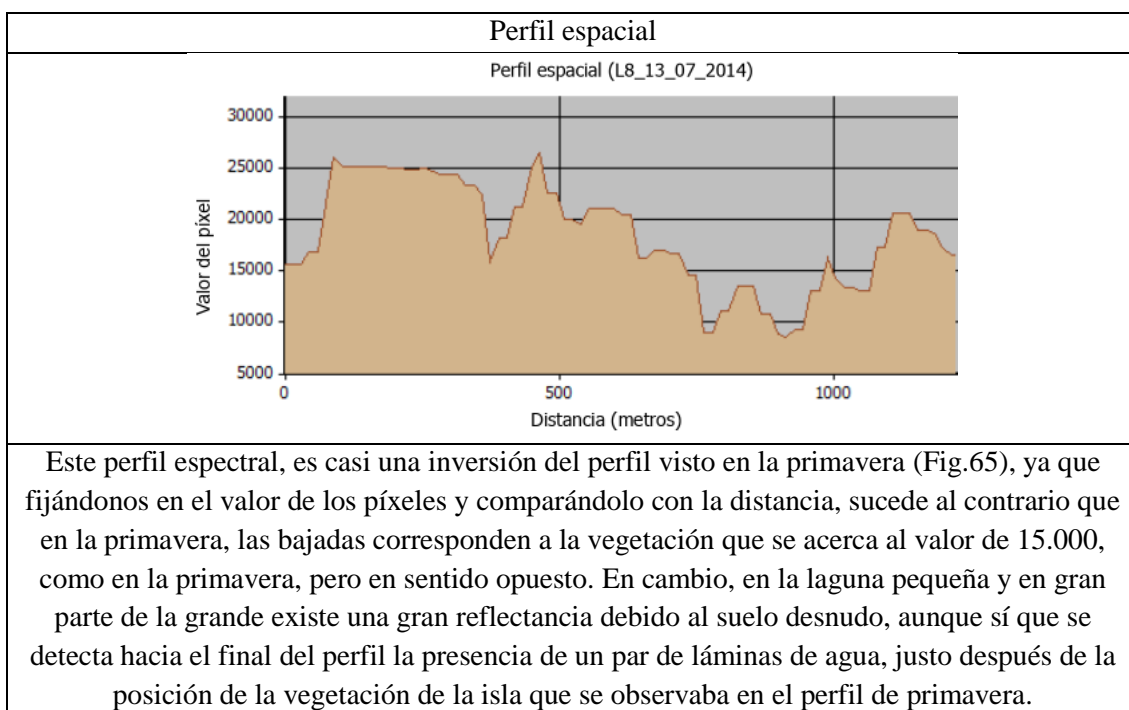


Fig.66. Perfiles espaciales para la laguna de Pedro Muñoz en verano

## OTOÑO

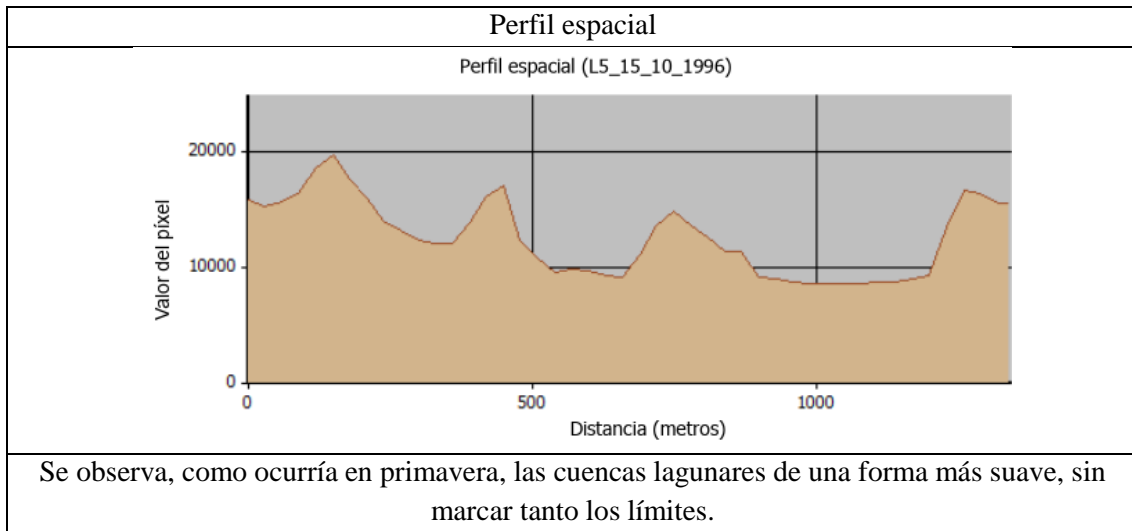


Fig.67. Perfiles espaciales para la laguna de Pedro Muñoz en otoño

### 4.3.7. Análisis del agua

El punto de muestreo del agua cuyos análisis se reflejan en la siguiente tabla se encuentra en el mapa expuesto (Fig.43) junto a los puntos de medición del NDVI.



Fig.68. Orilla norte de la laguna grande de Pedro Muñoz. Mayo 2022

| Laguna Pedro Muñoz |                   |          |          |          |          |          |
|--------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Año                | Nutrientes (mg/l) |          |          |          |          |          |
| 2022               | Nitratos          | Nitritos | Fosfatos | Sulfatos | Cloruros | Amoniaco |
|                    | 0,352             | 0,396    | 0,7      | 691      | 56       | 0,32     |

Fig.69. Tabla Nutrientes análisis de Agua

| Laguna Pedro Muñoz |                           |  |               |
|--------------------|---------------------------|--|---------------|
| Año                | Parámetros fisicoquímicos |  |               |
| 2022               | pH a 19,8°C               | Conductividad eléctrica (mS/cm) a 19,1°C | Observaciones |
|                    | 8,56                      | 4,04                                     |               |

Fig.70. Tabla Parámetros fisicoquímicos análisis de Agua

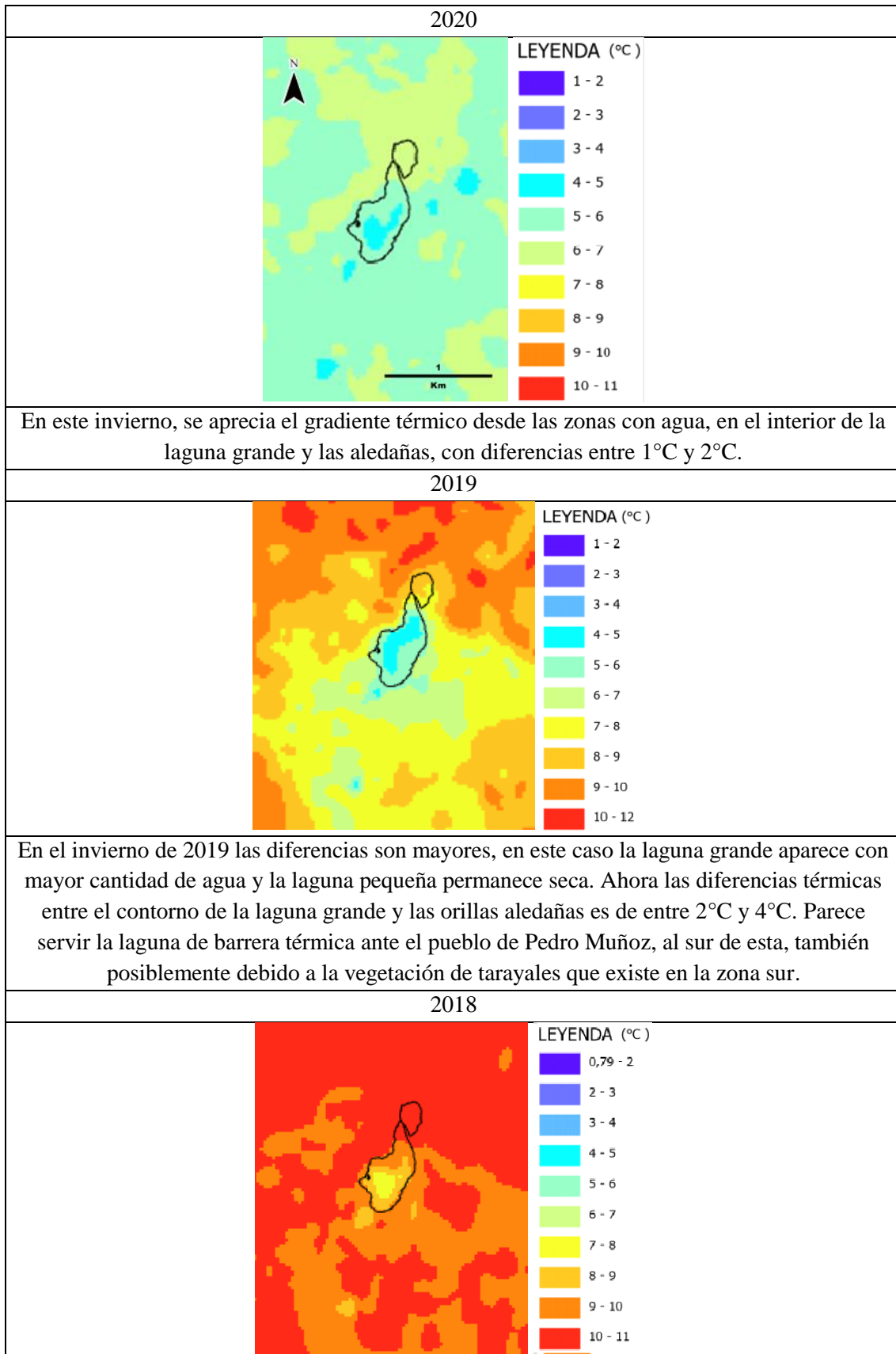
Basándonos en los parámetros establecidos por Rodier (1981) podemos comparar que en el caso de la laguna de Pedro Muñoz, obtenemos unos valores de nutrientes altos, similares a los obtenidos en la Acequia Madre de la laguna de Manjavacas, posiblemente debido a los vertidos de la EDAR, y que superan los límites establecidos en los nitritos, casi 4 veces más que el límite de 0,1 mg/L, en los fosfatos que tienen el mismo límite también se supera por 7 veces y en cuanto a los nitratos, se encuentra dentro del límite establecido, siendo este caso lo que lo diferencia del análisis de la Acequia Madre de Manjavacas (Fig.33). Los sulfatos se encuentran con valores muy por encima de los 25 mg/L establecidos como valor alerta para tener una mínima calidad del agua potable (Bolaños-Alfaro, 2017). El amoníaco se encuentra dentro del límite máximo de 1,5 mg/L de calidad de las aguas para consumo humano (Chuquimez, 2021).

En cuanto al pH, indica el carácter alcalino de la laguna, aunque no posee una conductividad demasiado alta, debido a la menor concentración de sales, pudiéndose observar que para los cloruros, las concentraciones están dentro de lo establecido para aguas no contaminadas tras el proceso de cloración que es de entre 40-63 mg/L (García Vargas et al., 2012).

#### 4.3.8. Análisis de las temperaturas

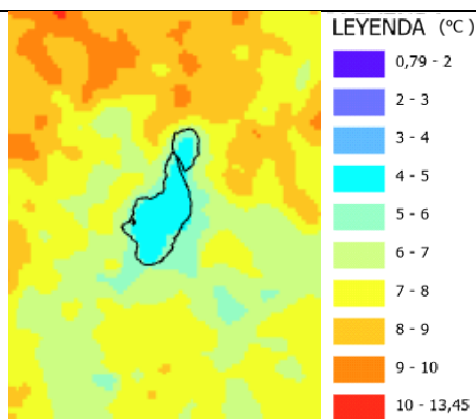
En este apartado se ha utilizado la banda térmica del satélite Landsat 8 para ver las diferencias térmicas de las lagunas con su entorno en diversos años y estaciones desde 2014 a 2022, observando el posible fenómeno de la isla de frío que puede crear las lagunas. Se expondrán imágenes junto a sus leyendas específicas y junto a los comentarios explicativos sobre lo que se puede observar.

## INVIERNO



En este año las diferencias siguen apareciendo, con características similares a los años anteriores con diferencias entre 2°C y 4°C

2015

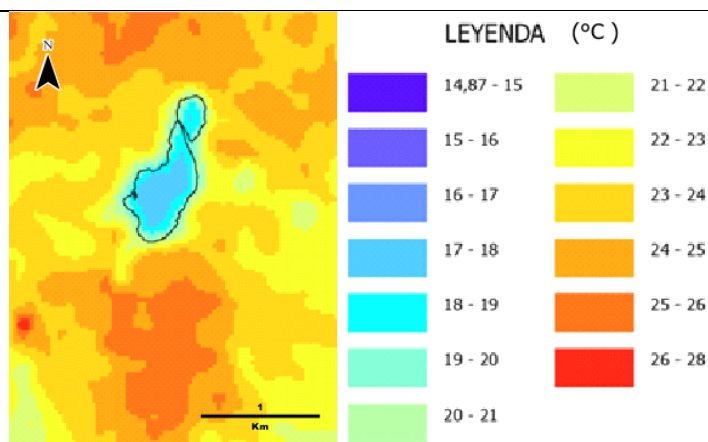


En el año 2015 se aprecia que al tener agua las dos lagunas, se puede un gradiente térmico en la lámina de agua y en su entorno inmediato, existiendo una diferencia entre la lámina de agua y su entorno de entre 1°C y 3°C solamente. Puede apreciarse también el efecto de frescor al sur y este de la laguna pudiendo ser los tarayales de estas zonas el motivo de la disminución de las temperaturas.

Fig.71. Imágenes de análisis de temperatura en invierno

### PRIMAVERA

2020



En la primavera de 2020 se observa la isla de frío que se crea dentro y en las inmediaciones de la lámina de agua y la vegetación circundante, existiendo un gradiente progresivo hasta los 150 metros desde el final de la lámina de agua a 18-19°C hasta esta distancia a 23-24°C. En cambio en el pueblo de Pedro Muñoz se crea una isla de calor con una diferencia de hasta 3°C con el terreno circundante de campiña

2018

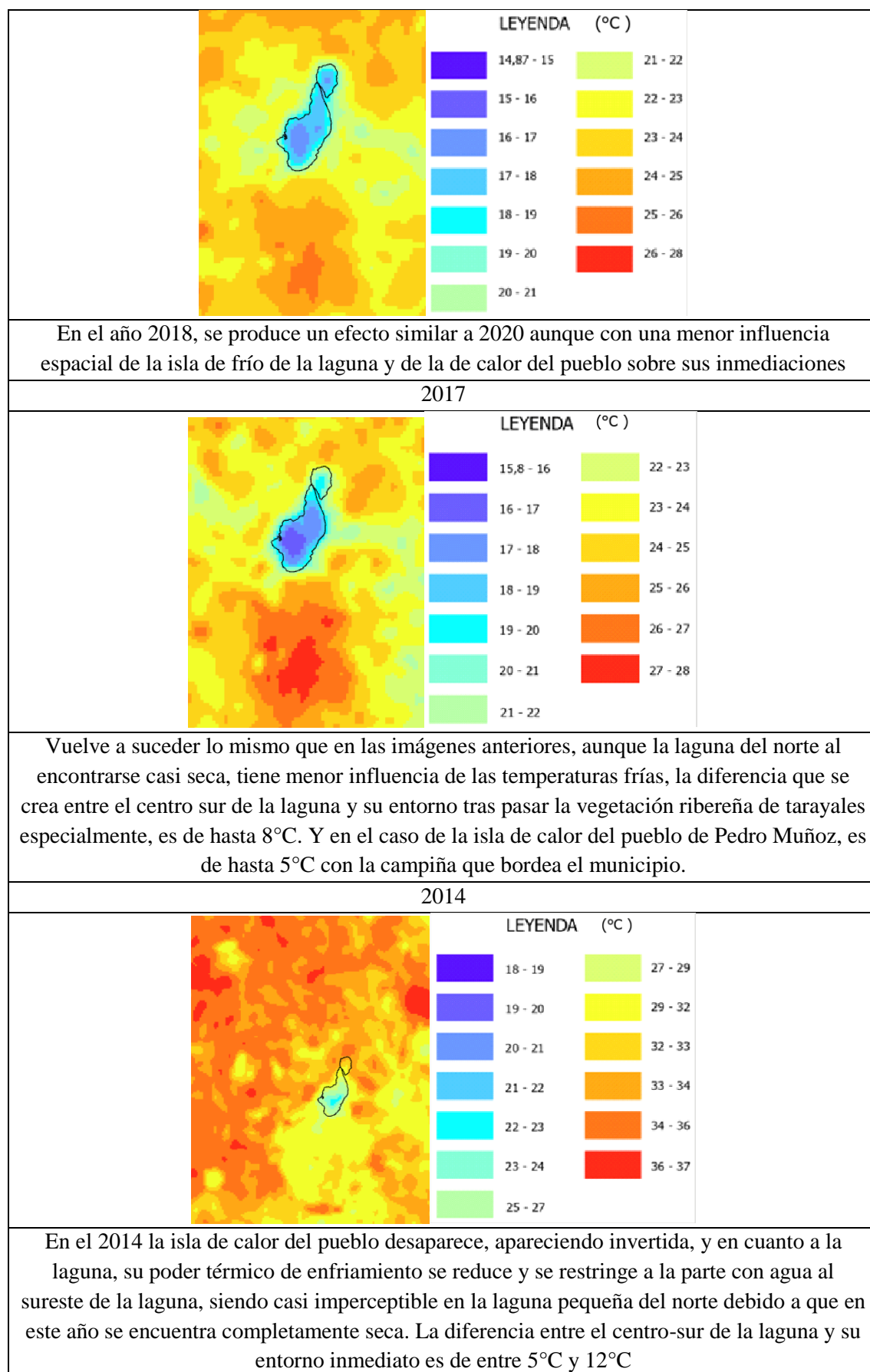
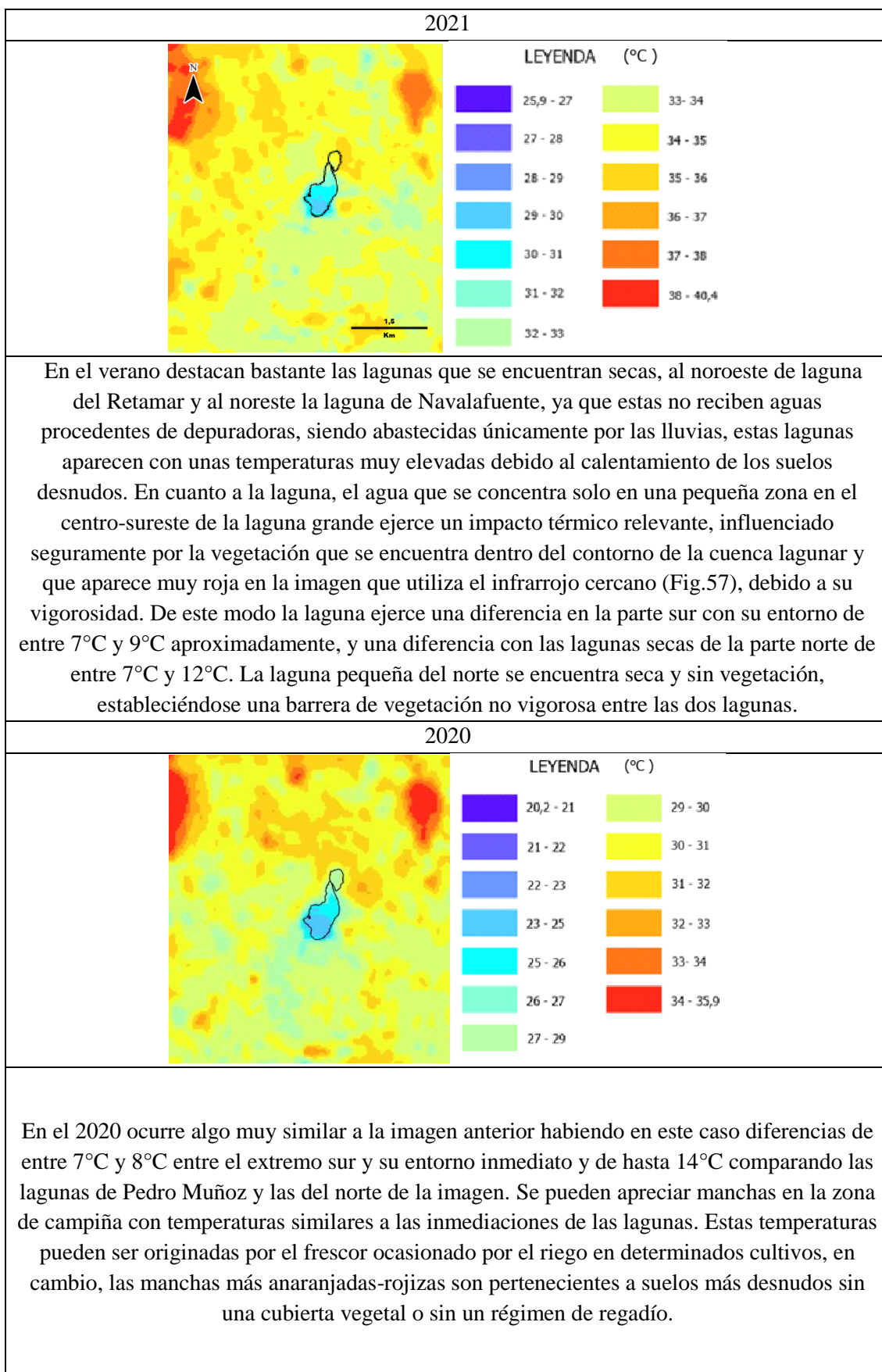


Fig.72. Imágenes de análisis de temperatura en primavera

## VERANO



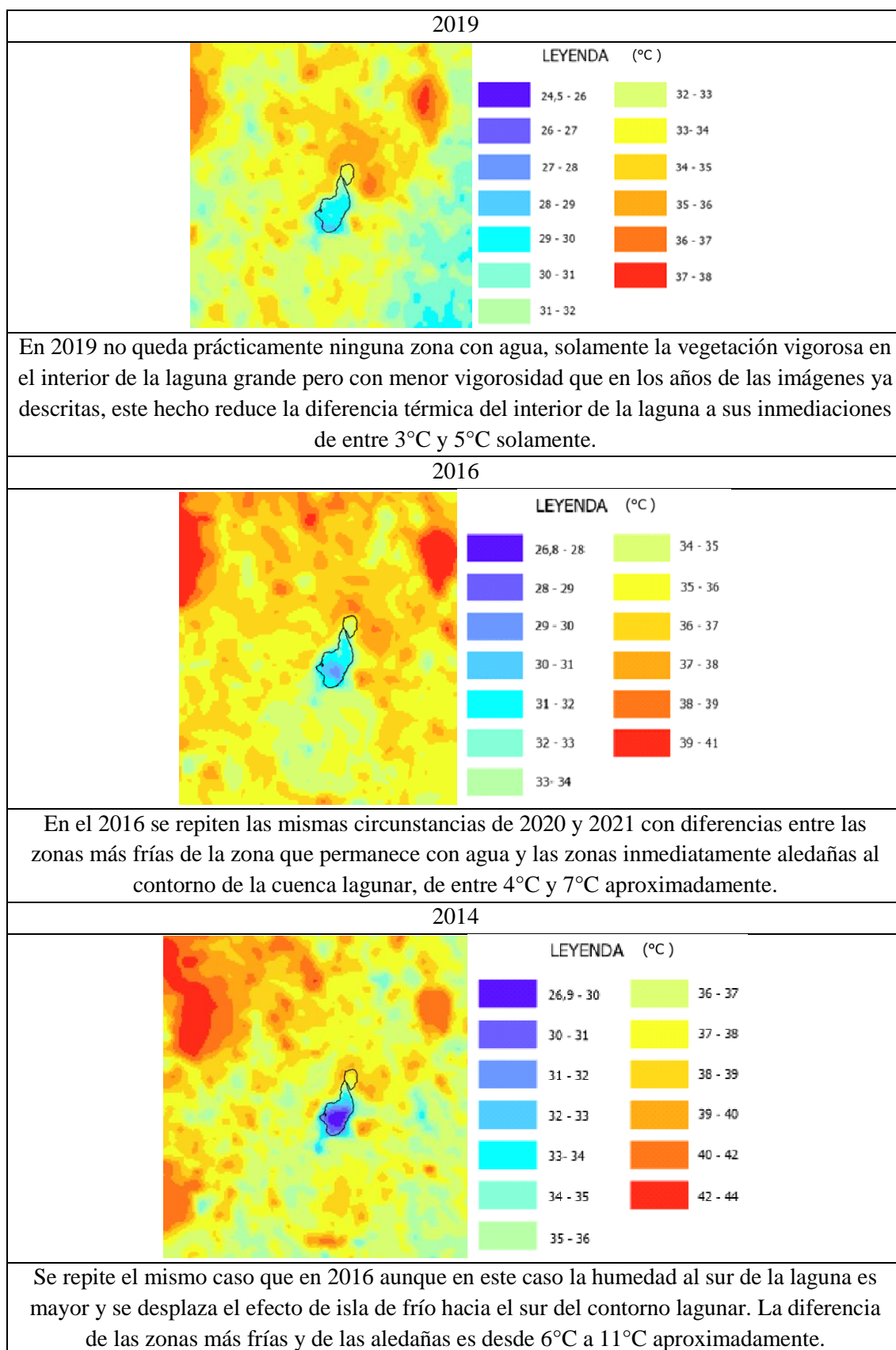
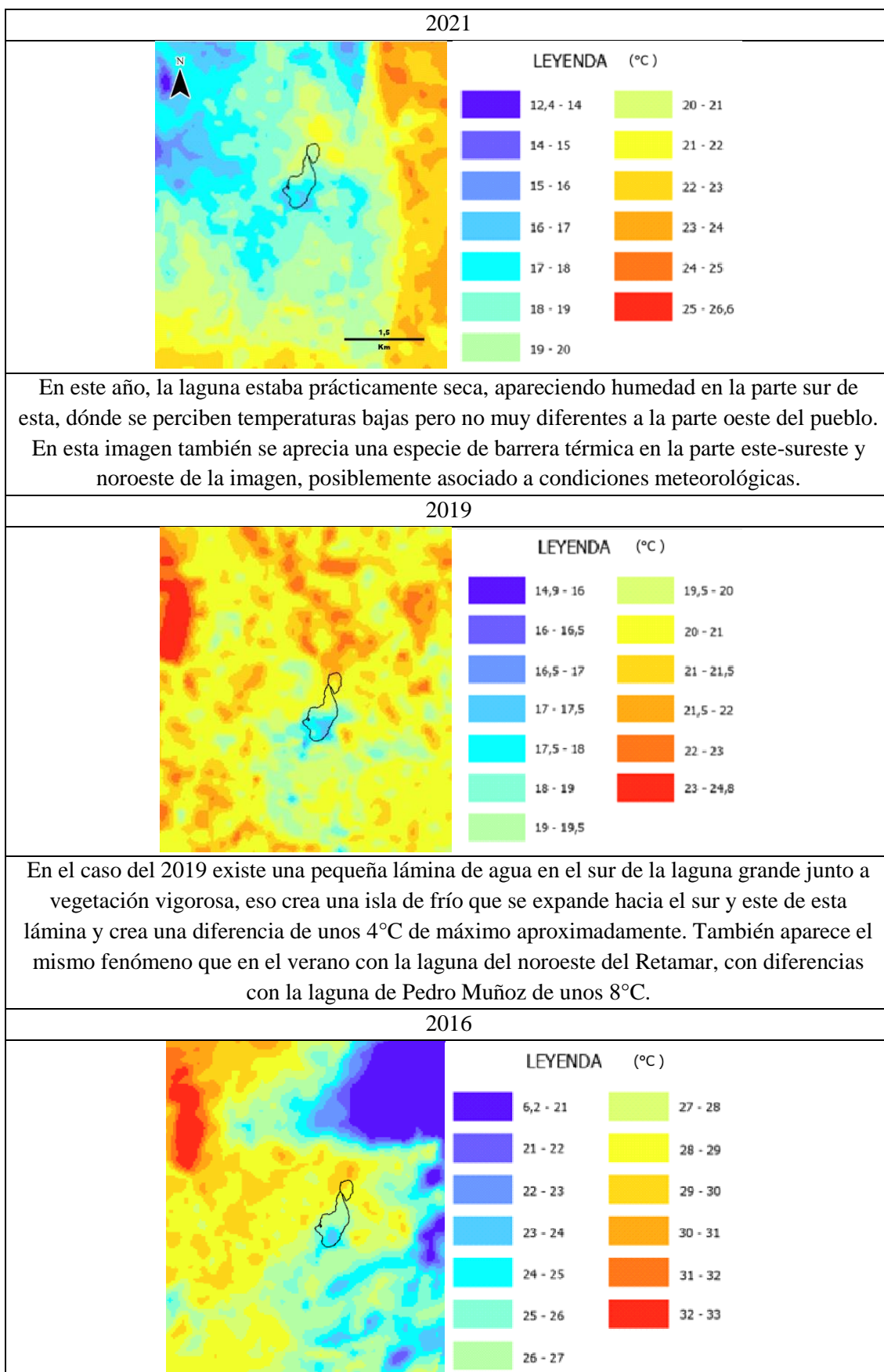


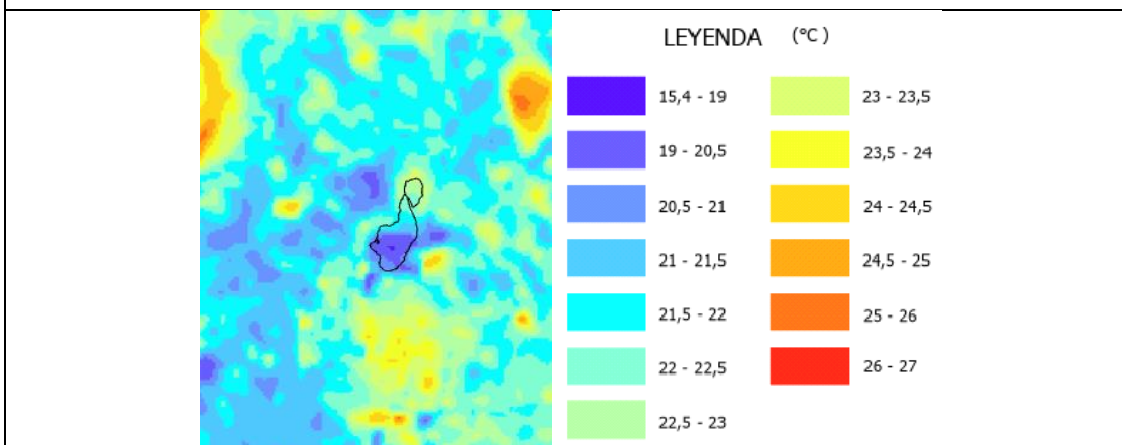
Fig.73. Imágenes de análisis de temperatura en verano

## OTOÑO



En el 2016 la extensión de la lámina de agua de la laguna es mayor pero la vegetación se muestra menos vigorosa, el resultado es que la influencia de la isla de frío parece ligeramente menor siendo la diferencia de unos 5°C entre el interior lagunar y las zonas aledañas. También se aprecia la presencia de nubosidad por la parte noreste especialmente que baja mucho la temperatura.

2014



En esta imagen se diferencia la isla de frío de la laguna aunque sin mucho contraste con las zonas aledañas, pero sí se aprecian mejor las islas de calor tanto de las lagunas del Retamar y de Navalafuente, como del municipio de Pedro Muñoz con diferencias con su entorno de entre 2°C y 4°C

Fig.74. Imágenes de análisis de temperatura en otoño

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la discusión se analizarán junto a los datos e hipótesis recogidos en los resultados y en la bibliografía, los diferentes objetivos del presente trabajo.

Para los objetivos del estudio de la vegetación y de la contaminación con especial atención a la eutrofización, los cuales se desarrollaron mediante la medición de los índices de NDVI, los análisis visuales de las bandas del espectro visible y del infrarrojo cercano, el trabajo de campo y el de laboratorio, se han constatado diferentes hipótesis y explicaciones.

En primer lugar, se puede verificar la gran utilidad de estas herramientas para el estudio de dicho parámetros, siendo muy evidente en ocasiones la correlación de la información percibida en el análisis visual con el índice de NDVI o los perfiles espaciales, e incluso con análisis de agua en el caso de la primavera de 2022. En cuanto a los resultados, indican que se ha producido un incremento de los valores del NDVI para la vegetación lagunar en el último lustro mayoritariamente, siendo el verano y el otoño, las estaciones en las que más se observa esta tendencia. Esto puede deberse a la permanencia del agua en la laguna durante estos periodos más secos, condicionado principalmente con el aporte de aguas residuales provenientes de depuradoras. Este incremento del aporte de agua de las depuradoras ocasiona, especialmente en la laguna de Pedro Muñoz, un incremento de

los valores del NDVI, pero en este caso para las cuencas lagunares, siendo provocado por el proceso de eutrofización debido al mayor aporte de nutrientes. Este proceso ha disminuido la estacionalidad de la laguna de Pedro Muñoz desde la década de los 50, pero también ha provocado una gran acumulación de nutrientes en la laguna (Donaire et al., 2005). Este proceso también ha sucedido en la laguna de Manjavacas tras los aportes antrópicos que recibe de las aguas residuales de Mota del Cuervo, lo que atenúa la estacionalidad, pero incrementa la contaminación por medio de la eutrofización (Peinado, 1994). Debido a estos aportes, la laguna acaba siendo hipertrófica con altos niveles de nitrógeno y fósforo (Gosálvez et al., 2012). Cuando las lluvias de otoño e invierno son abundantes, la recarga de la laguna permite que las semillas y esporas de los sedimentos germinen y se arraiguen al suelo, enraizando, haciendo así que se establezca la capa superior de sedimentos, minimizando su movimiento durante las lluvias más tardías y evitando así el enturbiamiento de la laguna, esta es una de las razones por las que la laguna de Manjavacas puede en un año tener aguas transparentes y abundante vegetación acuática, y en otro albergar aguas turbias y no poseer ninguna planta sumergida (Fortuna, 2003). Se puede comprobar en los gráficos de todas las estaciones que prácticamente para todos los años, los valores del NDVI son mayores en la vegetación lagunar de los bordes, o de la Acequia Madre en el caso de Manjavacas, que dentro de la laguna a pesar de la existencia de años con una gran eutrofización y/o crecimiento de vegetación higrohalófila y de algas varias, debido a que la vegetación que se encuentra dentro de la laguna cuando aún contiene cierta lámina de agua, provoca las interferencias propias del agua y por ello es detectada con una menor actividad clorofílica (García Rodríguez & Pérez González, 2004), incluso cuando la laguna está seca y se produce, como es habitual en la laguna de Pedro Muñoz, un crecimiento de la vegetación halófila, el índice de NDVI tiene una respuesta baja en comparación debido a su escaso porte aéreo y cobertura espacial (García Rodríguez & Pérez González, 2010).

La combinación de bandas que crean el color natural, permite detectar el verde en las lagunas que puede ser debido a la presencia de algas verdes o, si el color es más oscuro, a los altos contenidos en materia orgánica del sapropel de las lagunas salinas (García Rodríguez & Pérez González, 2004). Estos colores verdes dentro de la cuenca lagunar son muy bien apreciados en muchas de las imágenes expuestas como es el caso de las imágenes de otoño de 2014 y 1999 (Fig.54) en Pedro Muñoz o las del mismo otoño de 1999 en Manjavacas (Fig.17).

Los canales infrarrojos pueden ayudar en la diferenciación de la vegetación natural y de la eutrofización, apareciendo en tonos azules la vegetación natural, en rosas las algas y en tonos rojizos la vegetación de ribera (García Rodríguez & Pérez González, 2004). Es lo que sucede por ejemplo en la imagen de la laguna de Manjavacas en el invierno de 2018 (Fig.18) en el que se distinguen estos tres elementos gracias al canal 4 del infrarrojo cercano. Esto mismo es más visible durante la primavera en Manjavacas en los años recientes de 2020 y 2022 (Fig.19). También los tonos rosas correspondientes a las algas se pueden ver como abanicos provenientes de la Acequia Madre en imágenes como la del otoño de 2019 o de 1999 (Fig.21). Por lo que ambos análisis visuales resultan un método

idóneo para ver cuándo se ha producido una alta concentración de algas en el interior lagunar.

Se utiliza la banda 4 del infrarrojo por ser la que mejor discrimina la eutrofización (García Rodríguez & Pérez González, 2004) como se puede apreciar en la comparación de los tonos verdes cambiantes de la imagen de la primavera de 2022 (Fig.19) en la combinación de las bandas del espectro visible, con los tonos rosas de misma imagen, pero con la banda 4 del infrarrojo, indicando la presencia de algas. Algo diferente ocurre en la imagen de la primavera en Manjavacas de 1985 (Fig.19) en la que también en la combinación del espectro visible se ven tonos verdes, aunque más oscuros, y en la misma imagen con el infrarrojo se aprecian los tonos rojizos, en este caso los tonos rojos pueden indicar vegetación higrohalófila en vez de algas. El carácter resiliente de la vegetación higrohalófila se puede observar también, en las imágenes de Manjavacas de la primavera de 1995 y de 1996 (Fig.19), como a pesar de la gran sequía del primer año, la vegetación se recuperó rápidamente en años posteriores (García Rodríguez & Pérez González, 2004). Por último, según este mismo estudio de González & Rodríguez, 2004, la época estival es idónea para apreciar los abanicos de contaminantes de los vertidos antrópicos debido al reducido nivel hídrico de las lagunas, pero en las lagunas de estudio estos vertidos en forma de abanicos son apreciables más bien en otoño, concretamente se observan en el otoño de 1999 y 2019 (Fig.21) en forma, aparentemente de vertido de agua eutrofizada por el exceso de nutrientes de la depuradora.

En cuanto al objetivo del estudio del avance y retroceso de la lámina de agua estacionalmente y a lo largo de una serie temporal, se ha determinado en cierta medida que el avance y retroceso de la lámina de agua, especialmente en la laguna de Manjavacas es muy variable a lo largo de los años. Esto puede deberse, por una parte, al aporte de aguas residuales de Mota del Cuervo en el caso de Manjavacas, y en el caso de la laguna de Pedro Muñoz a las aguas residuales del municipio contiguo homónimo. La variabilidad de los aportes de agua a estas lagunas varía dependiendo del año y de la estación en la que se encuentre. El otro factor es la gran estacionalidad y variabilidad climática interanual que sufren la mayor parte de las áreas endorreicas de la cuenca mediterránea ibérica, las cuales tienen una gran dependencia de las precipitaciones (Carrasco, 1988). Esta dependencia se puede observar por las correlaciones que existen entre los datos recogidos en el estudio de Vicente-Serrano et al., 2017 en el que realiza una recopilación desde 1961 de dos índices diferentes para toda España. Uno de los índices, el SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración), el cual mide los datos de precipitación y la demanda de agua por parte de la atmósfera, se puede medir sobre las coordenadas de las lagunas, y los resultados de dicho índice coinciden con las condiciones vistas en la serie temporal en muchas de las ocasiones, al menos en las más anómalas. Se encuentra que el peor año de sequía en relación con este índice es 1995, algo que se puede corroborar en todas las imágenes, seguido a este año de sequía está 2005 con unos índices muy bajos, indicadores de largos periodos sin lluvias y con alta evapotranspiración. También se puede corroborar que la razón por la que el otoño de 2021 (Fig.13) tiene índices de NDVI tan bajos, indicando que la laguna está con agua, fue las lluvias que

indica el alto valor del SPEI en septiembre del mismo año, lo que indica una alta precipitación y una baja demanda de agua por arte de la atmósfera.

La notable reducción de las lluvias durante los meses veraniegos, característica del clima mediterráneo, suele limitar a uno o dos días de precipitaciones, con la consiguiente merma o desecación de los vasos lagunares. Frente a la sequía estival, el resto de meses tienen entre 6 y 9 días de lluvia, siendo enero, marzo, diciembre y noviembre, en orden descendente, cuando más días de lluvia se registran (Pérez González, 1995).

Las imágenes de invierno son muy útiles para cartografiar la extensión de los humedales (García Rodríguez & Pérez González, 2004) como se puede apreciar especialmente en Manjavacas, e incluso parece poder apreciarse la profundidad de estas láminas de agua en base a la intensidad del color, apareciendo en negro las zonas más profundas y pasando por azul a blanco conforme va reduciéndose la profundidad.

En cuanto a los análisis del agua recogidos y analizados, podemos llegar a diversas conclusiones. Si lo comparamos con los análisis de agua realizados con anterioridad (Pérez Ortega, 2011) observamos que para la laguna de Pedro Muñoz (Fig.69) se produce una disminución de nutrientes como los fosfatos en un 30% y en los nitratos pasando de 2 mg/L a 0,352, aunque sí hay un incremento de los nitritos y del amonio, que se establecía en 0 en dicho estudio. Otro cambio es que hay un incremento del pH, pasando de 7,38 a 8,56 pero una reducción de la conductividad eléctrica pasando de 10,22 a 4,04, posiblemente está ligado al mayor aporte de agua a la laguna, reduciendo así la concentración de sales, diluyéndose.

Para la laguna de Manjavacas también hay muchos cambios, los nitratos son más altos que cualquiera de los puntos muestreados, asemejándose más al punto de muestreo de la Acequia Madre (Fig.33), aunque este es el punto donde mayores son los nitritos, los cuales el estudio de Pérez Ortega en 2011 no daba señal alguna. En cuanto al resto de parámetros comparables se puede afirmar que se sufre un ligero aumento del pH y dependiendo del punto de muestreo hay variaciones en la conductividad, siendo más baja que en 2011 para el punto de la Acequia Madre, pero más alta para los otros dos puntos (Fig.35 y 37). La salinidad muestra que se trata de lagunas hiposalinas, en el caso de Manjavacas se aprecia como la salinidad va aumentando junto a la concentración de sales como los cloruros, que pasan de los 56 mg/L a los 500 mg/L, lo que se demuestra el carácter hiposalino de la laguna (Gosálvez et al., 2012).

En el estudio de Gosálvez et al., 2012, los cloruros se encontraban en 234,9 mg/L y si se realiza una media con las tres muestras para Manjavacas saldría una concentración de 248 mg/L, por lo que no hay mucha variación. En el caso de la conductividad, la media de este estudio da como resultado 10,61 mS/cm, que es casi el doble que los 5,74 mS/cm del estudio de Gósalvez et al., 2012, lo que indica un aumento de la concentración de sales disueltas. Por último, la concentración de sulfatos resulta mucho mayor a la hallada en dicho estudio, que era de 71,6 mg/L, y en el presente estudio, la media es de 588,27 mg/L.

Si comparamos este mismo estudio para Pedro Muñoz hallamos un descenso de la conductividad, de 6,857 mS/cm a 4,04 mS/cm, un ligero aumento en 10 mg/L de los cloruros y un gran aumento de los sulfatos pasando de los 55,2 mg/L del estudio de Gósalvez et al., 2012, a 691 mg/L del presente estudio. Por lo que tanto para Manjavacas como para Pedro Muñoz el incremento de los sulfatos es muy reseñable en comparación con el estudio de Gósalvez et al., 2012.

Existe otro estudio (Gómez, 2014) en el que se realiza un análisis químico de ambas lagunas, en este estudio en cuanto a los parámetros fisicoquímicos no existen muchas diferencias pero los nutrientes salen muy dispares, tanto con este estudio como con los otros comparados, existiendo diferencias como la encontrada con los nitratos en Manjavacas, los cuales alcanzan los 482,4 mg/L lo que difieren mucho de las concentraciones halladas en el presente estudio, que solo llegan hasta los 3,08 mg/L en el punto con mayor valor; o los cloruros que aumentan en el estudio de Gómez hasta los 32.544 mg/L, muy distante también del máximo de 500 mg/L del presente estudio. La explicación a este proceso puede darse por un vertido muy contaminante ocurrido en ese año que dejó valores de cloruros como si se tratara de salmuera y de nutrientes como los nitratos como si fuera una balsa de purines.

Por último, al comparar los resultados con los publicados por la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG) en los años 2019-2021 para ambas lagunas se puede observar que en cuanto a los nutrientes, los nitratos encontrados por la CHG son más altos para la laguna de Manjavacas en todos sus puntos para mayo de 2021, encontrándose en 6,1 mg/L; en cambio para el caso de los nitritos en abril de 2020, se encuentran en 0,04 mg/L, siendo un valor menor que en cualquiera de los puntos muestreados en Manjavacas; en el caso de la laguna de Pedro Muñoz los valores son similares, tanto nutrientes como parámetros fisicoquímicos.

La salinidad de la laguna de Pedro Muñoz es bastante baja en comparación con otras lagunas endorreicas de La Mancha, esta salinidad ha ido disminuyendo junto a su carácter estacional desde 1973 a partir del comienzo del aporte de aguas residuales (Peinado, 1994), seguramente conforme se incrementa la lámina de agua con los aportes antrópicos. Este proceso se puede estar incrementando en ambas lagunas, de ahí la reducción drástica en la concentración de algunas de las sales analizadas.

En cuanto al efecto sobre la temperatura que ejercen las lagunas, como sería el caso del efecto “isla de frío o de frescor”, en el cual los alrededores de las lagunas presentan unas temperaturas más bajas que su entorno, en parte por la vegetación y en parte por la temperatura específica del agua. Este efecto se demuestra en mayor o menor medida dependiendo del año, pero especialmente dependiendo de la estación en la que se encuentre. Los humedales presentan las temperaturas más bajas de su entorno inmediato, variando debido a la gran influencia del sustrato debido a la reflectancia y emisividad (Pérez González & García Rodríguez, 1999).

En otoño se demuestra que las temperaturas mínimas cambian bruscamente en los bordes de las lagunas más estacionales (Pérez González, 1995), esto se puede apreciar en las lagunas de estudio, en la laguna de Manjavacas en 2019 y especialmente en 2021 (Fig.42) se crea una diferencia térmica de entre 2°C y 4,5°C para 2019 y entre 4°C y 8°C para 2021 en relación con la lámina de agua y sus orillas aledañas, en cambio, este proceso disminuye su eficacia en la laguna de Pedro Muñoz (Fig.74), excepto para el año 2014, debido, principalmente a que la laguna suele encontrarse prácticamente sin agua para esta época.

En Pedro Muñoz, la laguna solía encontrarse seca, desde principios o mediados de abril comenzaba un incremento de la evapotranspiración y un descenso de las precipitaciones agotando así los recursos hídricos, acabando dicha laguna seca entre dos y cinco meses al año (Pérez González, 1995), pero debido a los aportes hídricos procedentes de la depuradora del municipio de Pedro Muñoz, se conserva cierta lámina de agua, más o menos visible según el año y que crea ese efecto de frío, apoyado especialmente por la vegetación, predominantemente de tarayales, llegando a diferencias muy notables entre el contorno de la laguna y las zonas aledañas (Fig.72). También, especialmente en verano, se hace reseñable, la diferencia térmica, en este caso de isla de calor, de las otras lagunas del municipio, las cuales no tienen un aporte de agua, ni por tanto, una vegetación densa más o menos permanente que amortigüen las temperaturas, estas lagunas salinas presentan temperaturas muy elevadas en relación a su entorno y especialmente en relación a la laguna de Pedro Muñoz (Fig.73), existiendo variaciones de hasta 17°C entre ambas.

Al darse la mayor parte de las precipitaciones en primavera, el invierno tiene escasas precipitaciones (Asencio & Martin, 1988), esto puede contribuir a que las diferencias térmicas que se encuentran en la laguna de Pedro Muñoz (Fig.71), especialmente, sean muy pequeñas, de entre 1°C y 3°C entre el contorno lagunar y las zonas ligadas a este. En el caso de la laguna de Manjavacas (Fig.39), durante el invierno estas diferencias son mayores en algunos de los años estudiados, posiblemente por la mayor cantidad de agua, ya que las temperaturas mínimas aumentan con la profundidad (Pérez González, 1995).

Las lagunas de corta estacionalidad, sin vegetación densa como la laguna de Manjavacas, presentan lo que se podría denominar como “microclima higronómico”, teniendo temperaturas más suaves que su entorno, reduciendo las temperaturas máximas y la amplitud térmica diurna, reduciendo los fenómenos de heladas y nieblas de irradiación, debido en gran parte al efecto moderador que ejerce el agua sobre la temperatura (Pérez González, 1995). Estos fenómenos se aprecian en todas las estaciones del año en dicha laguna existiendo una reducción significativa de las temperaturas máximas, especialmente en primavera y en verano.

Además de la influencia del agua en la reducción de la temperatura se encuentra el efecto reductor de la vegetación, que ejerce gran influencia, especialmente en la Acequia Madre en el caso de la laguna de Manjavacas, y en la zona sur de la laguna de Pedro Muñoz. Otra razón por las que existen fluctuaciones o anomalías fuera del entorno estrictamente lagunar son los usos de suelo, la presencia de regadíos, o el tipo de cultivos empleados,

pudiendo ser leñosos como las vides, o cultivos herbáceos como alguna especie de cereal, en ambos, influye también la época de las imágenes por el momento de siega o de crecimiento de la vegetación. Quedándose el suelo desnudo en el verano para los terrenos cerealistas, pero no para las viñas, las cuales entre agosto y septiembre tienen su época de cosecha. La influencia de los regadíos disminuye significativamente la temperatura de estos suelos ya sea por la mayor vigorosidad de los cultivos que crecen, como efecto reductor de la vegetación, o por el encharcamiento del suelo, como efecto reductor del agua. Por lo que se concluye que las temperaturas mínimas se dan en las láminas de agua y en los regadíos (Pérez González & García Rodríguez, 1999).

El estudio de la temperatura superficial de las masas de agua resulta ser muy importante para el estudio de los brotes de botulismo aviar, ya que entre muchos factores, el más importante es que la temperatura se encuentre por encima de los 20°C en el verano y también en el otoño, y que además el pH esté entre 7,5 y 9, siendo estos los factores más acuciantes para su aparición junto al crecimiento de la concentración de materia orgánica (Rocke et al., 1999). En la Mancha Húmeda el uso de aguas residuales para evitar la desecación de humedales ha frecuentado los casos de botulismo, a partir del aumento de la eutrofización de las aguas por el exceso de nutrientes. El sobrecrecimiento y posterior muerte del fitoplacton unido a las altas temperaturas acaba provocando condiciones anaerobias en los sedimentos, lo que permite la proliferación de la bacteria del botulismo (Gómez, 2014). Por lo que los análisis de este estudio con un mayor enfoque a la búsqueda de estas premisas pueden ser muy útil en la anticipación y remedio de estos brotes que provocan una gran cantidad de muertes durante el verano-otoño. En las lagunas de estudio, aunque no se han obtenido las imágenes, se produjeron brotes de botulismo, en 1988 para ambas lagunas y 2006 para la laguna de Pedro Muñoz (Gómez, 2014), aun así, sí se puede ver cómo en el caso de la laguna de Pedro Muñoz, en 2016 (Fig.74), las temperaturas superficiales de la laguna para el otoño se elevan entre 22°C y 27°C, frente al resto de años en los que se mantienen entre 17°C y 20°C, al comparar esta imagen con la expuesta en el análisis visual en el espectro visible, se observa una gran concentración de algas, mediante un color verde intenso en el interior de la lámina de agua, pero no se han encontrado estudios posteriores al de Gómez de 2014 que corroboren si se produjo un brote en dicho año. Existen otros años en la laguna de Manjavacas dónde las temperaturas de la cuenca lagunar se elevan mucho, pero estos años es debido a que se encuentra completamente seca.

Con todo lo expuesto se puede constatar la gran importancia de las imágenes por satélite en el estudio de lagunas en Castilla-La-Mancha y en otras partes del mundo, teniendo una amplia gama de ramas de estudio dependiendo de los objetivos y pudiendo complementarse con análisis de agua, muestras de suelo o cualquier otra técnica adicional que se crea necesaria. El análisis químico ha resultado ser muy interesante por las grandes diferencias que existían en ocasiones al compararse con otros estudios, si se hubiera podido obtener análisis del agua durante otras estaciones del año o incluso a lo largo de los años, hubiera podido ser muy interesante su estudio y ver la correlación con los

análisis visuales y analíticos, pudiendo contrastar así varias hipótesis sobre la contaminación de las lagunas o el cambio de su química. El conocimiento de las actuaciones de las depuradoras responsables del cambio del ciclo en ambas lagunas sería muy conveniente para poder constatar el origen certero tanto del aporte de agua como del exceso de nutrientes, mediante el aporte de información sobre los efluentes y sobre la calidad de estos. También podría haber ofrecido más información relevante al estudio el análisis de otros índices, no solo de vegetación, sino de otro tipo, como el hidrotermal; el análisis de los componentes principales; el estudio de otro tipo de perfiles; los filtros y ajustes radiométricos; y demás técnicas ofrecidas por la teledetección.

La mejora de los sensores que poseen los satélites y la cada vez mayor biblioteca de imágenes del terreno hacen posibles estudios cada vez más exhaustivos y reveladores sobre las dinámicas naturales y antrópicas del terreno, previendo una gran importancia a esta ciencia y un gran avance gracias también a las nuevas tecnologías de información geográfica para los años venideros.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Amado Pool, N. (2010). Ficha informativa de los humedales de Ramsar (FIR)-Versión 2006-2008. Ramsar.

Anza Gómez, I. (2014). Epidemiología del botulismo aviar en las Tablas de Daimiel y otros humedales de Castilla-La Mancha.

Asencio Castillejo, C. G. & Martín Herrero, J. 1988. Estudio de la ornitocenosis de la laguna de Manjavacas (Cuenca). En Ponencias de las II Jornadas Ibéricas del Estudio y Protección de Zonas Húmedas, pp: 269-278. FAT. Valencia.

Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), 15-27.

Carrasco, M. 1988. La zona húmeda manchega como área de internada de acuáticas. En: Ponencias de las II Jornadas Ibéricas del Estudio y Protección de Zonas Húmedas, pp: 231-235. FAT. Valencia.

Chuquimez Tafur, R. A., & Sifuentes Méndez, R. J. (2021). Remoción de amoniaco en 20 lt de agua del río Santa con 5 gr de Lenteja de agua (*Lemna minor*), Chimbote-Ancash-2021.

Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de teledetección*, 10 (1-9).

Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG) (2022). Datos analíticos por punto de control. Nombre del sitio web: <https://www.chguadiana.es/cuenca-hidrografica/calidad-y-estado-de-las-masas-de-agua/aguas-superficiales/datos-analiticos-por-punto-de-control>.

Decreto 185/2001, de 2 de octubre de 2001 por el que se aprueba el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales del Complejo Lagunar de Manjavacas, Sánchez Gómez y la Dehesilla en Mota del Cuervo (Cuenca) y Laguna de Alcahozo en Pedro Muñoz (Ciudad Real), y se declara la Reserva Natural del Complejo Lagunar de Manjavacas. Boletín Oficial de Castilla-La-Mancha. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente. Consejo de Gobierno. Publicado el 26 del 10 de 2001. <https://docm.jccm.es/docm/detalleDocumento.do?idDisposicion=123062606103230647>

Donaire Jiménez, C. “La diversidad de humedales de la provincia de Ciudad Real”. Ecosistemas. Vol. 14, n. 3 (sept.-dic. 2005). ISSN 1697-2473, pp. 100-106

Durán, J.J., García de Domingo, A. y López Geta, J.A. 2003. Hydrogeological Characterization of the Spanish Wetlands Included in Ramsar Convention. Instituto Geológico y Minero de España. 1 mapa. ISBN: 84-7840-490-2.

Fortuna, M. A. (2003). Dependencia hídrica de la comunidad ornítica acuática de la laguna de Manjavacas: la importancia de la desecación estival.

García Jerez, Ó. (2014). La reserva de la biosfera: la Mancha húmeda. Las áreas protegidas de Castilla-La Mancha: TIC y bilingüismo como recursos didácticos para la formación profesional (pp. 136-158).

García Jerez, Ó., & de la Cruz, M. A. S. (2016). El interés didáctico de los paisajes alterados: la Reserva de la Biosfera de La Mancha húmeda (España) como ejemplo de estudio. *Revista Contexto & Educação*, 31(99), 52-80.

García Rodríguez, M. P., & Pérez González, M. E. (2010). Aplicaciones de la teledetección en Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid.

García Vargas, A., Reyes Navarrete, M. G., Alvarado De La Peña, A. I., González Valdez, L. S., Antuna, D. M., Vázquez Alarcón, E. D. C., ... & Herrera Benavides, A. (2012). Cloruros totales en el agua de abastecimiento.

González, E. P., & Rodríguez, P. G. (2000). Estudio de las bandas térmicas del sensor AVHRR del satélite NOAA-14 en masas de agua continentales. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* (Vol. 2000, No. 20, pp. 163-176).

- González, M. P., & Rodríguez, M. G. (2004). Análisis de la contaminación hídrica en humedales de ambiente semiárido aplicando teledetección (La Mancha, 1992-2001). *Estudios Geográficos*, 65(254), 101-119.
- Gosálvez, R. U., Gil Delgado, J. A., Vives-Ferrándiz, C., Sánchez Emeterio, G., & Florin Beltran, M. (2012). Seguimiento de aves acuáticas amenazadas en lagunas de la Reserva de la Biosfera de La Mancha Húmeda (España Central).
- Hera Portillo, Á. D. L., Fornés Azcoiti, J. M., & Llamas Madurga, M. R. (2011). Servicios de los ecosistemas de humedales de la Reserva de la Biosfera de La Mancha Húmeda.
- Jiménez, J.; del Moral, A.; Morillo, C.; Sánchez, M. J. (1992). Las aves del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y otros humedales manchegos. Barcelona, Lynx Edicions.
- Rocke, T. E., & Samuel, M. D. (1999). Water and sediment characteristics associated with avian botulism outbreaks in wetlands. *The Journal of Wildlife Management*, 1249-1260.
- Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., & Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation* (No. E75-10354).
- Peinado Martín-Montalvo, Marta (1994). Funcionamiento y variabilidad de los geosistemas de los humedales manchegos. Tesis doctoral, Departamento de Análisis Geografía Regional y Geografía Física, Universidad Complutense de Madrid.
- Pérez González, María Eugenia (1995). Humedales de la confluencia de los ríos Riansares y Cigüela: estudio de ciertas funciones relevantes en Geografía Física. Tesis doctoral, Departamento de Análisis Geografía Regional y Geografía Física, Universidad Complutense de Madrid.
- Pérez González, M., & García Rodríguez, M. (1999). Análisis de la banda térmica del sensor TM del Landsat-5 de La Mancha (provincias de Toledo, Ciudad Real y Cuenca).
- Pérez Ortega, M. (2011). Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de la mancha húmeda.
- Rodier, J. (1981). Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar, química, fisicoquímica, bacteriología, biología (No. 543.3 R6Y).
- Vicente-Serrano, S. M., Tomas-Burguera, M., Beguería, S., Reig, F., Latorre, B., Peña-Gallardo, M. & González-Hidalgo, J. C. (2017). *A high resolution dataset of drought indices for Spain. Data*, 2(3), 22.

## ANEXO I:

| SATÉLITE  | SENSOR | FECHA      | ESCENA                |
|-----------|--------|------------|-----------------------|
| Landsat 1 | MSS    | 08-08-1972 | LM12150331972233AAA05 |
| Landsat 1 | MSS    | 25-05-1975 | LM12150331975145FUI01 |
| Landsat 1 | MSS    | 17-10-1975 | LM12160321975290FUI00 |
| Landsat 2 | MSS    | 01-09-1975 | LM22150331975244FUI00 |
| Landsat 1 | MSS    | 14-01-1976 | LM12150331976014FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 30-10-1984 | LT52000331984304XXX02 |
| Landsat 5 | TM     | 27-06-1985 | LT52000331985178FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 14-08-1985 | LT52000331985226FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 30-08-1985 | LT52000331985242FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 17-10-1985 | LT52000331985290FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 06-02-1986 | LT52000331986037FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 17-08-1986 | LT52000331986229FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 02-09-1986 | LT52000331986245FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 30-04-1987 | LT52000331987120XXX02 |
| Landsat 5 | TM     | 22-08-1988 | LT52000331988235FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 19-04-1989 | LT52000331989109FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 08-05-1990 | LT52000331990128FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 27-05-1991 | LT52000331991147FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 31-08-1991 | LT52000331991243FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 27-04-1992 | LT52000331992118FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 02-09-1992 | LT52000331992246FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 16-05-1993 | LT52000331993136FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 04-08-1993 | LT52000331993216FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 20-08-1993 | LT52000331993232FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 23-10-1993 | LT52000331993296FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 29-10-1995 | LT52000331995302FUI01 |
| Landsat 5 | TM     | 14-01-1995 | LT52000331995014FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 07-06-1995 | LT52000331995158FUI02 |
| Landsat 5 | TM     | 26-08-1995 | LT52000331995238FUI01 |
| Landsat 5 | TM     | 18-02-1996 | LT52000331996049FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 24-05-1996 | LT52000331996145FUI01 |
| Landsat 5 | TM     | 12-08-1996 | LT52000331996225FUI00 |
| Landsat 5 | TM     | 15-10-1996 | LT52000331996289FUI00 |
| Landsat 7 | ETM    | 13-08-1999 | LE72000331999225FUI00 |
| Landsat 7 | ETM    | 01-11-1999 | LE72000331999305FUI02 |
| Landsat 7 | ETM    | 28-04-2001 | LE72000332001118FUI03 |
| Landsat 7 | ETM    | 17-07-2001 | LE72000332001198NSG01 |
| Landsat 7 | ETM    | 03-09-2001 | LE72000332001246EDC01 |
| Landsat 7 | ETM    | 25-09-2003 | LE72000332003268ASN01 |

|            |          |            |  |
|------------|----------|------------|--|
| Landsat 7  | ETM      | 01-01-2005 | LE72000332005001ASN00  |
| Landsat 7  | ETM      | 25-05-2005 | LE72000332005145ASN00  |
| Landsat 7  | ETM      | 14-09-2005 | LE72000332005257EDC00  |
| Landsat 5  | TM       | 01-05-2005 | LT52000332005121MTI00  |
| Landsat 5  | TM       | 21-08-2005 | LT52000332005233MTI00  |
| Landsat 5  | TM       | 16-02-2007 | LT52000332007047MPS00  |
| Landsat 5  | TM       | 09-03-2009 | LT52000332009068MTI00  |
| Landsat 5  | TM       | 28-05-2009 | LT52000332009148MTI00  |
| Landsat 5  | TM       | 16-08-2009 | LT52000332009228MTI00  |
| Landsat 5  | TM       | 19-10-2009 | LT52000332009292MPS00  |
| Landsat 7  | ETM      | 12-01-2009 | LE72000332009012ASN00  |
| Landsat 7  | ETM      | 21-06-2009 | LE72000332009172ASN00  |
| Landsat 7  | ETM      | 11-10-2009 | LE72000332009284ASN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 23-05-2013 | LC82000332013143LGN02  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 11-08-2013 | LC82000332013223LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 30-10-2013 | LC82000332013303LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 19-02-2014 | LC82000332014050LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 26-05-2014 | LC82000332014146LGN02  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 13-07-2014 | LC82000332014194LGN02  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 05-01-2015 | LC82000332015005LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 16-07-2015 | LC82000332015197LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 24-01-2016 | LC82000332016024LGN02  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 15-05-2016 | LC82000332016136LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 19-08-2016 | LC82000332016232LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 06-10-2016 | LC82000332016280LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 25-12-2016 | LC82000332016360LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 02-05-2017 | LC82000332017122LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 22-08-2017 | LC82000332017234LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 25-10-2017 | LC82000332017298LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 29-01-2018 | LC82000332018029LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 09-08-2018 | LC82000332018221LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 16-01-2019 | LC82000332019016LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 28-08-2019 | LC82000332019240LGN01  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 15-10-2019 | LC82000332019288LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 19-01-2020 | LC82000332020019LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 26-05-2020 | LC82000332020147LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 30-08-2020 | LC82000332020243LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 17-10-2020 | LC82000332020291LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 29-05-2021 | LC82000332021149LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 17-08-2021 | LC82000332021229LGN00  |
| Landsat 8  | OLI-TIRS | 20-10-2021 | LC82000332021293LGN00  |
| Sentinel 2 | MSI      | 10-11-2016 | S2A_MSIL1C_20161110T110302_<br>N0204_R094_T30SWJ_20161110T110832 |
| Sentinel 2 | MSI      | 08-02-2017 | S2A_MSIL1C_20170208T110211_<br>N0204_R094_T30SWJ_20170208T110245 |
| Sentinel 2 | MSI      | 19-05-2017 | S2A_MSIL2A_20170519T105651_                                      |

|            |     |            |  |
|------------|-----|------------|--|
|            |     |            | N0205_R094_T30SWJ_20170519T110530                                |
| Sentinel 2 | MSI | 22-08-2017 | S2B_MSIL1C_20170822T105649_<br>N0205_R094_T30SWJ_20170822T110527 |
| Sentinel 2 | MSI | 16-10-2017 | S2A_MSIL2A_20171016T110031_<br>N0205_R094_T30SWJ_20171016T110313 |
| Sentinel 2 | MSI | 19-01-2018 | S2B_MSIL2A_20180119T110349_<br>N0206_R094_T30SWJ_20180119T131401 |
| Sentinel 2 | MSI | 04-05-2018 | S2A_MSIL2A_20180504T105621_<br>N0207_R094_T30SWJ_20180504T131626 |
| Sentinel 2 | MSI | 22-08-2018 | S2A_MSIL2A_20180822T105621_<br>N0208_R094_T30SWJ_20180822T144940 |
| Sentinel 2 | MSI | 16-10-2018 | S2B_MSIL2A_20181016T110029_<br>N0209_R094_T30SWJ_20181016T155756 |
| Sentinel 2 | MSI | 14-01-2019 | S2B_MSIL2A_20190114T110419_<br>N0211_R094_T30SWJ_20190114T134123 |
| Sentinel 2 | MSI | 14-05-2019 | S2B_MSIL2A_20190514T105629_<br>N0212_R094_T30SWJ_20190514T134607 |
| Sentinel 2 | MSI | 22-08-2019 | S2B_MSIL2A_20190822T105629_<br>N0213_R094_T30SWJ_20190822T141802 |
| Sentinel 2 | MSI | 16-10-2019 | S2A_MSIL2A_20191016T110041_<br>N0213_R094_T30SWJ_20191016T133547 |
| Sentinel 2 | MSI | 14-01-2020 | S2A_MSIL2A_20200114T110411_<br>N0213_R094_T30SWJ_20200114T122318 |
| Sentinel 2 | MSI | 18-05-2020 | 2B_MSIL2A_20200518T105619_<br>N0214_R094_T30SWJ_20200518T135500  |
| Sentinel 2 | MSI | 16-08-2020 | S2B_MSIL2A_20200816T105629_<br>N0214_R094_T30SWJ_20200816T135328 |
| Sentinel 2 | MSI | 15-10-2020 | S2B_MSIL2A_20201015T105939_<br>N0214_R094_T30SWJ_20201015T125649 |
| Sentinel 2 | MSI | 18-01-2021 | S2A_MSIL2A_20210118T110401_<br>N0214_R094_T30SWJ_20210118T134913 |
| Sentinel 2 | MSI | 13-05-2021 | S2B_MSIL2A_20210513T105619_<br>N0300_R094_T30SWJ_20210513T125254 |
| Sentinel 2 | MSI | 16-08-2021 | S2A_MSIL2A_20210816T105621_<br>N0301_R094_T30SWJ_20210816T140531 |
| Sentinel 2 | MSI | 20-10-2021 | S2B_MSIL2A_20211020T110009_<br>N0301_R094_T30SWJ_20211020T125659 |
| Sentinel 2 | MSI | 23-01-2022 | S2A_MSIL2A_20220123T110341_<br>N0301_R094_T30SWJ_20220123T153512 |
| Sentinel 2 | MSI | 08-05-2022 | S2B_MSIL2A_20220508T105619_<br>N0400_R094_T30SWJ_20220508T125857 |