

CASO PRÁCTICO

Seguimiento del fenómeno blanco de la laguna de la Cruz (Cuenca, España)

Ruiz M., Morales S., Soria J.M. *

Departamento de Microbiología y Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad de Valencia. 46100 – Burjassot, España.

Resumen: En el presente estudio se realizó un seguimiento de cinco años por teledetección del fenómeno de la precipitación de carbonato cálcico en la laguna kárstica de la Gitana o de la Cruz (situada en la provincia de Cuenca, España). Se conoce el importante papel que desempeña la precipitación del carbonato cálcico en la ecología del lago ya que influye en las migraciones verticales del fitoplancton, en la concentración de fósforo biodisponible y por ende, en la eutrofización y calidad de las aguas. El blanqueamiento sucede entre los meses de julio y agosto, pudiendo estudiarse en estas fechas a través de sus propiedades ópticas, con el objetivo principal de ofrecer datos actualizados de un fenómeno tradicionalmente estudiado y establecer posibles relaciones entre factores abióticos como la temperatura y/o precipitaciones. Los datos de temperatura del aire, recogidos por la estación meteorológica de Cuenca, sugieren una posible relación entre la aparición del fenómeno blanco y un pulso de temperaturas máximas previas. Por otra parte, no se encontró relación aparente entre las precipitaciones y el blanqueamiento del agua.

Palabras clave: carbonato cálcico, fenómeno blanco, karst, precipitación, teledetección.

Monitoring the whiting phenomenon in Lake La Cruz (Cuenca, Spain)

Abstract: In the present study, a five-year follow-up was performed by remote sensing of the calcium carbonate precipitation in La Gitana karstic lake also known as La Cruz (located on the province of Cuenca, Spain). The important role that calcium carbonate precipitation plays in the ecology of the lake is well known for its influence on the vertical migrations of phytoplankton, the concentration of bioavailable phosphorus and, therefore, the eutrophication and quality of the waters. Whiting take place between the months of July and August, and it can be studied at this time through its optical properties, with the main objective of offering updated data on a phenomenon traditionally studied and establishing possible relationships between abiotic factors such as temperature and/or rainfall. The atmospheric temperature data collected by the meteorological station suggest a possible relationship between the appearance of the white phenomenon and a pulse of previous maximum temperatures. On the other hand, no apparent relationship was found between rainfall and water whiting.

Key words: calcium carbonate, karst, precipitation, remote sensing, whiting.

1. Introducción

Las aguas superficiales continentales, forman valiosos ecosistemas (Buchanan y Stubblebine, 1962) de gran importancia para la biodiversidad global (Wunder, 2015). A nivel global, existen más de 100 millones de lagos (Verpoorter et al., 2014) que sustentan hasta un 87% del agua dulce sobre la superficie terrestre (Gleick, 1993). Estos recursos naturales son especialmente sensibles al cambio climático, por lo que, variables como la temperatura en la superficie del lago, nivel de agua y color del lago se caracterizan como Variables Climáticas Esenciales (ECVs) reconocidas así por el Sistema Mundial de Observación del Clima (GCOS) ya que contribuye de manera crítica a la caracterización del cambio climático (Woolway et al., 2020).

Los lagos kársticos son ecosistemas leníticos, con aguas más o menos ricas en bicarbonatos (Camacho et al., 2009), que se desarrollan sobre rocas sedimentarias, principalmente de calcio (calizas), magnesio (dolomitas), carbonatos, pero también minerales de sulfato de calcio (yeso) (Casamayor et al., 2012). Debido a que se encuentran asociados a zonas en las que los fenómenos de karstificación son muy activos (Camacho et al., 2009), este tipo de lagunas presentan frecuentemente formas redondeadas, lados empinados, sin entradas o salidas de superficie y una profundidad relativamente alta. Por lo tanto, es frecuente que las aguas se encuentren térmicamente estratificadas, dando lugar a compartimentos de agua con diferentes condiciones fisicoquímicas y biológicas (Casamayor et al., 2012).

Por las características oligotróficas de las aguas, permiten el desarrollo de comunidades dominadas por carófitos. Este tipo de ecosistemas son catalogados y nombrados como: “3140 Aguas oligomesotróficas calcáreas con vegetación béntica de *Chara* spp.” por la Directiva Hábitats 92/43CEE del Anexo 1 (Camacho et al., 2009). Las praderas subacuáticas de *Chara* spp. son un buen bioindicador de calidad de las aguas ya que sus poblaciones merman cuando la eutrofia del agua aumenta (Cirujano et al., 2007).

La laguna de la Cruz o laguna de la Gitana, es la laguna sobre la que se basa el presente estudio. Tiene una superficie aproximada de 1,4 ha, un diámetro medio de 132 metros y una profundidad máxima

de 25 metros (CMADR, 2007). Considerando toda el área kárstica en las montañas de Cuenca, solo dos sistemas leníticos (Laguna de la Cruz y el lago El Tobar) de 35 poseen características meromícticas (Miracle et al., 1992). La Laguna de la Cruz presenta una meromixis biogénica, debido al enriquecimiento del agua del monimolimnion (la capa profunda no mezclada sin ningún intercambio con las aguas superiores, excepto por procesos de difusión lenta (Izhitskiy et al., 2016) en bicarbonatos de calcio, magnesio y hierro (Miracle et al., 1992). Estos cambios fisicoquímicos se ponen de manifiesto todos los veranos, a finales de julio, cuando las aguas verde-azuladas del lago adquieren un aspecto lechoso debido a la precipitación de carbonato cálcico (CMADR, 2007) favorecida por las altas temperaturas, un pH elevado y/o un aumento en la producción primaria. (Vanderploeg et al., 1987; Homa y Chapra, 2011).

El objetivo del trabajo es realizar un seguimiento durante los últimos cinco años del fenómeno blanco de la laguna kárstica de Cañada del Hoyo a través de un análisis temático de las propiedades ópticas de la laguna mediante imágenes de satélite Sentinel-2. De este modo se puede hacer una recopilación de datos actualizados sobre el fenómeno blanco de la laguna de la Cruz, fechas en que se inicia y comprobar su duración en el tiempo.

2. Materiales y métodos

2.1. Contexto, Las Lagunas de Cañada del Hoyo

El presente estudio se desarrolla sobre el paraje conocido como Las Lagunas de Cañada del Hoyo (véase Figura 1), catalogado como monumento natural el año 2007. Se localizan al sureste de Los Palancares, en el paraje kárstico denominado Los Oteros, en la zona centro-oriental de la provincia de Cuenca (España), (véase Figura 1). Consiste en una agrupación de torcas, siete de las cuales mantienen agua de forma permanente y son conocidas como: laguna de la Cruz o laguna de la Gitana, laguna del Tejo, lagunillo del Tejo, laguna de la Parra, laguna Llana, lagunillo de las Tortugas y laguna de la Cardenilla (CMADR, 2007).

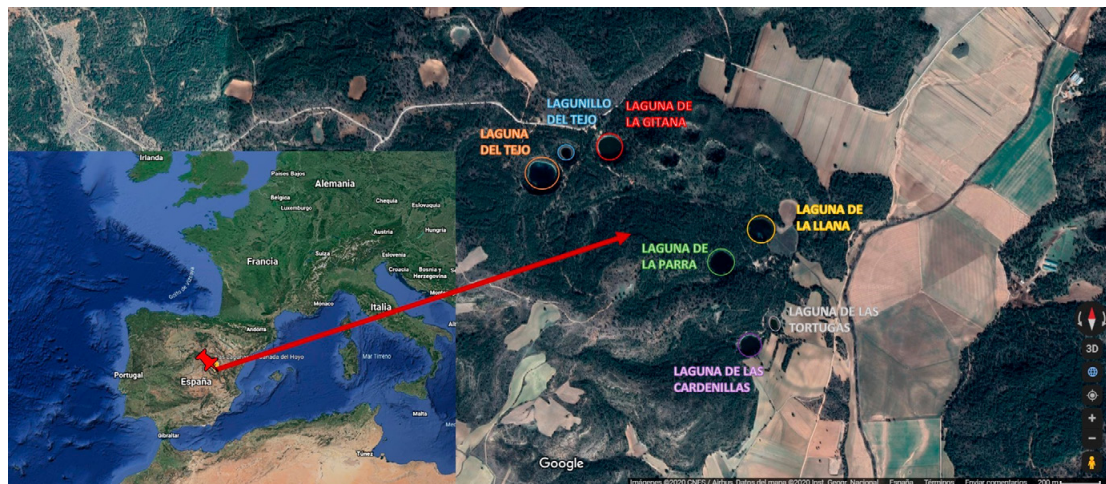


Figura 1. Situación del complejo cárstico de Cañada del Hoyo en la Península Ibérica. Las siete lagunas aparecen resaltadas en un círculo con sus respectivos nombres al lado. Junto a ellas hay otras torcas sin agua en el fondo (Fuente: modificado de Google Earth).

2.2. Seguimiento del fenómeno

El seguimiento del “fenómeno blanco”, como propiedad óptica exclusiva de la laguna de la Cruz, se realizó a través del uso de imágenes satelitales de la plataforma Sentinel 2 de la Agencia Espacial Europea, obtenidas del repositorio Copernicus Open Access Hub y posteriormente procesadas con el software gratuito de procesamiento de imágenes satelitales SNAP que, con una interfaz bastante intuitiva cuenta con múltiples aplicaciones y herramientas que facilitan enormemente el trabajo de gabinete.

La plataforma de descarga Copernicus conserva imágenes desde el inicio del funcionamiento de Sentinel-2 el año 2015 hasta la actualidad. Por ello, el seguimiento del fenómeno blanco abarca desde el verano de 2015 hasta el verano de 2019, acotando entre inicio del mes de julio y a finales del mes de agosto por ser las fechas cuando se produce el fenómeno blanco.

Las imágenes se descargaron con procesamiento de nivel 1 (L1C). Se remuestrearon y recortaron las imágenes (resolución de píxel de 10 m) usando las coordenadas geográficas 40,00 N; -1,90 W; 39,97 S; -1,85 E como delimitación de la zona. Las bandas 2, 3 y 4 se seleccionaron para visualizar en falso color (RGB) el fenómeno blanco.

Paralelamente, se recogieron datos de temperatura del aire y precipitaciones en la estación meteorológica de Cuenca durante las fechas que comprende el periodo de estudio.

3. Resultados

Se han descargado un total de 59 imágenes de Sentinel-2 a través del portal Copernicus Open Access Hub, (Tabla 1) en las cuales resultaba visible el estado de la laguna de la Cruz; algunas de ellas presentaban nubes tenues que permitían la visión pero no son útiles para un estudio radiométrico, sólo visual.

Se ha realizado una primera observación visual (Figura 2), ya que los cambios dentro del espectro visible indican claramente la ausencia o presencia del fenómeno blanco en la laguna de la Cruz (Figura 3). Se observa como el aumento de reflectividad en las bandas azules y verde es notable con respecto a la imagen normal.

Para cada año se ha realizado la observación con la imagen en falso color de la laguna en estado normal y con el blanqueamiento (Figura 2) desde la primera observación hasta su desaparición (Anexo 1). En los cinco años que se ha estudiado, el año 2015, solo se pudo observar en una imagen el fenómeno blanco en las imágenes Sentinel-2, el 16 de julio; además ha sido la fecha más temprana del año en

Tabla 1. Listado de las imágenes descargadas. En la columna de observaciones (Obs.) queda descrito para cada fecha si la laguna estaba cubierta o no por nubes (Desp./ Nubes) y “f.b.” para indicar que en esa fecha se detectó la presencia del fenómeno blanco.

Fecha	Nombre	Obs.	Fecha	Nombre	Obs.	Fecha	Nombre	Obs.
06/07/2015	S2A	Desp.	03/07/2018	S2A	Desp.	05/07/2019	S2A	Desp.
16/07/2015	S2A	Desp., f.b.	08/07/2018	S2B	Desp.	08/07/2019	S2A	Nubes
26/07/2015	S2A	Desp.	10/07/2018	S2A	Nubes	10/07/2019	S2B	Desp.
29/07/2015	S2A	Desp.	13/07/2018	S2A	Desp.	13/07/2019	S2B	Desp.
05/08/2015	S2A	Desp.	15/07/2018	S2B	Desp.	15/07/2019	S2A	Desp.
23/07/2016	S2A	Nubes	18/07/2018	S2B	Desp.	18/07/2019	S2A	Desp.
30/07/2016	S2A	Desp.	20/07/2018	S2A	Desp.	20/07/2019	S2B	Nubes
02/08/2016	S2A	Desp.	23/07/2018	S2A	Desp.	23/07/2019	S2B	Desp.
09/08/2016	S2A	Desp., f.b.	25/07/2018	S2B	Desp.	25/07/2019	S2A	Desp.
12/08/2016	S2A	Desp., f.b.	28/07/2018	S2B	Desp.	28/07/2019	S2A	Desp.
19/08/2016	S2A	Desp., f.b.	30/07/2018	S2A	Desp.	30/07/2019	S2B	Desp.
29/08/2016	S2A	Desp.	04/08/2018	S2B	Desp.	02/08/2019	S2B	Desp.
05/07/2017	S2A	Desp.	12/08/2018	S2A	Desp.	04/08/2019	S2A	Nubes
15/07/2017	S2A	Desp.	14/08/2018	S2B	Desp.	07/08/2019	S2A	Nubes
18/07/2017	S2A	Desp.	19/08/2018	S2A	Desp.	09/08/2019	S2B	Desp., f.b.
25/07/2017	S2A	Desp., f.b.	22/08/2018	S2A	Desp., f.b.	12/08/2019	S2B	Desp., f.b.
28/07/2017	S2A	Desp., f.b.	27/08/2018	S2B	Desp., f.b.	14/08/2019	S2A	Desp., f.b.
04/08/2017	S2A	Desp., f.b.	29/08/2018	S2A	Desp., f.b.	17/08/2019	S2A	Desp., f.b.
07/08/2017	S2A	Nubes	01/09/2018	S2A	Desp., f.b.	19/08/2019	S2B	Desp., f.b.
14/08/2017	S2A	Desp.	03/07/2019	S2B	Desp.			

que apareció. El año 2016, el fenómeno blanco se observó en tres imágenes en un periodo de 11 días entre el 9 y 19 de agosto. El año 2017 en cuatro imágenes, desde el 25 de julio hasta el 7 de agosto, 14 días en total, se observó el fenómeno blanco. El año 2018 se registró el fenómeno blanco con el inicio más tardío, desde el 22 de agosto hasta el 1 de septiembre (un total de 11 días) observándose en cinco imágenes. En 2019 se observó por primera vez el blanqueamiento en las imágenes del día 9 de

agosto y la desaparición el 19 de agosto en la laguna de la Cruz, en total en cuatro imágenes. Como dato más reciente, en 2020 no se tienen datos de temperaturas, pero la observación inicial del fenómeno ha sido la más tardía de todos, comenzando el 26 de agosto y desaparición completa de blanqueamiento el 12 de septiembre.

Asimismo, se ha obtenido los datos meteorológicos de los meses de julio y agosto con el fin de

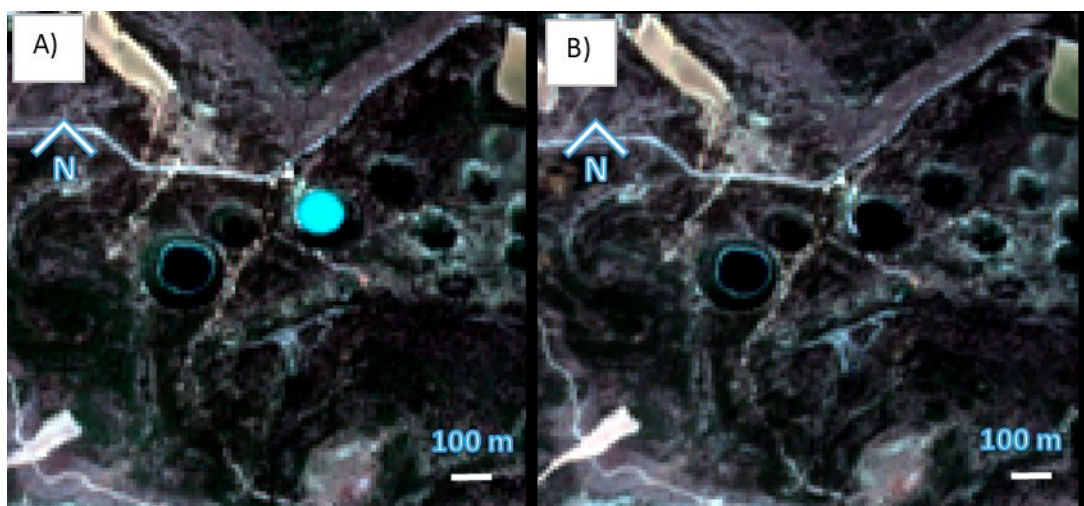


Figura 2. Comparativa de las propiedades ópticas de la laguna de la Cruz en falso color: A) la laguna el 22/08/2018 durante el fenómeno blanco y B) la laguna el 20/07/2018 en su estado normal. Elaboración propia, en falso color RGB a partir de las bandas Sentinel-2 (banda 2 para el azul, banda 3 para el verde y 4 para el rojo), obtenida con el nivel 1C.

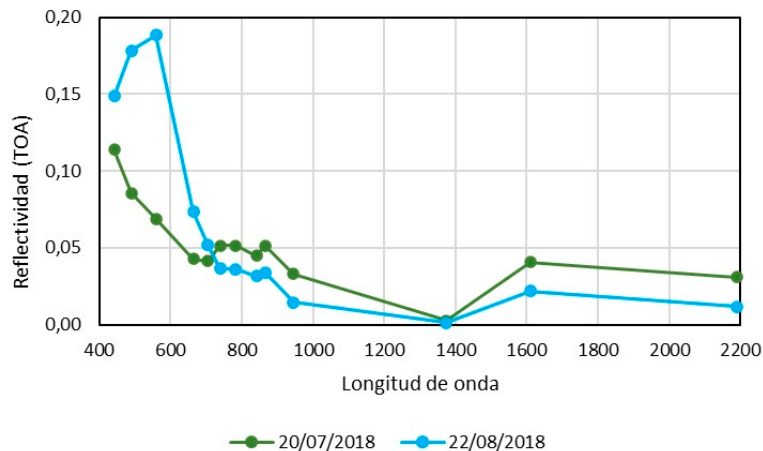


Figura 3. Comparativa del espectro radiométrico TOA de la laguna de la Cruz en presencia del fenómeno blanco en color azul (imagen del 22/08/2018) y en ausencia del fenómeno blanco en color verde (imagen del 20/07/2018).

estudiar las relaciones entre las temperaturas y precipitaciones registradas y el blanqueamiento del agua. Los datos de temperaturas para los cinco años, así como los datos de precipitaciones se presentan en las tablas del Anexo. La Figura 4 nos muestra, para los cinco años estudiados, la evolución de la temperatura máxima observada y las fechas de observación del fenómeno.

La aparición del blanqueamiento es súbita y se observa en tan sólo tres días, como es el caso del año 2016, donde se inicia el 9 de agosto y es total el día 12 de agosto. En la Figura 4 se observa cómo coincide el inicio con temperaturas máximas muy

altas unos doce días antes. En el caso de 2018, que el proceso fue el más tardío, estos valores más elevados de temperatura tuvieron lugar catorce días antes (Figura 2). En 2016 y 2017 tuvieron lugar doce y once días antes. En 2015 el máximo de temperaturas fue ocho días antes y en 2019 se presentaron también catorce días antes. Es cierto que estamos en el mes de julio y agosto y son los periodos de máximas temperaturas del año.

El decaimiento del fenómeno blanco es más lento y tarda unos pocos días más, dado que es un proceso de sedimentación de la materia particulada. En el caso del año 2019, la secuencia se aprecia

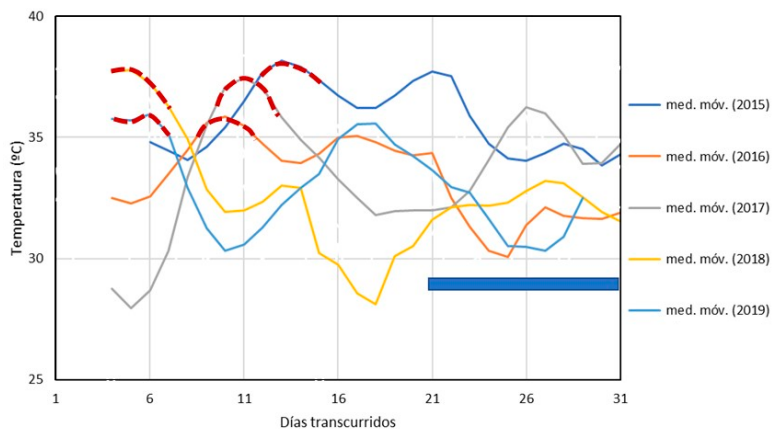


Figura 4. Media móvil de cuatro días de la temperatura máxima en el periodo estudiado cada año. Para todos los años, se hace coincidir la primera observación del blanqueamiento en el vigésimo primer día de la figura (puesto que para cada año, el blanqueamiento comienza en días distintos). La zona azul son los días de duración del fenómeno. El día 21 de cada año se sitúa la primera observación del blanqueamiento y su duración con una franja azul. La línea roja discontinua indica el periodo de máxima temperatura registrada.

perfectamente en la Figura 5, pues las condiciones meteorológicas permitieron tener todas las imágenes satelitales de los días del fenómeno. Se observa como el día 4 de agosto no hay fenómeno o en todo caso está en sus inicios, el 9 de agosto el blanqueamiento es completo y el 12 de agosto se mantiene; pero el 14 ya decae y el día 17 ya es un color verde-azulado, el 19 de agosto es casi normal.

4. Discusión

A través del procesado de imágenes satelitales, se ha logrado realizar un seguimiento interanual y casi diario del fenómeno anual del blanqueamiento de la laguna de la Cruz. De este modo, los nuevos datos recopilados pueden arrojar luz sobre el tema ayudando a futuros estudios limnológicos a dar con exactitud con los factores desencadenantes de dicho blanqueamiento, ya

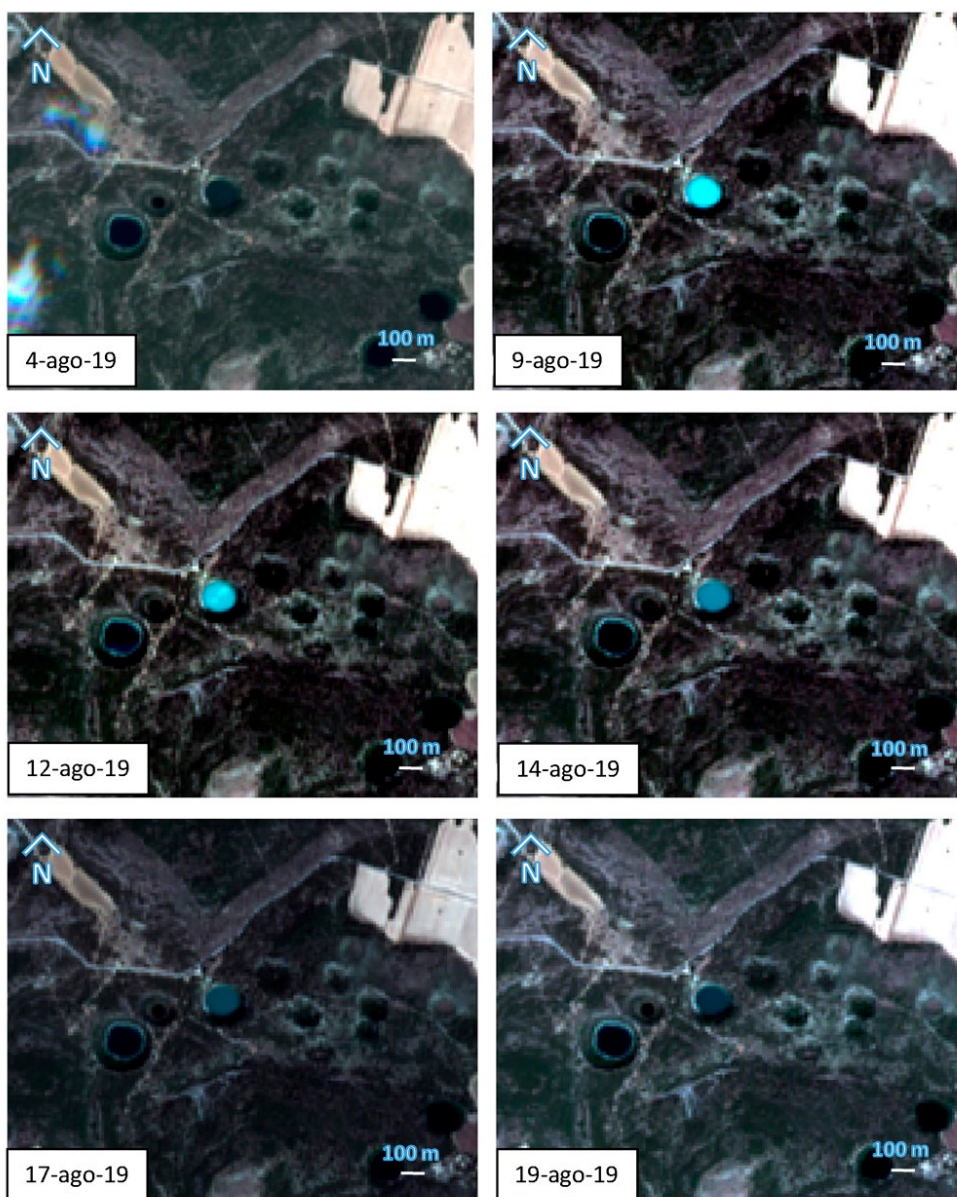


Figura 5. Observación del fenómeno blanco entre los días 4 y 19 de agosto de 2019 (elaboración en falso color RGB a partir de las imágenes de Sentinel-2).

que, hasta la fecha, numerosas investigaciones apuntan hacia direcciones similares pero estos datos no son suficientes para realizar predicciones exactas de cuándo tendrá lugar el próximo evento de blanqueamiento de la laguna. La disponibilidad de las imágenes de alta frecuencia combinadas de Sentinel-2A y 2B permite tener hasta cinco imágenes del fenómeno como en 2019, cuando en 2015 tan sólo se pudo observar en una imagen.

4.1. Duración del fenómeno

En los cinco años estudiados, el fenómeno blanco no ha aparecido más de una vez por año. Tampoco se cita en los trabajos realizados desde 1980 sobre la laguna de la Cruz que alguna vez haya habido dos periodos. Ello debe indicar que el blanqueamiento de la laguna cumple un ciclo anual.

Un hecho remarcable, es el tiempo que permanece de color blanco la laguna. En la Tabla Anexo A1 puede verse que estos años, el fenómeno dura como mínimo, aproximadamente, entre una semana (Miracle et al., 1992; Rodrigo et al., 1993) y el máximo sería de 18 días considerando que las imágenes de Sentinel-2 se han podido recoger cada tres - cinco días. Es importante destacar que la falta de imágenes satelitales disponibles para algunos años dificulta el recuento de días exactos en los que la laguna presenta el fenómeno como en 2015.

De acuerdo con Rodrigo et al. (1993), por comparación con otras lagunas que también presentan un fenómeno de precipitación de carbonato cálcico, la laguna de la Cruz cumple con el periodo de blanqueamiento de las aguas más corto. Este breve periodo de unos 15 días de duración (aproximadamente), contrasta con procesos que ocupan meses, como es el caso del Lago Powell, situado entre Arizona y Utah que presenta un proceso de blanqueamiento de seis meses de duración (Reynolds, 1978), dos meses en el Lago de Michigan (Strong y Eadie, 1978), un mes en el Lago Pirámide, en Nevada (Galat y Jacobsen, 1985) y, como caso extremo, el Lago Balatón que permanece así durante todo el año (Dobolyi y Herodek, 1980).

4.2. Inicio del fenómeno blanco

Los resultados obtenidos indican que no existe una fecha exacta de inicio del fenómeno, únicamente se puede acotar entre los meses de julio y agosto

(y excepcionalmente hasta inicios de septiembre); más concretamente, durante la última semana de julio o la primera de agosto (Miracle et al. 1992) siendo el periodo más caluroso del año. Esto puede indicar que el fenómeno blanco precisa de elevadas temperaturas para que, directa o indirectamente, se desencadene el fenómeno blanco.

Se sabe que los procesos de mineralización de carbonatos en lagos y lagunas dependen en gran medida de una serie de factores geoquímicos y biológicos (Reddy, 1995).

Según Miracle et al. (1992) las elevadas temperaturas favorecen la saturación del CaCO_3 , desencadenando así la precipitación y blanqueamiento. Además, existen organismos procariontes que, por su actividad metabólica, pueden desencadenar la bioprecipitación de carbonato cálcico en el medio acuático que habitan (Seifan y Berenjian, 2019) pero la efectividad de este proceso depende en gran medida de factores abióticos como la concentración de carbono inorgánico disuelto, punto de nucleación, pH, temperatura y potencial Redox (Eh) (Barton y Northup, 2011; Hammes y Verstraete, 2002). Estudios de Müller et al. (2016) sobre la precipitación biogénica de carbonato cálcico en lagos, atribuyen también este fenómeno a un incremento de pH causado por la proliferación de algas y por la nucleación de cristales de calcita sobre la superficie de microalgas.

En este estudio, los datos de temperatura del aire recogidos por la estación meteorológica de Cuenca indican, aunque vagamente, una posible relación entre el fenómeno blanco y un pulso previo de temperaturas máximas cercanas a los 40°C (Figura 4). La prueba es que en 2018 el inicio del fenómeno se retrasó hasta finales de agosto, al no haberse alcanzado en julio las máximas temperaturas. En cambio, el estudio de la pluviometría no parece ser un factor importante en el inicio del fenómeno blanco de la laguna de la Cruz, pues las precipitaciones observadas (Anexo 1) no presentan una relación con la fecha en la que tiene lugar dicho proceso de blanqueamiento. Véase en el Anexo 1 que, en los años 2015, 2016 y 2019 no hay lluvias apreciables antes del fenómeno, en cambio, no ocurre del mismo modo en 2017 y 2018.

Estudios sobre este fenómeno ofrecen grandes aportaciones a la rama de la ecología, limnología y geología ya que el blanqueamiento de las aguas

tiene un importante papel en la ecología del lago. Tradicionalmente, se considera que la reacción de precipitación del carbonato cálcico sirve como amortiguamiento contra la eutrofización de las lagunas kársticas (Kleiner, 1988; Robertson et al., 2007; Hamilton et al., 2009). El fósforo (P) se incorpora por coprecipitación en los cristales de carbonato cálcico, reduciendo así el P biodisponible y con ello, la abundancia de fitoplancton, además la formación de cristales sobre el fitoplancton induce el hundimiento y la senescencia. (Stabel, 1986; Koschel, 1987; Mullins, 1998).

Por todo esto, los sistemas leníticos que presentan periódicamente fenómenos de precipitación de carbonato cálcico, están comúnmente asociados a aguas transparentes y bajas en nutrientes (Wiik, 2014). Además de amortiguar la eutrofización, el fenómeno blanco tiene un papel importante en la migración vertical de organismos fototróficos al disminuir significativamente la penetración de la luz (Rodrigo et al., 1993).

Mediante la teledetección se pueden realizar estos seguimientos detallados de casi cualquier tipo de fenómeno natural, siempre y cuando se pueda investigar a través de sus propiedades ópticas (como el color cian de la laguna de la Cruz indica presencia del fenómeno blanco, Figura 5). Los estudios de fenómenos naturales por teledetección no precisan de gastos elevados en viajes hacia la zona de estudio y aparataje pesado o caro de laboratorio, ya que simplemente requiere de un trabajo de gabinete. Futuras líneas de investigación se orientarán en estudiar la temperatura superficial del agua y el estado trófico a partir de reflectividad de los pigmentos fotosintéticos, así como en la revisión del archivo de Landsat-5 y Landsat-8 para tener un periodo de estudio mucho más largo.

5. Conclusiones

A partir de los datos de temperatura máxima del aire, se puede deducir que existe correlación entre la aparición del fenómeno de blanqueamiento del agua de la laguna con un pulso previo de temperaturas máximas elevadas. Además, el satélite ha permitido ver con precisión el momento de inicio y duración del blanqueamiento hasta su total desaparición con una diferencia de tres días. La disponibilidad de las imágenes de Copernicus es un factor esencial para realizar trabajos de investigación de este tipo en los

cuales se combina la teledetección con la limnología. Los resultados obtenidos muestran la utilidad de la aplicación a un caso práctico de ciencia básica a caballo entre la geoquímica y la ecología, muy difícil de realizar en condiciones de campo. Es importante potenciar el uso de aplicaciones mediante sensores remotos en futuros estudios para el seguimiento de fenómenos naturales o por motivos de cualquier otra índole ya que sus resultados en el campo de la investigación son concluyentes con otros trabajos de campo.

Referencias

- Barton, L.L., Northup, D.E. 2011. Microbes at work in nature: biomineralization and microbial weathering. *Microbial Ecology*, 299-326. <https://doi.org/10.1002/9781118015841.ch11>
- Buchanan, J.M., Stubblebine, W.C. 1962. Externality. *Economica*, 29(116), 138-154. https://doi.org/10.1057/9780230523210_7
- Camacho, A., Borja, C., Valero-Garcés, B., Sahuquillo, M., Cirujano, S., Soria, J.M., Rico, E., De La Hera, A., Santamans, A.C., García De Domingo, A., Chicote, A., Gosálvez, R. 2009. 3140 Aguas oligomesotróficas calcáreas con vegetación de Chara spp. En: VV.AA., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 47 p.
- Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Rural, 2007. Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de las Lagunas de Cañada del Hoyo. *D. O. C. M.* Núm. 63
- Casamayor, E.O., Llorós, M., Picazo, A., Barberán, A., Borrego, C.M., Camacho, A. 2012. Contribution of deep dark fixation processes to overall CO₂ incorporation and large vertical changes of microbial populations in stratified karstic lakes. *Aquatic Sciences*, 74(1), 61-75. <https://doi.org/10.1007/s00027-011-0196-5>
- Cirujano, S., García Murillo, P., Meco Molina, A. 2007. Los carófitos ibéricos. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 64(1), 87-102. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2007.v64.i1.57>
- Dobolyi, E., Herodek, S. 1980. On the mechanism reducing the phosphate concentration in the water of Lake Balaton. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 65(3), 339-343. <https://doi.org/10.1002/iroh.19800650303>
- Galat, D.L., Jacobsen, R.L. 1985. Recurrent aragonite precipitation in saline-alkaline Pyramid Lake, Nevada. *Archiv für Hydrobiologie*, 105(2), 137-159.

- Gleick, P.H. 1993. Water and conflict: Fresh water resources and international security. *International security*, 18(1), 79-112. <https://doi.org/10.2307/2539033>
- Hamilton, S.K., Bruesewitz, D.A., Horst, G.P., Weed, D.B., Sarnelle, O. 2009. Biogenic calcite-phosphorus precipitation as a negative feedback to lake eutrophication. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66(2), 343-350. <https://doi.org/10.1139/F09-003>
- Hammes, F., Verstraete, W. 2002. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in environmental science and biotechnology*, 1(1), 3-7. <https://doi.org/10.1023/A:1015135629155>
- Homa, E.S., Chapra, S.C. 2011. Modeling the impacts of calcite precipitation on the epilimnion of an ultraoligotrophic, hard-water lake. *Ecological modelling*, 222(1), 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.011>
- Izhitskiy, A.S., Zavialov, P.O., Sapozhnikov, P.V., Kirillin, G.B., Grossart, H.P., Kalinina, O.Y., Zalota, A.K., Goncharenko, I.V., Kurbaniyazov, A.K. 2016. Present state of the Aral Sea: diverging physical and biological characteristics of the residual basins. *Scientific reports*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/srep23906>
- Kleiner, J. 1988. Coprecipitation of phosphate with calcite in lake water: a laboratory experiment modelling phosphorus removal with calcite in Lake Constance. *Water Research*, 22(10), 1259-1265. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(88\)90113-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(88)90113-3)
- Koschel, R., Benndorf, J., Proft, G., Recknagel, F. 1987. Model-assisted evaluation of alternative hypotheses to explain the self-protection mechanism of lakes due to calcite precipitation. *Ecological Modelling*, 39(1-2), 59-65. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(87\)90013-5](https://doi.org/10.1016/0304-3800(87)90013-5)
- Miracle, M.R., Vicente, E., Pedrós-Alió, C. 1992. Biological studies of Spanish meromictic and stratified karstic lakes. *Limnetica*, 8, 59-77.
- Müller, B., Meyer, J.S., Gächter, R. 2016. Alkalinity regulation in calcium carbonate-buffered lakes. *Limnology and Oceanography*, 61(1), 341-352. <https://doi.org/10.1002/lno.10213>
- Mullins, H.T. 1998. Environmental change controls of lacustrine carbonate, Cayuga Lake, New York. *Geology*, 26(5), 443-446. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026%3C0443:ECCOLC%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026%3C0443:ECCOLC%3E2.3.CO;2)
- Reddy, M.M. 1995. *Carbonate precipitation in Pyramid Lake, Nevada. In Mineral Scale Formation and Inhibition*. Boston: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1400-2_3
- Reynolds Jr, R.C. 1978. Polyphenol inhibition of calcite precipitation in Lake Powell 1. *Limnology and Oceanography*, 23(4), 585-597. <https://doi.org/10.4319/lo.1978.23.4.0585>
- Robertson, D.M., Garn, H.S., Rose, W.J. 2007. Response of calcareous Nagawicka Lake, Wisconsin, to changes in phosphorus loading. *Lake and Reservoir Management*, 23(3), 298-312. <https://doi.org/10.1080/07438140709354018>
- Rodrigo, M.A., Vicente, E., Miracle, M.R. 1993. Short-term calcite precipitation in the karstic meromictic Lake La Cruz (Cuenca, Spain). *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 25(2), 711-719. <https://doi.org/10.1080/03680770.1992.11900231>
- Seifan, M., Berenjian, A. 2019. Microbially induced calcium carbonate precipitation: a widespread phenomenon in the biological world. *Applied microbiology and biotechnology*, 103(12), 4693-4708. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09861-5>
- Stabel, H.H. 1986. Calcite precipitation in Lake Constance: Chemical equilibrium, sedimentation, and nucleation by algae 1. *Limnology and Oceanography*, 31(5), 1081-1094. <https://doi.org/10.4319/lo.1986.31.5.1081>
- Strong, A.E., Eadie, B.J. 1978. Satellite observations of calcium carbonate precipitations in the Great Lakes 1. *Limnology and Oceanography*, 23(5), 877-887. <https://doi.org/10.4319/lo.1978.23.5.0877>
- Vanderploeg, H.A., Eadie, B.J., Liebig, J.R., Tarapchak, S.J., Glover, R.M. 1987. Contribution of calcite to the particle-size spectrum of Lake Michigan seston and its interactions with the plankton. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44(11), 1898-1914. <https://doi.org/10.1139/f87-234>
- Verpoorter, C., Kutser, T., Seekell, D.A., Tranvik, L.J. 2014. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 41(18), 6396-6402. <https://doi.org/10.1002/2014GL060641>
- Wiik, E., Bennion, H., Sayer, C.D., Willby, N.J. 2014. Chemical and biological responses of marl lakes to eutrophication. *Freshwater Reviews*, 6(2), 35-62. <https://doi.org/10.1608/FRJ-6.2.630>
- Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lenters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M., Sharma, S. 2020. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1-16. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>
- Wunder, S. 2015. Revisiting the concept of payments for environmental services. *Ecological economics*, 117, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.08.016>

Anexos

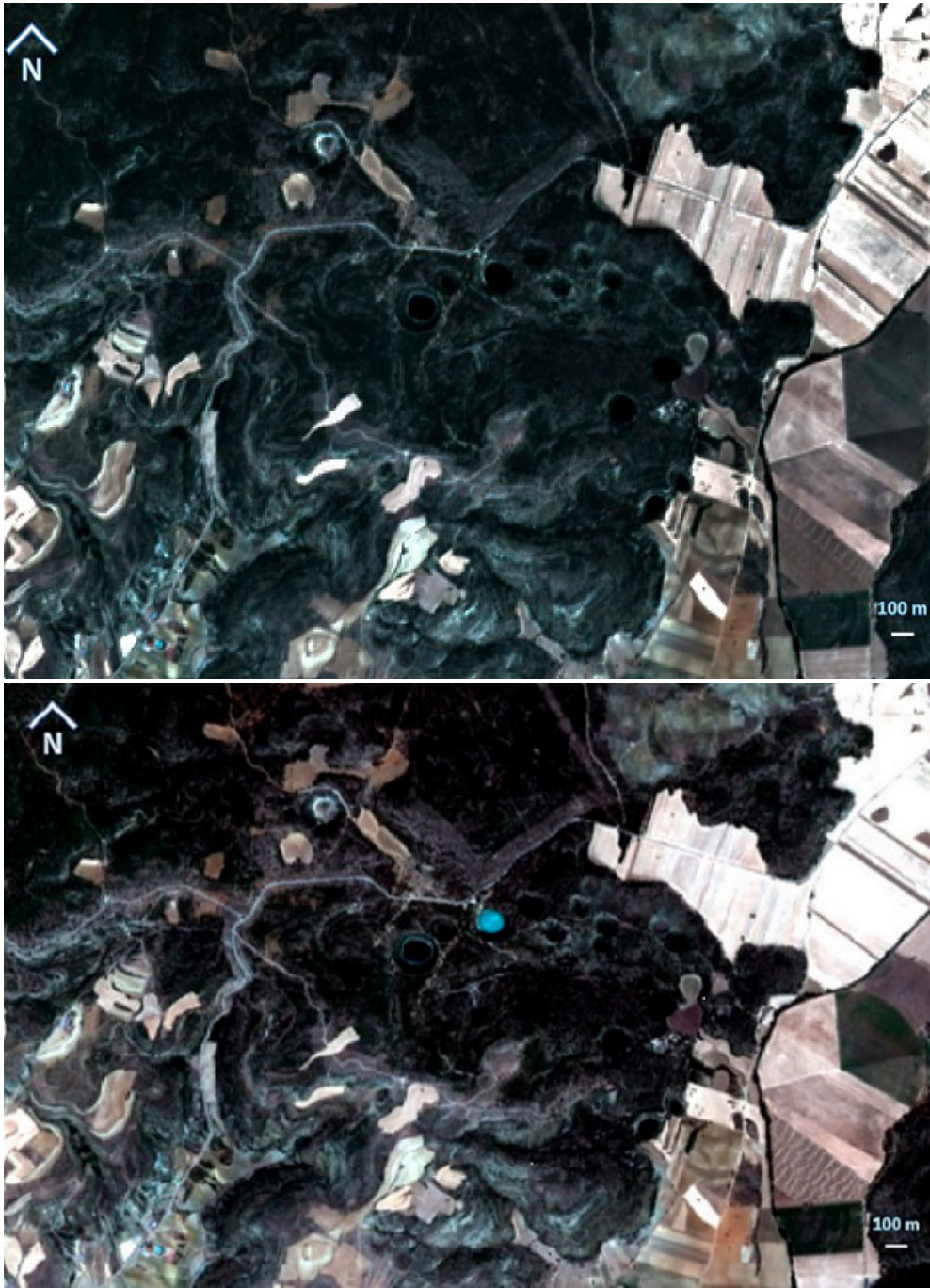


Figura A1. Arriba. Imagen del 25/07/2019, en falso color de las lagunas de Cañada del Hoyo. Puede verse que la laguna de la Cruz se encuentra en su estado normal. Abajo. Imagen satelital en falso color sacada el 12/08/2019, véase en color cian la laguna de la Cruz durante el fenómeno blanco.

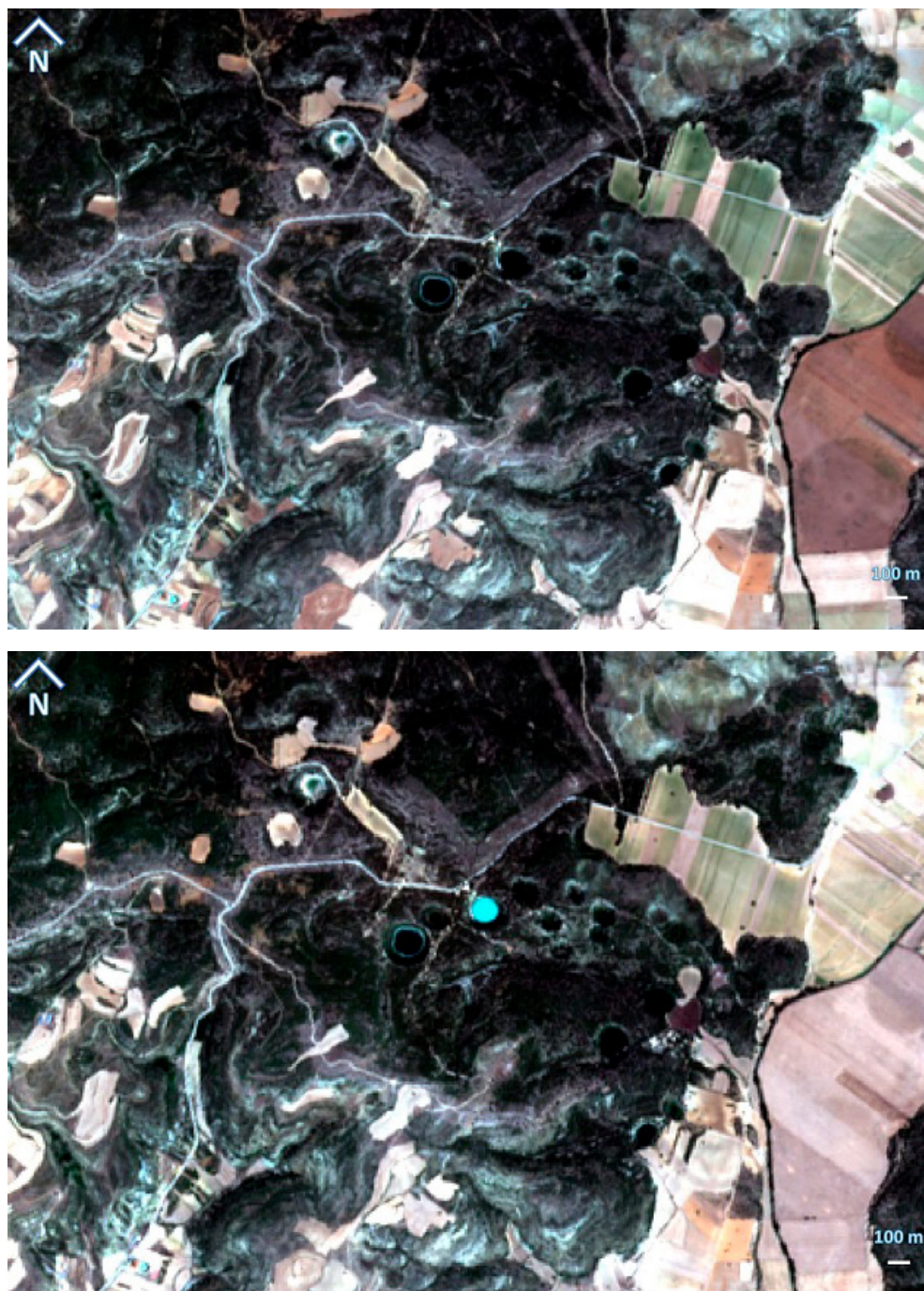


Figura A2. Arriba. Imagen satelital de las lagunas de Cañada del Hoyo, sacada el 20/07/2018, en falso color. Puede verse que la laguna de la Cruz se encuentra en su estado normal. Abajo. Imagen satelital sacada el 22/08/2018, en falso color. Véase en color cian la laguna de la Cruz durante el fenómeno blanco.

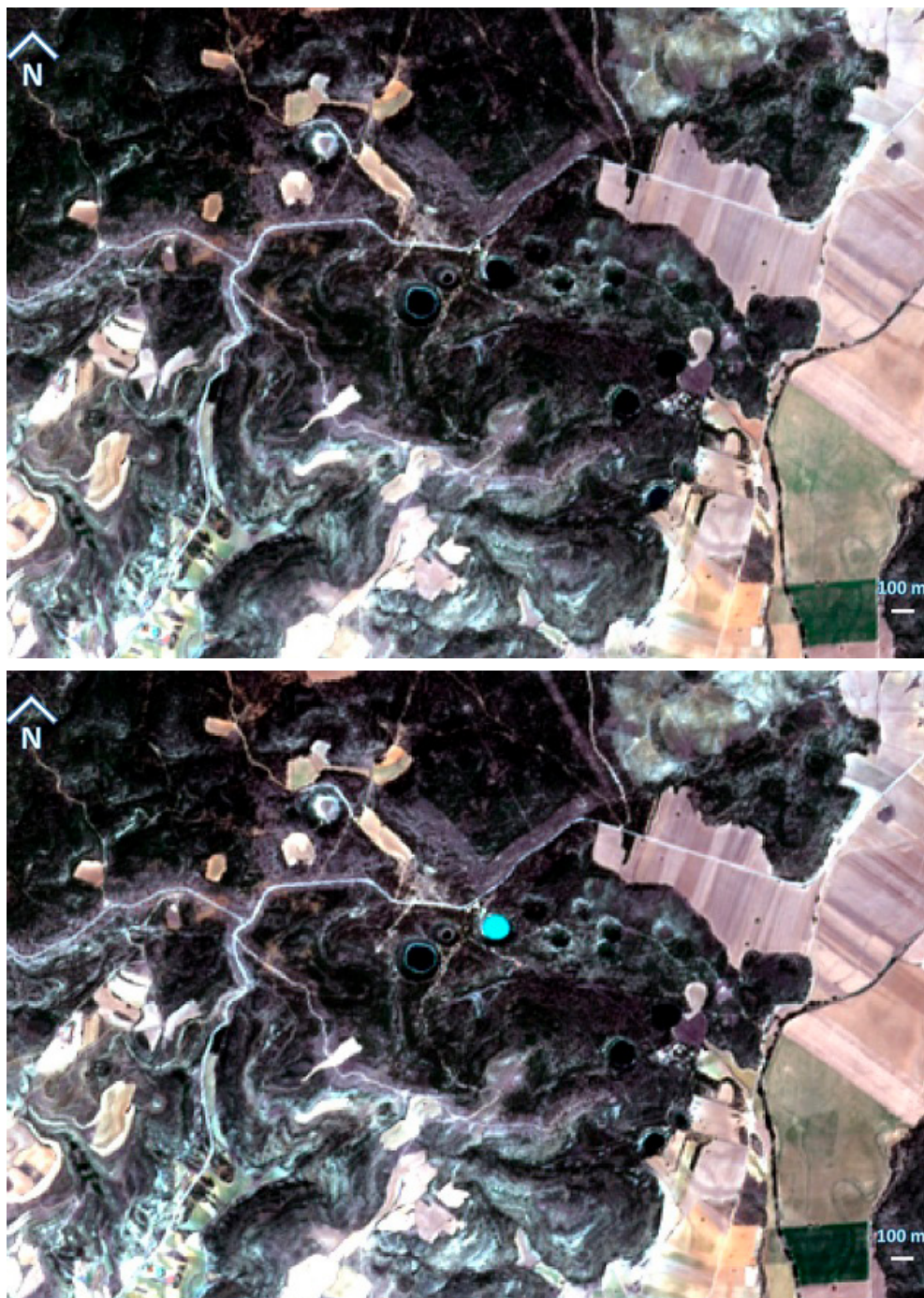


Figura A3. Arriba. Imagen satelital de las lagunas de Cañada del Hoyo, sacada el 14/08/2017, en falso color. Puede verse que la laguna de la Cruz se encuentra en su estado normal. Abajo. Imagen satelital de las lagunas de Cañada del Hoyo, sacada el 25/07/2017, en falso color. Véase en color cian la laguna de la Cruz durante el fenómeno blanco.

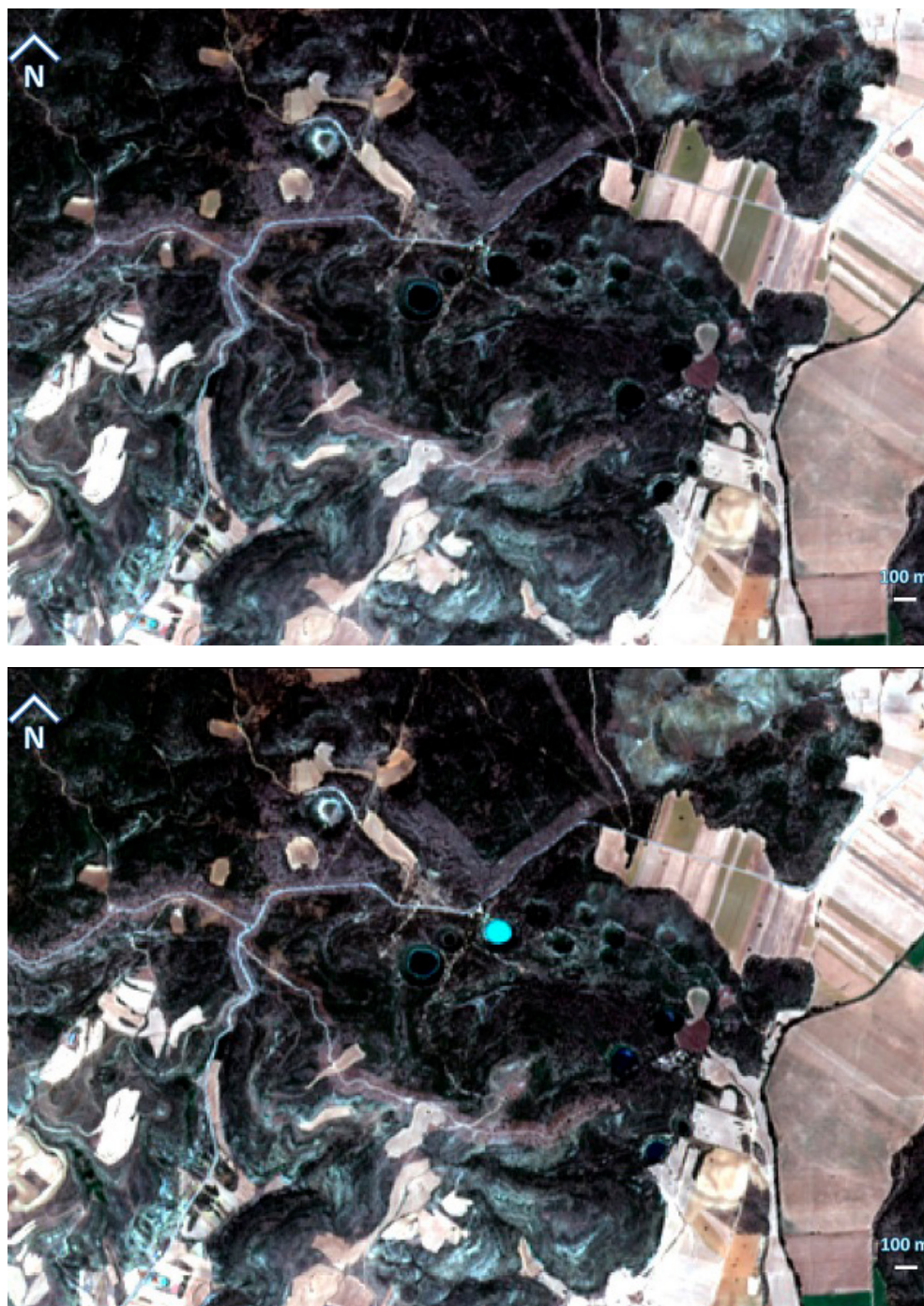


Figura A4. Arriba. Imagen satelital de las lagunas de Cañada del Hoyo, sacada el 30/07/2016, en falso color. Puede verse que la laguna de la Cruz se encuentra en su estado normal. Abajo. Imagen satelital de las lagunas de Cañada del Hoyo, sacada el 12/08/2016, en falso color. Véase en color cian la laguna de la Cruz durante el fenómeno blanco.

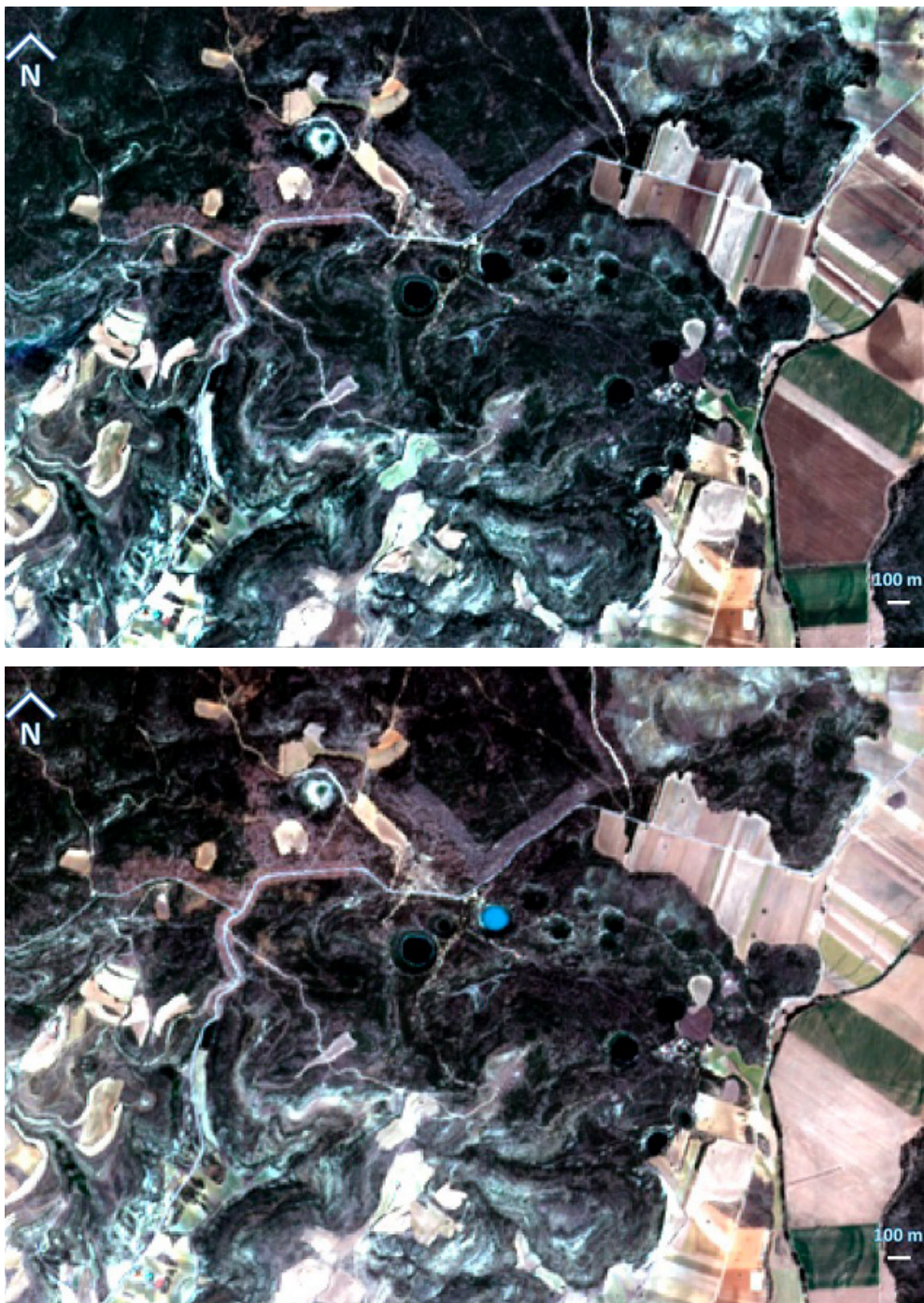


Figura A5. Arriba. Imagen satelital de las lagunas de Cañada del Hoyo, sacada el 06/07/2015, en falso color. Puede verse que la laguna de la Cruz se encuentra en su estado normal. Abajo. Imagen satelital de las lagunas de Cañada del Hoyo, sacada el 16/07/2015, en falso color. Véase en color cian la laguna de la Cruz durante el fenómeno blanco.

Tabla A1. Tabla con los datos de temperatura y precipitación del año 2015.

FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²	FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²
01/07/2015	34,8	21,2	0	24/07/2015	34,4	18,7	0
02/07/2015	34,1	20,4	0	25/07/2015	33,3	18,2	0
03/07/2015	33,3	19,6	0	26/07/2015	34,9	19,5	0
04/07/2015	36,2	21,1	0	27/07/2015	36,1	18,0	0
05/07/2015	38,1	23,4	0	28/07/2015	36,6	19,3	0
06/07/2015	38,4	22,6	0	29/07/2015	36,2	20,3	0
07/07/2015	38,0	21,1	0	30/07/2015	33,6	19,4	0
08/07/2015	38,1	19,7	0	31/07/2015	30,6	19,5	0
09/07/2015	37,1	19,9	0	01/08/2015	30,5	15,5	3,0
10/07/2015	36,3	19,4	0	02/08/2015	33,1	18,0	0
11/07/2015	35,4	17,0	0	03/08/2015	36,0	19,8	0
12/07/2015	36,1	18,6	0	04/08/2015	34,4	20,2	0
13/07/2015	37,1	18,4	0	05/08/2015	36,5	19,1	0
14/07/2015	38,3	20,6	0	06/08/2015	37,7	19,1	0
15/07/2015	37,8	20,3	0	07/08/2015	34,9	22,3	0
16/07/2015*	37,7	20,7	0	08/08/2015	25,7	19,5	0
17/07/2015	36,3	22,2	0	09/08/2015	32,5	16,5	0
18/07/2015	31,8	21,2	2,0	10/08/2015	34,6	15,1	0
19/07/2015	33,1	18,8	0	11/08/2015	33,5	19,2	0
20/07/2015	35,3	18,3	0	12/08/2015	34,4	18,4	0
21/07/2015	35,9	21,3	0	13/08/2015	27,0	17,5	0
22/07/2015	33,1	19,9	5,4	14/08/2015	26,5	13,9	0
23/07/2015	34,6	16,8	0				

*imagen donde se detectó el fenómeno blanco.

Tabla A2. Tabla con los datos de temperatura y precipitación del año 2016.

FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²	FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²
09/07/2016	34,8	16,2	0	01/08/2016	33,2	15,8	0
10/07/2016	36,2	18,2	0	02/08/2016	35,7	19,1	0
11/07/2016	35,7	21,0	0	03/08/2016	36,0	20,0	0
12/07/2016	32,8	18,0	0	04/08/2016	35,1	18,3	0
13/07/2016	29,7	17,1	0	05/08/2016	33,4	18,8	0
14/07/2016	29,5	12,5	0	06/08/2016	34,7	17,1	0
15/07/2016	30,0	12,2	0	07/08/2016	34,6	17,3	0
16/07/2016	32,6	15,6	0	08/08/2016*	34,3	16,4	0
17/07/2016	34,3	15,8	0	09/08/2016	33,8	16,3	1,8
18/07/2016	35,6	16,3	0	10/08/2016	27,3	16,0	1,0
19/07/2016	36,8	18,7	0	11/08/2016	29,8	13,3	0
20/07/2016	32,4	22,8	0,2	12/08/2016*	30,4	15,8	0
21/07/2016	34,0	20,5	0	13/08/2016	32,7	15,0	0
22/07/2016	32,2	16,1	0	14/08/2016	32,6	15,2	0
23/07/2016	31,4	16,2	0	15/08/2016	32,7	15,9	0
24/07/2016	31,5	17,3	0	16/08/2016	29,1	19,4	0,2
25/07/2016	35,2	17,7	0	17/08/2016	32,2	16,3	0,2
26/07/2016	35,9	18,6	0	18/08/2016	32,5	15,7	0
27/07/2016	35,3	22,1	0,2	19/08/2016*	33,8	16,0	0
28/07/2016	36,0	19,4	0	20/08/2016	31,7	17,2	0
29/07/2016	36,2	20,5	0	21/08/2016	31,7	17,6	0
30/07/2016	34,4	20,6	0	22/08/2016	34,7	17,8	0
31/07/2016	32,4	17,1	0	23/08/2016	35,4	17,9	0

*se detectó el fenómeno blanco.

Tabla A3. Tabla con los datos de temperatura y precipitación del año 2017.

FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²	FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²
01/07/2017	24,8	11,9	0	24/07/2017	31,5	16,6	0
02/07/2017	30,5	9,5	0	25/07/2017*	31,0	14,0	0
03/07/2017	32,7	13,7	0	26/07/2017	32,8	13,9	0
04/07/2017	32,5	16,6	0	27/07/2017	35,9	17,8	0
05/07/2017	33,7	18,8	1,2	28/07/2017*	36,6	18,8	0
06/07/2017	29,7	18,8	1,6	29/07/2017	36,3	18,3	0
07/07/2017	27,3	13,2	46,0	30/07/2017	36,2	18,7	0
08/07/2017	24,3	14,0	52,6	31/07/2017	34,8	20,7	0
09/07/2017	30,5	13,1	0	01/08/2017	33,0	19,0	0
10/07/2017	32,6	16,9	0	02/08/2017	31,6	21,0	3,8
11/07/2017	33,9	17,5	0	03/08/2017	36,3	17,8	0
12/07/2017	36,5	16,4	0	04/08/2017*	37,9	17,4	0
13/07/2017	39,0	18,4	0	05/08/2017	38,0	21,0	0
14/07/2017	38,9	21,2	0	06/08/2017	34,8	20,9	0
15/07/2017	35,5	20,2	0	07/08/2017	35,9	19,5	0
16/07/2017	34,8	20,2	0	08/08/2017	30,3	16,5	0
17/07/2017	34,1	21,3	0	09/08/2017	29,8	14,3	0
18/07/2017	35,2	19,5	0	10/08/2017	27,0	10,4	0
19/07/2017	32,5	20,3	0	11/08/2017	29,2	11,0	0
20/07/2017	31,3	16,1	0	12/08/2017	31,7	13,1	0
21/07/2017	31,0	19,4	0	13/08/2017	32,0	15,9	0
22/07/2017	32,4	17,0	0	14/08/2017	33,8	16,4	0
23/07/2017	33,1	17,1	0	15/08/2017	34,6	20,5	0

*se detectó el fenómeno blanco.

Tabla A4. Tabla con los datos de temperatura y precipitación del año 2018.

FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²	FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²
01/07/2018	28,0	15,6	0	02/08/2018	37,8	19	0
02/07/2018	28,3	13,1	0	03/08/2018	38,6	19,8	0
03/07/2018	31,5	12,8	0	04/08/2018	37,9	17,6	0
04/07/2018	28,5	15,0	0	05/08/2018	36,6	20,4	0
05/07/2018	28,0	12,1	0	06/08/2018	38,0	21,0	0,2
06/07/2018	30,6	14,0	0	07/08/2018	36,5	20,0	0
07/07/2018	31,9	19,7	0	08/08/2018	34,0	19,9	0
08/07/2018	32,6	18,1	0	09/08/2018	31,2	19,0	0
09/07/2018	33,8	18,8	0	10/08/2018	29,7	17,9	0
10/07/2018	33,2	18,0	0	11/08/2018	32,8	19,4	0
11/07/2018	33,0	18,0	0	12/08/2018	34,3	19,5	2,0
12/07/2018	31,1	17,4	0	13/08/2018	32,5	18,0	0
13/07/2018	32,3	18,7	0	14/08/2018	32,4	16,4	0
14/07/2018	32,1	17,0	0	15/08/2018	32,5	18,8	0
15/07/2018	30,0	14,8	0	16/08/2018	23,5	17,8	2,4
16/07/2018	28,8	15,7	0	17/08/2018	30,6	16,0	0,2
17/07/2018	32,9	15,5	0	18/08/2018	27,7	16,6	0
18/07/2018	32,1	19,4	0	19/08/2018	30,6	15,9	0
19/07/2018	33,1	15,6	0	20/08/2018	31,5	15,1	0
20/07/2018	31,5	14,3	0	21/08/2018	32,2	15,9	4,8
21/07/2018	30,1	14,5	0	22/08/2018*	32,1	15,4	0
22/07/2018	31,1	19,1	0	23/08/2018	32,6	16,0	3,6
23/07/2018	33,8	16,8	0	24/08/2018	32,0	13,2	0
24/07/2018	33,1	16,7	0	25/08/2018	32,0	13,9	0
25/07/2018	35,0	15,6	0	26/08/2018	32,6	16,6	0
26/07/2018	34,5	18,0	0	27/08/2018*	34,6	14,8	0
27/07/2018	34,5	17,0	0	28/08/2018	33,6	19,7	4,6
28/07/2018	33,5	15,4	0	29/08/2018*	31,6	17,2	0
29/07/2018	32,5	14,1	0	30/08/2018	30,3	16,8	0
30/07/2018	34,3	13,9	0	31/08/2018	32,2	18,5	0
31/07/2018	35,4	15,5	0	01/09/2018*	32,1	17,7	3,8
01/08/2018	36,6	20,3	0	02/09/2018	34,2	18,2	0

*se detectó el fenómeno blanco.

Tabla A5. Tabla con los datos de temperatura del año 2019.

FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²	FECHA	Tª Máx.	Tª Mín.	Precip. l/m ²
03/07/2019	33,1	18,5	0,8	25/07/2019	36,1	22,8	0
04/07/2019	31,8	18,6	0	26/07/2019	32,0	20,7	0
05/07/2019	33,6	17,9	0	27/07/2019	27,0	15,3	0
06/07/2019	34,4	16,7	0	28/07/2019	29,9	12,8	0
07/07/2019	34,3	18,1	0	29/07/2019	32,4	15,0	0
08/07/2019	31,3	17,3	0	30/07/2019	33,0	14,5	0
09/07/2019	29,0	14,5	0	31/07/2019	29,8	17,4	0
10/07/2019	32,1	14,6	0,8	01/08/2019	33,6	16,9	0
11/07/2019	36,9	17,5	0,8	02/08/2019	35,3	16,9	0
12/07/2019	39,0	19,2	0	03/08/2019	35,3	19,7	0
13/07/2019	37,0	23,8	0	04/08/2019	35,5	18,9	0
14/07/2019	32,1	18,2	0	05/08/2019	36,0	18,3	0
15/07/2019	33,8	17,5	0	06/08/2019	35,5	18,6	0
16/07/2019	34,9	20,7	0	07/08/2019	31,8	17,7	0
17/07/2019	32,9	17,9	0	08/08/2019	33,6	16,3	0
18/07/2019	34,4	17,5	0	09/08/2019*	33,7	17,7	0
19/07/2019	35,0	19,6	0	10/08/2019	32,7	18,2	0
20/07/2019	36,7	21,1	0	11/08/2019	30,9	19,4	0
21/07/2019	35,1	22,5	0	12/08/2019*	29,2	15,8	0
22/07/2019	35,2	20,7	0	13/08/2019	29,3	15,9	0
23/07/2019	36,0	21,0	0	14/08/2019*	32,5	15,2	0
24/07/2019	36,5	20,6	0				

*se detectó el fenómeno blanco.