

**EMPLEO DE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA PARA LA ESTIMACIÓN DE  
CLOROFILA-A EN EL EMBALSE ABREUS.**

**USE OF REMOTE SENSING TECHNIQUES FOR THE ESTIMATION OF  
CHLOROPHYLL-A IN THE ABREUS RESERVOIR.**

MSc Javier Alejandro Corcho Amador (1) MSc

Aimee Valle Pombrol. (2)

1. Academia Naval “Granma”. javico0511@gmail.com

2. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos aimeevallepombrol@gmail.com.

**RESUMEN:**

El deterioro de la calidad de las aguas continentales ha sido un problema creciente en los últimos años. Numerosos factores naturales y humanos han contribuido al incremento en los valores de indicadores, tales como la clorofila-a (Chl-a). Debido a esto, grande es el esfuerzo que se realiza en este campo por encontrar las mejores técnicas e instrumentos para monitorizar los recursos hídricos. El objetivo de este trabajo es emplear técnicas de Percepción Remota para estimar la concentración de clorofila-a en el embalse Abreus, provincia Cienfuegos. En la investigación se emplearon muestras de campo recopiladas entre el 2016 y el 2021 por el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) e imágenes del satélite Landsat 8, adquiridas gratuitamente de la página web Earth Explorer; con estos datos y el empleo de técnicas de regresión se seleccionaron y validaron 3 modelos de regresión simple para estimar la concentración de clorofilaa en el propio embalse. El algoritmo con los mejores resultados contiene el cociente B4/B5 y obtuvo un  $R^2$  de 98,93% y un RMSE de 2,12  $\mu\text{g/L}$ , este modelo se le aplicó a la imagen satelital del día 12.06.2019 y permitió obtener un mapa temático que refleja la distribución espacial de la clorofila-a en el cuerpo de agua, para esa fecha.

**Palabras clave:** Clorofila-a, Percepción Remota, Landsat-8, modelos de regresión, mapa temático.

**ABSTRACT:** The deterioration of the quality of continental waters has been a growing problem in recent years. Numerous natural and human factors have contributed to the increase in the values of

indicators such as chlorophyll-a (Chl-a), due to this, great is the effort involved in this field to find the best techniques and instruments to monitor the hydric resources. The objective of this work is to use Remote Sensing techniques to estimate the concentration of chlorophyll-a in the Abreus reservoir, Cienfuegos province. The research used field samples collected between 2016 and 2021 by the Center for Environmental Studies of Cienfuegos (CESC) and images from the Landsat 8 satellite, freely acquired from the Earth Explorer website; with these data and the use of regression techniques, 3 simple regression models were selected and validated to estimate the concentration of chlorophyll-a in the reservoir itself. The algorithm with the best results contains the B4/B5 ratio and obtained an  $R^2$  of 98.93% and an RMSE of 2.12  $\mu\text{g/L}$ , this model was applied to the satellite image of 06.12.2019 and allowed to obtain a thematic map that reflects the spatial distribution of chlorophyll-a in the body of water, for that date.

**Keywords:** Chlorophyll-a, Remote Sensing, Landsat-8, regression models, thematic map.

Recibido:21/09/2023

Aprobado:13/11/2023

## **1. INTRODUCCIÓN**

La moderna ciencia de la Teledetección o Percepción Remota, como un método de observación a distancia de un sistema físico, ha cobrado importancia principalmente con el avance de la tecnología espacial (Lira, 1995). El crecimiento ha sido realmente vertiginoso, facilitando una progresión muy notable, tanto en la cantidad, como en la variedad y calidad de la información disponible para campos científicos muy variados (Chuvieco, 1996), entre ellos, el monitoreo de la calidad del agua en los embalses.

El seguimiento y conservación de la calidad de las aguas superficiales en cuerpos de agua tales como lagos, lagunas o embalses es una de las principales preocupaciones a nivel mundial (Perdomo, 2015). En nuestro país se están llevando a cabo varios proyectos relacionados con esta temática, entre los que se encuentran los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Cuba para la agenda 2030 (Objetivos de Desarrollo Sostenible en Cuba, 2021) y la Tarea Vida: Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático (Ballagas, 2021), en los cuales el monitoreo del agua está recogido en el Objetivo 6 y las Tareas 4, 5 y 9 respectivamente.

Los indicadores de calidad del agua se determinan tradicionalmente por muestras colectadas en campo y el análisis de esas muestras en el laboratorio. Aunque estas mediciones in situ ofrecen gran exactitud, requieren de una labor intensiva y un proceso que consume tiempo, por lo tanto, no es factible para suministrar una base de datos simultánea sobre calidad del agua a escala regional.

Además, los métodos convencionales de muestreo en puntos no son fácilmente confiables para identificar las variaciones espaciales o temporales en la calidad del agua, lo cual es vital para una valoración integral y gestión de cuerpos de agua. Consecuentemente, estas dificultades de muestreo sucesivo y unificado se convierten en un obstáculo significativo para el monitoreo y gestión de la calidad del agua (Gholizadeh y otros, 2016).

En este contexto, los sensores remotos se presentan como una alternativa para determinar estos indicadores, a través de modelos matemáticos que relacionan los valores de reflectividad captados por los sensores con datos de calidad del agua adquiridos in situ, lo que permite una reducción de la inversión económica y de tiempo en la realización de estas tareas. Aunque en nuestro país no se cuenta con referencias sobre la aplicación de la observación remota en función de la calidad del agua de los embalses, en el mundo es ampliamente utilizada esta técnica, ejemplo de esto se pueden citar las investigaciones realizadas por Martínez (2017), Ayala y Herrera (2019), Pizani *et al* (2020), Hernández (2021) y Barreneche *et al* (2022), en las cuales se muestra el empleo de sensores como el Landsat-8 OLI-TIRS y el Sentinel-2 MSI y de técnicas de regresión para estimar parámetros tales como clorofila-a y transparencia del agua.

En consecuencia, con lo mencionado anteriormente, el presente trabajo tiene por objetivo estimar la concentración de clorofila-a en el embalse Abreus, provincia Cienfuegos, mediante el empleo de técnicas de Percepción Remota.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Breve descripción del área de estudio.**

El embalse Abreus (Fig. 1) se localiza en la región centro sur de Cuba, provincia Cienfuegos, específicamente en los 22°16'48'' de latitud norte y los 80°33'24'' de longitud oeste.

El área del embalse es de 5.40 km<sup>2</sup> y posee un volumen de almacenamiento de 35 hm<sup>3</sup>

Este embalse se construyó en el año 1986 para ser utilizado en el riego agrícola, pero con el paso del tiempo se destinó también al abastecimiento de agua a industrias cercanas y a un sector poblacional de la ciudad de Cienfuegos.



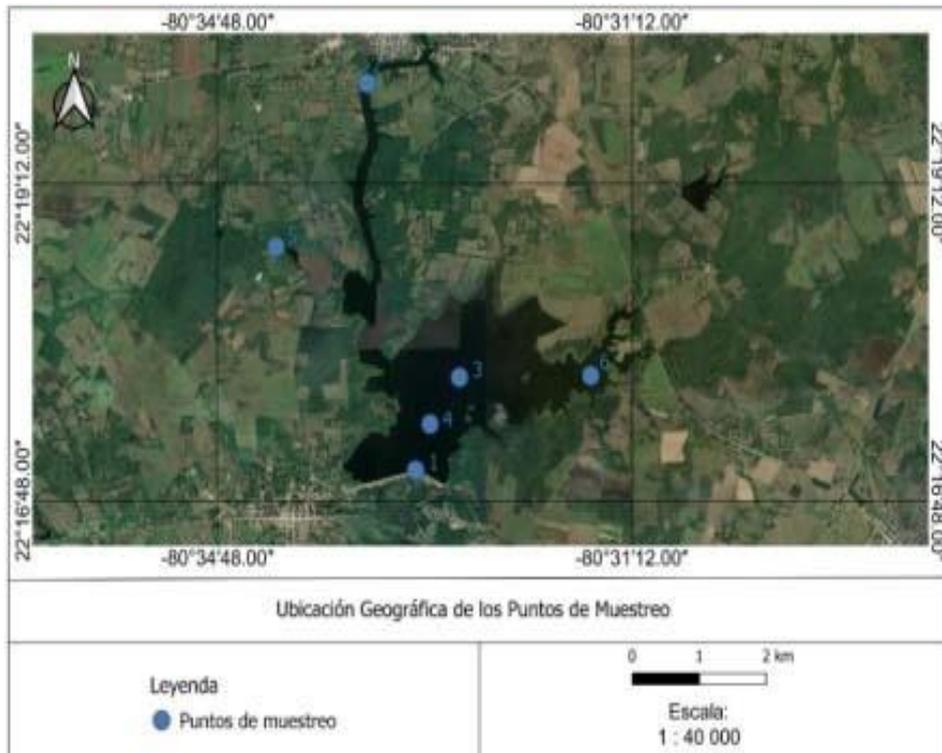
**Figura 1.** Ubicación geográfica del Embalse “Abreus”.

## 2.2 Adquisición de los datos de campo.

Las muestras de campo que se emplearon en este trabajo se comenzaron a tomar desde el 6 de abril de 2016 hasta el 7 de diciembre de 2021, por el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), fueron en total 20 muestreos, distribuidos durante el período de seca y de lluvia. Los puntos de muestreo fueron seis, sus coordenadas y ubicación geográfica se muestran en la Tabla 1 y la Fig. 2 respectivamente.

**Tabla 1.** Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo.

Nº	Nombre del punto	Latitud	Longitud	Sistema de referencia
1	Obra de Toma	22°16'58,58" LN	80°33'3,2" LO	WGS-84
2	Entrada del Río Damuji	22°19'59,86" LN	80°33'28,71" LO	
3	Centro del embalse 1	22°17'44,81" LN	80°32'27,31" LO	
4	Centro del embalse 2	22°17'34,12" LN	80°32'58,92" LO	
5	Entrada del Río Almendrillo	22°18'43,06" LN	80°34'17,65" LO	
6	Entrada del Río Limones	22°17'44,92" LN	80°31'32,41" LO	



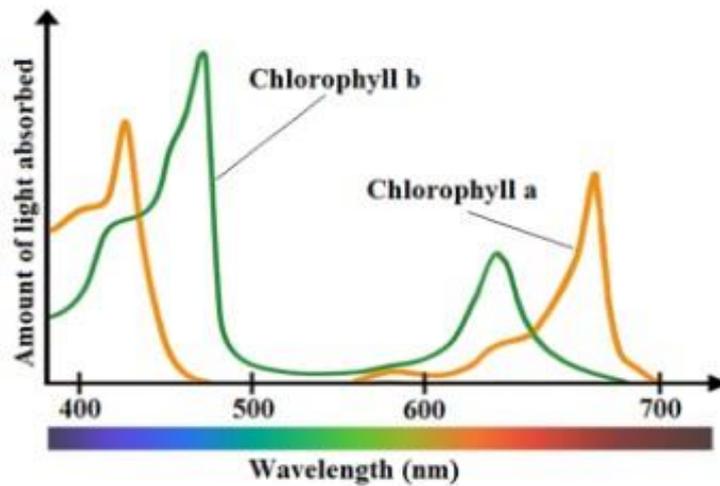
**Figura 2. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo.**

Las muestras de clorofila-a se tomaron a nivel subsuperficial (0.5 m) y se almacenaron en frascos plásticos de 500 mL y sus valores se determinaron por el método Fluorimétrico en extracción con metanol.

### **2.3 Comportamiento espectral de la clorofila-a.**

La signatura espectral de la clorofila-a varía en dependencia de su concentración en relación con otros parámetros de calidad del agua y la composición de los fenotipos del fitoplancton que producen la señal (Topp *et al*, 2020).

Las características prominentes de dispersión y absorción de la clorofila-a incluyen una fuerte absorción entre 450–475 nm (azul) y a 670 nm (rojo), y la reflectancia alcanza su punto máximo a 550 nm (verde) y cerca 700nm (NIR) (Gholizadeh *et al*, 2016), como se muestra en la Fig.3.



**Figura 3. Espectro de absorción de la clorofila-a y clorofila-b. Fuente: Gholizadeh *et al* (2016).**

Mediciones hechas in situ muestran que con el incremento de la concentración de clorofila-a, aumenta la reflectancia en la mayoría de las longitudes de onda (Ritchie *et al*, 2003), excepto en la banda azul, en la cual disminuyen estos valores (Yang *et al*, 2022). Los principios anteriores son usados para seleccionar las bandas y desarrollar algoritmos para determinar clorofila-a de imágenes satelitales, ya que es evidente que la signatura espectral cambia en dependencia del contenido de clorofila-a en el agua.

La revisión de la literatura mostró que la mayoría de los algoritmos para determinar la concentración de clorofila-a necesitan longitudes de onda cercanas a 675 nm (Gholizadeh *et al*, 2016) y otra cercana a los 700 nm (Zimba y Gitelson, 2006). En la Tabla 2 se muestran diferentes modelos matemáticos y los sensores empleados para estimar la concentración de clorofila-a.

**Tabla 2. Modelos matemáticos y sensores empleados para estimar la concentración de clorofila-a.**

Modelo matemático	Sensor	Referencia
$Chl \propto \frac{B_3}{B_2}$	Landsat-8 OLI	Tenjo <i>et al</i> (2014).
$Chl \propto \frac{B_5 - B_4}{B_6}$	Sentinel-2 MSI	Toming <i>et al</i> (2016). Martínez (2017).

$Chl \square \square a \ B_5 / B_4$	Landsat-8 OLI	Tenjo <i>et al</i> (2014).
$Chl \square \square a \ B_5 / B_2$	Sentinel-2 MSI	Delegido <i>et al</i> (2014).
$Chl \square \square a \ B_3 \square B_5$	Landsat-8 OLI	Ayala y Herrera (2019).
$Chl \square \square a \ B_5 / B_4$	Sentinel-2 MSI	Sakuno <i>et al</i> (2018)
$Chl \square \square a \ (B_5 \square B_4) * B_8$		

#### 2.4 Descarga de las imágenes satelitales.

Luego de analizar el comportamiento espectral y las principales bandas utilizadas para determinar los parámetros mencionados anteriormente es que se escoge el sensor a emplear, que en este caso fue el Landsat-8 OLI-TIRS. Las imágenes del satélite Landsat 8 se adquirieron para el mismo período de tiempo y época climática del muestreo de campo. La cantidad de imágenes está relacionada con las fechas del trabajo de campo, por lo que se empleó una imagen por cada fecha de muestreo, 20 en total, estas se descargaron de forma gratuita a través de la página web Earth Explorer, perteneciente al Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Las imágenes adquiridas son productos L1TP, pertenecientes al Nivel 1 de la Colección Landsat-8, este satélite tiene un período de revisita de 16 días, aunque con el lanzamiento del satélite Landsat-9, que posee las mismas características que su antecesor, se logra un período de revisita de ocho días entre los dos. Los sensores del Landsat-8 poseen además las características que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Distribución de las bandas de los sensores OLI y TIRS. Fuente: Ariza (2013).**

Sensor	Bandas	Longitud de onda, en micrómetros ( $\mu\text{m}$ )	Resolución, en metros (m)
<b>OLI</b>	Banda 1 - Ultra-azul (Aerosol y Costa)	0.43 - 0.45	30

	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo Cercano - (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus (Detección de nubes)	1.36 - 1.38	30
<b>TIRS</b>	Banda 10 - Infrarrojo térmico(TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

## 2.5 Procesamiento de las imágenes satelitales.

El procesamiento comprende la corrección atmosférica, la delimitación de la superficie del agua y la creación y aplicación de la máscara en las imágenes satelitales.

Para realizar esta corrección a la imagen multiespectral (Bandas 1-7) se emplea el módulo FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) del software ENVI 5.3, que emplea el modelo de transferencia radiativa MODTRAN 4 (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) (Aguilar *et al*, 2014).

La superficie del agua se delimita aplicando la ecuación (1) sobre las imágenes de las bandas 3 ( $B_3$ ) y 5 ( $B_5$ ) expresadas en niveles digitales, empleando la herramienta Band Math, del software ENVI.

$$(B_5 - B_3) / (B_5 + B_3) \quad (1)$$

La creación de la máscara se efectúa con la herramienta Build Mask, del software ENVI, para ello se utiliza la imagen obtenida en el paso anterior, esta máscara se le aplica a la imagen corregida mediante FLAASH empleando la herramienta Apply Mask.

## 2.6 Evaluación de los modelos recopilados.

Una vez creada y organizada la base de datos se procede a evaluar la relación que existe entre las muestras de campo y los valores de reflectancia de los píxeles de las imágenes satelitales, para ello se emplean 2/3 del total de muestras del registro. Este análisis se realiza con el software STATGRAPHICS y el empleo de técnicas de regresión. Para evaluar los resultados de la regresión se emplean dos indicadores, el coeficiente de determinación  $R^2$  (ecuación 2) y la raíz del error medio cuadrático, RMSE (ecuación 3) por sus siglas en inglés.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{p})^2} \quad (2)$$

Donde:

$Y_i$  - valor real de la muestra.

$y_i$  - valor predicho por el modelo.  $\bar{p}$  -

valor promedio de la muestra.  $n$  -

cantidad de muestras.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Donde:

$Y_i$  - valor real de la muestra.  $y_i$  -

valor predicho por el modelo.

$n$  - cantidad de muestras.

## 2.7 Validación de los modelos seleccionados.

La validación de cada uno de los modelos alcanzados en el proceso anterior se logra mediante la determinación de la exactitud en la obtención de los parámetros de calidad del agua por estos modelos. En esta operación se calcula el RMSE entre los datos estimados por los modelos del 1/3 restante de los datos de campo empleando el programa Excel.

## **2.8 Elaboración de los mapas temáticos de concentración de clorofila-a.**

La confección de los mapas temáticos sobre la distribución espacial de la clorofila-a se realiza con el software QGIS, versión 3.16. Estos mapas se componen de dos elementos principales, el fondo o mapa base, que en este caso son las imágenes satelitales, y el contenido temático, que será la imagen transformada a escala de colores del parámetro analizado. Estos y otros elementos se deben tener en cuenta para lograr una comunicación gráfica efectiva de los resultados obtenidos.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

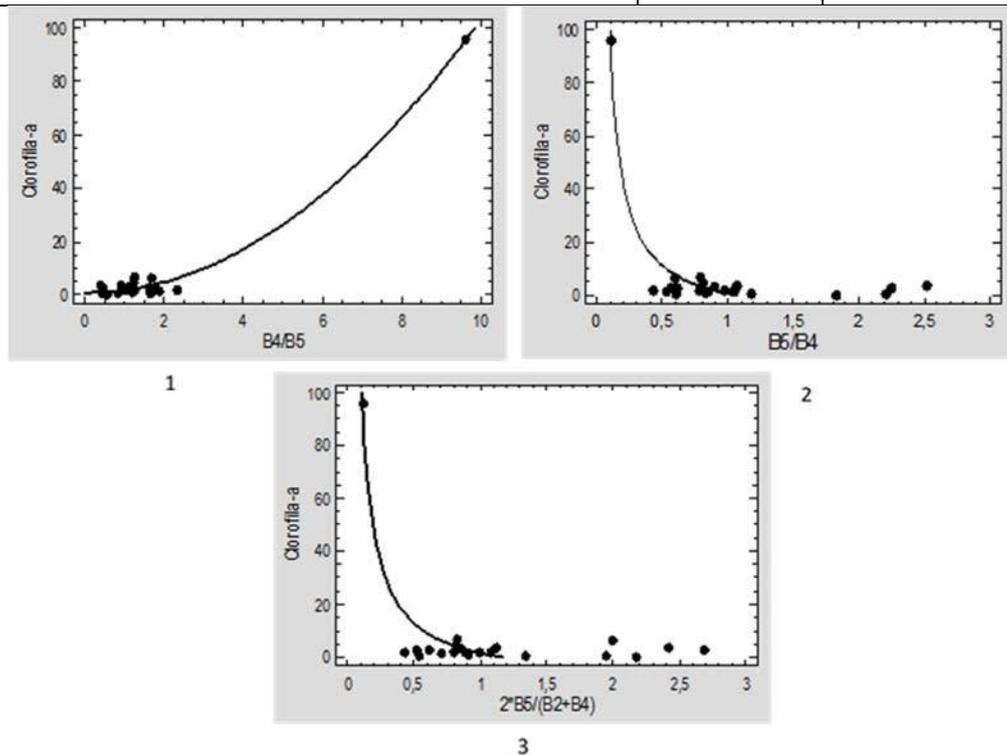
### **3.1 Valoración de los modelos analizados.**

En trabajos como este, fue necesario primeramente aplicar la corrección del efecto atmosférico a cada una de las imágenes empleadas en el análisis de regresión porque se utilizan modelos matemáticos para relacionar la radiancia que capta el sensor con las propiedades biológicas del agua embalsada (clorofila-a), modelos en los cuales intervienen distintas bandas de una imagen multiespectral y debido a que la dispersión aumenta inversamente proporcional a la longitud de onda, cada canal se verá afectado de un modo diferente, siendo mayor la dispersión mientras menor es la longitud de onda; de igual forma, en estudios multitemporales, cuando se comparan estos parámetros en distintas fechas, como es el caso, la atmósfera cambia sus características entre una y otra, lo cual introduciría errores en los modelos. Posteriormente, se evaluaron un total de 22 algoritmos matemáticos, obteniéndose los mejores resultados con modelos de regresión simples que contienen, entre otras, a las bandas 4 y 5 de las imágenes satelitales, lo cual ratifica la relación entre la clorofila-a y las bandas del rojo e infrarrojo cercano. De entre todos los modelos analizados, los valores más altos de  $R^2$  fueron obtenidos por algoritmos de dos bandas: el cociente entre la banda 4 y 5, el cociente entre la banda 5 y 4 y el cociente entre la banda 5 y la media entre la banda 2 y 4, los valores de  $R^2$  y RMSE obtenidos por estos 3 algoritmos se muestran en la Tabla 4 y sus gráficos de dispersión se muestran en la Fig. 4. Los valores de  $R^2$  obtenidos en este trabajo son superiores a

los obtenidos por Toming *et al* (2016) y Sakuno *et al* (2018) por ejemplo, para valores de clorofila-a entre 0 y 100  $\mu\text{g/L}$ .

**Tabla 4. Algoritmos matemáticos obtenidos con sus respectivos valores de  $R^2$  y RMSE.**

N°	Modelo matemático	$R^2$ (%)	RMSE ( $\mu\text{g/L}$ )
1	$\text{Clorofila-a} = 0,687696 + 1,02724 * B4/B5^2$	98,93	2,12
2	$\text{Clorofila-a} = -9,67492 + 10,3575/B5/B4$	92,82	5,49
3	$\text{Clorofila-a} = -9,55184 + 11,1748/2 * B5/(B2+B4)$	89,70	6,59



**Figura 4. Gráficos de dispersión de cada uno de los modelos.**

### 3.2 Validación de los modelos escogidos.

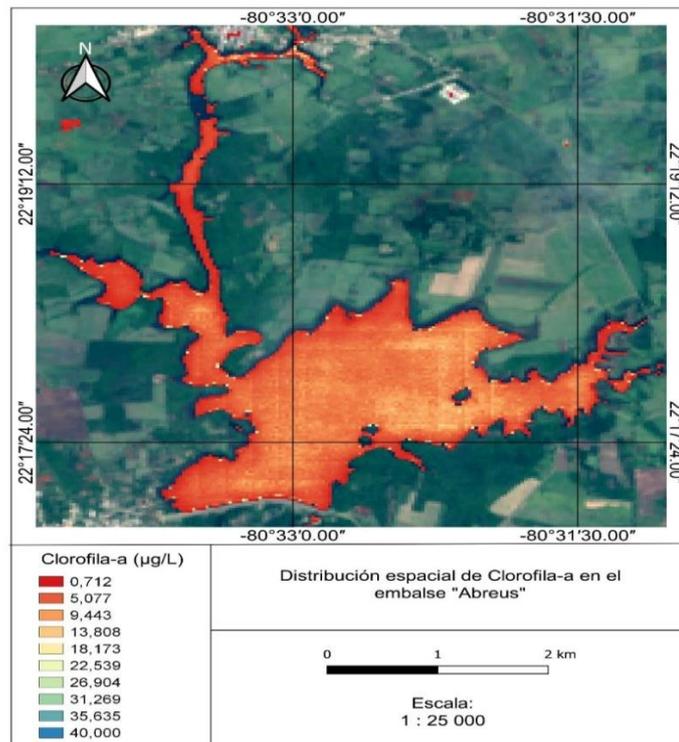
Los resultados de la validación de los algoritmos seleccionados se muestran en la Tabla 5, se observa que el modelo 1 posee el menor RMSE, por lo que fue el empleado en la confección del mapa temático que refleja la concentración de clorofila-a.

**Tabla 5. RMSE obtenido por los modelos seleccionados.**

Nº	Modelo matemático	RMSE ( µg/L)
1	Clorofila-a = $0,687696 + 1,02724 * B4 / B5^2$	1,50
2	Clorofila-a = $-9,67492 + 10,3575 / B5 / B4$	4,80
3	Clorofila-a = $-9,55184 + 11,1748 / 2 * B5 / (B2 + B4)$	4,80

### **3.3 Obtención del mapa temático sobre la concentración de la clorofila-a en el embalse Abreus.**

Primeramente el modelo 1 antes referido se le aplicó a la imagen multiespectral del día 12.06.2019, mediante la herramienta Raster Calculator y luego se le agregaron al mapa temático elementos tales como la red de cuadrículas, un título, una leyenda, una barra de escala, la flecha que indica el nombre, entre otros de vital importancia, tal y como se observa en la Fig. 5.



**Figura 5. Mapa temático sobre la concentración de clorofila-a en el embalse Abreus para el día 12.06.2019.**

Esta técnica de monitoreo remoto de la concentración de clorofila-a en los embalses es posible realizarla con una periodicidad de ocho días, lo que permite detectar procesos que ocurran en un período corto de tiempo y así mantener un correcto control de la calidad de las aguas interiores, asimismo, la obtención de las imágenes de forma gratuita significa un ahorro considerable en la realización de estos trabajos. La resolución espacial de este sensor (30 m) no es la ideal para las pequeñas superficies que abarcan los embalses del país, aunque, de acuerdo con Dekker y Hestir (2012), siempre que el tamaño del píxel sea tres o cuatro veces menor que el del cuerpo de agua y garantice que al menos un píxel sea de agua pura y no contenga ningún componente de señal significativo de la tierra y vegetación circundantes, ese sensor podrá medir eficazmente una masa de agua. Por otra parte, aunque autores como Toming *et al* (2016) y Sagan (2020) hayan expresado que el Landsat-8 carece de bandas en las regiones de reflexión y absorción de la clorofila-a respectivamente, este trabajo demuestra que se puede obtener buena correlación entre los valores de clorofila-a medidos en campo con respecto a los valores de los píxeles en las imágenes satelitales

del Landsat-8, sin embargo, los resultados de esta investigación están referidos a una región y un sensor en particular.

Aunque las capacidades de la Percepción Remota para evaluar la calidad del agua son innegables, esta técnica por sí sola no es suficientemente precisa y debe ser usada en conjunto con los métodos tradicionales de levantamiento y muestreo en campo. En otras palabras, el uso integrado de la Percepción Remota, mediciones in situ y el modelado computacional de calidad del agua puede conducir al incremento del conocimiento de la calidad del agua en estos sistemas.

#### **4. CONCLUSIONES.**

1. Se demostró que el Landsat-8 OLI-TIRS se puede emplear para la estimación de la concentración de clorofila-a utilizando algoritmos de regresión simple, específicamente el cociente B4/B5.
2. Se elaboró y validó un procedimiento para la estimación de la concentración de clorofila-a mediante técnicas de Percepción Remota que permite lograr una mayor periodicidad y el ahorro de recursos en la realización de estos trabajos.

#### **5. REFERENCIAS.**

1. Aguilar, H., Mora Zamora, R. y Vargas Bolaños, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes ASTER, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH, del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 53, 39-59. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>.
2. Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
3. Ayala Jesús, C y Herrera Díaz, M. A. (2019). Monitoreo de la calidad del agua del lago Chinchaycocha, mediante técnicas de teledetección espacial. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 2(2), 23-31. <https://doi.org/10.46380/rias.v2i2.46>.
4. Ballagas, A. (2021). Tarea Vida en Cuba: avances y perspectivas. Facultad de Ciencias Médicas de Bayamo. <https://ambimed2021.sld.cu/index.php/ambimed/2021/paper/viewFile/101/33>.

5. Barreneche, J.M., Guigou, B., Gallego, F., Barbieri, A., Smith, B., Fernández, M., Fernández, V. y Pahlevan, N. (2022). Monitoring Uruguay's freshwaters from space: An assessment of different satellite image processing schemes for chlorophyll-a estimation. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 29, 100891. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100891>.
6. Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de Teledetección espacial. Madrid: Ediciones RIALP, SA.
7. Dekker, A.G. y Hestir, E. L. (2012). Evaluating the Feasibility of Systematic Inland Water Quality Monitoring with Satellite Remote Sensing. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship.
8. Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Peña, R. y Moreno, J. (2014). Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel2 y 3. Validación con imágenes HICO. *Revista de Teledetección*, 41, 37-47 <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2014.2295>.
9. Gholizadeh, M., Melesse, A. y Reddi, L. (2016). A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. *Sensors*, 16, 1298. doi:10.3390/s16081298.
10. Hernández, L. (2021). Desarrollo de cuatro modelos matemáticos utilizando información procedente de los satélites Landsat 7, 8 y AMSA -periodo 2008-2014-, para establecer la condición físico-química y trófica del lago de Amatitlán, municipio de Amatitlán, Guatemala. [Trabajo de Grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt>.
11. Lira, J. (1995). La Percepción Remota: nuestros ojos desde el espacio. Bibliotecas ILSE.
12. Martínez García, I. (2017). Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota. [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Cantabria]. <http://repositorio.unicam.es>.
13. Objetivos de Desarrollo Sostenible en Cuba. (2021). I Informe Nacional Voluntario Cuba Julio 2021. Presidencia y Gobierno de Cuba. Último acceso: 5 de mayo, 2023. <https://www.presidencia.gob.cu/es/gobierno/objetivos-de-desarrollo-sostenible-en-cuba>.
14. Perdomo Vanegas, A. (2015). Predicción de parámetros físico químicos de calidad del agua mediante el uso de sensores remotos: caso de estudio embalse del Neusa. [Tesis de Maestría, Universidad de Bogotá]. <http://expeditiorepositorio.utadeo.co>.

15. Pizani, F., Maillard, P., Ferreira, A. y Amorim, C. (2020). Estimation of water quality in a reservoir from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI sensors. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals>.
16. Ritchie, J., Zimba, P. y Everitt, J. (2003). Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 695–704. DOI: 10.14358/PERS.69.6.695.
17. Sagan, V., Peterson, K., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B., Maalouf, B. y Adams, C. (2020). Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825220302336>.
18. Sakuno, Y., Yajima, H., Yoshioka, Y., Sugahara, S., Mohamed A. M., Adam, E. y George Chirima, J. (2018). Evaluation of Unified Algorithms for Remote Sensing of Chlorophylla and Turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi of Japan and the Vaal Dam Reservoir of South Africa under Eutrophic and Ultra-Turbid Conditions. *Water*, 10, 618. doi:10.3390/w10050618.
19. Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Peña, R. y Moreno, J. (2014). Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes LANDSAT 8. *Memorias de XVI Simposio Internacional SELPER 2014*.
20. Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B. y Nõges, T. (2016). First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sensing*, 8, 640. doi:10.3390/rs8080640.
21. Topp, S.N., Pavelsky, T., Jensen, B., Simard, M. y Ross, M. (2020). Research Trends in the Use of Remote Sensing for Inland Water Quality Science: Moving Towards Multidisciplinary Applications. *Water*, 12, 169. doi:10.3390/w12010169.
22. Yang, H.; Kong, J.; Hu, H.; Du, Y.; Gao, M.; Chen, F. A. (2022). Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges. *Remote Sens.* 14, 1770. <https://doi.org/10.3390/rs14081770>.
23. Zimba, P. y Gitelson, A. (2006). Remote estimation of chlorophyll concentration in hypereutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization. *Aquaculture*, 256, 272–286. doi:10.1016/j.aquaculture.2006.02.038.