

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/minerva.v7i19.294>

Evaluación del potencial de floraciones algales en un embalse tropical mediante teledetección y meteorología

María Eugenia Ramos Flores*
<https://orcid.org/0009-0004-7985-6019>
mariaeugeniaramosflores@gmail.com
Unidad Educativa Nela Martínez Espinosa
La Troncal, Ecuador

Santiago Marcelo Barba Nicolalde
<https://orcid.org/0009-0007-3532-0409>
santiago.barba@espoch.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

Luis Brayan Mera Landeta
<https://orcid.org/0009-0005-5078-5453>
luis.mera@espoch.edu.ec
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

Jorge Herrera-Cruz
<http://orcid.org/0000-0002-9229-1479>
jherreracruz@yahoo.com
Universidad Nacional Federico Villarreal, Facultad
de Oceanografía, Pesquería, Acuicultura y CCAA
Miraflores, Perú

*Autor de correspondencia: mariaeugeniaramosflores@gmail.com

Recibido: (26/10/2025), Aceptado: (14/01/2026)

Resumen. Las floraciones algales en embalses tropicales pueden afectar la calidad del agua y la gestión del recurso, pero su monitoreo continuo suele verse limitado por la baja frecuencia del muestreo *in situ*. Este estudio evaluó el potencial de floraciones algales mediante un flujo de trabajo reproducible que integró teledetección y meteorología. Se analizaron series satelitales de clorofila-a y un indicador complementario de cianobacterias flotantes, junto con precipitación y temperaturas diarias agregadas al mismo intervalo temporal. El procesamiento incluyó el recorte del área de interés, control de calidad y cobertura, cálculo de estadísticas espaciotemporales, mapas de recurrencia, síntesis mensual, correlaciones no paramétricas con rezagos y una clasificación operativa del potencial basada en excedencias robustas. Los resultados mostraron variabilidad intra anual de clorofila-a con zonas de recurrencia espacial, asociaciones meteorológicas débiles y una señal mínima de cianobacterias flotantes, respaldando el uso de este enfoque para monitoreo regional y priorización de muestreos.

Palabras clave: floraciones algales, clorofila-a, teledetección, meteorología.

Assessment of Algal Bloom Potential in a Tropical Reservoir Using Remote Sensing and Meteorology

Abstract. Algal blooms in tropical reservoirs can affect water quality and resource management, but continuous monitoring is often limited by the low frequency of *in situ* sampling. This study assessed algal bloom potential through a reproducible workflow integrating remote sensing and meteorology. Satellite time series of chlorophyll-a and a complementary indicator of floating cyanobacteria were analyzed together with precipitation and daily temperatures aggregated to the same temporal interval. Processing included clipping the area of interest, quality and coverage control, calculation of spatiotemporal statistics, recurrence maps, monthly synthesis, nonparametric lagged correlations, and an operational bloom-potential classification based on robust exceedances. The results showed intra-annual variability of chlorophyll-a with areas of spatial recurrence, weak meteorological associations, and a minimal floating-cyanobacteria signal, supporting the use of this approach for regional monitoring and sampling prioritization.

Keywords: algal blooms, chlorophyll-a, remote sensing, meteorology.

I. INTRODUCCIÓN

Las floraciones de algas en lagos y embalses se han convertido en un problema ambiental recurrente debido a sus efectos sobre la calidad del agua, el funcionamiento ecológico y, en situaciones específicas, la salud pública cuando se producen acumulaciones superficiales o la presencia de cianobacterias. La evidencia científica indica que estos eventos suelen intensificarse por la convergencia de la eutrofización y condiciones climáticas favorables, de modo que el calentamiento y los cambios hidrometeorológicos pueden amplificar la frecuencia e intensidad de las floraciones [1], [2], [3]. A nivel mundial, incluso con una alta variabilidad entre sistemas, se han documentado tendencias crecientes en la intensidad de las floraciones superficiales en numerosos lagos durante las últimas décadas, lo que refuerza la necesidad de herramientas de monitoreo más continuas y comparables en diferentes periodos [4].

En la práctica, muchos embalses tropicales y subtropicales carecen de monitoreo *in situ* con la necesidad temporal necesaria para capturar la naturaleza intermitente de las floraciones. En este contexto, la teledetección ofrece una alternativa eficiente para observar la superficie del agua y obtener indicadores relacionados con la biomasa del fitoplancton, en particular la clorofila-a. No obstante, el monitoreo satelital en aguas continentales enfrenta desafíos como heterogeneidad espacial, influencia de los bordes en cuerpos de agua relativamente pequeños y condiciones ópticas complejas debido a sedimentos y materia orgánica disuelta, que pueden afectar la precisión de las estimaciones puntuales. Por esta razón, los enfoques más robustos para estudios regionales tienden a priorizar patrones espacio-temporales y estrategias de control de calidad, en lugar de la interpretación de un solo valor [5], [6], [7]. La utilidad operativa de este enfoque también se ha destacado en experiencias aplicadas donde la teledetección apoya decisiones de vigilancia, comunicación de riesgos y priorización de muestreo en embalses para uso recreativo o de abastecimiento, así como en síntesis recientes sobre detección y monitoreo de floraciones utilizando sensores satelitales [8], [9].

Con base en estas limitaciones y oportunidades, el problema que guía este trabajo se centra en cómo caracterizar de forma reproducible la variabilidad espacial y temporal de la biomasa algal superficial y sus ventanas de mayor potencial de floración, integrando la teledetección y la meteorología en una escala temporal comparable. En particular, este estudio aprovecha productos operativos de calidad del agua con resolución media y una frecuencia de 10 días, complementados con datos diarios agregados de precipitación y temperatura [10], [11]. Este enfoque también permite dialogar con el reciente desarrollo de servicios de monitoreo satelital orientados a apoyar la toma de decisiones, que resaltan la necesidad de criterios de umbral consistentes, transparencia metodológica y productos interpretables para usuarios no especializados [12].

En consecuencia, el objetivo fue evaluar el potencial de floraciones algales en un embalse tropical durante el año 2025 mediante teledetección y meteorología, integrando clorofila-a (CHL-a) como *proxy* de la biomasa algal, un indicador complementario de cianobacterias flotantes (FCBPROB) y variables meteorológicas agregadas por periodo (precipitación y temperatura). Como contribución, se presenta un flujo de análisis compacto y replicable para el monitoreo regional, que combina excedencias basadas en percentiles, mapas de recurrencia (puntos calientes), series temporales de 10 días y una lectura meteorológica no paramétrica para identificar las ventanas temporales de mayor potencial sin requerir una infraestructura de monitoreo extensa.

Respecto al alcance temporal, se trabajó con 2025 como año piloto, principalmente por dos razones. Primero, el propósito de este estudio es presentar y validar un flujo metodológico reproducible para el monitoreo regional (series de 10 días, control de calidad, excedencias y puntos críticos) que pueda replicarse en otros años y embalses sin cambios sustanciales. Segundo, al centrar el análisis en un solo año se garantizó la consistencia de las fuentes y el procesamiento de los datos, la homogeneidad de los criterios de depuración y comparación, y la gestión controlada de la cobertura de las observaciones a lo largo del año. Además, el año 2025 fue elegido por la disponibilidad completa de series satelitales y meteorológicas consistentes para el área de estudio, permitiendo la ejecución del flujo sin interrupciones por cambios de fuente. En consecuencia, los resultados son interpretados como una línea base operativa, y el enfoque se plantea para extenderse a varios años en futuros trabajos. Por ello, el estudio se asume como exploratorio y de línea base, diseñado para replicarse de forma plurianual bajo criterios consistentes.

El artículo se estructura de la siguiente forma: luego de esta introducción se presentan los fundamentos teóricos que sustentan el estudio, después se describe la metodología, a continuación, se reportan los resultados integrando mapas, series y síntesis mensual, y finalmente se exponen las conclusiones.

II. MARCO TEÓRICO

A. Floraciones algales y control ambiental en embalses tropicales

Las floraciones algales en lagos y embalses se entienden como incrementos rápidos de biomasa fitoplanctónica que alteran la calidad del agua y el funcionamiento del ecosistema. En particular, cuando las floraciones son dominadas por cianobacterias pueden adquirir relevancia sanitaria y ambiental por su capacidad de formar acumulaciones densas, reducir el oxígeno disuelto durante la senescencia y producir metabolitos tóxicos (cianotoxinas). La evidencia internacional coincide en que la frecuencia, magnitud y duración de estos eventos tiende a incrementarse cuando confluyen dos presiones principales; el enriquecimiento por nutrientes y condiciones climáticas favorables, especialmente temperaturas elevadas y periodos de estabilidad hidrodinámica [3].

En embalses tropicales, la dinámica de floraciones suele estar fuertemente modulada por la estacionalidad hidrometeorológica. La precipitación puede actuar como forzante dual; por un lado, incrementa el transporte de nutrientes y material particulado desde la cuenca hacia el cuerpo de agua; por otro, puede intensificar la mezcla, acortar el tiempo de residencia y aumentar la turbidez, con posibles efectos de dilución o limitación por luz. La dirección neta del efecto depende del balance entre cargas externas, estratificación o mezcla y disponibilidad de luz, por lo que resulta común observar relaciones no lineales y con rezagos temporales entre meteorología y biomasa. En este marco, la evaluación del potencial de floraciones no se interpreta como una predicción determinista, sino como una característica probabilística y operativa de ventanas temporales donde se combinan señales de alta biomasa con condiciones ambientales compatibles con su persistencia o intensificación [1].

Un indicador ampliamente utilizado para aproximar la biomasa fitoplanctónica es la clorofila-a (CHL-a), por su relación con la abundancia de pigmentos fotosintéticos y su respuesta a cambios en productividad y disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, en aguas interiores, especialmente en embalses con alta variabilidad de sedimentos y materia orgánica disuelta coloreada, la interpretación de clorofila-a requiere cautela, dado que, el sistema óptico puede ser complejo y la señal espectral del agua puede reflejar simultáneamente múltiples constituyentes ópticamente activos. Por ello, en estudios basados en observación remota suele ser más robusto enfatizar patrones relativos (tendencias, estacionalidad, persistencia espacial, excedencias respecto a umbrales internos) que depender exclusivamente de un valor absoluto puntual [13].

B. Teledetección para monitoreo de clorofila-a y cianobacterias

La teledetección óptica de aguas continentales se fundamenta en la relación entre la reflectancia emergente del agua y la absorción producida por la clorofila, sólidos suspendidos y materia orgánica disuelta. A diferencia del océano abierto, donde los algoritmos han alcanzado una madurez notable, las aguas interiores presentan mayores desafíos por su heterogeneidad espacial, la mezcla de constituyentes y la influencia de bordes en cuerpos de agua relativamente pequeños. Revisiones especializadas destacan que el desempeño de los algoritmos de recuperación de constituyentes depende del tipo de agua, la geometría de observación y el control de calidad atmosférica, lo que hace indispensable el uso de máscaras y la validación contextual cuando es posible [14].

En el caso de floraciones algales dominadas por cianobacterias, la teledetección puede basarse en dos tipos de señales, el aumento de pigmentos fotosintéticos e indicadores específicos asociados con acumulaciones superficiales o pigmentos característicos, cuya detección es más compleja y varía según los sensores y las condiciones ópticas. La literatura reciente destaca que no existe un algoritmo universal para todas las aguas continentales; por lo tanto, los productos operativos tienden a ofrecer variables robustas y, cuando es posible, índices complementarios para cianobacterias flotantes, orientados al monitoreo [5].

Este estudio aprovechó la disponibilidad de productos globales de calidad del agua para lagos y embalses con resolución espacial media (300 m) y composición temporal de 10 días, diseñados para proporcionar series semicontinuas con control de calidad. Este tipo de producto es especialmente relevante en contextos regionales donde el muestreo *in situ* puede ser discontinuo, y que permite, caracterizar la estacionalidad con suficiente densidad temporal, mapear patrones espaciales persistentes, y generar métricas comparables entre periodos [15].

III. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló como un análisis observacional basado en teledetección, orientado a caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la clorofila-a superficial (CHL-a) y a evaluar el potencial de floraciones algales en un embalse tropical durante el año 2025, considerado como año piloto para estandarizar el flujo de procesamiento y evaluación antes de su aplicación multianual. La unidad de análisis fue el cuerpo de agua delimitado como un área de interés (AOI), definida mediante un recorte espacial consistente para todas las descargas.

El área de estudio fue el embalse de Betania ubicado en Huila-Colombia, construido sobre el río Magdalena y asociado a los aportes del río Yaguará y del mismo Magdalena, con un espejo de agua de aproximadamente 7400 ha. Este embalse ha sido utilizado principalmente para la generación de energía hidroeléctrica, además de actividades turísticas y de producción piscícola en jaulas flotantes, que han provocado cambios en sus características limnológicas. Para el acoplamiento con los datos meteorológicos, se empleó un punto representativo del entorno del embalse, ubicado en N 2°45'29.5'', W 75°25'4.1'', consistente con el centro operacional del recorte (AOI). La profundidad máxima del embalse es de 90 metros y un volumen de almacenamiento de 1971 millones de m³ [16]. De acuerdo a estudios previos basados en muestreos y bioindicadores, el embalse ha presentado una eutrofización avanzada, por lo que se consideró eutrófico como condición de referencia [17].

Se trabajó con dos fuentes principales de información; por un lado, se descargaron desde Copernicus Browser escenas de 10 días (dekadales) a 300 m en formato GeoTIFF correspondientes a clorofila-a y a la probabilidad de cianobacterias flotantes (FCBPROB) [15]. Por otro lado, se utilizó un archivo meteorológico diario en formato CSV para un punto representativo del entorno del embalse, del cual se extrajeron precipitación y temperatura del aire a 2 m. El periodo de análisis se estableció entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2025 [10].

Una vez reunidos los archivos, se organizó el año en ventanas de 10 días calendario (1–10, 11–20 y 21–fin de mes) con el propósito de estandarizar la comparación temporal. Se construyó un inventario automático de imágenes leyendo los nombres de archivo y extrayendo las fechas de inicio y fin asociadas a cada escena. Con ese inventario se depuraron los archivos fuera del periodo 2025 o que no correspondían a las ventanas definidas. Cuando existieron múltiples archivos para un mismo periodo, se seleccionó un único archivo por ventana priorizando aquel con mayor porcentaje de píxeles válidos; esta decisión se tomó mediante una lectura rápida de la escena únicamente para comparar cobertura entre candidatos sin afectar la resolución cartográfica final.

Antes del cálculo de indicadores, se verificó la consistencia espacial de las escenas, revisando el sistema de referencia, la geotransformación y las dimensiones de la grilla. Para la elaboración de mapas anuales se trabajó con el subconjunto de periodos que compartía la misma grilla de referencia, evitando mezclar geometrías incompatibles dentro de una misma acumulación espacial. En paralelo, para el análisis temporal a escala del área de interés (AOI) se utilizaron los archivos seleccionados por periodo, asegurando la continuidad de 10 días a lo largo del año.

En cada imagen se aplicó un enmascaramiento de valores no válidos con base en tres criterios: valores no numéricos (NaN/sin información), el valor *nodata* declarado en el archivo cuando estuvo disponible y rangos operativos coherentes con cada variable, descartando valores fuera del dominio esperado (por ejemplo, probabilidad de cianobacterias flotantes fuera de 0–1). Con enmascaramiento se calculó, para cada periodo, el porcentaje de cobertura válida como proporción de píxeles válidos respecto al total del área de interés. A continuación, se estimaron estadísticos espaciales por periodo recorriendo las imágenes por bloques (*tiles*) para mantener estabilidad computacional, es así que, para clorofila-a se calculó la media espacial y el máximo espacial del área de interés, y para la probabilidad de cianobacterias flotantes se calculó de forma análoga la media y el máximo, registrándose además la cobertura válida de cada ventana.

La información meteorológica diaria se preparó para integrarse con la serie satelital. Primero se identificó la columna de fecha a partir de los campos de año y día juliano, y luego se agregaron los datos a las mismas ventanas de 10 días utilizadas en teledetección. Para cada periodo se obtuvo la precipitación total acumulada (suma diaria) y la temperatura media del periodo (promedio diario), junto con el número de días disponibles como control interno. Estas variables se unieron a la serie de 10 días de clorofila-a para permitir el análisis conjunto.

Con el propósito de definir eventos de incremento de clorofila-a sin introducir criterios externos, se estableció un umbral interno robusto a partir de la propia distribución anual, por lo que, se consideró clorofila-a alta a todo periodo cuya media espacial en el área de interés (AOI) fue mayor o igual al percentil 90 de la serie anual. En paralelo, se definió una condición meteorológica favorable relativa al año de estudio usando estadísticas centrales. Se consideró precipitación baja cuando la precipitación del periodo fue inferior a la mediana anual, y temperatura alta cuando la temperatura media del periodo superó la mediana anual. Con estas reglas se clasificó cada periodo en tres niveles de potencial: alto cuando existieron clorofila-a alta y meteorología favorable, medio cuando hubo clorofila-a alta sin meteorología favorable, y bajo en el resto de casos. Posteriormente, estas clases se agregaron por mes para describir su distribución estacional.

Para el análisis espacial anual se generaron tres productos cartográficos basados en clorofila-a: la media anual por píxel, calculada como la suma de valores válidos dividida para el número de observaciones válidas; la cobertura anual por píxel, expresada como conteo de observaciones válidas; y un mapa de puntos calientes, construido como la frecuencia anual con la que cada píxel superó un umbral alto. Este umbral alto por píxel se estimó a partir del percentil 90 de una muestra representativa de valores válidos a lo largo del año, y la frecuencia se calculó como el cociente entre el número de excedencias y el número de observaciones válidas por píxel. La acumulación espacial se ejecutó por bloques para conservar la resolución nativa del producto y evitar limitaciones de memoria.

Finalmente, la relación entre clorofila-a y meteorología se evaluó mediante correlaciones de Spearman, seleccionadas por su robustez ante no normalidad y relaciones monotónicas. Se calcularon correlaciones entre la clorofila-a media por periodo y la precipitación del periodo, la temperatura media del periodo y sus versiones con rezago de un periodo, reportándose coeficientes, significancia y tamaño muestral efectivo. Las asociaciones estadísticas fueron consideradas de carácter exploratorio, dado el tamaño muestral por periodos.

IV. RESULTADOS

El análisis integró series satelitales de clorofila-a y probabilidad de cianobacterias flotantes, junto con variables meteorológicas agregadas al mismo intervalo temporal (Tabla 1). Los productos de calidad de agua lacustre a 300 m y resolución temporal de 10 días permitieron caracterizar la variabilidad intra anual con un compromiso razonable entre detalle espacial y frecuencia de observación [15].

Tabla 1. Fuentes y variables.

Fuente	Variable	Descripción	Unidad	Periodo
Copernicus Browser (LWQ 300 m, 10-daily)	CHL-a	Clorofila-a superficial (<i>proxy</i> de biomasa algal)	mg/m ³	2025
Copernicus Browser (LWQ 300 m, 10-daily)	FCBPROB	Probabilidad de cianobacterias flotantes	0 – 1	2025
NASA POWER (punto)	PRECTOTCORR	Precipitación diaria agregada a cada periodo satelital	mm	2025
NASA POWER (punto)	T2M	Temperatura diaria a 2 m agregada a cada periodo satelital	°C	2025

Fuente: Elaboración propia.

La consistencia espacial de la estimación queda reflejada en la cartografía anual, donde la media anual de clorofila-a exhibe un patrón espacial coherente dentro del cuerpo de agua (Fig. 1A) y la cobertura de observaciones válidas muestra, a su vez, dónde la serie fue más robusta (Fig. 1B). Este control visual es importante en teledetección de aguas interiores porque la presencia de nubes, bruma, geometrías desfavorables y condiciones ópticas complejas puede introducir vacíos o sesgos si no se evalúa la disponibilidad de datos [6].

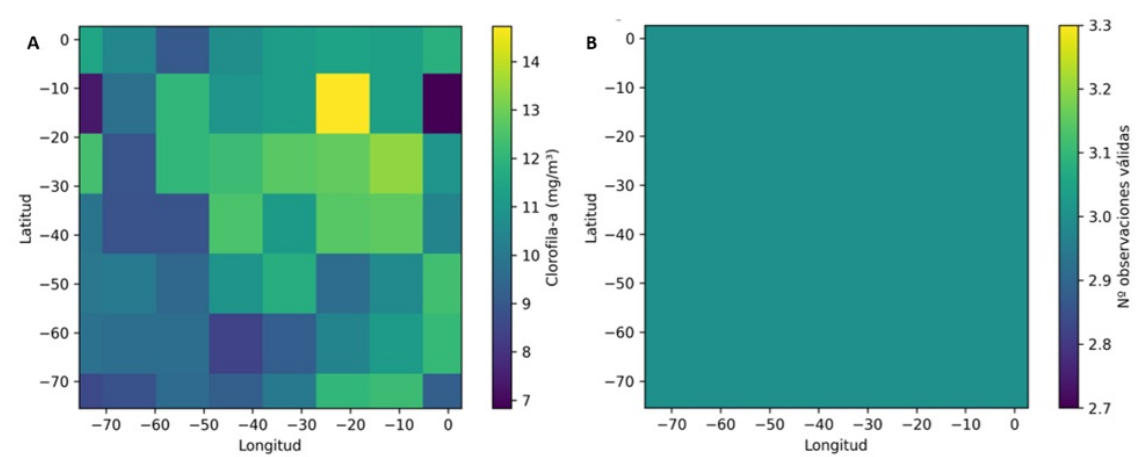


Fig. 1. A) Media anual de clorofila-a, B) Cobertura de observaciones válidas.

A escala del embalse (promedios espaciales por periodo), los estadísticos de calidad y magnitud anual se resumen en la Tabla 2. En esta tabla, el máximo anual corresponde al máximo de la media mensual del área de interés (AOI), una medida robusta que evita la influencia de valores atípicos por píxel. En general, la clorofila-a se comporta como un indicador de biomasa fitoplanctónica útil para identificar incrementos relativos de productividad; sin embargo, en aguas ópticamente complejas la relación entre señal espectral y concentración puede presentar incertidumbre, especialmente cuando coexisten variaciones fuertes de turbidez y materia orgánica disuelta coloreada. Por ello, en este estudio el énfasis se coloca en patrones temporales, espaciales y de covariación meteorológica, más que en la interpretación estrictamente absoluta de cada valor puntual [14].

Tabla 2. Calidad y umbrales.

Indicador	Nº periodos	% válidos (mediana)	Umbral P90 (AOI, mg/m³)	Máximo anual (media mensual del AOI, mg/m³)
CHL-a	16	100.0	19.4201	30.671
FCBPROB	35	100.0	—	0.0

Nota: En 2025 existen 36 periodos de 10 días por calendario; los valores de Nº periodos reflejan únicamente los periodos disponibles y válidos en los archivos descargados luego del control de calidad.

La serie de 10 días de clorofila-a (Fig. 2A) evidencia una dinámica no estacionaria, con episodios puntuales de aumento sobre un fondo más estable, lo que es consistente con la naturaleza intermitente de las floraciones algales y con la influencia combinada de forzantes meteorológicas e hidrológicas como mezcla, estratificación, aporte de nutrientes y tiempos de residencia [18].

Al reorganizar la información a escala mensual (Tabla 3), se aprecia la estructura estacional del sistema, en la que, meses con promedios más altos de clorofila-a y con mayor frecuencia de eventos (definidos operativamente con un umbral alto, Tabla 2) se distinguen de meses de menor productividad. La distribución mensual (Fig. 3B) complementa esta lectura al mostrar cómo cambia la dispersión intra mensual, donde meses con cajas más elevadas o mayor rango sugiere periodos de mayor inestabilidad y probables condiciones favorables a acumulaciones de biomasa.

Tabla 3. Resumen mensual.

Mes	N° periodos	CHL media (mg/m³)	Eventos CHL alta	Potencial alto	Precipitación total (mm)	T media (°C)
01	—	—	—	—	—	—
02	1	13.428	0	0	173.93	18.93
03	—	—	—	—	—	—
04	1	11.243	0	0	178.01	18.89
05	1	7.774	0	0	15.48	18.12
06	1	10.443	0	0	78.61	18.01
07	1	20.089	1	0	3.18	17.96
08	1	18.751	0	0	9.85	18.75
09	3	7.462	0	0	54.94	19.09
10	2	12.248	0	0	27.81	19.54
11	3	30.671	1	0	167.66	19.56
12	2	7.092	0	0	103.95	19.65

Nota: (—) indica que no hubo periodos satelitales válidos disponibles para ese mes en el dataset procesado.

La Fig. 2 muestra una síntesis de la dinámica intra-anual en dos escalas temporales. La serie de 10 días de clorofila-a permite identificar episodios de incremento y su secuencia a lo largo del año. En tanto que, el panel meteorológico mensual proporciona el contexto climático general en el que se producen estas variaciones. En conjunto, la figura permite comparar de forma visual la evolución de la biomasa algal con el patrón estacional de precipitación y temperatura.

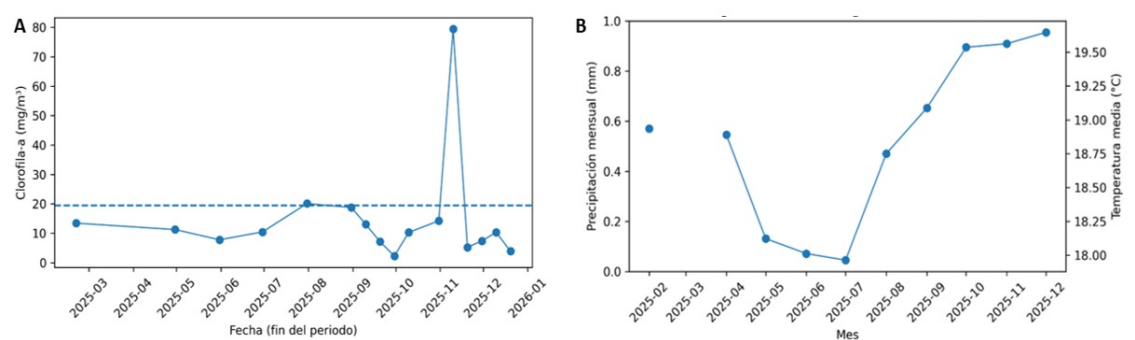


Fig. 2. A) Clorofila-a media por periodo, B) Meteorología mensual.

Desde un punto de vista limnológico, esta señal temporal es congruente con el marco conceptual ampliamente documentado para ambientes eutrofizados o en proceso de eutrofización. La biomasa algal, particularmente la ocurrencia de floraciones, responde a combinaciones de nutrientes disponibles, temperatura y condiciones de estabilidad de la columna de agua, moduladas por la hidrología y el viento. En sistemas tropicales, la temperatura suele mantenerse alta, por lo que pequeñas variaciones térmicas y, sobre todo, cambios en precipitación y mezcla pueden marcar diferencias relevantes en la probabilidad de acumulación superficial de algas [2].

En términos espaciales, la media anual (Fig. 1A) resume la distribución central de la productividad superficial, mientras que el mapa de puntos calientes (Fig. 3A) aporta una lectura distinta, al identificar zonas con recurrencia de condiciones de clorofila-a alta (frecuencia relativa por píxel). Esta distinción es útil porque un promedio anual puede suavizar episodios intensos y localizados, mientras que la frecuencia resalta persistencia o repetición.

La presencia de puntos calientes persistentes suele asociarse, en términos mecanísticos, a sectores donde confluyen procesos que favorecen la acumulación como, áreas someras, zonas con menor energía hidrodinámica, sectores próximos a entradas de agua o zonas de retención, e incluso gradientes locales de turbidez y nutrientes. Aunque la teledetección por sí sola no identifica la causa dominante, sí ofrece una base objetiva para priorizar campañas *in situ* y para orientar hipótesis sobre fuentes y trayectorias de material particulado o nutrientes. Bajo esta lógica, el uso de mapas satelitales para focalizar monitoreo

y gestión es recomendado en regiones con limitada instrumentación de campo [7].

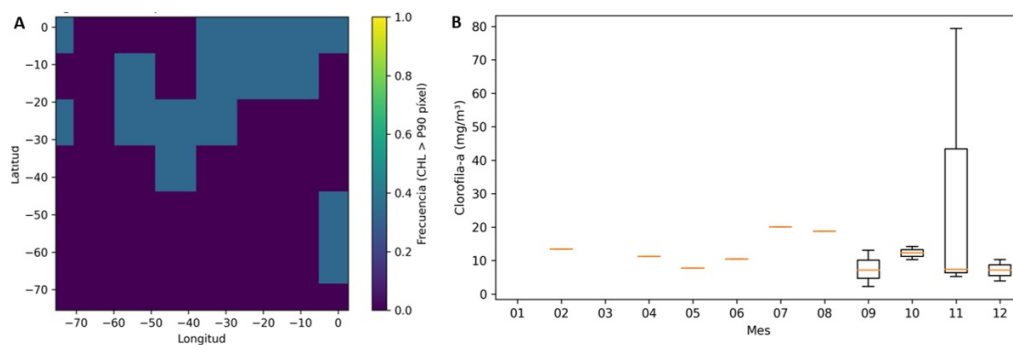


Fig. 3. A) Puntos calientes de clorofila-a alta, B) Distribución mensual de clorofila-a.

La meteorología (Fig. 2B) muestra el contexto de precipitación y temperatura sobre el cual se superponen los cambios de clorofila-a. Para cuantificar la asociación de forma no paramétrica, se estimaron correlaciones de Spearman entre clorofila-a y la meteorología, incluyendo rezago de un periodo (Tabla 4). La nube de puntos de clorofila-a y precipitación (Fig. 4A) permite visualizar la forma de esa relación, en tanto que la Tabla 4 aporta el coeficiente ρ , su significancia y el tamaño muestral efectivo. Cabe señalar que el número de observaciones disponibles por periodos de 10 días limita la potencia estadística para detectar asociaciones débiles; por ello, los resultados de Spearman son interpretados como exploratorios y útiles principalmente para guiar las hipótesis de monitoreo. Debido a esto, la consistencia de los patrones temporales y la recurrencia espacial se prioriza como evidencia complementaria.

Tabla 4. Correlaciones Spearman.

Variable meteorológica	Rho (Spearman)	p-valor	n
Precipitación (mm, suma por periodo)	-0.3147	0.2352	16
Temperatura (°C, media por periodo)	-0.1824	0.4991	16
Precipitación con rezago 1 periodo	-0.3250	0.2372	15
Temperatura con rezago 1 periodo	-0.3536	0.1961	15

El signo y la magnitud de ρ ayudan a distinguir posibles escenarios. Si la asociación entre clorofila-a y precipitación es positiva, puede sugerir un predominio del aporte de nutrientes y materia particulada desde la cuenca durante episodios lluviosos, con incremento posterior de biomasa. En cambio, si es negativa, puede reflejar efectos de dilución, mezcla, reducción de tiempo de residencia o aumento de turbidez que limita la penetración de luz y reduce la productividad aparente. Ambos comportamientos han sido reportados en distintos contextos y dependen del balance entre carga de nutrientes, estabilidad de la columna de agua y limitación por luz [18].

Con el fin de traducir estos patrones a una métrica interpretativa simple, se clasificó cada periodo en clases de potencial (bajo, medio, alto) combinando clorofila-a alta respecto a un umbral robusto y en relación a condiciones meteorológicas relativamente favorables. En 2025 no se registraron periodos clasificados como potencial alto (Fig. 4B; Tabla 3), y la clasificación se concentró en niveles bajo y medio. Esto sugiere que, bajo los criterios operativos definidos, los incrementos de clorofila-a (CHL-a) no coincidieron con condiciones meteorológicas simultáneamente favorables.

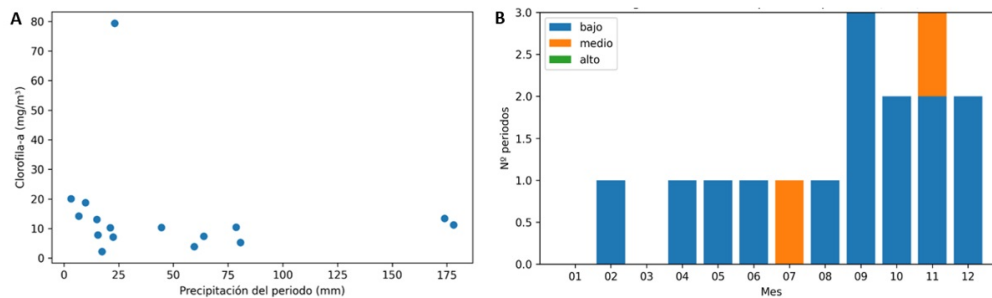


Fig. 4. A) Relación entre clorofila-a media y precipitación (Spearman, $\rho = -0,31$, $p = 0,235$), B) Clasificación mensual del potencial.

Este enfoque es consistente con la literatura que vincula floraciones con los nutrientes y el clima, puesto que, el calentamiento favorece tasas de crecimiento y dominancia de grupos oportunistas; simultáneamente, la hidrología controla aportes desde la cuenca y condiciones de mezcla o retención. En particular, múltiples revisiones destacan que la eutrofización y el cambio climático actúan de forma sinérgica para aumentar la frecuencia e intensidad de floraciones, especialmente de cianobacterias bajo escenarios de altas temperaturas [2].

Aunque el estudio incorporó probabilidad de cianobacterias flotantes (Tabla 1), los resultados agregados a escala anual muestran valores muy bajos en el periodo analizado, con un máximo anual reportado en la Tabla 2. Esto no descarta la presencia de cianobacterias en la columna de agua, pero sugiere que, al menos bajo el criterio del producto utilizado, no se detectaron acumulaciones superficiales persistentes compatibles con concentraciones flotantes marcadas durante el 2025.

Hay varias interpretaciones compatibles: las floraciones observadas podrían estar dominadas por otros grupos fitoplanctónicos como el aumento de clorofila-a sin señal de flotación; podría existir biomasa de cianobacterias principalmente subsuperficial que es menos detectable; o por limitaciones inherentes al algoritmo y a las condiciones ópticas locales que pueden reducir la detectabilidad. En teledetección de aguas interiores, estas limitaciones son conocidas, ya que, la complejidad óptica y la variabilidad de condiciones atmosféricas pueden afectar los productos derivados, por lo que la verificación *in situ* sigue siendo la referencia para confirmar composición taxonómica y toxicidad [14].

A. Alcances y limitaciones

En conjunto, las Fig. 1–4 y las Tablas 1–4 sostienen como resultado principal que, la teledetección con la serie de 10 días de clorofila-a permite detectar y localizar episodios y zonas recurrentes de alta productividad, y que la incorporación de meteorología mejora la interpretación de estos cambios como ventanas de mayor o menor potencial. Este esquema es muy valioso en contextos regionales donde el monitoreo *in situ* es discontinuo, puesto que, los mapas de puntos calientes (Fig. 3A) sirven para focalizar muestreos, la serie temporal (Fig. 2A) permite vigilar intensificación intra-anual, y la clasificación mensual (Fig. 4B) aporta un lenguaje operativo para gestión.

Como limitaciones, deben considerarse; la meteorología que proviene de un punto y no captura microclimas dentro de la cuenca (Tabla 1) [11]; la ausencia de variables clave como nutrientes, transparencia de Secchi, ficocianina, tiempos de residencia, impide una relación causa-efecto evidente; y en aguas ópticamente complejas la clorofila-a satelital debe interpretarse con cautela, preferentemente acompañada de validación de campo [6]. Estas limitaciones orientan futuras extensiones con validación *in situ* y la incorporación de indicadores hidrológicos.

CONCLUSIONES

Este estudio mostró que la integración de series satelitales de 10 días de clorofila-a con meteorología incorporada permite la construcción de una línea base operativa para monitorear el potencial de floraciones algales en embalses tropicales.

La combinación de umbrales basados en percentiles y cartografía de recurrencia espacial, resultó útil para localizar zonas persistentes y para guiar, de forma práctica, la priorización de muestreos e inspecciones, en lugar de establecer valores de referencia absolutos.

Las asociaciones evaluadas de clorofila-a y meteorología deben interpretarse como indicativas y no confirmatorias, dado el tamaño de muestra por periodos y la complejidad óptica e hidrodinámica del sistema; en este sentido, los resultados sirven principalmente para generar hipótesis de monitoreo sobre ventanas temporales de mayor variabilidad.

El indicador complementario de cianobacterias flotantes se comportó como una señal mínima en el periodo analizado, lo que sugiere que la vigilancia satelital del potencial se basó principalmente en clorofila-a y que la verificación de la composición fitoplanctónica requiere de campañas *in situ* específicas.

Como extensión inmediata, el flujo propuesto puede aplicarse a un monitoreo plurianual para comparar la recurrencia espacial y la variabilidad interanual bajo criterios consistentes, e incorporar variables hidrológicas y mediciones de nutrientes cuando estén disponibles para fortalecer la interpretación del potencial.

REFERENCIAS

- [1] T. D. Harris *et al.*, "What makes a cyanobacterial bloom disappear? a review of the abiotic and biotic cyanobacterial bloom loss factors," *Harmful Algae*, vol. 133, no. 3, p. 102599, mar 2024, doi: 10.1016/j.hal.2024.102599.
- [2] J. M. O'Neil, T. W. Davis, M. A. Burford, and C. J. Gobler, "The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change," *Harmful Algae*, vol. 14, pp. 313–334, feb 2012, doi: 10.1016/j.hal.2011.10.027.
- [3] L. Song *et al.*, "Harmful cyanobacterial blooms: Biological traits, mechanisms, risks, and control strategies," *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 48, pp. 123–147, nov 2023, doi: 10.1146/annurev-environ-112320-081653.
- [4] J. C. Ho, A. M. Michalak, and N. Pahlevan, "Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s," *Nature*, vol. 574, no. 7780, pp. 667–670, oct 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1648-7.
- [5] K. Shi, Y. Zhang, B. Qin, and B. Zhou, "Remote sensing of cyanobacterial blooms in inland waters: Present knowledge and future challenges," *Sci. Bull. (Beijing)*, vol. 64, no. 20, pp. 1540–1556, oct 2019, doi: 10.1016/j.scib.2019.07.002.
- [6] R. C. Lins, J. M. Martinez, D. da M. Marques, J. A. Cirilo, and C. R. Fragoso, "Assessment of chlorophyll-a remote sensing algorithms in a productive tropical estuarine-lagoon system," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 6, may 2017, doi: 10.3390/rs9060516.
- [7] B. W. Asres, M. G. Kebedew, M. D. Nerae, S. Tsegaye, and F. A. Zimale, "Remote sensing-based estimation of chlorophyll-a concentrations in a water hyacinth-infested tropical headwaters lake: A study of lake tana, ethiopia," *Frontiers in Water*, vol. 7, p. 1600222, nov 2025, doi: 10.3389/frwa.2025.1600222.
- [8] Z. Zhang, J. Liu, R. Deng, Z. Hu, and S. Pan, "Satellite remote sensing of algal blooms in seagoing river in eastern china," *Front. Mar. Sci.*, vol. 12, 2025, doi: 10.3389/fmars.2025.1620021.
- [9] B. N. Lopez Barreto, E. L. Hestir, C. M. Lee, and M. W. Beutel, "Satellite remote sensing: A tool to support harmful algal bloom monitoring and recreational health advisories in a california reservoir," *Geohealth*, vol. 8, no. 2, p. e2023GH000941, feb 2024, doi: 10.1029/2023GH000941.
- [10] NASA POWER, "Documentación — servicios de datos — api diaria," En línea, disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/docs/services/api/temporal/daily/>. Accedido: Feb. 05, 2026.
- [11] —, "Documentación — tutoriales — parámetros," En línea, disponible en: https://power.larc.nasa.gov/docs/tutorials/parameters/?utm_source=. Accedido: Feb. 04, 2026.

- [12] N. Janatian *et al.*, "A review on remote-sensing-based harmful cyanobacterial bloom monitoring services," *Remote Sens. Appl.*, vol. 37, no. 9, p. 101488, jan 2025, doi: 10.1016/j.rsase.2025.101488.
- [13] S. C. J. Palmer, T. Kutser, and P. D. Hunter, "Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions," *Remote Sens. Environ.*, vol. 157, pp. 1–8, feb 2015, doi: 10.1016/j.rse.2014.09.021.
- [14] D. Odermatt, A. Gitelson, V. E. Brando, and M. Schaepman, "Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery," *Remote Sens. Environ.*, vol. 118, pp. 116–126, mar 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.11.013.
- [15] Copernicus Land Monitoring Service, "Calidad del agua del lago 2024-presente (ráster de 300 m), global, 10 diarios – versión 2," En línea, disponible en: https://land.copernicus.eu/en/products/water-bodies/lake-water-quality-near-real-time-v2-0-300m?utm_source=. Accedido: Feb. 04, 2026.
- [16] N. A. Ramírez-Silva, J. L. Muñoz-Yustres, and A. G. García-Gómez, "Perfil de la contaminación por microplásticos en el agua del embalse betania, departamento del huila, colombia," *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, vol. 28, no. 1, 2025, doi: 10.31910/rudca.v28.n1.2025.2593.
- [17] P. Martínez-García, J. Delgado, and J. Muñoz, "Diversidad de géneros del fitoplancton del embalse de betania–huila y su importancia como bioindicadores," *Revista Científica*, vol. 25, no. 2, pp. 241–251, 2016, doi: 10.14483/udistrital.jour.RC.2016.25.a8.
- [18] H. W. Paerl and T. G. Otten, "Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls," *Microb. Ecol.*, vol. 65, no. 4, pp. 995–1010, may 2013, doi: 10.1007/s00248-012-0159-y.