



Lago de Valencia: Radiografía Satelital de su Salud Ecológica (Junio 2026)

Estudio Satelital de Eutrofización, Clorofila y Material Suspendido (Junio 2026)

Declaración del alcance

Este estudio es producto de las capacidades de procesamiento de datos del Centro de Investigación Informática Lazarus, potenciadas mediante el uso de Inteligencia Artificial (IA) para la interpretación avanzada de información geoespacial.

El presente documento constituye un referente de análisis satelital de alerta temprana enfocado en establecer potenciales escenarios y situaciones de interés. Su función principal es actuar como un mapa preliminar para orientar con precisión las evaluaciones y los muestreos en terreno, sirviendo como material de apoyo técnico para investigaciones de mayor profundidad a cargo de especialistas en las áreas de teledetección y disciplinas afines.

Nota: Este reporte no constituye un diagnóstico definitivo, sino un insumo estratégico para optimizar la labor analítica e investigativa en campo. Todos los hallazgos presentados requieren validación adicional en terreno por especialistas competentes.

Descripción General

El presente documento detalla el flujo de trabajo computacional ejecutado por el Centro de Investigación Informática Lazarus para evaluar el nivel de estrés ecológico severo en el ecosistema lacustre del Lago de Valencia (Los Tacarigua). A través del procesamiento avanzado de imágenes satelitales ópticas captadas a finales de mayo y junio de 2026, se analizó la calidad del agua aislando variables bioquímicas con alta confianza estadística.

Metodología del Procesamiento Geoespacial

1. **Máscara Diferencial de Agua (MNDWI):** El Índice Diferencial de Agua Modificado (MNDWI) es un operador algebraico multiespectral aplicado para aislar de manera estricta el cuerpo lacustre, lo cual resulta de vital relevancia en el análisis geoespacial para evitar la interferencia de la reflectancia terrestre en los algoritmos posteriores de calidad de agua. (Fuente: [Modification of normalised difference water index \(NDWI\) to enhance open water features in remotely sensed imagery](#))
2. **Redes Neuronales Acopladas (C2RCC):** El procesador Case 2 Regional Coast Colour (C2RCC) es una arquitectura de redes neuronales diseñada específicamente para derivar con alta precisión las capas de clorofila y material suspendido en cuerpos de agua

ópticamente complejos. Su integración multidisciplinaria es crucial en la teledetección moderna para superar las limitaciones de los modelos bio-ópticos estándar al momento de desenredar firmas espectrales mixtas en ecosistemas turbios. (Fuente: [EVOLUTION OF THE C2RCC NEURAL NETWORK FOR SENTINEL 2 AND 3 FOR THE RETRIEVAL OF OCEAN COLOUR PRODUCTS IN NORMAL AND EXTREME OPTI](#))

3. **Biomasa Superficial e Índice NDCI (Clorofila):** El Índice de Clorofila de Diferencia Normalizada (NDCI) permite detectar espectralmente la biomasa mediante tonos cálidos (rojo/naranja) que cuantifican una alta densidad en la floración de microorganismos acuáticos. Esta variable posee una inmensa relevancia oceanográfica y biológica, ya que dicha biomasa bloquea la penetración fótica y genera un agotamiento severo del oxígeno disuelto (anoxia inducida) al entrar en fase de descomposición. (Fuente: [Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters - ScienceDirect](#))
4. **Material Suspendido Total (TSM):** Representa el aislamiento de la reflectancia de partículas inorgánicas en suspensión, cobrando gran relevancia en la hidrodinámica litoral al permitir la identificación de emisores focales (como las desembocaduras de los ríos Maracay/Aragua y Cabriales) que inyectan cargas masivas de sedimentos pesados hacia los márgenes del ecosistema lacustre. (Fuente: [Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters - ScienceDirect](#))
5. **Patrones Hidrodinámicos (Vórtices de Retención):** Consiste en la detección espacial de corrientes superficiales manifestadas como remolinos y vetas de algas acumuladas. Su relevancia radica en comprender la dinámica de circulación física del cuerpo de agua, evidenciando cómo estos vórtices atrapan y concentran la biomasa en el centro del lago, impidiendo su dispersión natural hacia las costas. (Fuente: publicaciones del International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG) y el NOAA (GLERL). URL: [IOCCG](#) - [NOAA Great Lakes Environmental Research Laboratory](#)).

Parámetros de Visualización y Lectura del Mapa NDCI

Para la representación cartográfica en **SNAP (Sentinel Application Platform)**, los valores derivados del índice NDCI se estructuraron mediante una **rampa de colores discreta**.

Dicha escala de clasificación distribuye la densidad del fitoplancton (clorofila-a) asignando tonalidades cálidas a las zonas de mayor concentración bio-óptica y frías a los sectores de menor densidad. A continuación, se detallan las especificaciones técnicas necesarias para reproducir la simbología empleada:

1. Umbrales Técnicos de la Escala de Color

La variación espacial de la biomasa se dividió en 6 rangos definidos por los siguientes umbrales numéricos de NDCI:

- **Rojo (0.1376):** Límite máximo; indica eutrofización crítica y concentración máxima de biomasa.
- **Amarillo (-0.1736):** Densidad de clorofila alta.

- **Verde (-0.2619):** Densidad intermedia.
- **Cian / Celeste (-0.2935):** Nivel moderado a bajo.

Con el objetivo de generar la visualización cartográfica en la plataforma **SNAP (Sentinel Application Platform)**, se implementó una **rampa de colores discreta** a partir de las estimaciones obtenidas mediante el índice NDCI.

Esta escala simbólica categoriza la concentración de fitoplancton (clorofila-a) asignando tonalidades cálidas a las áreas de mayor densidad bio-óptica y tonos fríos a los sectores de menor concentración. A continuación, se detallan las especificaciones técnicas de la leyenda empleada y el procedimiento para su reproducción:

1. Parámetros Técnicos de la Rampa de Color

La gradación espacial de la biomasa se estratificó en 6 intervalos clave definidos por los siguientes umbrales numéricos del índice NDCI:

- **Rojo (0.1376):** Umbral superior correspondiente a la máxima acumulación biológica y eutrofización crítica.
- **Amarillo (-0.1736):** Concentración elevada de clorofila.
- **Verde (-0.2619):** Rango de densidad intermedia.
- **Celeste / Cian (-0.2935):** Nivel moderado a bajo.
- **Azul (-0.3021):** Concentración baja de fitoplancton.
- **Negro (-0.3052):** Valor mínimo registrado, asociado a aguas oligotróficas o transparente reflectancia espectral.

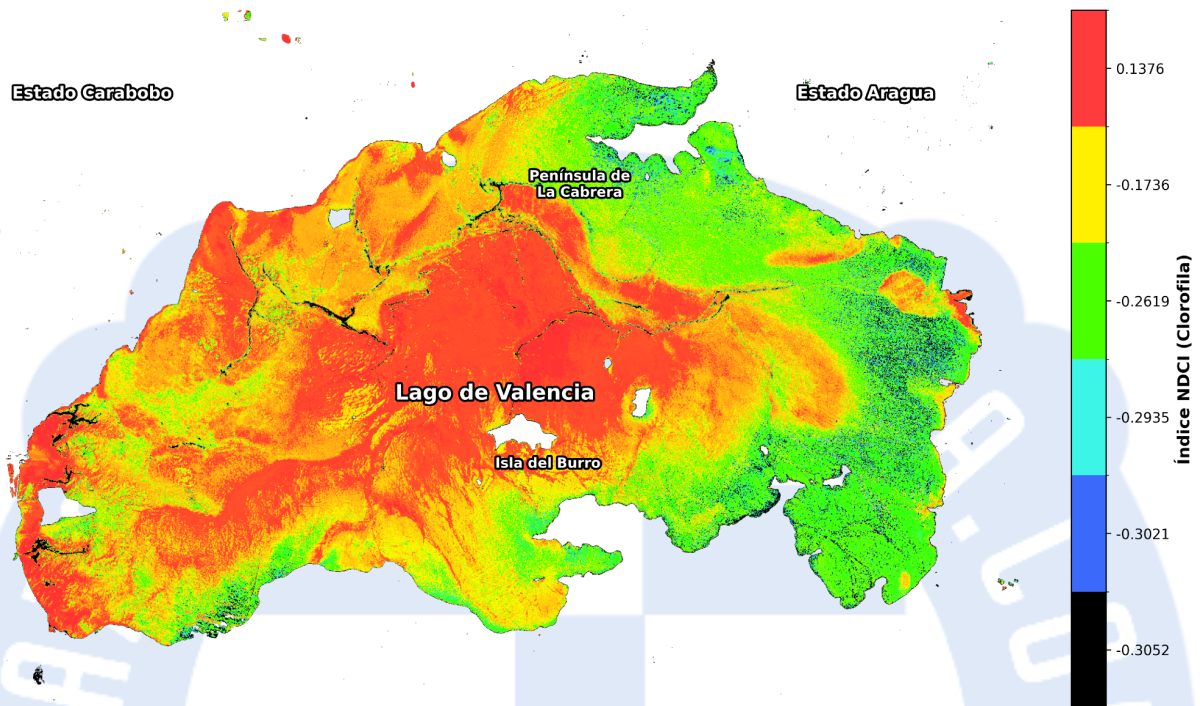
Para obtener esta representación visual en **SNAP (Sentinel Application Platform)**, se ha aplicado una **rampa de colores discreta (discrete color ramp)** sobre el producto ráster resultante del cálculo del índice NDCI.

Esta simbología utiliza una escala de colores para clasificar los niveles de concentración de fitoplancton (clorofila), donde los colores cálidos indican mayor densidad y los fríos menor. A continuación, detallo los parámetros técnicos de la leyenda visible: **Parámetros de la Rampa de Color (Simbología)**

La configuración se basa en un esquema de 6 niveles (o intervalos) definidos por los siguientes valores críticos del índice NDCI:

- **Rojo (0.1376):** Valor máximo. Representa el núcleo de máxima eutrofización/biomasa.
- **Amarillo (-0.1736):** Nivel alto de clorofila.
- **Verde (-0.2619):** Nivel intermedio.
- **Celeste/Cian (-0.2935):** Nivel moderado-bajo.
- **Azul (-0.3021):** Nivel bajo.
- **Negro (-0.3052):** Valor mínimo. Representa áreas con mínima reflectancia de clorofila o agua clara.

Mapa de Índice NDCI - Lago de Valencia (Los Tacarigua)



Interpretación de los Datos Satelitales (Ráster NDCI)

- **Núcleo Hiper-eutrófico (Centro-Occidente):** Se observa que los valores máximos de reflectancia para el índice de clorofila (codificados en la rampa de color mediante tonos rojos y naranjas, con valores superiores cercanos a -0.1376) dominan abrumadoramente la porción central y occidental del ecosistema. Esta biomasa envuelve la **Isla del Burro** y se proyecta densamente hacia las costas del **Estado Carabobo**, delimitando espacialmente la zona crítica de posible asfixia biológica.
- **Gradiente de Transición (Oriente):** En contraste, el sector oriental correspondiente al **Estado Aragua**, particularmente al este de la **Península de La Cabrera**, exhibe una caída abrupta en los valores del índice (tonos verdes, celestes y azules, descendiendo hasta -0.3052). Esto sugiere una menor concentración de fitoplancton superficial en estas bahías.
- **Huella Hidrodinámica:** La morfología de la concentración roja central no es homogénea; presenta texturas arremolinadas y estrias fluidas. Este patrón visual respalda sólidamente la hipótesis de la existencia de vórtices de retención que atrapan mecánicamente la floración en el dominio pelágico.

Hallazgos Preliminares, Hipótesis y Riesgos Derivados

A partir de los datos recabados, el análisis exploratorio permite proyectar los siguientes escenarios de alerta temprana:

- **Mortalidad de Fauna y Asfixia Biológica:**
 - Hipótesis: La prolongada estabilidad térmica y luminica de la columna de agua fomenta el desarrollo explosivo de biomasa anóxica. Esto genera un riesgo inminente de mortandad masiva de peces en el ambiente pelágico debido al agotamiento del oxígeno.
- **Salud Pública y Vulnerabilidad Toxicológica:**
 - Hipótesis: La firma espectral detectada sugiere la presencia de cepas de cianobacterias productoras de toxinas. Ante la amenaza para la salud pública, es indispensable realizar una validación toxicológica in situ mediante recolección de muestras.
- **Riesgo para la Infraestructura Costera:**
 - Hipótesis: El flujo constante de sedimentos pesados inyectados por los tributarios causa un peligro operativo de carácter físico. En consecuencia, las instalaciones y redes locales de agua corren riesgo de sufrir taponamientos o daños por abrasión.
- **Control de la Incertidumbre:**
 - Hipótesis: Los gradientes de velocidad del viento y la batimetría del lecho lacustre determinan la morfología y permanencia de los vórtices de retención. Es imperativo contrastar los datos satelitales con registros de vientos y perfiles batimétricos actualizados.

Recomendaciones Estratégicas y Mitigación

Con base en el diagnóstico extraído de las imágenes, se determinó el abandono de enfoques homogéneos a favor de estrategias geográficamente focalizadas:

1. **Estrategia Pelágica (Centro/Occidente):** Priorizar la implementación de tecnologías de remoción biológica masiva, sistemas de oxigenación forzada o contención química para mitigar la hipoxia y el riesgo de muerte de fauna.
2. **Estrategia Litoral (Este/Noreste):** Instalación urgente de sistemas de filtración física en las desembocaduras de los ríos tributarios para detener la inyección continua de material suspendido inorgánico.

Autoría y Créditos Institucionales

- **Laboratorio / Entidad:** Centro de Investigación Informática Lazarus.
- **Declaración de Verificación:** Todo el procesamiento óptico multiespectral documentado en este informe constituye una evaluación generada estrictamente para Fines de Estudio e Investigación.