

Reconocimiento de Patrones en Imágenes Satelitales para Analizar la Proliferación de Lentejas de Agua en el Lago Titicaca (2021–2025)

Joel Antoni Quispe Cruz
Universidad Nacional del
Altiplano – FINESI
Email:
73313305@est.unap.edu.pe

Nelson Catunta Huisa
Universidad Nacional del
Altiplano – FINESI
Email:
ncatuntah@est.unap.edu.pe

Fred Torres Cruz
Universidad Nacional del
Altiplano – FINESI
Email:
ftorres@unap.edu.pe

Resumen—En este estudio se desarrolla un sistema de análisis computacional basado en procesamiento digital de imágenes para la detección y cuantificación de la cobertura de lentejas de agua en el Lago de Puno, utilizando imágenes satelitales adquiridas entre los años 2021 y 2025. Se emplea un enfoque metodológico que incluye la recopilación estandarizada de imágenes desde Google Earth Pro, su georreferenciación, y un riguroso preprocesamiento (conversión al espacio de color HSV, filtrado morfológico y normalización cromática). Posteriormente, se aplica segmentación por umbrales en el canal de matiz para identificar con precisión las zonas de vegetación flotante. A partir de las máscaras generadas, se extraen métricas espaciales como el área cubierta (en píxeles) y el porcentaje de cobertura respecto al área total analizada. Se implementa un sistema de fraccionamiento para dividir las imágenes en fragmentos homogéneos, lo que permite un análisis comparativo más granular. La validación de los rangos HSV se realizó mediante calibración manual y comparación visual. Finalmente, se lleva a cabo un análisis cuantitativo entre ambos años, evidenciando un incremento significativo en la presencia de lentejas de agua, visualizado a través de mapas segmentados, gráficos de pastel, y reportes estadísticos descriptivos. Los resultados evidencian el potencial del procesamiento computacional de imágenes como herramienta eficaz para el monitoreo ambiental.

Index Terms—Contaminación ambiental, lentejas de agua, segmentación por color, análisis satelital, monitoreo ecológico, visión por computadora.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de lentejas de agua en cuerpos acuáticos es un fenómeno que puede alterar significativamente los ecosistemas, afectando la calidad del agua, la biodiversidad y las actividades humanas vinculadas al lago. En la ciudad de Puno, el crecimiento acelerado de estas plantas sobre la superficie del lago Titicaca se ha convertido en un problema ambiental visible y preocupante. Frente a esta situación, se vuelve crucial desarrollar métodos eficientes para estimar su extensión y monitorear su evolución en el tiempo.

En este contexto, surgen los métodos automatizados de análisis de imágenes y video como una alternativa prometedora. Los avances en el reconocimiento visual de patrones, apoyados por técnicas computacionales de visión por computadora y aprendizaje automático, han demostrado ser efectivos para

detectar y cuantificar elementos específicos dentro de entornos complejos [1].

Sin embargo, aplicar estos métodos en escenarios naturales plantea retos asociados a la precisión, la variabilidad de condiciones (como iluminación o turbidez del agua), y la necesidad de interpretabilidad en los resultados. Es indispensable que los modelos utilizados no solo sean precisos, sino también comprensibles para investigadores ambientales, autoridades locales y tomadores de decisiones [2].

En este trabajo se propone una aplicación de técnicas de reconocimiento de patrones visuales y análisis computacional para estimar el porcentaje de cobertura de lentejas de agua (*Lemna* spp.) en sectores seleccionados del lago de Puno, una zona acuática de importancia ecológica y social en el altiplano peruano. Para ello, se emplean imágenes satelitales capturadas mediante la plataforma Google Earth, las cuales son tratadas mediante una serie de algoritmos de procesamiento digital, segmentación por color y clasificación de regiones. El enfoque metodológico combina principios de visión por computadora con métricas estadísticas aplicadas a nivel de píxeles.

Entre las técnicas utilizadas se incluyen métodos de segmentación basados en umbrales definidos sobre el espacio de color HSV, que permiten distinguir con precisión tonalidades verdes asociadas a vegetación flotante. Además, se exploran mecanismos de agrupamiento visual (clustering de píxeles) y se implementa un sistema de fraccionamiento espacial para dividir las imágenes en fragmentos homogéneos, lo que posibilita un análisis más granular de la distribución geográfica de la cobertura vegetal.

El análisis interpretativo de los resultados permitió establecer comparaciones entre los años 2021 y 2025, cuantificando variaciones espaciales y temporales en la cobertura de lentejas de agua. Estas comparaciones se plasmaron mediante gráficos estadísticos, tablas de cobertura porcentual y mapas segmentados que evidencian las zonas más afectadas por la proliferación de vegetación flotante.

II. DATASET Y PREPROCESAMIENTO

La fuente de datos utilizada en este estudio fue elaborada específicamente para este trabajo, a partir de imágenes sate-

liales del lago de Puno capturadas mediante la plataforma Google Earth. Se seleccionaron imágenes correspondientes a dos años distintos: 2021 y 2025, con el objetivo de comparar visualmente la evolución de la cobertura de lentejas de agua en ese intervalo temporal. Ambas imágenes se centraron en una misma zona del lago, definida por un perímetro constante de 2.088,12 metros y un área total de 166.236,75 metros cuadrados, garantizando así la comparabilidad espacial entre los años analizados. La selección temporal se realizó considerando condiciones climáticas similares (épocas del año con mínima nubosidad y alta visibilidad), con el fin de minimizar sesgos estacionales y asegurar una calidad homogénea en la adquisición de datos.

Para facilitar la extracción de patrones visuales y permitir un análisis más granular, se desarrolló una herramienta personalizada en Python que permitió procesar las imágenes y aplicar transformaciones específicas. En particular, se utilizó una técnica de inversión de colores, la cual resultó útil para realzar el contraste entre el cuerpo de agua y las regiones cubiertas por vegetación flotante (como las lentejas de agua). Este paso fue fundamental para mejorar la precisión de las etapas posteriores de segmentación y análisis de cobertura, y para facilitar la identificación visual durante el proceso de validación. Además, cada imagen fue fraccionada en una cuadrícula de 25 fragmentos (5x5), lo que permitió evaluar la distribución espacial de las lentejas con mayor detalle, y registrar sus valores de cobertura por fragmento.

Una vez invertidos los colores, se procedió al análisis de componentes de color (por ejemplo, niveles RGB y conversión al espacio HSV) y a la segmentación por umbral adaptativo para separar las distintas regiones de interés. Mediante este enfoque, fue posible clasificar las áreas visibles del lago en tres categorías: agua libre, zona con lentejas de agua y otros elementos (como sombra, sedimentos o vegetación ribereña no flotante). La segmentación se validó manualmente para garantizar su coherencia visual con la imagen original, empleando herramientas interactivas que permitieron calibrar los rangos cromáticos del verde en el espacio HSV. Estos rangos fueron posteriormente aplicados de forma automática a todos los fragmentos del dataset.

A partir de la segmentación, se calcularon los porcentajes relativos de cada categoría sobre la superficie total del lago y por fragmento, lo que permitió estimar de manera robusta la proporción de lentejas de agua en ambos años y establecer comparaciones cuantitativas. Adicionalmente, se exportaron estadísticas básicas como el área cubierta por lentejas en metros cuadrados, la cobertura porcentual por clase (agua, vegetación, resto), y la variación relativa entre 2021 y 2025. Todos estos resultados fueron organizados en tablas estructuradas (CSV), facilitando su análisis posterior mediante gráficos y reportes.

El uso de imágenes reales, una zona geográfica constante y un proceso cuidadosamente planificado para recuperar la información aseguran que los resultados obtenidos sean fiables y reflejen con precisión los cambios ocurridos en la vegetación del lago. Este enfoque no solo permite observar con claridad

la evolución de las lentejas de agua a lo largo del tiempo, sino que también puede aplicarse fácilmente a otros lagos con características similares y acceso a imágenes satelitales comparables. Además, esta metodología podría fortalecerse aún más incorporando herramientas de análisis automatizado o técnicas de inteligencia artificial, lo que abriría la posibilidad de monitorear áreas más grandes de forma rápida y sistemática. Esto sería especialmente útil para mejorar la vigilancia ambiental, anticiparse a posibles problemas ecológicos, y tomar decisiones más acertadas para proteger los ecosistemas acuáticos. En definitiva, se trata de un método adaptable, replicable y con gran potencial para contribuir al cuidado del medio ambiente desde una perspectiva tecnológica y sostenible.

Imagen satelital en: <https://is.gd/5RQr1o>

Cuadro I
MEDICIÓN SATELITAL DE LA BAHÍA (GOOGLE EARTH PRO, 2025)

Parámetro	Valor
Perímetro	2,088.12 m
Área	166,326.75 m ²
Herramienta	Google Earth Pro
Fecha	2025



Figura 1. Google Earth. G. [Mapa del perímetro del lago de Puno]. Recuperado el 02 de junio, 2025 de.

Cuadro II
MEDICIÓN SATELITAL DE LA BAHÍA (GOOGLE EARTH PRO, 2021)

Parámetro	Valor
Perímetro	2,088.12 m
Área	166,326.75 m ²
Herramienta	Google Earth Pro
Fecha	2021



Figura 2. Google Earth. G. [Mapa del perímetro del lago de Puno]. Recuperado el 10 de noviembre, 2021 de.

III. METODOLOGÍA

Con el objetivo de evaluar los cambios en la cobertura de lentejas de agua en el lago de Puno entre los años 2021 y 2025, se recopilieron imágenes satelitales de alta resolución desde la plataforma Google Earth Pro. Las imágenes fueron capturadas manualmente, asegurando la misma escala, área geográfica y condiciones similares de iluminación y visibilidad (preferentemente en días despejados y en épocas equivalentes del año, para evitar sesgos estacionales). Cada imagen fue georreferenciada y recortada para mantener una zona de estudio constante entre ambos años.

A partir de estas imágenes, se aplicó una metodología computacional de análisis ambiental automatizado basada en visión por computadora, estructurada en varias etapas:

Primero, se realizó el fraccionamiento sistemático de las imágenes en múltiples fragmentos más pequeños, dividiendo cada imagen en una cuadrícula regular. Este proceso se implementó en Python utilizando la librería PIL, calculando el tamaño proporcional de cada fragmento con base en el número de filas y columnas deseadas. Los fragmentos fueron almacenados individualmente en una carpeta organizada, generando una base de datos visual homogénea para el análisis posterior. Aunque este procedimiento no involucra estadística directamente, sienta las bases para estudios cuantitativos sobre unidades espaciales comparables entre ambos años.

Luego, se llevó a cabo una calibración visual exploratoria de los colores verdes, con el fin de identificar con precisión los valores HSV (Hue, Saturation, Value) correspondientes a las lentejas de agua. Para esto, se implementó una herramienta interactiva que permitía al usuario hacer clic en regiones verdes de las imágenes, registrando el valor HSV de cada píxel seleccionado. Esta calibración empírica permitió establecer

rangos de umbral óptimos para la detección de vegetación flotante, adaptándose a las condiciones cromáticas particulares del entorno lacustre analizado.

A partir de los rangos calibrados, se aplicó un proceso de segmentación automática por color sobre cada imagen fragmentada. Cada fragmento fue convertido a espacios de color HSV y Lab, y se utilizaron máscaras binarias para identificar tres categorías principales: zona azul (lago), zona verde (vegetación flotante), y zona roja (otros elementos, como orillas o estructuras). La segmentación del agua se realizó mediante umbralización adaptativa (Otsu) sobre la imagen en escala de grises, mientras que la vegetación se delimitó con filtros inRange sobre el canal Hue del espacio HSV.

Una vez segmentadas las clases ecológicas, se realizó una cuantificación estadística de cobertura por clase. Para cada fragmento, se contó el número de píxeles correspondientes a cada categoría y se calculó su proporción respecto al total, generando así medidas de frecuencia relativa (porcentajes) para azul, verde y rojo. Estos datos fueron organizados en tablas (DataFrames) y exportados a archivos CSV para su posterior análisis. Esta etapa corresponde a una forma de estadística descriptiva computacional, aplicada a nivel de píxeles segmentados.

Además, se implementó un proceso automatizado de procesamiento por lote, que permite aplicar la segmentación a múltiples imágenes contenidas en una carpeta, generando imágenes procesadas, vistas previas comparativas (imagen original vs. segmentada) y registros tabulados de resultados. Esto facilitó la comparación temporal entre años, la validación visual y el análisis sistemático de grandes volúmenes de imágenes.

Finalmente, se realizó una comparación cuantitativa y visual entre los resultados obtenidos para los años 2021 y 2025. Se calcularon promedios, desviaciones estándar y tasas de cambio de la cobertura vegetal, permitiendo evidenciar un incremento en la proporción de lentejas de agua en la zona de estudio. Esta evolución fue representada mediante gráficos de pastel, diagramas de barras y mapas comparativos, facilitando la interpretación de los cambios espaciales y temporales.

Todos los procesos fueron realizados íntegramente en Python, utilizando bibliotecas como OpenCV (procesamiento de imágenes), NumPy (cálculos matriciales), Matplotlib (visualización), Pandas (gestión de datos) y PIL (manipulación de imágenes). Esta metodología asegura la reproducibilidad del análisis, la automatización del monitoreo y su potencial aplicación en otros entornos lacustres con características similares.

IV. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

A. Adquisición de datos e imágenes satelitales

Para evaluar la cobertura de lentejas de agua en el lago Titicaca durante el año 2025 y 2021, se utilizó la plataforma Google Earth Pro para capturar imágenes satelitales del área de estudio correspondiente a la bahía de Puno. Estas imágenes fueron tomadas durante el mismo periodo estacional con el fin de mantener condiciones comparables en términos de iluminación, nivel del lago y actividad biológica.

Las imágenes fueron segmentadas en múltiples fragmentos con el objetivo de facilitar un análisis espacial más detallado. Se obtuvieron un total de 25 fragmentos, los cuales fueron nombrados sistemáticamente (por ejemplo, *fragmento00.png*, *fragmento32.png*, *etc.*).

Esta estrategia permitió identificar con mayor precisión las variaciones locales en la cobertura del lago, como la proliferación de lentejas acuáticas o la pérdida de superficie de agua limpia, proporcionando una base más robusta para la comparación temporal entre años.

B. Clasificación de coberturas y procesamiento digital

Cada fragmento fue procesado mediante técnicas de segmentación de color en el espacio HSV, para identificar y cuantificar tres categorías principales de cobertura superficial(rojo, azul y verde):

Porcentaje Azul: Representa áreas de agua limpia (sin proliferación visible). Porcentaje Verde: Corresponde a zonas cubiertas por lentejas de agua es decir el área contaminada. Porcentaje Rojo: Agrupa el resto de los elementos presentes en la imagen, incluyendo bordes terrestres, contaminantes flotantes u objetos artificiales.

El procesamiento se realizó usando scripts automatizados en Python, empleando la biblioteca OpenCV para el análisis de color y la extracción de estadísticas por imagen. Los porcentajes fueron normalizados sobre el área total visible del fragmento, excluyendo márgenes irrelevantes o no acuáticos.

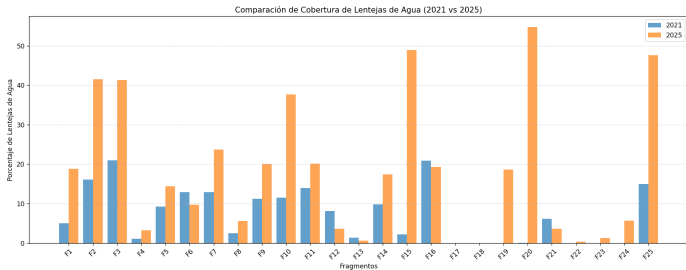


Figura 3. Ilustración/Gráfico/Histograma original creado por: [Joel A. Quispe Cruz y Nelson Catunta H.]

Incremento general: El porcentaje promedio de cobertura de lentejas en el lago se más que duplicó de 8.41 % en el 2021 a 19.61 % en el 2025.

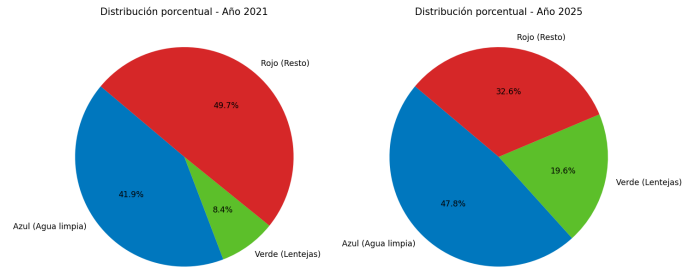


Figura 4. Ilustración/Gráfico/Gráfico circular original creado por: [Joel A. Quispe Cruz y Nelson Catunta H.]

Cuadro III
COBERTURA VEGETAL EN LOS FRAGMENTOS ANALIZADOS PARA LOS AÑOS 2021 Y 2025

Fragmento	2021 (%)	2025 (%)	Dif. (%)
fragmento_0_0.png	5.04	18.83	+13.79
fragmento_0_1.png	16.12	41.51	+25.39
fragmento_0_2.png	20.99	41.31	+20.32
fragmento_0_3.png	1.07	3.25	+2.18
fragmento_0_4.png	9.25	14.41	+5.16
fragmento_1_0.png	12.91	9.75	-3.16
fragmento_1_1.png	12.87	23.67	+10.80
fragmento_1_2.png	2.51	5.63	+3.12
fragmento_1_3.png	11.25	20.08	+8.83
fragmento_1_4.png	11.48	37.64	+26.16
fragmento_2_0.png	13.90	20.17	+6.27
fragmento_2_1.png	8.15	3.64	-4.51
fragmento_2_2.png	1.36	0.64	-0.72
fragmento_2_3.png	9.80	17.42	+7.62
fragmento_2_4.png	2.21	48.94	+46.73
fragmento_3_0.png	20.86	19.32	-1.54
fragmento_3_1.png	0.00	0.00	0.00
fragmento_3_2.png	0.00	0.00	0.00
fragmento_3_3.png	0.00	18.61	+18.61
fragmento_3_4.png	0.01	54.72	+54.71
fragmento_4_0.png	6.13	3.57	-2.56
fragmento_4_1.png	0.00	0.30	+0.30
fragmento_4_2.png	0.00	1.27	+1.27
fragmento_4_3.png	0.00	5.71	+5.71
fragmento_4_4.png	14.99	47.62	+32.63

Cuadro IV
ESTADÍSTICAS RESUMIDAS POR AÑO

Métrica	2021	2025	Dif.
Media (% lentejas)	8.41 %	19.61 %	+11.2 %
Desv. estándar	7.51	15.75	+8.24
Frag. >10 %	12/25 (48 %)	19/25 (76 %)	+28 %
Frag. >20 %	4/25 (16 %)	11/25 (44 %)	+28 %
Frag. sin lentejas	5	2	-3
Máx. cobertura	20.99 %	54.72 %	+33.73 %

Mayor proliferación: Algunos fragmentos, especialmente *fragmento_3_4.png* y *fragmento_2_4.png*, mostraron un aumento muy significativo, pasando de niveles casi nulos a coberturas muy altas de lentejas de agua (más del 45 %).

Incremento en fragmentos con proliferación notable: En 2021 no hubo fragmentos con más de 30 % de lentejas, mientras que en 2025 el 36 % de los fragmentos superan ese umbral, lo que indica una extensión considerable de áreas muy afectadas y una tendencia preocupante de expansión acelerada, posiblemente favorecida por factores ambientales y antrópicos.

Fragmentos estables o con leve disminución: Solo unos pocos fragmentos presentaron disminución en la cobertura de lentejas, pero son la excepción. Implicancias ecológicas: La proliferación de lentejas sugiere procesos de eutrofización más avanzados y posibles impactos negativos en la calidad del agua, la biodiversidad acuática y el uso del lago.

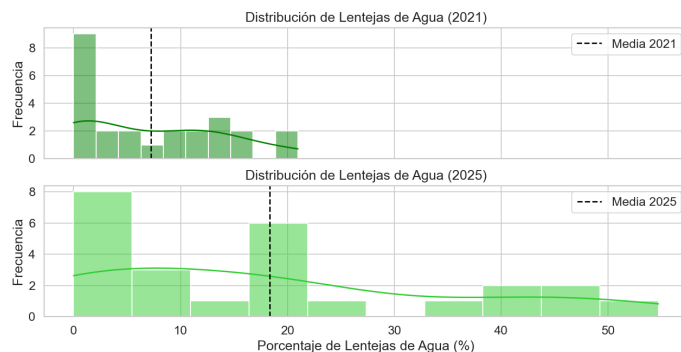


Figura 5. Ilustración/Gráfico/Histograma original creado por: [Joel A. Quispe Cruz y Nelson Catunta H.]

V. CONCLUSIONES

Este fenómeno de expansión no fue homogéneo en toda la bahía de Puno. Algunos sectores del lago, como los correspondientes a los fragmentos `fragmento_3_4` y `fragmento_2_4`, mostraron incrementos especialmente alarmantes, alcanzando coberturas de hasta 54.72 % en 2025, en comparación con niveles casi nulos en 2021. Este crecimiento acelerado sugiere un proceso de eutrofización avanzado, probablemente impulsado por el incremento en la carga de nutrientes en el agua, derivado del vertido de aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola rica en fertilizantes, y residuos sólidos urbanos que ingresan sin tratamiento adecuado al ecosistema lacustre. El presente estudio realizó un análisis comparativo de la cobertura de lentejas de agua en el Lago Titicaca durante los años 2021 y 2025, empleando imágenes satelitales fragmentadas para evaluar las proporciones relativas de agua limpia (azul), lentejas (verde) y otras coberturas (rojo). Estas imágenes fueron procesadas mediante técnicas de segmentación en el espacio de color HSV, permitiendo la extracción precisa de áreas con presencia de vegetación flotante. El análisis cuantitativo mostró que los niveles de cobertura por lentejas de agua aumentaron significativamente en numerosos fragmentos, pasando de una media del 8.41 % en 2021 a un 19.61 % en 2025, lo que representa un incremento relativo superior al 30 %. Desde una perspectiva ecológica, la expansión masiva de las lentejas de agua tiene consecuencias negativas directas. La cobertura excesiva impide la penetración de la luz solar en el agua, limita la fotosíntesis de otras especies acuáticas, reduce el oxígeno disuelto y genera condiciones anóxicas en el fondo, lo que perjudica a peces, macroinvertebrados y microorganismos. A largo plazo, estas condiciones pueden generar cambios drásticos en la estructura ecológica del lago, disminuyendo su biodiversidad y resiliencia.

Además, el fenómeno también acarrea consecuencias socioeconómicas. Las comunidades que dependen de la pesca artesanal, el turismo lacustre y la navegación fluvial se ven afectadas por la presencia densa de vegetación flotante, que entorpece el tránsito, deteriora la estética del paisaje y reduce

el valor recreativo y económico del lago. La presencia continua de estas plantas también puede incrementar la frecuencia de plagas y la proliferación de mosquitos, impactando en la salud pública.

En conclusión, la comparación entre los años 2021 y 2025 pone en evidencia una tendencia clara al incremento de la proliferación de lentejas de agua en el Lago Titicaca. Esta situación exige una respuesta urgente por parte de las autoridades ambientales y del gobierno regional. Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo a través de sensores remotos, acciones de mitigación que reduzcan el ingreso de nutrientes al lago, y políticas públicas enfocadas en la educación ambiental, el saneamiento básico y la recuperación de ecosistemas acuáticos. Solo mediante un enfoque integral será posible revertir esta tendencia y preservar el equilibrio ecológico y la funcionalidad del lago más alto del mundo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Escuela Profesional de Ingeniería Estadística e Informática (FINESI) de la Universidad Nacional del Altiplano por el respaldo institucional brindado, así como por el compromiso académico y la formación proporcionada, que fueron fundamentales para el desarrollo y culminación exitosa de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] R. Gerardo and I. P. de Lima, "Monitoring Duckweeds (Lemna minor) in Small Rivers Using Sentinel-2 Satellite Imagery: Application of Vegetation and Water Indices to the Lis River (Portugal)," *Water*, vol. 14, no. 15, p. 2284, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14152284>
- [2] H. Gao, R. Li, Q. Shen, et al., "Deep-Learning-Based Automatic Extraction of Aquatic Vegetation from Sentinel-2 Images—A Case Study of Lake Honghu," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 5, p. 867, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16050867>
- [3] Y. Du et al., "Extraction of duckweed or algal bloom covered water using the SEM-Unet model," *Journal of Cleaner Production*, vol. 433, 140874, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140874>
- [4] P. Song and K. Park, "Detection of Aquatic Plants Using Multispectral UAV Imagery and Vegetation Index," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 3, p. 387, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12030387>
- [5] B. Romano, M. Iovane, L. G. Izzo, and G. Aronne, "A Machine-Learning Method to Assess Growth Patterns in Plants of the Family Lemnaceae," *Plants*, vol. 11, no. 15, p. 1910, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11151910>
- [6] Y. Chen, Y. Jin, X. Wu, and D. Wang, "Automatic Extraction of Aquatic Vegetation in the Amur River Basin Based on Landsat Imagery and Deep Learning," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 2, p. 345, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16020345>
- [7] Z.-Y.-C. Liu et al., "Deep Learning Segmentation of Satellite Imagery Identifies Aquatic Vegetation Associated with Snail Intermediate Hosts of Schistosomiasis in Senegal, Africa," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 6, p. 1345, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14061345>
- [8] Z.-H. Wang, C.-L. Xin, Z. Sun, J.-H. Luo y R.-H. Ma, "Automatic Extraction Method of Aquatic Vegetation Types in Small Shallow Lakes Based on Sentinel-2 Data: A Case Study of Cui-ping Lake," *Remote Sensing Information*, vol. 34, pp.132–141, 2019. <https://doi.org/10.3390/su141912478>
- [9] W. Zou, L.Yuan y L.Zhang, "Analyzing the Spectral Response of Submerged Aquatic Vegetation in a Eutrophic Lake, Shanghai, China," *Ecological Engineering*, vol.57, pp.65–71, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.042>
- [10] M. Shen, H. Xu y X. Guo, "Satellite Remote Sensing of Harmful Algal Blooms (HABs) and a Potential Synthesized Framework," *Sensors*, vol.12, no.6, pp.7778–7803, 2012. <https://doi.org/10.3390/s120607778>

- [11] Y. Dai, L. Feng, X. Hou, and J. Tang, "An Automatic Classification Algorithm for Submerged Aquatic Vegetation in Shallow Lakes Using Landsat Imagery," *Remote Sensing of Environment*, vol. 260, p. 112459, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112459>
- [12] X. Liu, Y. Zhang, K. Shi, Y. Zhou, X. Tang, G. Zhu y B. Qin, "Mapping Aquatic Vegetation in a Large, Shallow Eutrophic Lake: A Frequency-Based Approach Using Multiple Years of MODIS Data," *Remote Sensing*, vol.7, no.8, pp.10295–10320, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70810295>
- [13] M. K. Islam, A. Simic Milas, T. Abeysinghe y Q. Tian, "Integrating UAV-Derived Information and WorldView-3 Imagery for Mapping Wetland Plants in the Old Woman Creek Estuary, USA," *Remote Sensing*, vol.15, no.4, p.1090, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15041090>
- [14] A. Simic Milas, T. Abeysinghe, M. Islam y Q. Tian, "Mapping invasive *Phragmites australis* in the Old Woman Creek Estuary using UAV remote sensing and machine learning classifiers," *Remote Sensing*, vol.11, no.11, p.1380, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11111380>
- [15] An automatic classification algorithm for submerged aquatic vegetation in shallow lakes using Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, vol.260, p.112459, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112459>

REPOSITORIO

Contaminación en lentejas del Lago Titicaca. GitHub.
Disponible en: <https://is.gd/bpKRI6>.