

CLASIFICACIÓN DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA EN EL LAGO TITICACA A PARTIR DE ÍNDICES DEL SATÉLITE SENTINEL-2

CLASSIFICATION OF AQUATIC VEGETATION IN LAKE TITICACA BASED ON SENTINEL-2 SATELLITE INDICES

Carlos Paulino¹ Han Xu¹ Cesar Gamarra²
 Carmen Villanueva² Humberto Siguayro²

<https://doi.org/10.53554/boletin.v37i1.362>

RESUMEN

PAULINO, C., XU, H., GAMARRA, C., VILLANUEVA, C., SIGUAYRO, H. (2022). *Clasificación de la vegetación acuática en el lago Titicaca a partir de índices del satélite Sentinel-2*. Bol Inst Mar Perú. 37(1): 128-145.- Se elaboró un algoritmo para la clasificación de la vegetación acuática del lago Titicaca a partir de índices de vegetación del satélite Sentinel-2 y de registros *in situ* de la cobertura espacial y la densidad de especies de macrofitas, con el propósito de delimitar la extensión del cinturón circunlacustre entre la bahía interior de Puno hasta Acora. Se utilizaron imágenes ópticas MSI (*Multispectral Instrument*) de 10 metros de resolución espacial de junio y noviembre 2018, a los cuales se les aplicó la corrección atmosférica Sen2Cor para obtener el valor de reflectancia espectral en la superficie del agua con el cual se estimaron los índices NDWI, NDVI, Band ratio y AVE. Los rangos de umbral para cada índice de vegetación usados en el método de árbol de decisión para la clasificación de vegetación acuática se adaptaron según la estacionalidad y tienen correspondencia con el análisis de similitud espacial de Jaccard. El algoritmo propuesto identificó la vegetación acuática sumergida, superficial y emergente. La vegetación de totorales (emergente) presentó variación de 36 km² de cobertura espacial entre ambos periodos analizados, mientras que la vegetación sumergida no tuvo mucha variación espacial durante el mismo periodo. Por otro lado, las macrofitas sumergidas en diferentes profundidades presentaron respuestas espectrales distintas de acuerdo con la densidad de su distribución espacial.

PALABRAS CLAVE: vegetación acuática, reflectancia, Sentinel-2, lago Titicaca, Perú

ABSTRACT

PAULINO, C., XU, H., GAMARRA, C., VILLANUEVA, C., SIGUAYRO, H. (2022). *Classification of aquatic vegetation in Lake Titicaca based on Sentinel-2 satellite indices*. Bol Inst Mar Peru. 37(1): 128-145.- An algorithm was developed for the classification of the aquatic vegetation of Lake Titicaca from the Sentinel-2 satellite vegetation indices and *in situ* records of the spatial coverage and density of macrophyte species to delimit the extension of the surrounding area of Lake Titicaca between the inner bay of Puno to Acora. MSI (*Multispectral Instrument*) 10-meter spatial resolution optical images from June and November 2018 were used, to which the Sen2Cor atmospheric correction was applied to obtain the spectral reflectance value on the water surface with which the NDWI, NDVI, band ratio, and AVE indices were estimated. We adapted the threshold ranges for each vegetation index used in the decision tree method for aquatic vegetation classification according to seasonality and have correspondence with Jaccard's spatial similarity analysis. The proposed algorithm identified submerged, surface, and emergent aquatic vegetation. The cattail vegetation (emergent) showed a variation of 36 km² of spatial coverage between both periods analyzed, while the submerged vegetation did not have much spatial variation during the same period. On the other hand, macrophytes submerged at different depths presented different spectral responses according to the density of their spatial distribution.

KEYWORDS: aquatic vegetation, reflectance, Sentinel-2, Lake Titicaca, Peru

1. INTRODUCCIÓN

Las denominadas macrofitas acuáticas o hidrofitos constituyen un grupo funcional de vegetación heterogéneo e importante por los servicios y funciones ambientales que proveen a los ecosistemas lacustres como producción primaria, oxigenación de las aguas, fijación del

1. INTRODUCTION

The aquatic macrophytes or hydrophytes are a heterogeneous and important functional group of vegetation due to the environmental services and functions they provide to lake ecosystems, such as primary production, water oxygenation, fixation of atmospheric carbon dioxide,

1 Área Funcional de Sensoramiento Remoto, DGIHSA, Instituto del Mar del Perú – Av. Argentina 2245-Callao, Perú, mail: cpaulino@imarpe.gob.pe, Orcid-id: 0000-0003-2612-7483

2 Laboratorio Continental de Puno, Instituto del Mar del Perú – Jr. ciudad de La Paz 205-207, Puno-Perú

dióxido de carbono atmosférico, regulación de las propiedades físico-químicas del agua, absorción de nutrientes como soporte trófico y alimento para los consumidores primarios y transporte de sedimentos. Además, sirven como barreras de protección al efecto erosivo de corrientes y flujos de agua (CIRUJANO *et al.* 2011; GALLEGO, 2015).

En el lago Titicaca las plantas superiores están representadas por un número pequeño de especies, más allá del cinturón de totora existe vegetación acuática sumergida (VAS) enraizada en el fondo, que la transparencia del agua le permite alcanzar una profundidad de una decena de metros (RAYNAL-ROQUES, 1991).

Según POUILLY *et al.* (2014), en primavera y verano la zona fótica (Z_{eu}) en el lago Mayor alcanza en promedio 27 m de profundidad, mientras que en invierno disminuye a 12 m. Este periodo se caracteriza por ocasionales estratificaciones térmicas superficiales inestables que permiten mayor concentración de oxígeno disuelto durante todo el año.

El uso de imágenes satelitales y los registros de reflectancia obtenidos con espectrorradiómetros permiten identificar las propiedades ópticas de cualquier cuerpo a través de su firma espectral para determinar las características de la zona en estudio (SOBRINO *et al.*, 2000). Los flujos energéticos emitidos por todo cuerpo en forma de energía reflejada o emitida en función de la longitud de onda constituyen su firma espectral.

De acuerdo con PAULINO *et al.* (2019), la respuesta espectral a nivel superficial de un espejo de agua depende del contenido de partículas en suspensión, como sedimentos y organismos biológicos (fitoplancton) y la profundidad e intensidad de la radiación solar en el momento del registro. Mientras que un factor determinante en la distribución espacial de la vegetación sumergida es el alcance de la zona fótica (Z_{eu}).

Los estudios mediante técnicas de teledetección con sensores satelitales multispectrales (Landsat-8, Spot-6 y Sentinel-3) y fotografías aéreas permitieron la identificación, delimitación y cuantificación de vegetación acuática sumergida (FITZGERALD *et al.*, 2005; WATANABE *et al.*, 2013), lo que a través de su respuesta espectral con espectrorradiómetros y

regulation of the physical-chemical properties of water, nutrient absorption as trophic support and food for primary consumers, and sediment transport. In addition, they serve as protective barriers to the erosive effect of currents and water flows (CIRUJANO *et al.* 2011; GALLEGO, 2015).

In Lake Titicaca, the higher plants are represented by a small number of species. Beyond the cattail belt, there are submerged aquatic vegetation (SAV) rooted to the bottom, which, due to the transparency of the water, can reach a depth of about ten meters (RAYNAL-ROQUES, 1991).

POUILLY *et al.* (2014) stated that in spring and summer the photic zone (Z_{eu}) in Lake Titicaca's deep main basin reaches on average 27 m depth, while in winter it decreases to 12 m. This period is characterized by occasional unstable surface thermal stratifications that allow higher dissolved oxygen concentrations throughout the year.

The use of satellite images and reflectance records obtained with spectroradiometers allow the identification of the optical properties of any material through its spectral signature to determine the characteristics of the area under study (SOBRINO *et al.*, 2000). The energy fluxes emitted by all material in the form of reflected or emitted energy as a function of wavelength constitute its spectral signature.

According to PAULINO *et al.* (2019), the spectral response at the surface level of a water mirror depends on the content of suspended particles, such as sediments and biological organisms (phytoplankton), and the depth and intensity of solar radiation at the time of recording. The extent of the photic zone (Z_{eu}) is a determining factor in the spatial distribution of submerged vegetation.

Studies using remote sensing techniques with multispectral satellite sensors (Landsat-8, Spot-6, and Sentinel-3) and aerial photographs allowed the identification, delimitation, and quantification of submerged aquatic vegetation (FITZGERALD *et al.*, 2005; WATANABE *et al.*, 2013),

modelos semiempíricos demostró óptimos resultados en el mapeo de macrofitas (VILLA *et al.*, 2018).

La detección espectral de VAS se ve afectada por los componentes de agua ópticamente activos (OAC) que modifican las propiedades ópticas aparentes e inherentes, por lo tanto, es diferente del agua pura que muestra una disminución del valor de reflectancia a lo largo de la longitud de onda en la región visible e infrarrojo cercano. La VAS muestra alta reflectancia en la región verde (GONZÁLES-LUNA *et al.*, 2019; YOSHINO *et al.*, 2013) y esta característica se ha utilizado para la detección de floraciones de algas (KAHRU *et al.*, 2007). Además, como las vegetaciones superficial y sumergida muestran un similar comportamiento, usualmente se utilizan los índices de vegetación para la detección de vegetaciones acuáticas (ZHAO, 2013; HU, 2009).

El objetivo de este trabajo fue proponer un algoritmo de árbol de decisión para clasificar la vegetación acuática con los datos de reflectancia e índices de vegetación del satélite Sentinel-2 y datos *in situ* de localización de macrofitas a fin de determinar la extensión del cinturón circunlacustre en el lago Titicaca desde la bahía interior de Puno hasta Acora.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio está ubicada en el lago Titicaca a una altitud de 3.810 metros sobre el nivel del mar en la Región Puno, Perú. La zona litoral del lago presenta aguas poco profundas, en las que se identifica la presencia de vegetación emergente, flotante y sumergida.

Durante los periodos del 19 al 22 de junio y del 6 al 10 de noviembre 2018, a bordo de la embarcación IMARPE VIII del Laboratorio Continental de Puno, del Instituto del Mar del Perú (IMARPE), se recolectaron muestras de vegetación acuática sumergida (VAS) de 95 estaciones del sector circunlacustre comprendido entre la bahía de Puno, Churo, Perca, Platería, Charcas y Acora (Fig. 1). La actividad se llevó a cabo en el marco del proyecto de zonificación espacial de vegetación sumergida y emergente como parte del proyecto para la zonificación de las áreas florísticas en los márgenes litorales del lago Titicaca.

which showed optimal results in the mapping of macrophytes through their spectral response with spectroradiometers and semi-empirical models (VILLA *et al.*, 2018).

The spectral detection of SAV is affected by the optically active constituents of water (OACS) that modify the apparent and inherent optical properties. Therefore, it is different from pure water which shows a decrease in reflectance value along the wavelength in the visible and near-infrared region. The SAV shows high reflectance in the green region (GONZÁLES-LUNA *et al.*, 2019; YOSHINO *et al.*, 2013) and this feature has been used for algal bloom detection (KAHRU *et al.*, 2007). Also, as surface and submerged vegetations show similar behavior, vegetation indices are usually used for the detection of aquatic vegetations (ZHAO, 2013; HU, 2009).

Our goal was to propose a decision tree algorithm to classify aquatic vegetation with Sentinel-2 satellite reflectance data and vegetation indices and *in situ* macrophyte location data to determine the extent of the surrounding area of Lake Titicaca from the inner bay of Puno to Acora.

2. MATERIAL AND METHODS

Study area

The study area is located in Lake Titicaca at 3,810 masl in the Puno Region, Peru. It is characterized by the presence of emergent, floating, and submerged vegetation in the shallow waters of the littoral zone of the lake.

Samples of submerged aquatic vegetation (SAV) were collected from 95 stations in the surrounding area of the lake, between Puno Bay, Churo, Perca, Platería, Charcas, and Acora (Fig. 1), during the periods 19-22 June and 6-10 November 2018, onboard the IMARPE VIII vessel of the IMARPE's Puno Continental Laboratory. The activity was carried out as part of the project for the spatial zoning of submerged and emergent vegetation included in the project for the zoning of floristic areas in the littoral zones of Lake Titicaca.

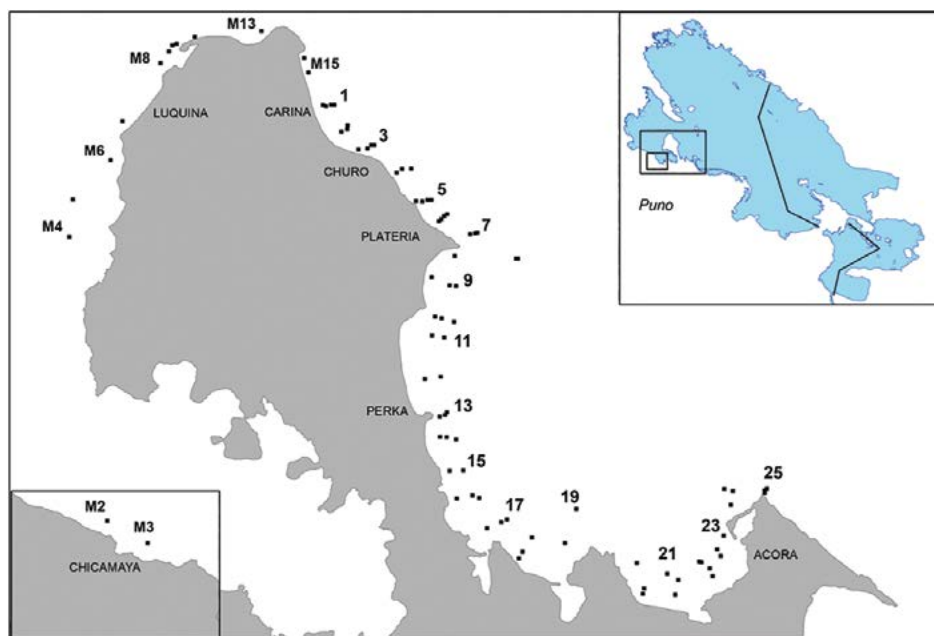


Figura 1.- Área de estudio con ubicación de estaciones (M2 - M15) y con transectos (1- 25) de muestreo de vegetación sumergida (puntos negros) entre el sector de Chicamaya y Acora, lago Titicaca, junio y noviembre 2018

Figure 1. Study area with station locations (M2 - M15) and transects (1- 25) of submerged vegetation sampling (black dots) between the Chicamaya and Acora sectors, Lake Titicaca (June and November 2018)

Vegetación sumergida

Las estaciones de muestreo se localizaron perpendicularmente a la orilla a 0,5; 5; 10; 15; 20 y 25 metros de profundidad en cada transecto y se obtuvo información de la localización espacial, profundidad y características del sustrato. Las muestras de VAS se extrajeron del fondo con un rastrillo, se recolectaron en bolsas de plástico con cierre hermético (*ziplock*), se conservaron en formol al 4% y se almacenaron en cajas con hielo para su identificación en el laboratorio (CHE, 2005). Asimismo, se hizo el registro fílmico de la vegetación sumergida con una cámara subacuática, que permitió observar con mayor detalle la cobertura espacial y composición de las especies de hidrofitos.

Durante el análisis cualitativo, las muestras de macrofitas fueron lavadas en un tamiz de 1 mm de poro para retirar el sedimento y la materia orgánica adherida. Para la identificación y caracterización de las especies, se utilizaron las claves taxonómicas y descripciones aplicadas por DEJOUX e ILTIS (1991) y CIRUJANO *et al.* (2008).

Submerged vegetation

Sampling stations were located perpendicular to the shore at depths of 0.5, 5, 10, 15, 20, and 25 m in each transect, and information was obtained on spatial location, depth, and substrate characteristics. SAV samples were extracted from the bottom with a rake, collected in plastic Ziplock bags, preserved in 4% formalin, and stored in boxes on ice for identification in the laboratory (CHE, 2005). A film recording of the submerged vegetation was also made with an underwater camera, which made it possible to observe in greater detail the spatial coverage and composition of the hydrophyte species.

For qualitative analysis, macrophyte samples were washed in a 1 mm mesh sieve to remove sediment and adhering organic matter. For the identification and characterization of the species, we used the taxonomic keys and descriptions applied by DEJOUX & ILTIS (1991) and CIRUJANO *et al.* (2008).

Para medir el grado de similitud entre zonas de muestreo (M2-M15) y transectos (1-25), se utilizó el índice de Jaccard (IJ), que permitió determinar la presencia/ausencia de la vegetación sumergida:

$$IJ = \frac{c}{a + b + c} \quad (\text{ecua. 1})$$

Donde:

a: número de especies presentes en la zona A.

b: número de especies presentes en la zona B.

c: número de especies presentes en ambas zonas A y B, es decir que están compartidas.

Parámetros físico-químicos

La información de temperatura, pH y conductividad eléctrica se registró con un multiparámetro Ysi Profesional Plus; el oxígeno disuelto, se midió con un oxímetro óptico Mettler Toledo previamente calibrado, y la transparencia, con un disco Secchi.

Se recolectaron muestras de agua a nivel vertical con una botella Niskin de 5 litros para la determinación de clorofila-a, la cual se realizó con el sistema de filtración a través de un filtro Whatman GF/F y posterior extracción con una solución de acetona y lectura espectrofotométrica (JEFFREY & HUMPHREY, 1975; APHA, 2005). La sensibilidad de la técnica analítica para la determinación por espectrofotómetro tuvo un margen de error de +/-2 nm de longitud de onda. Para la estimación de la concentración de clorofila-a (Chl-a), se utilizó la fórmula tricromática de JEFFREY & HUMPHREY (1975), ecuación 2.

$$Chl - a \left(\frac{mg}{m^3} \right) = \frac{[11,85 * (A664 - A750) - 1,54(A647 - A750) - 0,08 * (A630 - A750)] * v}{V * Z} \quad (\text{equa. 2})$$

Donde:

A630, A647, A664, A750 = Densidad óptica en nm (absorbancia)

v = Volumen del extracto (mL)

V = Volumen de agua filtrada (L)

Z = Paso óptico de la cubeta (cm)

The Jaccard index (JI) was used to measure the degree of similarity between sampling zones (M2-M15) and transects (1-25), which allowed us to determine the presence/absence of submerged vegetation:

$$IJ = \frac{c}{a + b + c} \quad (\text{equa. 1})$$

Where:

a: number of species in zone A.

b: number of species in zone B.

c: number of species found in both zones A and B.

Physical-chemical parameters

Temperature, pH, and electrical conductivity data were recorded with a Ysi Professional Plus multiparameter; dissolved oxygen was measured with a previously calibrated Mettler Toledo optical oximeter, and a Secchi disk was used to measure transparency.

For determining chlorophyll-a, water samples were collected vertically with a 5-liter Niskin bottle using the filtration system through a Whatman Grade GF/F filter and subsequent extraction with an acetone solution and spectrophotometric reading (JEFFREY & HUMPHREY, 1975; APHA, 2005). The sensitivity of the analytical technique for the determination by spectrophotometer had a margin of error of +/-2 nm wavelength. We used the trichromatic formula of JEFFREY & HUMPHREY (1975), equation 2, for estimating the concentration of chlorophyll-a (Chl-a).

Where:

A630, A647, A664, A750 = Optical density in nm (absorbance)

v = Extract volume (mL)

V = Filtered water volume (L)

Z = Optical cuvette pitch (cm)

Información satelital

Se usaron imágenes de nivel L1C del sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) a bordo del satélite Sentinel-2 del 21 de junio, 3 y 8 de noviembre 2018, provenientes del programa Copérnico de la Agencia Espacial Europea (ESA) y publicado en su portal (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Se calculó la reflectancia superficial del agua (nivel 2A) con el modelo de corrección atmosférica Sen2Cor antes de la extracción de las firmas espectrales para cada estación de muestreo (ESA, 2017), se usó el programa SNAP 7.0 (*Sentinel Application Platform*) desarrollado por ESA.

Método

Se propone un método de clasificación de vegetación emergente y sumergida teniendo como base el modelo de árbol de decisión propuesto por (XU, 2006; HARMA *et al.*, 2001). Para la identificación de las áreas con vegetación sumergida y superficial se usaron los índices *Normalized difference water index* (MNDWI), *Average reflectance of blue, green and red bands* (AVE), *band ratio* ($R_{\text{SWIR}}/R_{\text{VRE}}$) de los canales de infrarrojo corto (SWIR) y de borde rojo de vegetación (VRE) y la batimetría del lago (Tabla 1).

Para la vegetación emergente (totales), se usaron los índices *Normalized difference vegetation index* (NDVI), *Average reflectancia of blue, green and red bands* (AVE) y la reflectancia del canal de borde rojo de vegetación (R_{VRE}). Los valores de umbral de cada índice para cada tipo de vegetación fueron diferentes para cada periodo debido a la estacionalidad (Fig. 2).

Asimismo, se analizó la respuesta espectral satelital de las estaciones de muestreo de vegetación sumergida con el propósito de correlacionar y validar la presencia de vegetación en relación con la clasificación obtenida de los índices del árbol de decisión.

Satellite information

We used L1C level images from the *Multispectral Instrument* (MSI) sensor aboard the Sentinel-2 satellite on 21 June, 3 and 8 November 2018 from the Copernicus program of the European Space Agency (ESA) and published on its website (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Water surface reflectance (level 2A) was estimated with the Sen2Cor atmospheric correction model before the extraction of spectral signatures for each sampling station (ESA, 2017), using the SNAP 7.0 (*Sentinel Application Platform*) developed by ESA.

Method

We propose a method for classifying emergent and submerged vegetation based on the decision tree model described by XU, 2006 and HARMA *et al.*, 2001. The *Normalized difference water index* (MNDWI), *Average reflectance of blue, green, and red bands* (AVE), *band ratio* ($R_{\text{SWIR}}/R_{\text{VRE}}$) of the short infrared (SWIR) and vegetation red edge (VRE), and the bathymetry of the lake were used to identify the areas with submerged and surface vegetation (Table 1).

For emergent vegetation (cattails), the *Normalized difference vegetation index* (NDVI), *Average reflectance of blue, green, and red bands* (AVE), and reflectance of the red edge vegetation channel (RVRE) were used. Due to seasonality, the threshold values of each index for each vegetation type were different per period (Fig. 2).

The satellite spectral response of the submerged vegetation sampling stations was analyzed to correlate and validate the presence of vegetation versus the classification obtained from the decision tree indices.

Tabla 1.- Índices espectrales usados en el método de árbol de decisión

Table 1. Spectral indices used in the decision tree method

Índices	Abreviación	Formula	Referencias
<i>Normalized Difference Water Index</i>	NDWI	$(B03 - B08) / (B03 + B08)$	(McFEETERS, 1996)
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	NDVI	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	(ROUSE <i>et al.</i> , 1974)
<i>Average reflectance of B02, B03, B04 bands</i>	AVE	$(B02 + B03 + B04) / 3$	(HÁRMA <i>et al.</i> , 2001)
<i>Band ratio</i>	BR	$(RSWIR/RVRE)$	(PEARSON & MILLER, 1972)

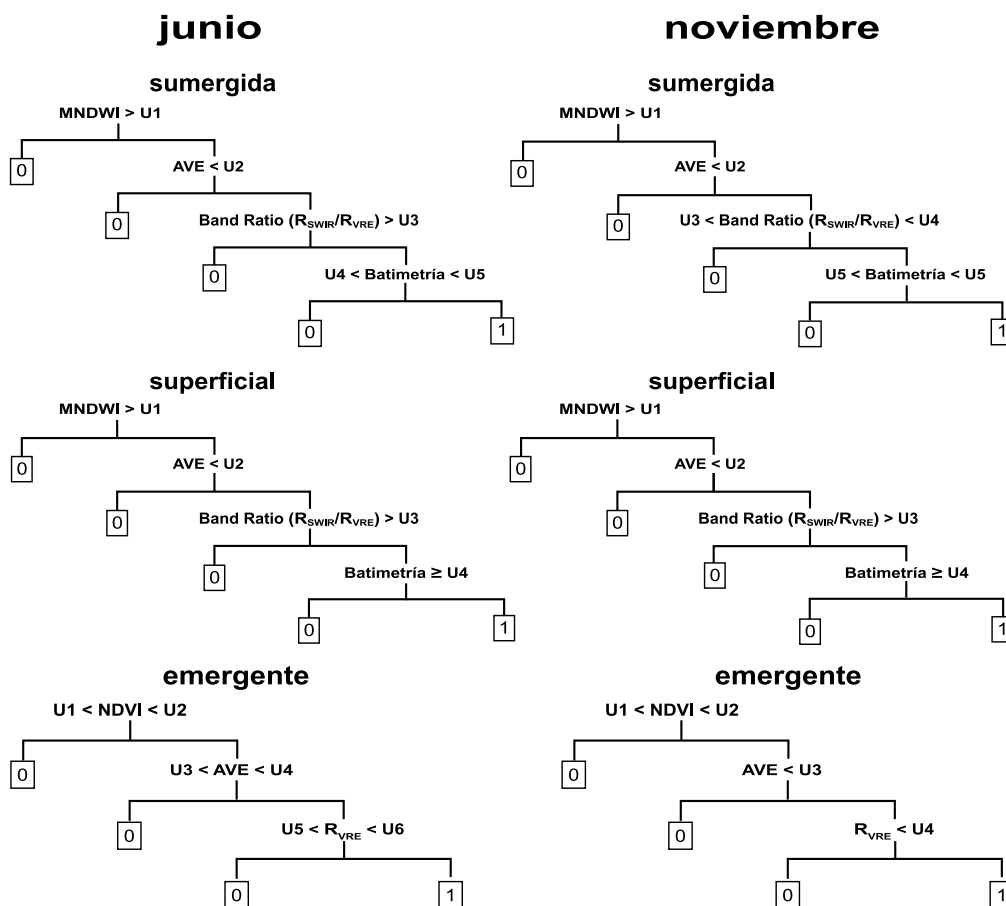


Figura 2.- Estructura del modelo de árbol de decisión para la clasificación de áreas con vegetación sumergida, superficial y emergente; los ceros indican pixeles que no corresponden a la vegetación, mientras que los valores de uno sí corresponden. U1 a U6 representan valores de umbral usados en la clasificación

Figure 2. Structure of the decision tree model for the classification of areas with submerged, surface, and emergent vegetation. Zeros indicate pixels that do not correspond to vegetation, while values of 1 do. U1 to U6 represent threshold values used in the classification

3. RESULTADOS

Vegetación sumergida

La vegetación sumergida está compuesta por las siguientes siete especies de macrofitas: *Myriophyllum quitense* Kunth, *Elodea potamogeton*, *Chara* sp., *Lemna gibba*, *Isoetes lacustris*, *Stuckenia filiformis* y *Zannichellia palustris*.

La mayor riqueza específica (S) de macrofitas (> 5 especies por estación) se localizaron principalmente dentro de los 10 m de profundidad, mientras que por debajo de los 20 m solo se encontró una especie. La especie *Chara* sp. tuvo mayor presencia a lo largo del perfil perpendicular desde la orilla hasta 20 metros de profundidad (Fig. 3).

3. RESULTS

Submerged vegetation

A total of 7 species of macrophytes are found in the submerged vegetation: *Myriophyllum quitense* Kunth, *Elodea potamogeton*, *Chara* sp., *Lemna gibba*, *Isoetes lacustris*, *Stuckenia filiformis*, and *Zannichellia palustris*.

The highest species richness (S) of macrophytes (> 5 species per station) was located mainly within 10 m depth, while below 20 m depth, only one species was found. The species *Chara* sp. was most abundant along with the perpendicular profile from the shore to 20 m depth (Fig. 3).

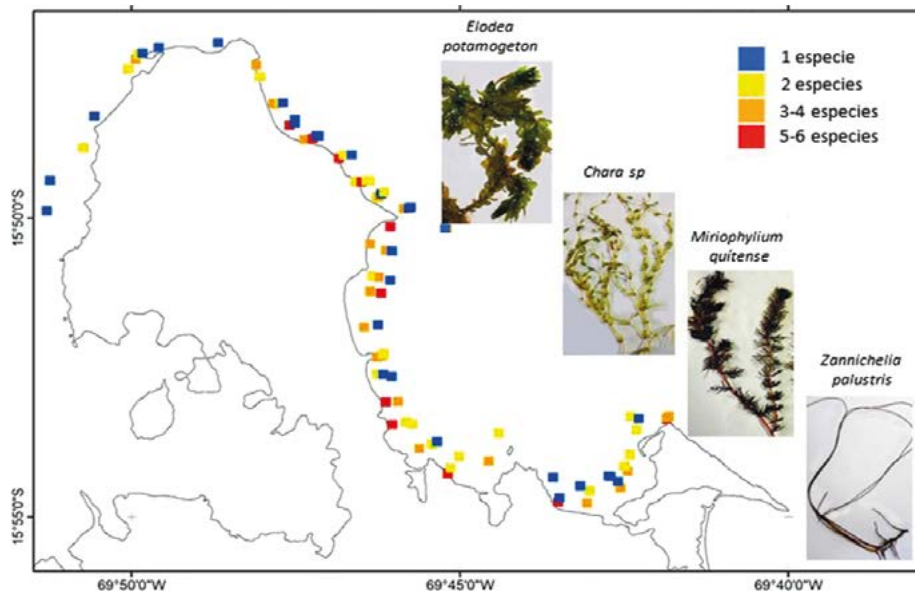


Figura 3.- Distribución espacial de la vegetación sumergida por número de especies y por estación de muestreo e imágenes de especies de flora sumergida
 Figure 3. Spatial distribution of submerged vegetation by number of species and sampling station and images of submerged flora species

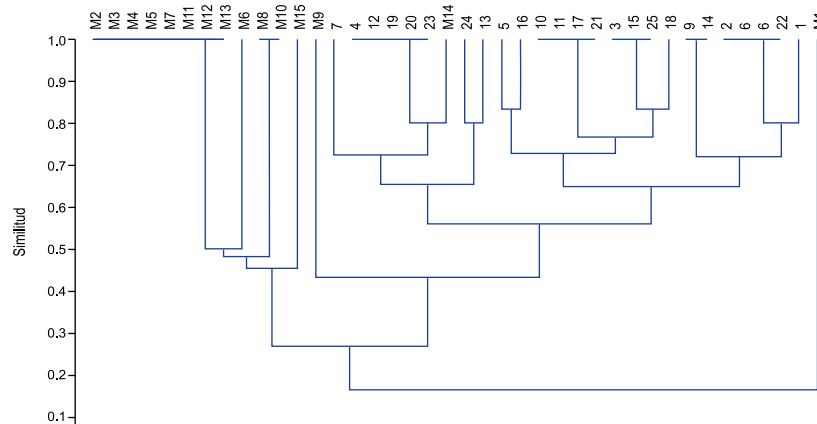


Figura 4.- Índice de similitud de Jaccard (II) para la vegetación sumergida por estaciones de muestreo y transectos
 Figure 4. Jaccard similarity index (II) for submerged vegetation by sampling stations and transects

El análisis de similitud de Jaccard (II) identificó que las estaciones M2, M3, M4, M5, M7, M11, M12 y M13 presentaron únicamente especies del género *Chara* ($J = 1, S = 1$), que por su proximidad geográfica indicaría que esas zonas presentarían condiciones idóneas para el desarrollo de este género de macrofitas (Fig. 4).

The Jaccard similarity analysis (II) identified that stations M2, M3, M4, M5, M7, M11, M12, and M13 had only species of the genus *Chara* ($J = 1, S = 1$), which, due to their geographic proximity, would indicate that these areas would be suitable for the development of this genus of macrophytes (Fig. 4).

Asimismo, se identificó que los transectos 4, 12, 19, 20 y 23 comparten 4 especies ($S = 4$) de macrofitas con una similitud $J = 1$. Otros grupos con similitud $J = 1$ fueron los transectos 10, 11, 17 y 21 ($S = 4$) y otro grupo conformado por los transectos 2, 6, 8 y 22 ($S = 4$); entre ambos compartieron el 75% de especies.

We also identified that transects 4, 12, 19, 20, and 23 share 4 macrophyte species ($S = 4$) with a similarity $J = 1$. Other transects with similarity $J = 1$ were 10, 11, 17, and 21 ($S = 4$) and another group formed by transects 2, 6, 8, and 22 ($S = 4$). Both groups shared 75% of the macrophyte species.



Figura 5.- Vegetación acuática emergente (helófitos) y tipos de estratos con vegetación sumergida en un transecto del muestreo

Figure 5. Emergent aquatic vegetation (helophytes) and types of submerged vegetation strata in a sampling transect

Se observó una distancia muy fuerte en el índice de similitud entre los transectos del 1 al 25 y entre las estaciones del M1 al M15, lo cual se relacionaría con la distancia geográfica y la temporalidad en la toma de muestras.

La figura 5 muestra diferentes especies de vegetación acuática; en el extremo izquierdo se observan plantas acuáticas (helófitos) con la mayor parte de su aparato vegetativo (hojas, tallos y flores) emergentes y hacia la derecha las fotos corresponden a la vegetación acuática a lo largo de un transecto de navegación frente a Chucuito. En las imágenes se identifican diferentes tipos de vegetación que de acuerdo con su extensión, densidad y profundidad pueden ser registrados por los sensores satelitales.

La información del número de especies de macrofitas en relación con la profundidad de cada estación de muestreo generó la delimitación de la distribución espacial de la vegetación sumergida como una variable de ingreso en el algoritmo de análisis del árbol de decisiones propuesta en la metodología.

Condiciones fisicoquímicas

Los parámetros fisicoquímicos evaluados durante junio y noviembre evidencian condiciones ambientales diferenciadas por la estacionalidad registrados en la Tabla 2. La bahía de Puno en junio mostró masas de agua más frías ($T = 12,78\text{ }^{\circ}\text{C}$) con mayores concentraciones de oxígeno disuelto, pH y de clorofila-a. El límite de la zona fótica (Z_{eu}) de

There was a significant gap in the similarity index between transects 1 to 25 and between stations M1 to M15, which would be related to the geographical distance and the timing of sampling.

Figure 5 shows different species of aquatic vegetation. Aquatic plants (helophytes) with most of their vegetative apparatus (leaves, stems, and flowers) emerging can be seen on the far left, and to the right, the photos correspond to the aquatic vegetation along a navigation transect off Chucuito. The images identify different types of vegetation that according to their extension, density, and depth can be recorded by satellite sensors.

The information on the number of macrophyte species compared to the depth of each sampling station generated the delimitation of the spatial distribution of submerged vegetation as an input variable in the decision tree analysis algorithm proposed in the methodology.

Physical-chemical conditions

The physical-chemical parameters evaluated in June and November show environmental conditions differentiated by seasonality, as shown in Table 2. In June, Puno Bay recorded cooler water masses ($T = 12.78\text{ }^{\circ}\text{C}$) with higher dissolved oxygen, pH, and chlorophyll-*a* concentrations. The photic zone (Z_{eu}) limit of

1% se alcanzó hasta 31 m de profundidad con un coeficiente de atenuación difusa (K) de 0,15 m⁻¹.

En noviembre, las zonas de aguas someras entre 2 y 5 m de profundidad del lago Mayor registraron un incremento en el valor de los parámetros fisicoquímicos en comparación con zonas más profundas entre 20 y 40 m. Asimismo, el límite de la zona fótica (Z_{eu}) de 1% se alcanzó hasta 39 m de profundidad con un coeficiente de atenuación difusa (K) de 0,10 m⁻¹.

Por otro lado, la temperatura, el oxígeno disuelto, la concentración de clorofila-a y la penetración de la luz presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambos periodos y en diferentes isóbatas. La morfología, la distribución y composición de especies de macrofitas sumergidas, la productividad primaria y la presencia de materia orgánica asociada a la actividad acuícola en la bahía de Puno son factores que marcaron diferencias en relación con los registros en el litoral del lago Mayor.

Reflectancia superficial del agua

Con la identificación de la vegetación sumergida en cada estación de muestreo se agruparon las estaciones de acuerdo al número de especies y a la profundidad de su ubicación, con lo cual se verifica tres clases de vegetación sumergida dada las características de su respuesta espectral y valor de reflectancia. La característica más resaltante entre las clases es el registro de picos de alta reflectancia en zonas de menor profundidad y mayor cantidad de especies de macrofitas, los cuales disminuyen en relación con la profundidad (Fig. 6).

1% was reached up to 31 m depth with a diffuse attenuation coefficient (Kd) of 0.15 m⁻¹.

In November, the shallow water zones between 2 and 5 m depth of Lake Titicaca's deep main basin recorded an increase in the value of physical-chemical parameters compared to the deeper zones between 20 and 40 m. Also, the photic zone (Z_{eu}) limit of 1% reached up to 39 m depth with a diffuse attenuation coefficient (Kd) of 0.10 m⁻¹.

Temperature, dissolved oxygen, chlorophyll-a concentration, and light penetration showed significant differences ($p < 0.05$) between both periods and in different isobaths. The morphology, distribution, and species composition of submerged macrophytes, primary productivity, and the presence of organic matter associated with the aquaculture activity in Puno Bay are factors that differentiated the records from those of the littoral of Lake Titicaca's deep main basin.

Water surface reflectance

After identifying the submerged vegetation at each sampling station, we grouped the stations according to the number of species and the depth of their location, thus determining three classes of submerged vegetation given the characteristics of their spectral response and reflectance value. The record of high reflectance peaks in areas of shallower depth and a greater number of macrophyte species, decreasing as the depth increases, is the most outstanding characteristic among the classes (Fig. 6).

Tabla 2.- Condiciones fisicoquímicos del margen litoral del lago Titicaca durante el 2018

Table 2. Physical-chemical conditions of the littoral zone of Lake Titicaca in 2018

	Bahía de Puno (junio)			Luquina - Villa Socca, Lago Mayor (noviembre)					
	Isobata: 10 - 38 m (n = 18)			Isobata: 2 - 5 m (n = 12)			Isobata: 20 - 40 m (n = 36)		
	Rango	Media	DE	Rango	Media	DE	Rango	Media	DE
Temperatura (°C)	12,20 - 13,30	12,78	0,40	14,40 - 16,70	15,68	0,72	13,30 - 16,20	14,71	0,77
Conductividad eléctrica (µS/cm)	1492,0 - 1505,0	1495,1	2,75	1507,0 - 1514,0	1511,1	1,93	1502,0 - 1514,0	1508,5	2,58
pH	8,71 - 8,85	8,76	0,03	8,39 - 8,49	8,44	0,03	8,38 - 8,48	8,44	0,03
Oxígeno disuelto (mg/L)	6,57 - 8,12	6,83	0,37	5,69 - 7,26	6,54	0,38	5,39 - 6,89	6,35	0,29
Clorofila-a (mg/m ³)	0,88 - 2,24	1,65	0,41	0,30 - 1,11	0,73	0,24	0,22 - 1,14	0,65	0,26
Transparencia (m)	7,50 - 9,70	8,90	0,82	-	-	-	11,0 - 16,3	13,52	1,99
Límite de zona fótica 1% (m)	20 - 31	25,80	7,40	-	-	-	25 - 39	33,60	5,50
Coeficiente de atenuación (m ⁻¹)	0,15 - 0,23	0,19	0,06	-	-	-	0,10 - 0,15	0,12	0,02

DE: desviación estándar

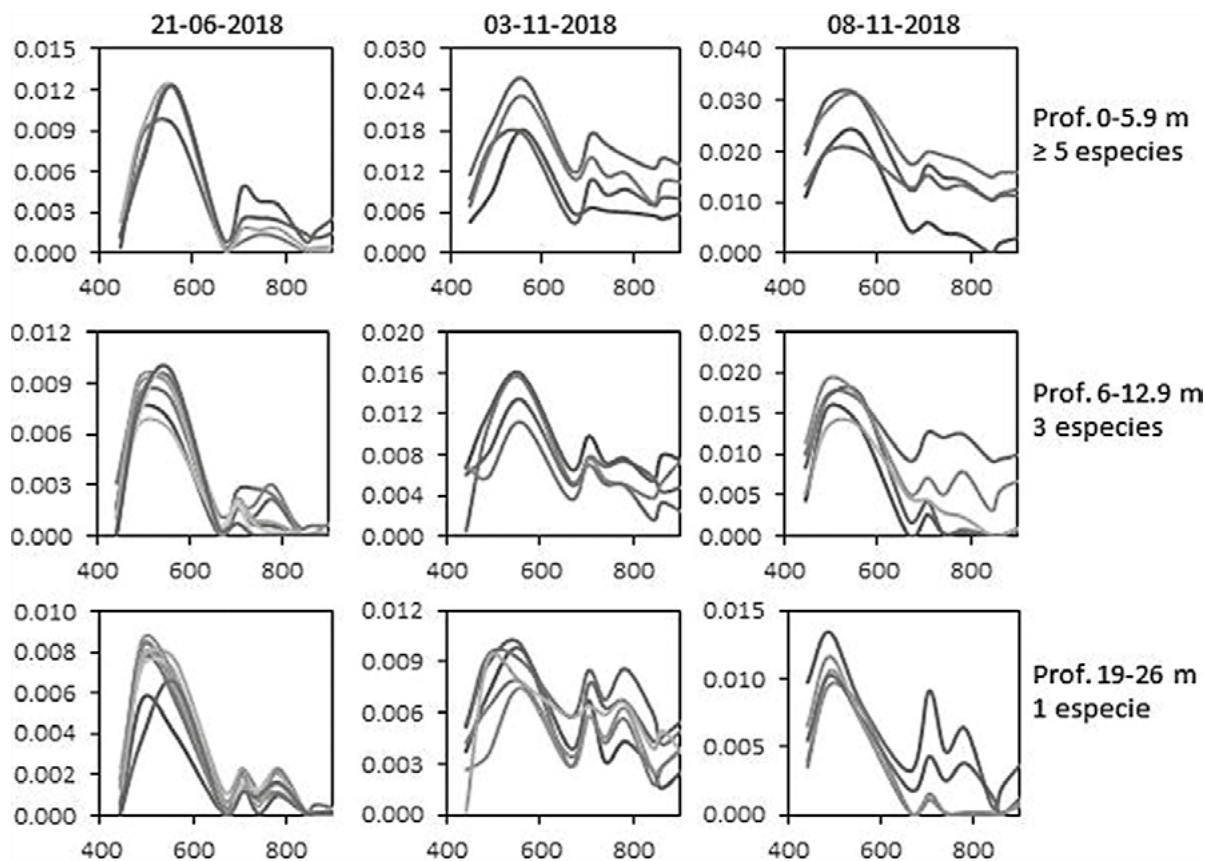


Figura 6.- Respuesta espectral superficial BOA de 3 tipos de clases según la profundidad y el número de especies registradas en las estaciones de muestro en el lago Titicaca

Figure 6. BOA surface spectral response of 3 types of classes according to depth and number of species recorded at the sampling stations in Lake Titicaca

La clase con alta reflectancia agrupa a las estaciones con más de 5 especies de macrofitas a profundidad de 0 a 5,9 metros. Estas áreas con poca profundidad y alta visibilidad son zonas que presentan altos valores de reflectancia en todo el espectro visible en las imágenes. La diferente respuesta espectral en el rango de 700 a 800 nm registradas en las imágenes del 21 de junio, 3 y 8 de noviembre indican cambios en la cobertura de vegetación, partículas en suspensión, organismos biológicos (fitoplancton) y el incremento de la clorofila-a debido a la estacionalidad.

Por otro lado, la clase con reflectancia media (Fig. 6) presentó menores valores de reflectancia en la región visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR) en relación con la clase alta, debido a que las estaciones de muestro se localizaron a mayor profundidad, donde se registraron hasta 3 tipos de especies. Las firmas espectrales de las estaciones del 21 de junio muestran alta absorción entre 660 y 700 nm

The high reflectance class groups stations with more than 5 species of macrophytes at depths of 0 to 5.9 m. These shallow, high visibility areas are zones with high reflectance values throughout the visible spectrum in the images. Due to seasonality, the different spectral responses in the 700 to 800 nm range recorded in the June 21, November 3, and 8 images indicate changes in vegetation cover, suspended particles, biological organisms (phytoplankton), and increased chlorophyll-a.

In contrast, the medium reflectance class (Fig. 6) had lower reflectance values in the visible (VIS) and near-infrared (NIR) regions compared to the high class, because the sampling stations were located at greater depths, where up to 3 types of species were recorded. On June 21, the spectral signatures of the stations show high absorption between 660 and 700 nm associated with the low concentration of chlorophyll-a;

asociados a la baja concentración de clorofila-a; sin embargo, la curva por encima de los 700 nm en noviembre indicaría la presencia de algas y mayor cantidad de sedimentos suspendidos en el agua. Este grupo de estaciones se localizaron más lejos de la orilla, por lo cual los picos de reflectancia producto de la vegetación es baja en comparación con los de reflectancia de clase alta.

Las estaciones de muestreo de las clases alta y media más próximas de la orilla evidenciaron mayor variabilidad de reflectancia, especialmente en la región *vegetation red edge* - VRE (698 a 793 nm) y *near infra red* - NIR (785 a 900 nm).

Las estaciones con una especie de macrofitas están localizadas en profundidades de 19 a 26 m y presentan menores valores de reflectancia en la región VIS y NIR. El 21 de junio, los picos de máxima reflectancia en la región verde (543-578 nm) fueron de 0,008 sr⁻¹, mientras que en la región VRE fueron de 0,002 sr⁻¹ y representan los valores más bajos de reflectancia satelital de las estaciones. Sin embargo, durante noviembre la respuesta espectral fue variable en un corto periodo de tiempo, como se observa en la figura 6, que estaría asociada a la presencia de partículas en suspensión y de organismos fitoplanctónicos.

La creciente actividad acuícola de trucha (*Oncorhynchus mykiss*) en jaulas de cultivo cerca de algunas estaciones de muestreo podría corresponder con la alta variabilidad espectral entre 700 y 850 nm, debido a las partículas en suspensión producto de la alimentación.

El análisis de firmas espectrales e índices de vegetación de las estaciones de muestreo en ambas imágenes evidenció que, a pesar de la diferencia temporal entre ambos periodos analizados, el área de estudio presentó similar extensión de áreas de cobertura vegetal.

Clasificación de la vegetación acuática

Las imágenes satelitales de Sentinel-2 del 21 de junio y 8 de noviembre coincidieron con las fechas del muestreo *in situ* y presentaron condiciones óptimas de visibilidad, por lo que se logró identificar áreas con cobertura de vegetación cerca de la orilla a partir de la combinación de las bandas 4, 3, 2 (RGB). Ello permitió observar

however, in November, the curve above 700 nm would indicate the presence of algae and a greater number of suspended sediments in the water. This group of stations was located farther from the shore, so the reflectance peaks due to vegetation are low compared to those of high-class reflectance.

Sampling stations in the high and medium classes closest to the shore showed greater reflectance variability, especially in the vegetation red edge - VRE (698 a 793 nm) and near infra-red - NIR (785 a 900 nm) regions.

The stations with a macrophyte species are located at depths of 19 to 26 m and have lower reflectance values in the VIS and NIR regions. On June 21, the maximum reflectance peaks in the green region (543-578 nm) were 0.008 sr⁻¹, while in the VRE region they were 0.002 sr⁻¹ and represent the lowest satellite reflectance values of the stations. Nevertheless, Figure 6 shows that the spectral response was variable over a short period in November, which would be associated with the presence of suspended particles and phytoplanktonic organisms.

The increasing aquaculture activity of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in culture cages near some sampling stations could be associated with the high spectral variability between 700 and 850 nm, due to suspended particulate matter from feeding.

The analysis of spectral signatures and vegetation indices of the sampling stations in both images showed that, although there was a temporal difference between the two periods analyzed, the study area showed a similar extension of vegetation cover areas.

Classification of aquatic vegetation

The Sentinel-2 satellite images of June 21 and November 8 coincided with the dates of the *in situ* samplings and had optimal visibility conditions, so it was possible to identify areas with vegetation cover near the shore from the combination of bands 4, 3, 2 (RGB). This allowed

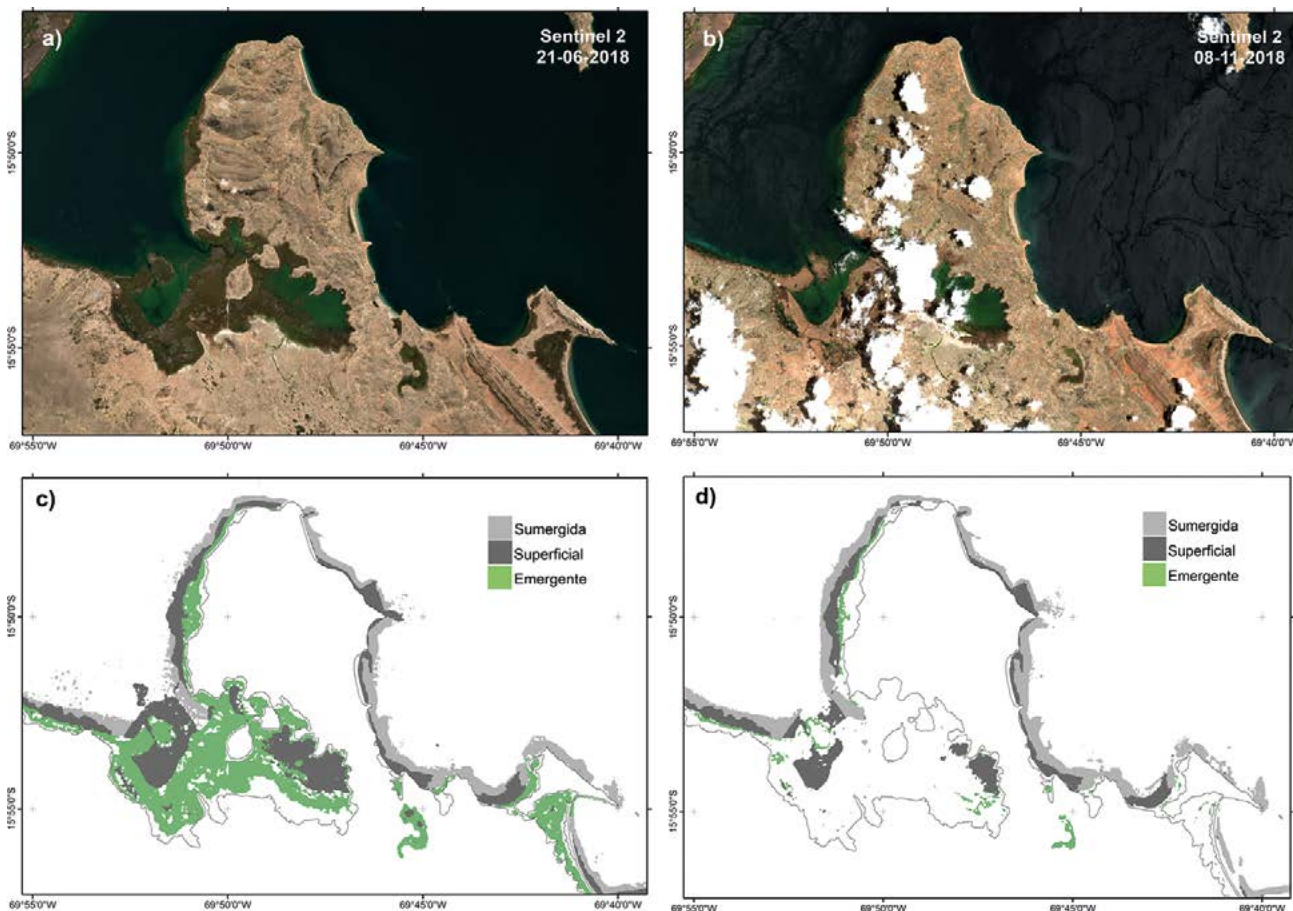


Figura 7.- Imágenes RGB del lago Titicaca del a) 2 de junio y b) 8 de noviembre 2018, y de clasificación de tipos de vegetación acuática en c) y d) para ambas fechas

Figure 7. RGB images of Lake Titicaca from (a) June 2 and (b) November 8, 2018, and classification of aquatic vegetation types in (c) and (d) for both dates

Tabla 3.- Valores de umbral usados en los índices MNDWI y NDVI

Table 3. Threshold values used in the MNDWI and NDVI indices

Clase	Árbol		U1	U2	U3	U4	U5	U6
	Periodo							
Sumergida	Junio		0,106	0,135	0,447	-18	-4	
	Noviembre		0,080	0,149	0,200	0,817	-18	-4
Superficial	Junio		0,008	0,094	0,020	-4		
	Noviembre		0,005	0,151	1,060	-4		
Emergente	Junio		0,360	0,820	0,025	0,195	0,010	0,120
	Noviembre		0,320	0,590	0,180	0,045		

con mejor detalle la extensión de la vegetación acuática emergente en zonas húmedas (color marrón oscuro) y la vegetación superficial (color verde) alrededor de la orilla del lago, como se muestra en las figuras 7a y 7b, respectivamente.

A través de índices de vegetación con el método de árbol de decisiones se logró identificar el cinturón de vegetación acuática en tres clases: la emergente, como helófitos (totoraes); la superficial, entre las

us to observe in better detail the extent of emergent aquatic vegetation in wet areas (dark brown) and surface vegetation (green) around the lakeshore, as shown in Figures 7a and 7b, respectively.

We grouped the aquatic vegetation belt into three classes through vegetation indices using the decision tree method: emergent, such as helophytes (cattails); surface, including floating

que se encontrarían macrófitos flotantes (MEF) como *Lemna gibba*, y la sumergida compuesta por los macrófitos enraizados sumergidos (MES), como *Elodea potamogeton*, *Miriophyllum quitense* y otras especies registradas en las estaciones de muestreos (Figs. 7c, 7d). Los valores de umbral usados para la identificación de cada clase de vegetación acuática se listan en la Tabla 3.

La vegetación sumergida presentó una distribución casi permanente y con ligeros cambios de cobertura espacial entre ambos periodos, los cuales están influenciados por la estacionalidad y las condiciones ambientales, como la mayor irradiación disponible. En la imagen de junio este tipo de vegetación tuvo un área de 21,43 km², mientras que para el 8 de noviembre fue de 25,76 km² y en ambos casos la información de sensores satelitales indica que esta vegetación se extiende hasta 20 m de profundidad aproximadamente, lo que corrobora los registros obtenidos en los muestreos *in situ*.

En el caso de la vegetación superficial, su distribución fue más variable en ambos periodos de estudio, debido principalmente a las características propias de las especies, dado que el incremento o disminución de este tipo de vegetación se debe a la circulación acuática circundante. En la figura 7c del 21 de junio se distinguen extensas áreas de esta cobertura frente al sector de Chucuito y Sayguane con un área total de 31,91 km², a diferencia de la imagen del 8 de noviembre en la que el área de este tipo de vegetación se redujo a 19,68 km².

Por otro lado, la vegetación emergente localizada en áreas más húmedas y al borde del litoral presentó mayor variabilidad en su distribución espacial, la cual está influenciada por condiciones ambientales de estacionalidad. Esta vegetación de totorales presenta su máxima extensión durante junio frente a Chucuito con un área de 41,46 km² y se reduce considerablemente durante la estación seca en noviembre con un área de 5,21 km².

La clasificación propuesta en esta investigación coincide con la densidad poblacional y extensión espacial de macrofitas registradas *in situ* durante las campañas de evaluación del 2018. Sin embargo, la detección de píxeles de algún tipo de clase de vegetación está condicionada a propiedades ópticas de la información satelital, como la cober-

macrophytes (FMP) such as *Lemna gibba*, formed by submerged rooted macrophytes (SRM), such as *Elodea potamogeton*, *Miriophyllum quitense*, and other species recorded at the sampling stations (Figs. 7c, 7d). Table 3 lists the threshold values used for the identification of each class of aquatic vegetation.

The submerged vegetation was distributed almost permanently with slight changes in spatial coverage between the two periods, which are influenced by seasonality and environmental conditions, such as higher available irradiation. In the image of June this type of vegetation had an area of 21.43 km², while on November 8 it was 25.76 km². In both cases, the information from satellite sensors indicates that this vegetation extends to approximately 20 m depth, which corroborates the records obtained in the *in situ* samplings.

For surface vegetation, its distribution was more variable in both study periods, mainly due to the characteristics of the species themselves, since the increase or decrease of this type of vegetation depends on the surrounding aquatic circulation. Figure 7c of June 21 shows extensive areas of this cover off Chucuito and Sayguane with a total area of 31.91 km², unlike the image of November 8 in which the area of this type of vegetation was reduced to 19.68 km².

The emergent vegetation located in wetter areas and along the coastline showed greater variability in its spatial distribution, which is influenced by seasonal environmental conditions. The maximum extent of this cattail vegetation is found in June off Chucuito with an area of 41.46 km² and is considerably reduced in November, during the dry season, with an area of 5.21 km².

Our proposed classification coincides with the population density and spatial extent of macrophytes recorded *in situ* during the 2018 assessment campaigns. Nevertheless, the detection of pixels of any type of vegetation is conditioned by optical properties of the satellite information, such as cloud cover and

tura nubosa y partículas atmosféricas suspendidas captadas por el sensor satelital.

Las características como el tipo de sustrato, la profundidad y la pendiente permiten que la vegetación sumergida prospere a lo largo del cinturón circunlacustre del lago Titicaca, como se observa en el área entre Carina hasta Acora en el lago Mayor. Asimismo, las diferencias espectrales de las clases de vegetación acuática están en función del contenido de humedad, la materia orgánica flotante presente y la diversidad de composición de las especies de macrofitas.

4. DISCUSIÓN

Las aguas de zonas poco profundas con isobatas entre 2-5 m de la bahía de Puno y zonas litorales del lago Mayor mostraron condiciones térmicas fluctuantes, mientras que las aguas entre 10 y 38 m registraron variación irregular en la intensidad de la estratificación. Estas características coinciden con lo descrito por DEJOUX & ILTIS (1991), quienes indican que las ganancias o las pérdidas térmicas y, por consiguiente, la intensidad en la estratificación varía considerablemente en la escala de tiempo polimíctico, como es el caso del lago Titicaca.

Las altas concentraciones de oxígeno disuelto entre isobatas de 2 a 5 m estarían asociadas a la presencia de macrofitas y de acuerdo con las evaluaciones de campo existen hasta 6 tipos de especies que ocupan la zona litoral. Estas condiciones fueron descritas por DEJOUX & ILTIS *et al.* (1991) y NORTHCOTE *et al.* (1991), quienes refieren que las zonas poco profundas con presencia de macrofitas con injerencia de variables meteorológicas e hidrológicas en su condición polimíctica presentan altos contenidos de oxígeno disuelto, lo que coincide con lo registrado en la zona de estudio.

El límite de zona fótica (Z_{eu}) basado en la radiación fotosintética activa (PAR - *Photosynthetically Active Radiation*) mostró que no hay variación estacional, pero se presentaron variaciones espaciales que estarían relacionadas con cambios en la distribución de la vegetación sumergida, principalmente frente a Acora. ZHOU *et al.* 2018, encontraron la misma condición en un lago oligotrófico de Fuxian en China y destacaron como importantes

suspended atmospheric particles captured by the satellite sensor.

Characteristics such as substrate type, depth, and slope allow submerged vegetation to thrive along with the surrounding areas of Lake Titicaca, as observed in the area between Carina to Acora in the deep main basin. Likewise, spectral differences in aquatic vegetation classes depend on moisture content, the floating organic matter present, and the diversity of macrophyte species composition.

4. DISCUSSION

Waters in shallow zones with isobaths between 2-5 m in the Puno Bay and littoral zones of the Lake Titicaca's deep main basin showed fluctuating thermal conditions, while waters between 10 and 38 m had irregular variation in the intensity of stratification. These characteristics coincide with those described by DEJOUX & ILTIS (1991), who stated that thermal gains or losses and, consequently, the intensity of stratification varies considerably on the polymictic time scale, as is the case of Lake Titicaca.

The high concentrations of dissolved oxygen in the 2 to 5 m isobaths would be associated with the presence of macrophytes and according to field evaluations there are up to 6 species occupying the littoral zone. These conditions were described by DEJOUX & ILTIS *et al.* (1991) and NORTHCOTE *et al.* (1991), who reported that shallow zones with the presence of macrophytes influenced by meteorological and hydrological variables in their polymictic condition have high dissolved oxygen contents, which coincides with our findings in the study area.

The photic zone (Z_{eu}) limit, based on photosynthetically active radiation (PAR) showed that there is no seasonal variation, but spatial variations occurred and these would be related to changes in the distribution of submerged vegetation, mainly off Acora. In 2018, ZHOU *et al.* found the same condition in the oligotrophic Lake Fuxian in China and highlighted the presence of organic matter and primary productivity as

reguladores de la transparencia a la presencia de materia orgánica y la productividad primaria. Esto confirmaría la poca concentración de clorofila-*a* en las zonas evaluadas, especialmente en el lago Mayor, lo que concuerda con AGUIRRE-GÓMEZ (2015), quien indica que un bajo porcentaje de la penetración de luz y alto contenido de clorofila-*a* son indicadores de eutrofización, lo que no se observó en las zonas evaluadas.

La presencia de vegetación sumergida hasta aproximadamente 20 m de profundidad está relacionada directamente con la intensidad de luz. En este caso, la extensión de áreas de vegetación sumergida registrada durante junio se dio luego del periodo principal de pérdidas térmicas, mientras que en noviembre el lago se encontraba en la fase de almacenamiento térmico, como lo describe RICHESON (1991), condiciones que inciden en la distribución espacial de las áreas de vegetación sumergida. De igual manera, SCHNEIDER *et al.* (2015) explican el crecimiento de las macrofitas expuestas a condiciones de mucha luz. Mientras que POUILLY *et al.* (2014) y VINCENT *et al.* (1986) reportaron el 1% de la Z_{eu} hasta 20 m de profundidad en el lago Mayor, tal como se registró en el campo.

La clasificación con el método del árbol de decisión permitió identificar tres clases de vegetación acuática relacionadas con la distribución de las macrofitas sumergidas en dos periodos estacionales; sin embargo, como lo refiere ZHAO *et al.* (2012), los valores umbral del árbol de decisión solo son aplicables a una imagen en un tiempo específico, debido a que existen factores intrínsecos e extrínsecos, como las condiciones atmosféricas y la calidad del agua que influyen la clasificación. El análisis de un periodo más extenso y con mayor cantidad de imágenes y de datos *in situ* permitirá construir árboles de decisión con umbrales más precisos.

5. CONCLUSIONES

La clasificación de la vegetación acuática identificada en este estudio representa dos momentos y condiciones ambientales específicos comprobados por la diferencia en el tamaño de las áreas por tipo de vegetación. Por ello, el estudio de la variabilidad estacional de la vegetación acuática en el cinturón circunlacustre del lago Titicaca requiere la construcción de series de tiempo con datos satelitales e

important regulators of transparency. This would confirm the low concentration of chlorophyll-*a* in the evaluated areas, especially in the deep main basin, which is in agreement with AGUIRRE-GÓMEZ (2015), who indicates that a low percentage of light penetration and high chlorophyll-*a* content are indicators of eutrophication, which was not observed in the evaluated areas.

The occurrence of submerged vegetation up to about 20 m depth is directly related to light intensity. Here, the extent of submerged vegetation areas recorded in June occurred after the main period of thermal losses, while in November the lake was in the thermal storage phase, as described by RICHESON (1991), conditions that influence the spatial distribution of submerged vegetation areas. Similarly, SCHNEIDER *et al.* (2015) explain the growth of macrophytes exposed to high light conditions. In addition, POUILLY *et al.* (2014) and VINCENT *et al.* (1986) reported 1% of the Z_{eu} up to 20 m depth in the Lake Titicaca's deep main basin, as recorded in the field.

The classification with the decision tree method allowed the identification of three classes of aquatic vegetation related to the distribution of submerged macrophytes in two seasonal periods. Nevertheless, as noted by ZHAO *et al.* (2012), the threshold values of the decision tree are only applicable to an image at a specific time, because there are intrinsic and extrinsic factors, such as atmospheric conditions and water quality influencing the classification. The analysis of a longer period and with more images and *in situ* data will allow the construction of decision trees with more accurate thresholds.

5. CONCLUSIONS

The classification of aquatic vegetation identified in our study represents two specific times and environmental conditions evidenced by the difference in the size of the areas for each type of vegetation. Therefore, the study of seasonal variability of aquatic vegetation in the surrounding areas of Lake Titicaca requires the construction of time series with satellite data

información de parámetros ambientales relacionados con el desarrollo de las especies a fin de entender los cambios estacionales en la distribución de la vegetación acuática y su impacto en la calidad de agua del lago Titicaca.

Debido a que los resultados de la clasificación por el método del árbol de decisión son puntuales para un tiempo y espacio determinados, estudiar la variabilidad de la vegetación acuática en el lago Titicaca requiere la evaluación sistemática en campo por un periodo corto con el propósito de aprovechar la amplia cobertura espacial y temporal de las imágenes Sentinel-2.

Las firmas espectrales satelitales superficiales de las estaciones de muestreo evidenciaron patrones de reflectancia de la vegetación sumergida relacionados con el número de especies y la profundidad; sin embargo, es posible que a partir de mediciones de radiometría con espectrorradiómetros de alta resolución se pueda obtener firmas espectrales más detalladas que permitirían caracterizar los componentes químicos y biológicos del agua alrededor del cinturón circunlacustre.

Las imágenes satelitales de Sentinel-2 de alta resolución espacial permitieron identificar tres tipos de vegetación acuática, lo que evidencia la importancia del uso de la tecnología satelital en el estudio de los ecosistemas terrestres y acuáticos a micro escala. El desarrollo de estudios sobre la variabilidad de la vegetación acuática permitirá comprender la ocurrencia de otros procesos físico-químico-biológicos, como las floraciones algales y los eventos de anoxia, por lo que se sugiere continuar los programas de investigación tanto en la zona circunlacustre como en el lago mayor.

and information on environmental parameters related to species development to understand seasonal changes in the distribution of aquatic vegetation and its impact on water quality in the lake.

Since the results of the classification by the decision tree method are specific for a given time and space, studying the variability of the aquatic vegetation in Lake Titicaca requires systematic field evaluation for a short period to take advantage of the wide spatial and temporal coverage of the Sentinel-2 images.

Surface satellite spectral signatures from the sampling stations showed reflectance patterns of submerged vegetation related to the number of species and depth but we could obtain more detailed spectral signatures from radiometry measurements with high-resolution spectroradiometers that would allow characterizing the chemical and biological components of the water in the surrounding area of Lake Titicaca.

The high spatial resolution Sentinel-2 satellite images allowed the identification of three types of aquatic vegetation, which demonstrates the importance of the use of satellite technology in the study of micro-scale terrestrial and aquatic ecosystems. The development of studies on the variability of aquatic vegetation will facilitate understanding the occurrence of other physical-chemical-biological processes, such as algal blooms and anoxia events, so we suggest continuing research programs both in the surrounding areas of the lake and its deep main basin.

6. REFERENCIAS

- AGUIRRE-GÓMEZ, R. (2015). Análisis óptico hiperespectral del Lago de Zumpango, México. *Investigaciones Geográficas*, 0(84). doi:10.14350/rig.34052
- APHA. (2005). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, 17 Edición. Editores Díaz de Santos S.A. Madrid. 1816 pp.
- CHE. (2005). Informe de situación 2005 Control del Estado de las Masas de Aguas Superficiales. Confederación Hidrográfica del Ebro. España. www.chebro.es/en/rios
- CIRUJANO, S., CAMBRA, J., SANCHEZ, A., FLOR, N. (2008). Flora ibérica - Algas continentales: Carófitos (Characeae). Real Jardín Botánico, CSIC. Madrid. ISBN: 978-84-612-1319-1.
- CIRUJANO, S., MECO, A., CEZÓN, K. (2011). Flora acuática: Macrófitos. Jornada de presentación del Tesoro Taxonómico para la clasificación del estado ecológico de las masas de agua continentales, TAXAGUA. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, España.
- DEJOUX, C., ILTIS, A. (1991). El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. La Paz - Bolivia: HISBOL, ORSTOM. pp. 107-114.
- ESA. (2017). Sen2Cor configuration and user manual. The European Space Agency. Ref. S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.4. 53.

- FITZGERALD, D., ZHU, B., HOSKINS, S., HADDAD, D., GREEN, K., RUDSTAM, L., MILLS, E. (2005). Quantifying submerged aquatic vegetation using aerial photograph interpretation, *Fisheries*, 30, 2, 61-73, DOI: 10.1577/1548-8446(2005)30[61:QSAVUA]2.0.CO;2
- GALLEGO, D. (2015). Caracterización de las macrofitas del humedal Meandro del Say como insumo de las herramientas de conservación. Trabajo de grado para optar el título de ingeniera ambiental. Universidad Santo Tomas. 79 pp.
- GONZÁLES-LUNA, C., FILONOV, A., MIRELES, O., TERESHCHENKO, I. (2019). Análisis espectral y dispersión superficial de detritus suspendidos en la Bahía de Banderas mediante imágenes de satélite. *Revista Cartográfica*, 98, 223-237.
- HARMA, P., VEPSALAINEN, J., HANNONEN, T., KAMARI, J. (2001). Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland. *Sci Tot Environ*. 268. 4. 111-197.
- HU, M. (2009). A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2118-2129.
- JEFFREY, W., HUMPHREY, F. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls A, B, C1 and C2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie Und Physiologie Der Pflanzen*, 167(2), 191-194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3)
- KAHRU, M., SAVCHUK, P., ELMGREN, R. (2007). Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability. *Marine Ecology Progress Series*, 343, 15-23
- MCFEETERS, K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. Journal Remote Sensing*, 17, 1425-1432.
- NORTHCOTE, T., MORALES, P., LEVY, D., GRAFVEN, M. (1991). Contaminación en el lago Titicaca, Perú: capacitación, investigaciones y manejo. *Westwater Research Centre, Univ. Drit. Columbia, Vancouver. Inst. Aguas Alt. And., UNTA, Puno*, 278 p.
- PAULINO, C., VILLEGAS, P., POLAR, M. (2019). Características de irradiancia espectral del mar y de la zona costera de Moquegua y Tacna durante setiembre 2017. *Bol Inst Mar Perú*. 34(1), 80-90.
- PEARSON, J., MILLER, L. (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Pawnee National Grassland Grover, CO*, pp. 1355-1379.
- POUILLY, M., LAZZARO, X., POINT, D., AGUIRRE, M. (2014). Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca. Quito, IRD-UICN. 320 p.
- RAYNAL-ROQUES, A. (1991). Las Plantas Superiores, en *El Lago Titicaca, Síntesis del conocimiento limnológico actual* (Dejoux, C. and Iltis, A., eds). ORSTOM y HISBOL, La Paz, 233-239.
- RICHERSON, P. J. (1991). El régimen de estratificación termal del Lago Titicaca. En *Dejoux C & Iltis A* (Eds.) *El Lago Titicaca; síntesis del conocimiento limnológico actual*. La Paz, HISBOL, ORSTOM. pp. 139-148.
- ROUSE, J., HAS, R., SCHELL, J., DEERING, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351. 1. NASA, Washington, DC*, pp. 309-317.
- SCHNEIDER, S. C., PICHLER, D. E., ANDERSEN, T., MELZER, A. (2015). Light acclimation in submerged macrophytes: The roles of plant elongation, pigmentation and branch orientation differ among *Chara* species. *Aquatic Botany*, 120, 121-128.
- SOBRINO, J., RAISSOUNI, N., KERR, Y., OLIOSO, A., LÓPEZ-GARCÍA, M., BELAID, A., EL KHARRAZ, H., CUENCA, J., DEMPÈRE, L. (2000). Teledetección. *Servicio de Publicaciones Universidad de Valencia*. 467 pp.
- VINCENT, W. F., WURSTBAUGH, W. A., NEALE, P. J., RICHERSON, P. J. (1986). Polymixiid and algal production in a tropical lake: latitudinal effects on the seasonality of photosynthesis. *Freshw. Biol*, 16, 781-803.
- VILLA, P., PINARDI, M., BOLPAGNI, R., GILLIER, J. M., ZINKE, P., NEDEL CUT, F., BRESCIANI, M. (2018). Assessing macrophyte seasonal dynamics using dense time series of medium resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 216. 230-244. 10.1016/j.rse.2018.06.048.
- WATANABE, F., IMAI, N., ALCANTARA, E., BARBOSA, C., DA SILVA, L. (2013). Identification of submerged aquatic vegetation using simulated data from Sentinel-3, *ESA Living Planet Symposium*, 722, 190.
- XU, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int J Remote Sens*, 27, 3025-3033.
- YOSHINO, S., NOBUHIRO, N., HERENIO, E., HENRIQUE DA SILVA, L., GARCEZ, A. (2013). Signal classification of submerged aquatic vegetation based on the hemispherical-conical reflectance factor spectrum shape in the yellow and red regions. *Remote Sensing*, 5, 1856-1874.
- ZHAO, D., JIANG, H., YANG, T., CAI, Y., XU, D., AN, S. (2012). Remote Sensing of Aquatic Vegetation Distribution in Taihu Lake Using an Improved Classification Tree with Modified Thresholds. *Journal of Environmental Management*, 95(1), 98-107. doi:10.1016/j.jenvman.2011.10.007
- ZHAO, H., LI, T., JIANG, H., CAI, Y., XU, L., AN, Q. (2013). Spatio-temporal variability of aquatic vegetation in Taihu Lake over the past 30 years. *PLOS ONE*. 8. 1-7.
- ZHOU, Q., ZHANG, Y., LI, K., HUANG, L., YANG, F., ZHOU, Y., CHANG, J. (2018). Seasonal and spatial distributions of euphotic zone and long-term variations in water transparency in a clear oligotrophic Lake Fuxian, China. *Journal of Environmental Sciences*. 72, 185-197, ISSN 1001-0742, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.01.005>