

BASES DE DATOS, PERCEPCIÓN REMOTA Y SIG APLICADOS A LA GESTIÓN AMBIENTAL

Monitoreo de la calidad del agua del lago Chinchaycocha, mediante técnicas de teledetección espacial.

Monitoring the water quality of the Chinchaycocha lake, thru remote sensing techniques.

Christian Ayala Jesús¹
y Marco Antonio Herrera Díaz
¹Esterd Consultores S.A.C., Perú
christian996971191@gmail.com

Recibido: 17/06/2019
Aceptado: 20/11/2019
Publicado: 27/12/2019

RESUMEN

Las técnicas de teledetección o percepción remota se pueden usar para la estimación de variables de calidad del agua como clorofila, partículas suspendidas totales y transparencia de agua. Este artículo presenta algoritmos empíricos para su estimación que utilizan los datos del sensor *Operational Land Imager* (OLI, por sus siglas en inglés), del satélite Landsat 8/LCDM. Los datos se tomaron en el lago Chinchaycocha, pues el mismo presenta sustancias nutritivas que generan el aumento de la producción de algas y otras plantas acuáticas, las cuales deterioran la calidad del agua. Se obtuvieron ecuaciones empíricas para estimar la clorofila a partir de la relación en los valores de reflectividad, con la utilización del método de Chávez, entre las bandas 3 y 5 del sensor OLI; la transparencia mediante el disco de secchi, por la de la influencia en las bandas 3 y 4, y partículas totales suspendidas de la influencia en la banda 5; todo lo cual arrojó como resultado mapas del lago Chinchaycocha donde se muestran los valores de estos parámetros de calidad del agua. La investigación valida la efectividad de las técnicas utilizadas.

PALABRAS CLAVE: estado trófico, lago, *operational land imager*, reflectividad.

ABSTRACT

The remote sensing technique or remote perception can be used to estimate the water quality variables, such as chlorophyll, total suspended matter and water clearness. This article presents empiric algorithms for its estimation which use the Operational Land Imager (OLI) sensor data from the satellite Landsat 8/LCDM. The data were taken from the Chinchaycocha lake, because it has nutritive substances that improve the algae production and other aquatic plants that deteriorate the water quality. We obtain empiric equations to estimate chlorophyll on the relation of reflectivity values with the Chavez method, between 3 and 5 OLI sensor bands; the transparency through the disco de secchi, the influence on the 3 and 4 bands; and the total suspended matter influence on band 5; shows as a result, maps of Chinchaycocha lake were the values of this parameters can be seen. This investigation supports the techniques used.

KEYWORDS: lake, operational land imager, reflectivity, trophic state.

INTRODUCCIÓN

El estado eutrófico de las aguas es un problema fundamental, pues puede ocasionar el aumento de la turbidez y el cambio de su color hacia el verde, debido a un aumento en la abundancia de fitoplancton, lo cual es perjudicial (Moncayo y Bueno, 2016). Según la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), la eutrofización se define como el enriquecimiento del agua por sustancias nutritivas que generalmente conduce a cambios, tales como el aumento de la producción de algas y otras plantas acuáticas, el deterioro de su calidad y ecosistema (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 1982). Es por ello que resulta importante realizar un monitoreo de la calidad del agua, para así poder determinar posibles soluciones. Por otra parte, la teledetección es la técnica de poder obtener información sin estar en contacto físico con el medio; esto se realiza a través de sensores que se encuentran acoplados en las plataformas conocidas como satélites, los cuales giran alrededor de la tierra realizando tomas de información por medios de los mismos. El tiempo que un satélite demora en pasar por el mismo punto se llama periodo de revisita, y gracias a esto es posible realizar un seguimiento temporal.

La resolución espacial del sensor OLI, del satélite Landsat 8 (30 metros/píxel), es apropiada para poder realizar el estudio de la calidad del agua y determinar algunas variables. La resolución espectral de otros sensores como MODIS, a bordo del Satélite AQUA y TERRA sería la más adecuada, pero su resolución espacial no es apropiada en este estudio que oscila de 250 a 1000 metros/píxel. La ventaja del sensor OLI es que permite monitorear variables de calidad del agua como transparencia, partículas suspendidas en el agua y clorofila-a (Doña *et al.*, 2014; Moncayo y Bueno, 2016).

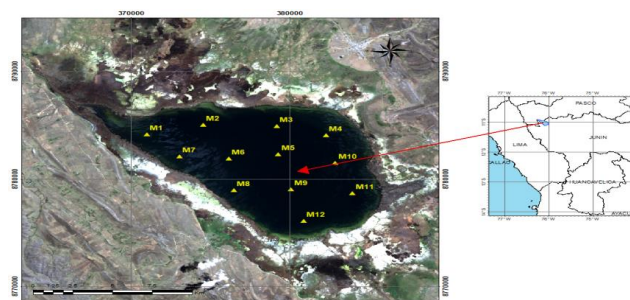
El objetivo de este trabajo es realizar ecuaciones empíricas para poder estimar las tres variables de calidad del agua, con ayuda de muestras tomadas en el lago Chinchaycocha, pues el mismo posee características hipertróficas, debido a que parte de los desechos de la población y la actividad turística discurren en él afectándolo, igual que la actividad minera. Si se continúa sin preservar estas aguas se deterioran con el tiempo y será imposible recuperarlas (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El lago Chinchaycocha está ubicado a 4 200 msnm en los Andes centrales, distritos de Ondores, Carhuamayo y Junín de la región Junín; y distritos de Ninacaca y Vicco de la región Pasco. Se encuentra ubicado dentro de la reserva nacional, protegido por el Servicio Nacional de áreas Naturales Protegidas (SERNANP). El lago Chinchaycocha es reconocido por la Convención Ramsar desde el año 1997 como un humedal de relevancia internacional, debido a su importante hábitat para las aves acuáticas.

Figura 1. Distribución de las muestras tomadas en campo.



Fuente: *Elaboración propia.*

Datos basados en el campo

Los datos tomados en campo corresponden a clorofila-a (Ch-l en mg/L); transparencia del agua mediante el *disco de Secchi* en metros (SD en m); y la concentración de sólidos suspendidos totales (TSS en mg/L). Para ello se tomaron un total de 12 muestras en el lago (*tabla 1*). La concentración de clorofila-a se utiliza para estimar la biomasa de algas, por ello se estimó extrayendo muestras en frascos de vidrio, llevados al laboratorio. La transparencia del agua se midió con el disco de *Secchi*, que también se utiliza para estimar el estado trófico de las aguas, debido a que esta se ve afectada por el color, las algas y las partículas suspendidas. La concentración de sólidos suspendidos totales, que incluye partículas muertas, inertes y degradadas, se valoró extrayendo muestras de agua en frascos de vidrio, enviados al laboratorio para su respectivo análisis.

Tabla 1. Muestras tomadas en el lago Chinchaycocha, coordenadas UTM WGS 84 Zona 18 Sur.

MUESTRAS	COORDENADAS UTM		CHL-A (MG/L)	TSS (MG/L)	DS (M)
	ESTE (X)	NORTE (Y)			
M1	370986	8784190	22.32	21.12	1.11
M2	374542	8785079	18.06	10.15	0.56
M3	379177	8784931	17.92	9.34	0.61
M4	382268	8784085	17.31	8.40	0.39
M5	379262	8782328	16.54	7.80	0.45
M6	376151	8781926	20.66	7.50	0.52
M7	373039	8782116	18.67	14.3	0.81
M8	376468	8778983	22.42	9.8	0.52
M9	380066	8779047	15.80	8.79	0.54
M10	382839	8781502	18.16	9.20	0.30
M11	383940	8778687	16.50	8.20	0.30
M12	380850	8776126	18.67	15.84	0.39

Nota: Los datos se tomaron en la fecha y hora de adquisición de la imagen Landsat 8 (01/10/2017 a las 15:00 horas UTC). **Fuente:** *Elaboración propia*.

Datos satelitales

Las imágenes multiespectrales que se usaron corresponden al sensor OLI del satélite Landsat 8/LCDM, que se puede descargar libremente del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Los archivos de la USGS, de las imágenes OLI de Landsat 8/LCDM, permiten realizar un seguimiento temporal a partir del año 2013 hasta la actualidad, y determinar no solo el estado trófico de las aguas, sino también el monitoreo de la vegetación mediante índices, gracias a las características espectrales del sensor OLI/TIRs de Landsat 8/LCDM (Ariza, 2013).

Tabla 2. Características del Satélite Landsat 8/LCDM.

Sensor	Banda	Espectral (μm)	Resolución		Radiométrica (bits)	Área de cobertura (km^2)
			Espacial (m)	Temporal (días)		
Landsat 8 OLI/TIRs	1	0.43-0.45	30			183 x 170
	2	0.45-0.51	30			
	3	0.53-0.59	30			
	4	0.64-0.67	30			
	5	0.85-0.88	30			
	6	1.57-1.65	30	16	12	
	7	2.11-2.29	30			
	8	0.50-0.68	15			
	9	1.36-1.38	30			
	10	10.60-11.19	100			
	11	11.50-12.51	100			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Sensor y escena utilizada en este trabajo.

IMAGEN	FECHA
Landsat 8/LCDM (Path/row: 067/008)	01-10-2017

Fuente: Elaboración propia.

Pre-procesado de Landsat 8/LCDM

El pre-procesado de las imágenes Landsat consistió en la calibración radiométrica y la corrección atmosférica. La calibración radiométrica se realiza para poder convertir los datos medidos por el sensor (CD) a radiancia L ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) para cada banda espectral «i» (Ariza, 2013).

$$L_i = M_L \cdot DN_i + A_L \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

- L_i : Radiancia espectral del sensor
- M_L : Multiplicativo para la banda i
- A_L : Aditivo para la banda i.
- DN_L : Número de cuenta digital de la imagen

Estos coeficientes de calibración se encuentran dentro del archivo metadato de la imagen. Se utilizaron diversos métodos de corrección atmosférica entre el FLASH, QUAC y el método de Chávez o del punto oscuro, utilizado solo este último para poder calcular la reflectividad de la superficie. El método de Chávez permite obtener directamente una imagen de reflectividad de la superficie a partir de una imagen de radiancias en el sensor, sin necesidad de calcular la reflectividad TOA (techo de la atmósfera) como paso intermedio. En dicho método se considera que la radiación solar difusa es cero y la transmisividad atmosférica entre la superficie y el sensor es la unidad (Brizuela *et al.*, 2007). Se calculó la reflectividad de superficie mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{sup} = \frac{d^2 \cdot \pi \cdot (L_i - L_{camino})}{t \cdot E_0 \cdot \cos\theta_z} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

- ρ_{sup} : Reflectividad de superficie
- d : Distancia de la tierra al sol en unidades astronómicas
- L_i : Radiancia espectral del sensor
- L_{camino} : Radiancia camino
- t : Transmisividad atmosférica
- E_0 : Irradiancia solar estratosférica
- $\cos\theta_z$: Coseno del ángulo cenital solar

La radiancia camino se calculó a partir de la siguiente expresión (Lim y Choi, 2015):

$$L_{camino} = L_{min} - L_{1\%} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

- L_{min} : Es radiancia TOA correspondiente al número de cuentas digitales mínimo para cada banda.
- $L_{1\%}$: Es el valor de radiancia que tiene al menos el 1% de los píxeles de la imagen.

El $L_{1\%}$ se calcula como (Lim y Choi, 2015):

$$L_{1\%} = \frac{0.01 \cdot t \cdot E_0 \cdot \cos\theta_z}{d^2 \cdot \pi} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde

- d : Distancia de la tierra al sol en unidades astronómicas
- t : Transmisividad atmosférica
- E_0 : Irradiancia solar estratosférica
- $\cos\theta_z$: Coseno del ángulo cenital solar.

Desarrollo de algoritmos

Para poder realizar las comparaciones se realizaron regresiones lineales entre ecuaciones aplicadas a las bandas del sensor OLI de Landsat 8/LCDM. En el presente trabajo se abordará la reflectividad de la superficie de la banda 5 (infrarrojo cercano, «b5»), banda 4 (rojo, «b4») y banda 3 (azul, «b3»). Las mismas son indispensables para poder determinar variables de calidad del agua, debido a su respuesta espectral. Además, se tomaron ecuaciones propuestas por diferentes autores con la finalidad de ver su similitud entre la realidad de estudio y situación actual. Finalmente, se seleccionaron las regresiones que muestran el mejor rendimiento en función de los parámetros estadísticos (Duan *et al.*, 2006; López y Caselles, 1987).

Tabla 4. Algoritmos para estimación de sólidos suspendidos totales con datos de reflectividad de superficie de Landsat 8/LCDM.

AUTOR	ALGORITMO	a	b	c	R ²
Algoritmo propuesto	$a + b \cdot OLI5$	2.99	337	-	0.69

Nota: a y b son los coeficientes de regresión y R² es la correlación de los datos de campo con los datos obtenidos del sensor. **Fuente:** *Elaboración propia.*

Tabla 5. Algoritmos para estimación de transparencia de agua con datos de reflectividad de superficie de Landsat 8/LCDM.

AUTOR	ALGORITMO	a	b	c	R ²
Algoritmo propuesto	$a + b \cdot OLI3 + c \cdot OLI4$	1.16	-3.83	-2.77	0.81

Nota: a, b y c son los coeficientes de regresión y R² es la correlación de los datos de campo con los datos obtenidos del sensor. **Fuente:** *Elaboración propia.*

Tabla 6. Algoritmos para estimación de clorofila-a con datos de reflectividad de superficie de Landsat 8/LCDM.

AUTOR	ALGORITMO	a	b	c	R ²
Algoritmo propuesto	$a + b \cdot OLI3 + c \cdot OLI5$	2.05	132	197	0.77

Nota: a, b y c son los coeficientes de regresión y R² es la correlación de los datos de campo con los datos obtenidos del sensor. **Fuente:** *Elaboración propia.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos basados en campo

Los datos de campo confirman que este lago posee una transparencia (DS) con un mínimo de 0.48 m, el valor máximo de concentración de clorofila-a es de 54.93 mg/L y los sólidos suspendidos totales son de 16.18 mg/L (*tabla 1 y figura 3*).

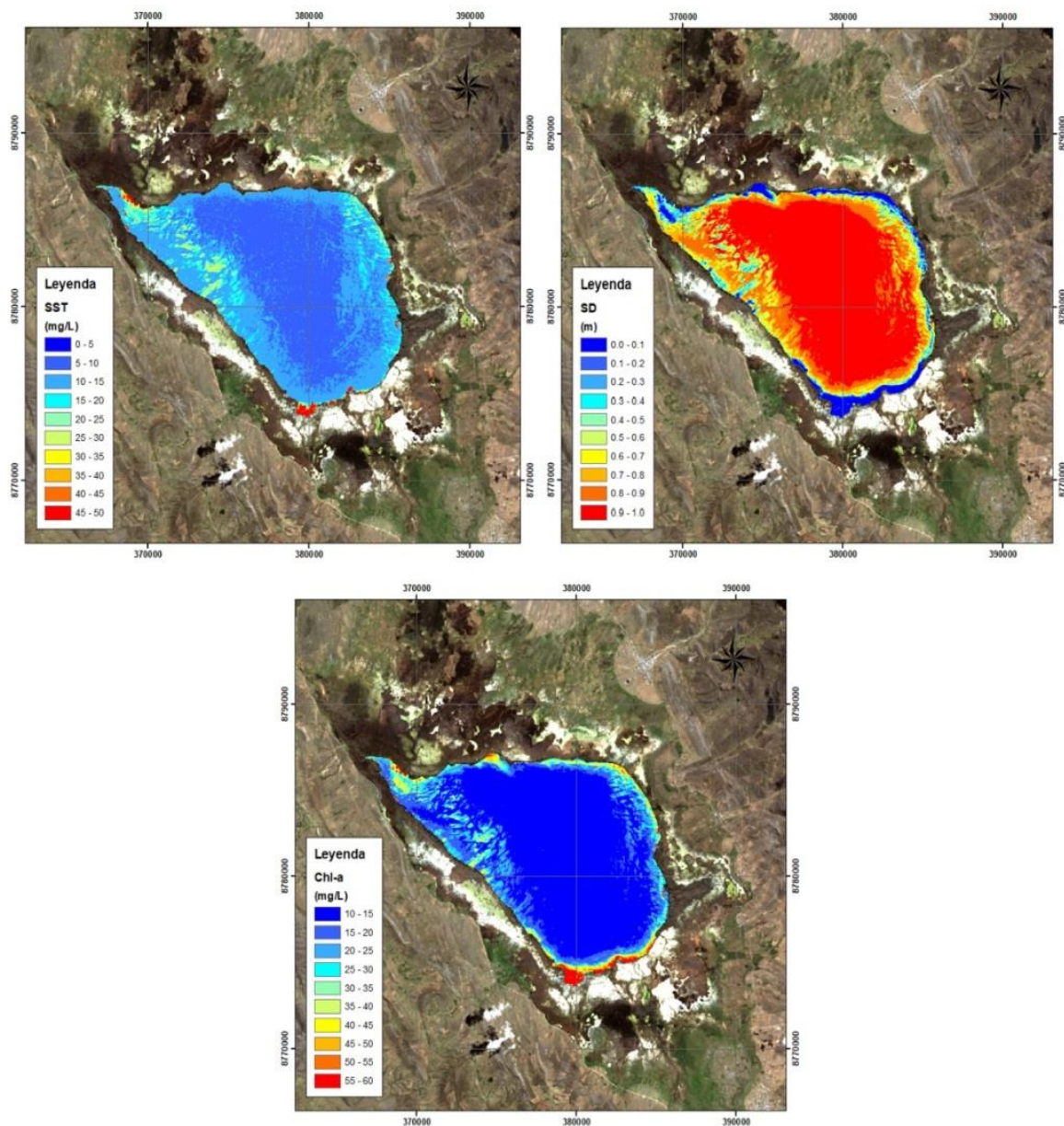
Algoritmos propuestos

1. *Transparencia (SD):* Al utilizar la reflectividad de la banda 4 (banda roja) y la banda 3 (banda azul) del sensor OLI de Landsat 8, se obtuvo una correlación de 0.69 (*tabla 4 y figura 3*) con los datos medidos en campo.

2. *Concentración sólidos suspendidos totales:* En este caso, la banda 5 del sensor OLI mostró los mejores resultados para la estimación de TSS. Con respecto a la comparación entre los valores modelados y medidos de TSS para el conjunto de datos de prueba, se tuvo en cuenta que el algoritmo propuesto muestra una correlación de 0.81 (*tabla 5 y figura 3*) con los datos medidos en campo.

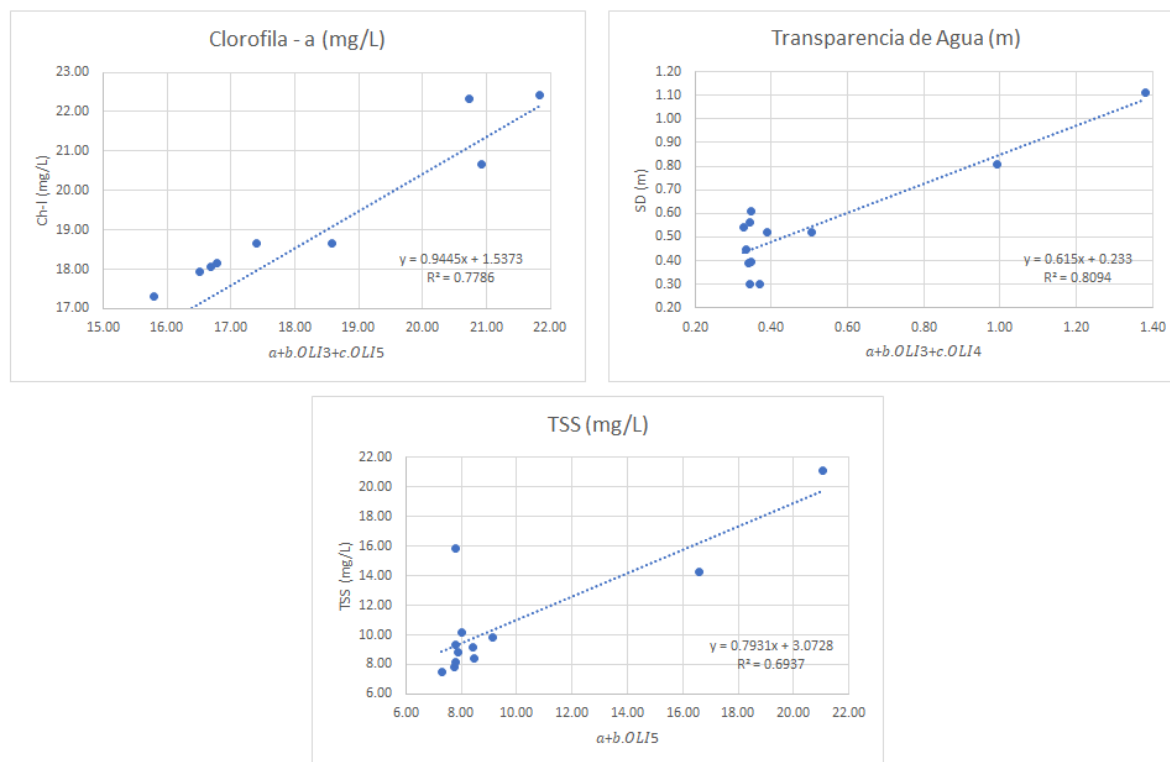
3. *Concentración de clorofila-a*: En una primera parte, se intentó relacionar el nivel de clorofila-a directamente a OLI 3 (banda roja), propuesto por Domínguez *et al.* (2009) a TM2 como una sola variable de entrada, donde solo utilizó la reflectividad de la banda 2 (banda roja) mediante el sensor TM de *Landsat 5*, pero los resultados no fueron satisfactorios, debido al bajo valor de ajuste y los altos errores obtenidos. Finalmente, se obtuvo la ecuación utilizando la banda 3 y la banda 5 del satélite *Landsat 8*; en este caso se obtuvo un coeficiente de regresión de 0.77 (*tabla 6 y figura 3*). El algoritmo propuesto se aplicó a estos grupos de datos reservados para las pruebas, y los resultados se compararon con los datos medidos en el terreno.

Figura 2. Mapas elaborados a partir de las ecuaciones propuestas. En la parte superior derecha se obtuvieron los sólidos totales suspendidos, en la parte superior izquierda la transparencia de agua y en la parte inferior el nivel de clorofila-a.



Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 3. Gráfica de las correlaciones obtenidas mediante los datos calculados con las ecuaciones propuestas para Landsat 8 y los datos obtenidos en campo.



Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los algoritmos utilizados fueron validados en el lago Chinchaycocha, respaldados por campañas adicionales de campo, y muestran resultados aceptables en términos de estimación de clorofila-a y sólidos suspendidos en correlaciones de 0.77 y 0.69 respectivamente. Sin embargo, algunas discrepancias se incrementaron al monitorear la transparencia del agua como consecuencia de los bajos valores de este parámetro y las condiciones de viento en la sierra de Junín, lo que ocasionó un gran error relativo en la determinación de este parámetro.

El uso de imágenes del sensor OLI es especialmente atractivo para estudiar la evolución de la calidad del agua del lago Chinchaycocha. Además, la similitud de las ecuaciones propuestas por diferentes autores mediante el sensor TM puede relacionarse con el sensor OLI, debido a su similitud en la respuesta espectral. Los usuarios tienen acceso gratuito a los archivos *Landsat*, disponible en línea de la USGS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://cutt.ly/JyPROFF>
- Brizuela, A., Aguirre, C. y Velasco, I. (2007). *Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para seguir análisis multitemporal*. CONICET.

- Domínguez, J.A., Chuvieco, E. y Sastre, A. (2009). Monitoring transparency in inland water bodies using multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 30(6), 1567–1586. <https://doi.org/10.1080/01431160802513811>
- Doña, C., Sanchez, J., Caselles, V., Domínguez, J. y Camacho A. (2014). Empirical Relationships for Monitoring Water Quality of Lakes and Reservoirs Through Multispectral Images. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observation and remote sensing*, 7(5), 1632-1641. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6730928>
- Duan, H., Zhang, Y., Zhang, B., Song, K. y Wang, Z. (2006). Assessment of Chlorophyll-a concentration and trophic state for Lake Chagan using Landsat TM and field spectral data. *Environ Monit Assess*, 129(1-3), 295-308. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9362-y>
- Lim, J. y Choi, C. (2015). Assesment of water quality based on Landsat 8 operational land imager associated with human activities in Korea. *Environ Monit Assess*, 187(6), 384. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4616-1>
- López-García, M. J. y Caselles, V. (1987). Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Albufera lagoon of Valencia (Spain). *Proc.13th Ann. Conf. of Remote Sensing Society. Nottingham*, 510-519. <https://cutt.ly/pyPRVqT>
- Moncayo, R., y Bueno M. (2016). Evaluación Espacio-Temporal del estado trófico de un lago de grandes dimensiones usando imágenes MOD09GA. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 7(1), 27-42. <https://doi.org/10.18359/rcin.1893>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (1982). *Eutrophisation des Eaux. Methodes de surveillance, d'évaluation et de lute.*
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (2015). *Humedales en Áreas Naturales Protegidas, fuentes de vida y desarrollo.* Ministerio del Ambiente del Perú. <https://cutt.ly/JyPR5Ct>