

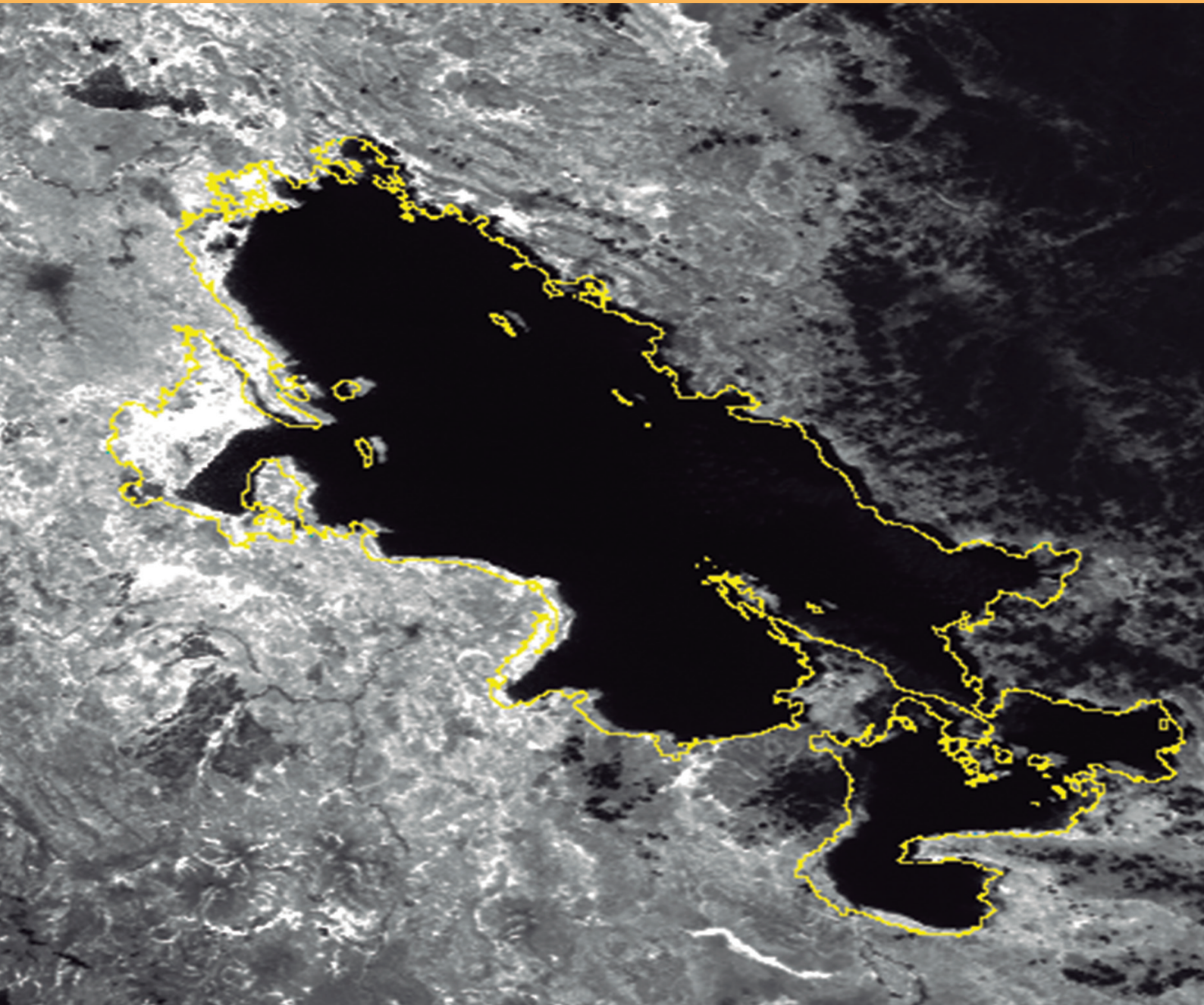


INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ

# INFORME

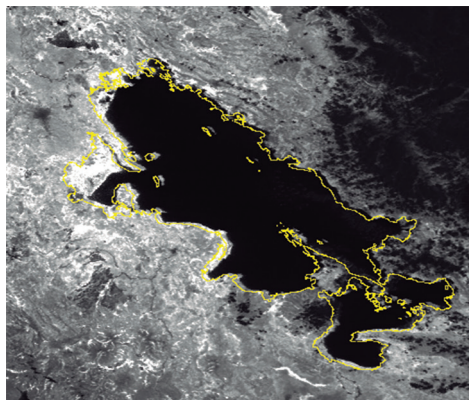
ISSN 0378-7702

Volumen 43, Número 3



Julio - Setiembre 2016  
Callao, Perú

INFORME IMARPE ISSN 0378-7702  
Inf Inst Mar Perú Vol 43 N° 3, Julio-Setiembre 2016



**PORTADA:** Imagen satelital del Lago Titicaca  
Imagen satelital con vector de área no coincidente ajustada  
geoméricamente con datos de geolocalización Landsat 8.  
TERASCAN system del IMARPE

© 2016 Instituto del Mar del Perú (IMARPE)

Esquina Gamarra y General Valle s/n

Casilla postal 22. Callao, Perú

Teléfono 208 8650

Fax: 429.9811

C. electrónico: [imarpe@imarpe.gob.pe](mailto:imarpe@imarpe.gob.pe)

---

#### Consejo Directivo IMARPE 2016

##### **PRESIDENTE**

Valmte. AP (r) JAVIER A. GAVIOLA TEJADA

##### **DIRECTOR EJECUTIVO CIENTÍFICO**

Blgo. RENATO GUEVARA CARRASCO

#### Comité Editorial

##### COORDINADORA

BLGA. EMIRA ANTONIETTI VILLALOBOS

##### EDITORIA

VIOLETA VALDIVIESO MILLA

##### CO-EDITOR

JUAN JOSÉ VÉLEZ DIÉGUEZ

##### DIAGRAMACIÓN

ARTURO SANDOVAL NAVARRO

---

#### Indizada en Aquatic Science Fisheries Abstracts (ASFA)

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2015-04965

Reservados todos los derechos de reproducción, publicación  
total o parcial, los de traducción y de la página Web.

Tiraje: 300 ejemplares

Terminado de imprimir: 2016

---

Distribución: canje, suscripción o compra

---

Impreso en: IAKOB Comunicadores y Editores SAC

Calle Los Talladores 474 - Ate

Telf. 364-8038 / 369-5019

---

La información estadística, los mapas, figuras, términos y designaciones  
empleados en esta publicación científica son referenciales, no tienen  
valor oficial, y son de completa responsabilidad de los autores.

# ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-a EN EL LAGO TITICACA USANDO IMÁGENES SATELITALES MERSI

## ESTIMATED CHLOROPHYLL-a IN TITICACA LAKE USING MERSI SATELLITE IMAGES

Carlos Paulino<sup>1</sup>  
Edward Alburqueque

Han Xu<sup>2</sup>  
German Velaochaga

### RESUMEN

PAULINO C, XU H, ALBURQUEQUE E, VELAACHAGA G. 2016. *Estimación de concentración de clorofila-a en el lago Titicaca usando imágenes satelitales MERSI*. Inf Inst Mar Perú. 43(3): 242-251.- Imágenes satelitales del sensor MERSI de 250 m de resolución espacial fueron usadas para la estimación de la concentración de clorofila-a del Lago Titicaca y su relación con los productos calibrados de concentración de clorofila-a del MODIS (AQUA) y VIIRS (NPP), los cuales son recepcionados y procesados por el sistema TERASCAN del IMARPE. Para la estimación de concentración de clorofila-a se usó 3 modelos de razón de bandas (MOD2-1, MOD2-2 y MOD2-3) a partir de valores de reflectancia de las imágenes MERSI. El análisis de distribución de clorofila-a en los perfiles P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub> indicó que el modelo MOD2-2 es el que se aproxima más a los valores calculados por VIIRS y MODIS. Los resultados evidenciaron una correlación de R=0,846 entre los valores de clorofila-a del MOD2-2 y VIIRS en el perfil P<sub>1</sub>, una correlación menor en el perfil P<sub>2</sub> de R=0,472 y una óptima correlación para valores de clorofila-a en un rango entre 0 a 2 mg/m<sup>3</sup> de R=0,945. Se evidenció la importancia de la resolución espacial de 250 m del modelo MOD2-2 en la estimación de la clorofila en el Lago Titicaca, porque permite identificar características que no pueden ser registradas con los sensores MODIS. Tanto para áreas abiertas como para zonas con abundante vegetación, los productos del MODIS y VIIRS de 1 km se saturan fácilmente, como en el caso de la bahía de Puno.

PALABRAS CLAVE: Clorofila-a, MERSI, Lago Titicaca, Perú

### ABSTRACT

PAULINO C, XU H, ALBURQUEQUE E, VELAACHAGA G. 2016. *Estimated chlorophyll-a in Titicaca lake using MERSI satellite images*. Inf Inst Mar Perú. 43(3): 242-251.- Satellite images of the sensor MERSI of 250 m of spatial resolution were used for the estimation of the concentration of chlorophyll-a of Lake Titicaca and its relationship with the calibrated products concentration of chlorophyll-a from MODIS (AQUA) and VIIRS (NPP), which are received and processed by the TERASCAN system of the IMARPE. For the estimation of concentration of chlorophyll-a, we used 3 models of reason of bands (MOD2-1, MOD2-2 and MOD2-3) from reflectance values of the images MERSI. The analysis of distribution of chlorophyll-a in the profiles P<sub>1</sub> and P<sub>2</sub> indicated that the model MOD2-2 is the one that is closest to the calculated values by VIIRS and MODIS. The results showed a correlation of R=0.846 between the values of chlorophyll-a MOD2-2 and VIIRS in profile P<sub>1</sub>, a correlation lower in the profile P<sub>2</sub> of R=0,472 and an optimal correlation for values of chlorophyll-a in a range between 0 to 2 mg/m<sup>3</sup> of R=0,945. It was proved the importance of the spatial resolution of 250 m the model MOD2-2 in the estimation of chlorophyll in the Lake Titicaca, because it allows you to identify features that may not be registered with the MODIS sensors. Both for open areas such as for areas with abundant vegetation, in which products from MODIS and VIIRS of 1 km are saturated easily, as in the case of the Bay of Puno.

KEYWORDS: Chlorophyll-a, MERSI, Lake Titicaca, Peru

## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad de cuerpos de agua está ligada a la concentración de clorofila que genera un área de influencia donde se aprecian las relaciones entre clorofila-a, los recursos hídricos y el medio ambiente (REINART y KUSTER 2006) tales como la disminución de la solubilidad del oxígeno en el agua, la muerte de los organismos acuáticos y la liberación de sustancias tóxicas (CARMICHAEL 2001, LIU et al. 2004). Los métodos convencionales de detección de la calidad del agua tienen alto costo y generan pérdida de tiempo. La técnica de teledetección proporciona una manera

eficaz de rápida determinación del cuerpo de agua y su medio ambiente en grandes extensiones. Además, el gran campo de visión de las imágenes del satélite compensa la falta de datos in-situ (YE et al. 2009). La estimación de la concentración y la distribución de clorofila-a, consiste en encontrar relación entre las propiedades ópticas de diferentes tipos de cuerpos de agua y las características de reflectancia en un rango espectral dado, especialmente en el rango de longitud de onda visible e infrarrojo cercano (GORDAN et al. 1988, GITELSON et al. 2007). MITTENZWEY et al. 1992, DEKKER 1993 y HAN et al. 1997, obtuvieron la característica óptica de la reflectancia de clorofila-a

<sup>1</sup> Área de Sensoramiento Remoto AFSR-DGIHSA- Instituto del Mar del Perú, IMARPE. Av. Argentina 2245-Callao, Perú. cpaulino@imarpe.gob.pe

mediante la razón de reflectancias R705/R670, donde se observó un pico de alta reflexión en rango de longitud de onda central de 705 nm y un pico de absorción en 670 nm.

HAN et al. (2011) utilizaron los modelos de razón de bandas MOD2 y MOD3 para estimar la concentración de clorofila-a en el Lago Taihu en China, encontrando relaciones entre los dos modelos usados y los datos in-situ: i) relación lineal para el modelo MOD2 y ii) no logarítmica para el modelo MOD3. El valor mínimo y máximo del coeficiente de correlación  $R^2$  entre los datos in-situ y las seis fórmulas expresadas en las ecuaciones 8 y 9 fue de 0,43 y 0,79 respectivamente.

En el estudio de HAN et al. (2011) las muestras fueron tomadas en zonas de agua limpia con distintas concentraciones de clorofila-a, observándose que en el rango de longitud de onda ( $\lambda$ ) de 350 nm a 1000 nm, varía la forma de la firma espectral del agua. Para la zona del agua limpia y de poca concentración de clorofila-a existen tres picos de reflexión con  $\lambda$  de 570 nm, 700 nm, 810 nm. Cuando  $\lambda$  es mayor a 850 nm la reflectancia decrece de manera rápida (el valor es menor que 0,05). Sin embargo, para aguas con mayor concentración de clorofila-a aparecen dos picos de absorción alrededor de  $\lambda$  450 nm y 680 nm en la firma espectral, además, la reflectancia aumenta bruscamente en 690 nm, llegando a un valor máximo (0,22-0,3) entre 750-820 nm debido a la presencia de clorofila-a. Esto es similar a una firma espectral para la vegetación, estimándose el índice de vegetación a través de la razón del pico de reflexión (región infrarrojo cercano) al pico de absorción (región roja).

Asimismo, los modelos utilizan principalmente tres canales espectrales con longitud de onda central de 670 nm, 710 nm y 750 nm para la estimación de clorofila-a. El uso del modelo no depende del tipo de base de datos, pueden ser datos in-situ o imágenes satelitales (DALL'OLMO et al. 2005, GITELSON et al. 2008).

BROGE et al. 2002, describieron que no existe diferencia notable entre los modelos empleados para imágenes hiperespectrales y para bandas anchas. Tal como refiere DALL'OLMO et al, existe incertidumbre para la estimación de clorofila-a que es afectada por varios factores tales como la composición, las propiedades ópticas del agua y las condiciones atmosféricas.

El objetivo de la investigación fue estimar la concentración de clorofila-a basada en modelos de razón de bandas y evaluar la precisión entre los valores obtenidos mediante dicho modelo y los valores obtenidos por los productos MODIS y VIIRS.

## ÁREA DE ESTUDIO

El Lago Titicaca, es el lago navegable más alto del mundo y está ubicado entre los territorios del Perú y Bolivia (15°16'21"S a 15°50'20"S - 70°02'10"W a 69°46'23"W), a una altitud promedio de 3.812 msnm (Fig. 1).

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

Las imágenes MERSI provienen del sistema receptor de imágenes satelitales TERASCAN del IMARPE, el cual tiene la capacidad de recibir y procesar información del sensor MERSI de 250 m de resolución espacial y está a bordo del satélite FY-3C.

La órbita polar del satélite FY-3C, permite obtener imágenes del Perú aproximadamente alrededor de las 10:30 horas. El sensor MERSI tiene 20 canales; la resolución espacial de los canales 1 al 5 es de 250 m, con longitudes de onda central de 470 nm, 550 nm, 650 nm, 865 nm y 11.250 nm; mientras que los canales del 6 al 20 están en un rango espectral de 412 nm a 2130 nm y su resolución espacial es de 1,1 km. Para la estimación de la concentración de clorofila-a se utilizó los cuatro canales de 250 m del rango visible e infrarrojo cercano y cuyos resultados han sido comparados con los datos de clorofila-a del MODIS (AQUA) y VIIRS (NPP) del 20 de mayo de 2015.

El sistema TERASCAN, también permite recibir y procesar imágenes de los sensores MODIS (AQUA y TERRA) y VIIRS (NPP), imágenes con las cuales se ha comparado y analizado la información del MERSI.

Los datos utilizados del MERSI son del nivel L1A con resolución radiométrica de 12 bits, mientras que los del MODIS y VIIRS son de nivel L3 de 1 km de resolución espacial. El tiempo inicio de escaneo de las imágenes MERSI, MODIS-AQUA y VIIRS fueron a las 10:11, 13:21 y 14:08 hora local, respectivamente.



Figura 1.- Mapa de ubicación del Lago Titicaca localizado en Perú y Bolivia

Asimismo, se usó la carta digital (Carta N° 300) del Lago Titicaca, elaborada por la Comisión Mixta Peruana Boliviana (D.H.N.M. y el S.H.N.B.) y publicada por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú en 1993.

**Pre-procesamiento**

El primer paso es calibrar radiométricamente los números digitales (ND) del MERSI usando los coeficientes de calibración almacenados en el archivo cabecero en formato HDF5, con el fin de estimar la radiancia espectral  $L$  ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ). Para el sensor MERSI, la relación entre ND y  $L$  está expresada por la ecuación 1 (Hu et al. 2012):

$$L = a_0 + a_1 \cdot ND + a_2 \cdot ND^2 \quad , \quad (ec. 1)$$

Donde,  $L$  es la radiancia espectral;  $ND$  es el número digital;  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  son los coeficientes de calibración almacenados en el archivo cabecero.

Se ha estimado la reflectancia fuera de la atmósfera  $\rho_{TOA}$ , que es la fracción de la cantidad total de la radiación recibida por el sensor y expresada por la ecuación 2:

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi L d^2}{E_{sol} \cos \theta_s} \quad , \quad (ec. 2)$$

Donde,  $d^2$  es la razón de la distancia promedio Sol-Tierra entre la distancia Sol-Tierra en un día determinado del año, en unidades astronómicas AU (IQBAL 1983).  $E_{sol}$  es la irradiancia solar extraterrestre (Tabla 1).

La corrección geométrica se dividió en dos etapas: una corrección preliminar con los datos de geolocalización

Tabla 1.- Longitud de onda central, coeficientes de calibración e irradiancia solar extraterrestre de los canales 1-4 del MERSI de 250 m (Wu et al. 2011)

Canal	Longitud de onda central ( $\mu m$ )	Coeficientes de calibración			Irradiancia solar extraterrestre ( $W/m^2$ )
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	
1	0,412	-6,756000	0,028600	0	2007,95
2	0,443	-5,731000	0,028500	0	1741,58
3	0,490	-5,708000	0,028800	0	1558,31
4	0,520	-4,674000	0,028300	0	957,31

almacenados en el archivo de cabecero de la imagen, registrándose un desplazamiento de 4 a 6 píxeles o 1 km (Fig. 2a) entre la imagen georreferenciada con respecto al vector digital del perímetro del Lago Titicaca (DHNM 1993); motivo por el cual, se corrigió la imagen con 15 puntos de control obtenidos de una imagen Landsat 8 (Fig. 2b), obteniéndose finalmente un error menor a 2 píxeles aproximadamente (Fig. 2c).

La corrección atmosférica se hizo a través del módulo Quick Atmospheric Correction (QUAC) de ENVI 5.1. JIANG y ZHAO 2011, utilizaron el QUAC con el fin de detectar un derrame de petróleo en el Golfo de México. QUAC es un algoritmo semi-empírico que se basa en la fórmula de transferencia radiactiva expresada por la ecuación 3:

$$\rho_{TOA}(\lambda) = A(\lambda) + \frac{B(\lambda)}{1 - S(\lambda) \cdot M\rho(\lambda)} \cdot \rho(\lambda) + \frac{C(\lambda)}{1 - S(\lambda) \cdot M\rho(\lambda)} \cdot M\rho(\lambda) \quad , \quad (ec. 3)$$

Donde,  $\rho_{TOA}(\lambda)$  es la reflectancia fuera de la atmosfera,  $M\rho(\lambda)$  es el promedio de la reflectancia de los objetos vecinos,  $\rho(\lambda)$  es la reflectancia en el suelo,  $S(\lambda)$  es el albedo planetario de la atmosfera de la Tierra,  $A(\lambda)$ ,  $B(\lambda)$  y  $C(\lambda)$  son los coeficientes relacionados con la transmitancia y scattering en este modelo.

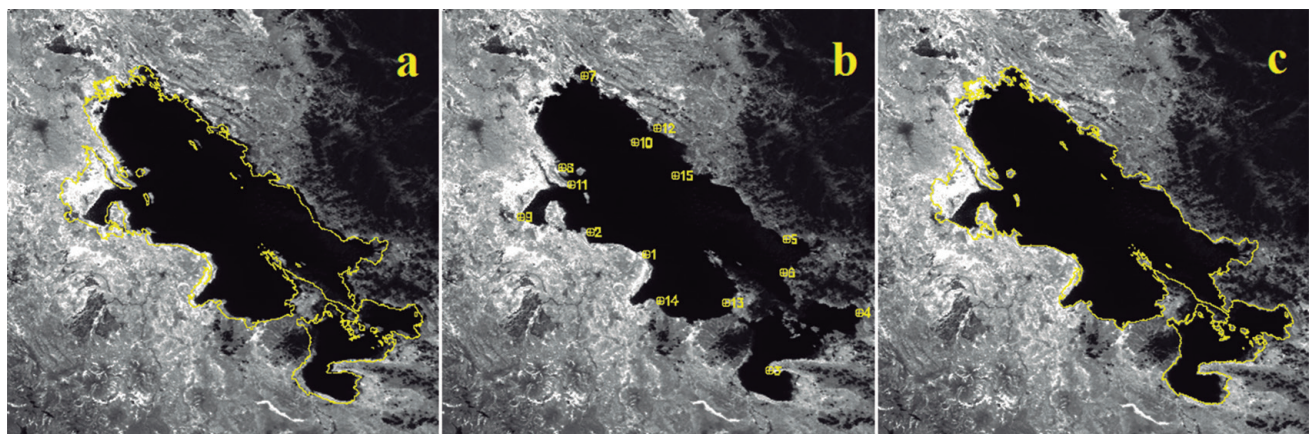


Figura 2.- a) Imagen satelital del Lago Titicaca con vector de área no coincidente ajustada geométricamente con datos de geolocalización; b) Puntos de control seleccionados (amarillo) para corrección geométrica; c) imagen corregida con datos GCPs (Ground Control Points) de la imagen OLI (Operational Land Imager) – Landsat 8

Cuando  $S(\lambda)$  es pequeño y el efecto de los objetos vecinos no es considerable, la ecuación (3) se expresa por la ecuación 4:

$$\rho_{TOA}(\lambda) = A(\lambda) + B(\lambda) \cdot \rho(\lambda) + C(\lambda) \cdot M\rho(\lambda) . \quad (\text{ec. 4})$$

Para los objetos oscuros (por ejemplo, la superficie del cuerpo de agua, la vegetación),  $\rho_{TOA}(\lambda)$  se aproxima a la ecuación 5:

$$\rho_{TOA}(\lambda) = A(\lambda) + C(\lambda) \cdot M\rho(\lambda) . \quad (\text{ec. 5})$$

Para este caso,  $\rho_{TOA}$  se denomina como la contribución de línea de base  $\rho_b$ . QUAC considera diversos tipos de pixeles espectrales (más de 10 tipos), para cada uno de ellos con desviación estándar no variada y proporciona a  $B(\lambda)$  como se expresa en la ecuación 6:

$$B(\lambda) = g_0 \cdot \sigma_p(\lambda) , \quad (\text{ec. 6})$$

Donde,  $g_0$  es el factor de normalización y  $\sigma_p(\lambda)$  es la desviación estándar para un determinado tipo de objeto (BERNSTEIN et al. 2005). Reemplazando las ecuaciones (5) y (6) en (4) se tiene la ecuación 7):

$$\rho(\lambda) = \frac{\rho_{TOA} - \rho_b}{g_0 \cdot \sigma_p(\lambda)} , \quad (\text{ec. 7})$$

Aquí,  $g_0$  y  $\sigma_p(\lambda)$  son los coeficientes almacenados en el modelo QUAC que ajustan los elementos externos de cada pixel de la imagen a través de la diferencia entre la reflectancia TOA y la reflectancia de línea de base para los objetos oscuros (agua, suelo oscuro y otros)  $\rho_{TOA} - \rho_b$  (ZHANG et al. 2010), donde, se ha empleado el modelo Máximo Ángulo Secuencial del Cono Convexo (Sequential Maximum Angle Convex Cone, SMACC) para la selección de los elementos externos (GRUNINGER et al. 2004).

### Modelo de razón de bandas

Para la estimación de clorofila-a se utilizó el modelo de razón de bandas MOD2 de cuatro canales propuesto por HAN et al. (2011) para los canales verde ( $\lambda$  550 nm) e infrarrojo cercano ( $\lambda$  865 nm) estos son sensibles al cambio de la clorofila-a, donde el pico de reflexión en 550 nm se debe a los pigmentos de las algas y en 865 nm al scattering (dispersión) múltiple. Para un determinado pixel, la sensibilidad del cambio de clorofila-a a través del uso de la razón de bandas se encuentra entre un pico de reflexión y un pico de absorción, por lo que la técnica de razón de bandas es idónea para la estimación de clorofila-a mediante los modelos MOD2 (ecuación 8) y MOD3 (ecuación 9), ambos desarrollados por HAN et al. (2011).

MOD2:

$$\begin{aligned} 1 &\rightarrow \frac{R_{Nir}}{R_{Red}} , \\ 2 &\rightarrow \frac{R_{Nir}}{R_{Green}} , \\ 3 &\rightarrow \frac{R_{Nir}}{R_{Blue}} . \end{aligned} \quad (\text{ec. 8})$$

MOD3:

$$\begin{aligned} 1 &\rightarrow (R_{Red}^{-1} - R_{Nir}^{-1}) \cdot R_{Green} , \\ 2 &\rightarrow (R_{Blue}^{-1} - R_{Green}^{-1}) \cdot R_{Nir} , \\ 3 &\rightarrow (R_{Blue}^{-1} - R_{Green}^{-1}) \cdot R_{Red} \end{aligned} \quad (\text{ec. 9})$$

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estimado de la concentración de clorofila-a del MERSI ha sido calculado a partir del modelo de razón de bandas y comparado con los datos de concentración de clorofila-a de los sensores VIIRS (NPP) y MODIS (AQUA); todas las imágenes satelitales usadas fueron recepcionadas y procesadas a través del sistema de recepción de imágenes satelitales TERASCAN del Área Funcional de Sensoramiento Remoto del IMARPE.

Los resultados de la estimación de clorofila-a entre los modelos de razón de bandas (MOD2-1, MOD2-2 y MOD2-3) son mostrados en las figuras 3a, 3b y 3c. Dichas imágenes presentan áreas de mayor concentración de clorofila-a en zonas cerradas debido a la presencia de vegetación (totales) como en la bahía de Puno. La vegetación existente en las orillas del lago conlleva a una sobreestimación de concentración de clorofila-a en esas áreas, cuyos valores están resaltados en la Tabla 2.

Las imágenes de clorofila-a de los sensores MODIS y VIIRS no presentan información (valores) en áreas consideradas de "alta concentración" debido a que el algoritmo para el cálculo de clorofila-a usa una máscara que descarta las zonas con presencia de vegetación en las orillas del lago (Fig. 3d, 3e). Sin embargo, para los modelos MOD2 la clorofila-a presenta información más completa en dichas áreas de "alta concentración".

El MOD2-1 presenta mayor valor de saturación (concentración de clorofila-a  $>15$  mg/m<sup>3</sup>) en zonas "cerradas" y menor valor en zonas abiertas (Fig. 3a), además se registró que el MOD2-2 es sensible en zonas de baja concentración de clorofila-a tal como se observa en la zonas norte y centro del lago (Fig. 3b), debido a que en el canal verde utilizado resalta los niveles de reflectancia de la vegetación en cuerpos de agua. Por otra parte, el modelo MOD2-3 es menos sensible al cambio de la concentración de clorofila-a entre áreas con alta presencia de vegetación (Fig. 3c).

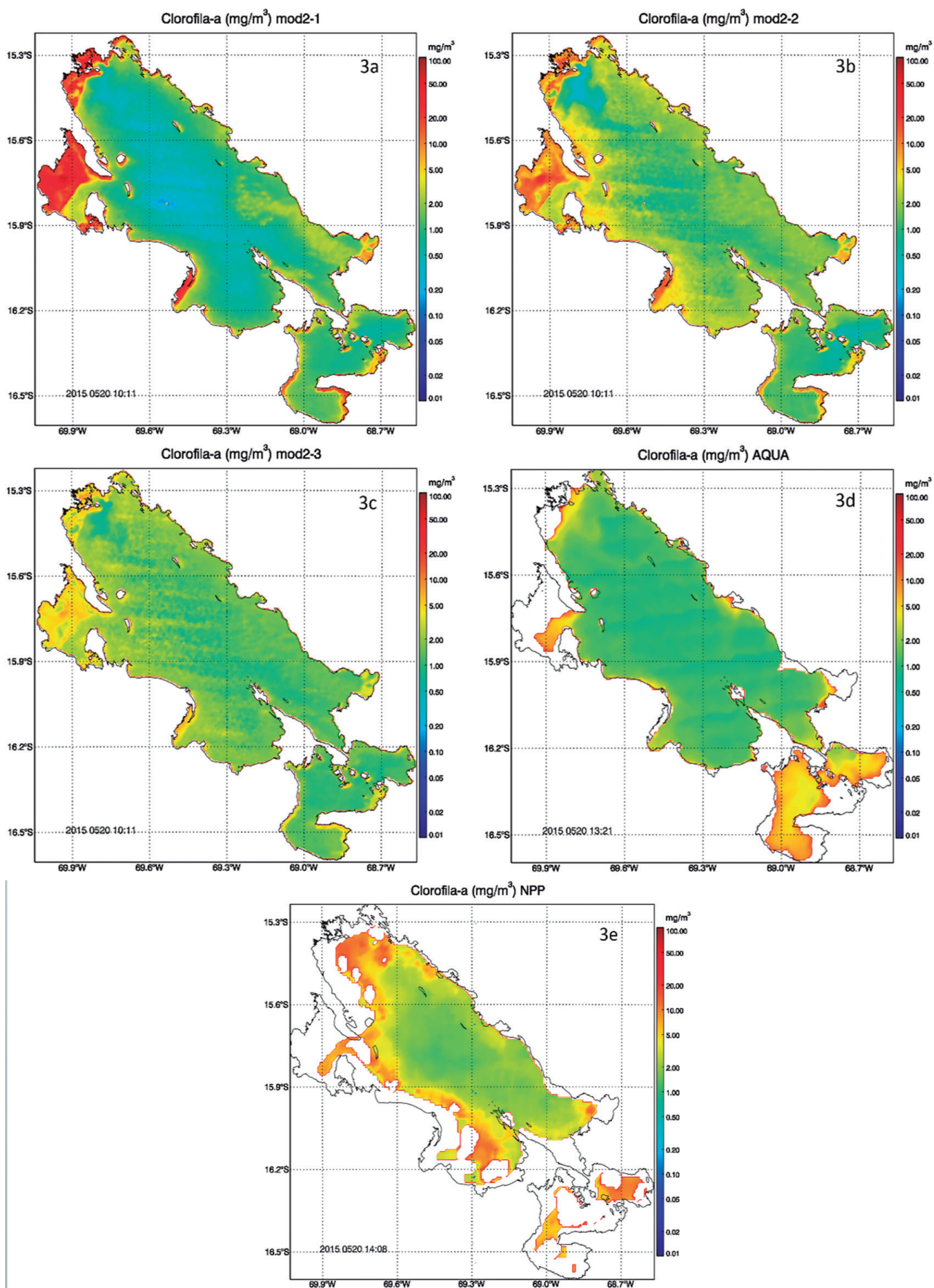


Figura 3.- Estimación de concentración de clorofila-a: (3a) MOD2-1, (3b) MOD2-2 y (3c) MOD2-3 y cálculo de concentración de clorofila-a de (3d) MODIS-AQUA y (3e) VIIRS-NPP

Tabla 2.- Valores de concentración de clorofila-a de estaciones fijas de los modelos MOD2-1, MOD2-2, MOD2-3, MODIS-AQUA y VIIRS-NPP; en negrita valores altos de estaciones afectadas por la vegetación cercana a la orilla del lago

Estación	Longitud	Latitud	MERSI / FY-3C			AQUA - MODIS	VIIRS - NPP
			MOD2-1 (mg/m <sup>3</sup> )	MOD2-2 (mg/m <sup>3</sup> )	MOD2-3 (mg/m <sup>3</sup> )		
1	-69,8116	-15,4369	0,6296	0,4359	0,9583	2,6672	42,8270
2	-69,6866	-15,4369	0,5476	1,3529	1,7059	1,6795	11,6367
3	-69,5616	-15,4369	1,0222	2,1111	1,8400	1,1014	4,7709
4	-69,7700	-15,5619	1,0000	3,7143	2,3529	1,2287	4,0148
5	-69,6450	-15,5619	0,3778	0,8500	1,3077	1,1317	3,1557
6	-69,5199	-15,5619	0,5349	1,0357	1,1333	1,1889	2,3070
7	-69,3949	-15,5619	1,1781	1,6429	1,4154	0,9649	3,2761
<b>8</b>	-69,6866	-15,6869	<b>1,6571</b>	<b>3,7647</b>	<b>2,4615</b>	<b>1,0265</b>	
9	-69,5616	-15,6869	0,4474	1,6429	1,3077	0,9443	1,5807
10	-69,4366	-15,6869	0,5111	1,1500	1,1154	0,9818	1,5401
11	-69,3116	-15,6869	0,8519	1,6429	1,5333	0,9927	1,9298
<b>12</b>	-69,7283	-15,8119	<b>0,7632</b>	<b>2,4286</b>	<b>1,7692</b>	<b>1,1157</b>	<b>25,2040</b>
13	-69,6033	-15,8119	0,3750	1,5455	1,7692	1,0532	2,7879
14	-69,4783	-15,8119	0,2791	0,8571	0,9231	0,9241	1,2285
15	-69,3533	-15,8119	0,4423	0,9200	1,0000	1,0287	1,4013
16	-69,2283	-15,8119	1,5975	1,7199	1,3368	1,0923	1,4021
17	-69,1033	-15,8119	1,1529	1,6429	1,3279	0,9278	1,4306
<b>18</b>	-69,6033	-15,9369	<b>1,2051</b>	<b>2,6111</b>	<b>2,1364</b>	<b>1,2329</b>	<b>19,9000</b>
19	-69,4783	-15,9369	0,5610	1,6429	1,6111	1,0640	2,9113
20	-69,3533	-15,9369	0,4182	1,0952	1,0455	0,9032	1,5533
21	-69,2283	-15,9369	0,4259	0,9200	0,8846	0,9588	1,8130
22	-69,1033	-15,9369	0,6765	1,1795	1,0455	1,0107	1,4710
23	-68,9783	-15,9369	2,4047	1,8821	1,3740	1,0799	
<b>24</b>	-69,3949	-16,0619	<b>1,5238</b>	<b>2,9091</b>	<b>1,8286</b>	<b>1,3871</b>	
25	-69,2699	-16,0619	0,5227	1,6429	1,3182	1,1747	4,3387
<b>26</b>	-69,0616	-16,0619	<b>1,2340</b>	<b>1,5678</b>	<b>1,2577</b>	<b>1,1627</b>	<b>1,7767</b>
27	-68,9366	-16,0619	0,9074	1,3067	1,1084	1,2091	1,6510
28	-68,9366	-16,1452	1,2295	1,6774	1,2188		
<b>29</b>	-69,3533	-16,1869	<b>0,9111</b>	<b>2,7333</b>	<b>1,6111</b>	<b>1,2650</b>	<b>56,3703</b>
30	-69,2283	-16,1869	0,5800	1,6364	1,3182	0,9825	10,6422
31	-68,7699	-16,2702	0,5878	0,5000	0,9588	13,2840	175,7065
32	-68,6449	-16,2702	0,7172	0,6933	1,0357		10,7584
33	-68,9783	-16,3536	1,0853	1,1429	1,0087	5,6468	
34	-68,8533	-16,3536	0,8632	0,8857	1,1343	3,3199	
35	-68,8949	-16,3952	0,7755	0,8750	1,0448		21,4635
36	-68,7699	-16,3952	1,6420	1,1000	1,2500		21,7564
37	-69,0199	-16,4369	1,7157	1,5591	1,4113	6,9185	
38	-69,0199	-16,5202	1,3538	1,2571	1,2394		123,8170
39	-68,9366	-16,5202	1,3538	1,1750	1,3134		

Tabla 3.- Promedio y desviación estándar de clorofila-a de los sensores

Producto	Chla-a promedio	Desviación estándar
MOD2-1	0,89	0,35
MOD2-2	1,32	0,34
MOD2-3	1,36	0,24
MODIS-AQUA	1,13	0,18
VIIRS-NPP	1,58	0,19



La imagen de concentración de clorofila-a del sensor MODIS- AQUA, presenta mejor estimación debido a que dicho sensor ha sido diseñado específicamente para el cálculo de clorofila-a del mar (Fig. 3d).

La imagen del sensor VIIRS-NPP presenta una sobreestimación de clorofila-a debido a que este sensor es espectralmente sensible a la variación de concentración de clorofila-a.

Con el propósito de preservar los detalles se ha aplicado un median filter a las imágenes, observándose que el sensor VIIRS-NPP presentó mayor valor promedio de concentración de clorofila-a ( $1,58 \text{ mg/m}^3$ ), mientras que el MERSI-FY3C estimó un valor promedio mínimo de ( $0,89 \text{ mg/m}^3$ ) usando el módulo MOD2-1; sin embargo, este modelo presenta mayor desviación estándar ( $0,35$ ) mientras que para el MODIS- AQUA la desviación estándar es  $0,18$  (Tabla 3).

Se demostró que la precisión en la estimación de concentración de clorofila-a no depende completamente de una alta resolución espectral del sensor ( $0,05 \mu\text{m}$ . MERSI) y ( $0,02 \mu\text{m}$  MODIS y VIIRS), dado que a mayor resolución espectral, el sensor es más sensible a captar ruidos como aerosoles y vapor de agua en la columna (KUCHARIK et al. 1998). Por lo

tanto, la resolución espacial de  $250 \text{ m}$  del MERSI es el factor principal para una estimación con mejor detalle usando el modelo de razón de bandas.

Tal como describió DALL'OLMO et al. (2005), existe superposición entre el canal más sensible a la concentración de clorofila-a (canal verde del MERSI) y el cuerpo de agua, y es probable que el mejor canal para la estimación de clorofila-a no sea el canal verde sino el canal rojo o azul que están poco influenciados por los cuerpos de agua. Para analizar esto, se ha extraído valores de clorofila-a del MOD2-2, MOD2-3, MODIS-AQUA y VIIRS-NPP a lo largo de dos perfiles longitudinales transversales ( $P_1$  de color rojo y  $P_2$  de color azul) en la parte más ancha (Fig. 4).

### Distribución espacial de clorofila-a

Tal como muestra la figura 5 ( $P_1$ -a y  $P_2$ -a) los valores de clorofila-a en el perfil  $P_1$  y  $P_2$  de los 3 modelos MOD2, presentan una tendencia similar en cada perfil. El valor de clorofila-a para los MOD2 es mayor en los extremos (especialmente al lado oeste del lago) y menor en la parte central. En el  $P_1$ -a el MOD2-2 tuvo clorofila-a de  $2,6 \text{ mg/m}^3$  y MOD2-3 de  $1,9 \text{ mg/m}^3$ , mientras que MOD2-1 presenta un resultado contrario aunque la diferencia es menor a  $1 \text{ mg/m}^3$ .

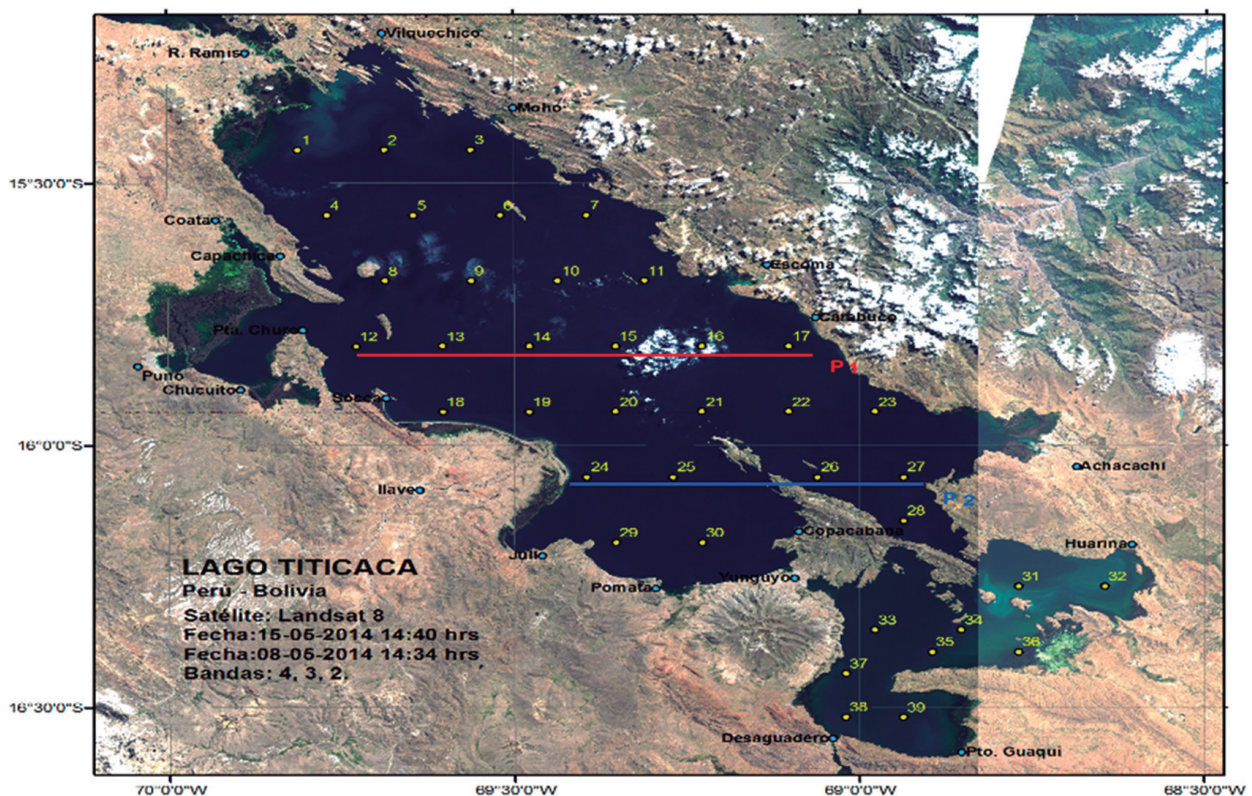


Figura 4.- Lago Titicaca presenta zonas con vegetación en la Bahía de Puno y zona norte del lago, estaciones fijas para comparación de concentraciones (puntos amarillos), Perfil  $P_1$  y  $P_2$  para análisis de la distribución de valores de clorofila-a. Fuente: Imagen Landsat 8 (RGB) / USGS - Earth Resources Observation and Science Center (EROS)

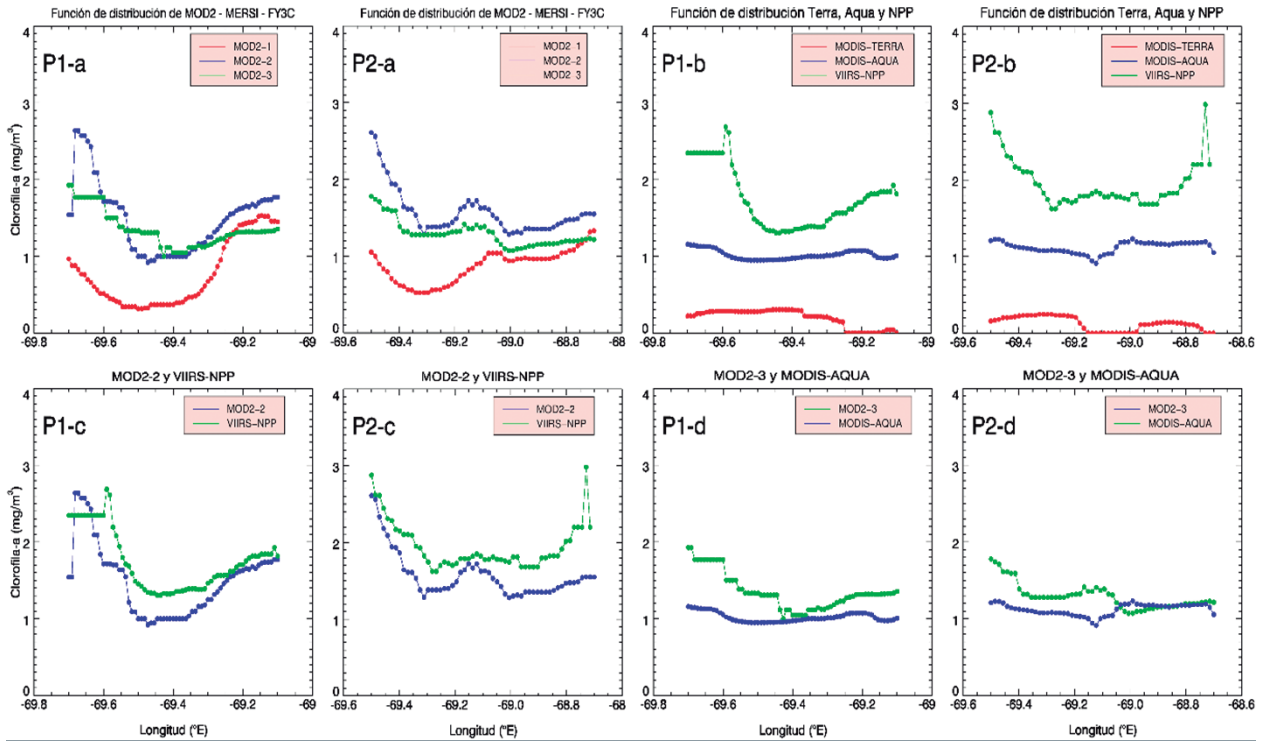


Figura 5.- Diagramas de análisis de distribución de concentración de clorofila-a de los tres modelos de razón de bandas MOD2 y de sensores MODIS (AQUA-TERRA) y VIIRS-NPP en el perfil P1 y P2

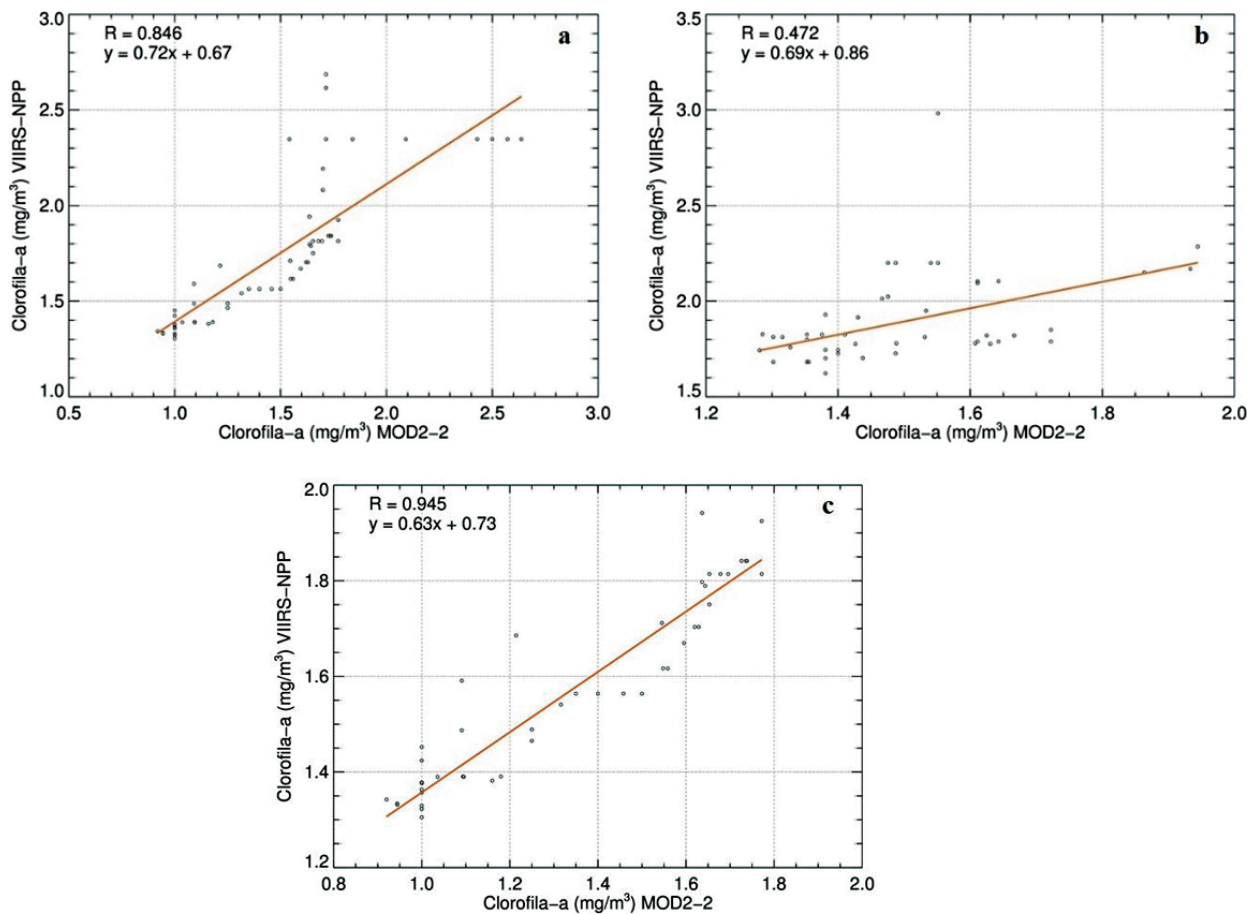


Figura 6.- Gráficas de Dispersión de: (a) VIIRS vs MOD2-2 en P1, (b) VIIRS vs MOD2-2 en P2, y (c) VIIRS vs MOD2-2 en P1, para un rango de Chla-a de 0-2 mg/m³

De la misma forma,  $P_1\text{-b}$  y  $P_2\text{-b}$  muestran distribuciones de los valores de MODIS-TERRA, MODIS-AQUA y VIIRS-NPP, observándose que el VIIRS en ambos perfiles presenta distribución similar al modelo MOD2 pero con valores altos ( $>1,3 \text{ mg/m}^3$ ), mientras que AQUA presenta de 0,9 a  $1,2 \text{ mg/m}^3$  y TERRA  $>0,4 \text{ mg/m}^3$ .

Con los resultados previos se realizó la comparación de valores entre MOD2-2 vs VIIRS ( $P_1\text{-c}$  y  $P_2\text{-c}$ ), en ambos cuadros la distribución de concentración es similar con valores cercanos a  $3 \text{ mg/m}^3$  en el lado oeste del lago en ambos perfiles, mientras que algo menor ( $1,9$  a  $2,3 \text{ mg/m}^3$ ) en el lado Este. Cabe resaltar que la figura  $P_2\text{-c}$  registra un aumento de clorofila-a en la zona central del lago ( $-69,1^\circ\text{W}$ ), dicho aumento solo es posible observarlo con el MOD2-2, mientras que los productos de MODIS y VIIRS de  $1 \text{ km}$  no registran este aumento, es decir, a mayor resolución espacial se puede identificar la variación de clorofila-a en pequeñas áreas.

De la misma manera, se analizó la distribución de valores entre el modelo MOD2-3 vs MODIS-AQUA ( $P_1\text{-d}$  y  $P_2\text{-d}$ ), observándose distribución espacial algo parecida entre ambas concentraciones. Por tanto, los valores de concentración de clorofila-a estimados por el modelo MOD2-2 presentan distribución espacial muy similar a la del VIIRS-NPP.

De los valores de distribución espacial del MOD2-2 y VIIRS-NPP, se analizó la relación entre ambas fuentes obteniendo correlaciones con  $R=0,846$  en el perfil  $P_1$  (a) y menor correlación con  $R=0,472$  en el perfil  $P_2$  (b). Debido a que el Lago Titicaca generalmente no presenta valores de clorofila mayor a  $2 \text{ mg/m}^3$ , se filtró los valores para un rango de  $0\text{-}2 \text{ mg/m}^3$  descartándose aquellos valores producto de la saturación, obteniendo mejor correlación de  $R=0,945$  (c) (Fig. 6).

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la capacidad de estimar la concentración de clorofila-a en el lago Titicaca a partir de modelos de razón de banda MOD2, utilizando información del sensor MERSI recepcionados por el sistema TERASCAN del IMARPE.

El modelo de razón de bandas MOD2-2 se ajusta mejor a los valores de concentración de clorofila-a calculados por el VIIRS-NPP ( $R=0,945$ ) para el lago Titicaca, dado que ambas fuentes cuentan con mayor resolución espacial, lo que permite identificar características que no pueden ser observadas con los sensores MODIS TERRA y AQUA. El canal verde ( $\lambda=550 \text{ nm}$ ) e infrarrojo ( $\lambda=865 \text{ nm}$ ) utilizados en MOD2 son más adecuados para el área de estudio mientras que para

el MOD3 se requiere una ecuación de ajuste para la estimación a partir de los datos in-situ.

Los valores de clorofila-a estimados con el MERSI dependen más de su resolución espacial de  $250 \text{ m}$  que de su resolución de ancho de banda ( $0,05 \mu\text{m}$  para MERSI) en relación a  $0,02 \mu\text{m}$  para MODIS y VIIRS, confirmando la base teórica para el desarrollo de modelos de ajuste y cálculo de clorofila-a con mejor detalle en bahías y lagunas.

El modelo de razón de bandas se puede usar con imágenes Landsat8, porque posee las longitudes de onda adecuadas para los modelos MOD2 y MOD3.

Donde los canales 2-5 ( $482,5 \text{ nm}$ ,  $562,5 \text{ nm}$ ,  $655 \text{ nm}$  y  $865 \text{ nm}$ ) coinciden con los del MERSI sí se aplica este método con las imágenes Landsat8 de  $30 \text{ m}$  de resolución espacial y se optimizarán los resultados con mayor detalle.

#### 5. REFERENCIAS

- BERNSTEIN L S, ADLER-GOLDEN S M, SUNDBERG R L. 2005. A new method for atmospheric correction and aerosol property retrieval for VIS-SWIR multi - and hyperspectral imaging sensors: QUAC (Quick Atmospheric Correction), IGARSS, (5): 3549-3552.
- BROGE N H, MORTENSEN J V. 2002. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data, Remote Sensing of Environment, (81): 45-57.
- CARMICHAEL W W. 2001. Health effects of toxin-producing cyanobacteria: "The CyanoHABs", Human and Ecological Risk Assessment, (7): 1393-1407.
- DALL'OLMO G, GITELSON A A, RUNDQUIST D C. 2005. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands, Remote Sensing of Environment, (96): 176-187.
- DEKKER A. 1993. Detection of the optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing, Ph.D. Thesis, Free University, Amsterdam, The Netherlands, (1): 237.
- DIRECCIÓN DE HIDROGRAFÍA Y NAVEGACIÓN. 1993. Atlas Hidrográfico del Perú. Segunda Edición. (2): 275.
- GITELSON A A, SCHALLES J F, HLADIK C M. 2007. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, estuaries: Chesapeake Bay case study, Remote Sensing of Environment, (109): 464-472.
- GITELSON A A, DALL'OLMO G, MOSES W. 2008. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll in turbid waters: Validation, Remote Sensing of Environment, (112): 3582-3593.
- GORDAN H R, BROWN O B, EVANS R H. 1988. A semianalytic radiance model of ocean color, Journal of Geophysical Research, (93): 10909-10924.
- GRUNINGER J, RATKOWSKI A J, HOKE M L. 2014. The sequential maximum angle convex cone (SMACC) endmember model, SPIE, (5425): 1-14.

- HAN L, RUNDQUIST D. 1997. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: A case study in a turbid reservoir, *Remote Sensing of Environment*, (62): 253-261.
- HAN X Z, ZHENG W, LIU C, AN S Y. 2011. Estimation of chlorophyll-a using MERSI and MODIS images in Taihu Lake, China, *Geographical Research*, (30): 291-300.
- HU X Q, SUN L, LIU J J, DING L, WANG X G, LI Y, ZHANG Y, XU N, CHEN L. 2012. Calibration of the solar reflective bands of medium resolution spectral imager onboard FY-3A, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (50): 4915-4928.
- IQBAL M. 1983. *An introduction to solar radiation*, Academic press, (1): 390.
- JIANG Q, ZHAO C. 2011. The improvement of oil spill detection by atmospheric correction of FY-3A/MERSI data, *Transactions of Oceanology and Limnology*, (4): 16-24.
- KUCHARIK C J, NORMAN J M, GOWER S T. 1998. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*, (91): 69-88.
- LIU F C, SHI X Z, YU D S, PAN X Z. 2004. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin, *Geographical Research*, (22): 63-70.
- MITTENZWEY K H, ULLRICH S, GITELSON A A. 1992. Determination of chlorophyll-a of inland waters on the basis of spectral reflectance, *Limnology and Oceanography*, (37): 147-149.
- REINART A, KUSTER T. 2006. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea, *Remote Sensing of Environment*, (102): 74-85.
- WU R H, YANG J, YANG Z D, LIU J J. 2011. Impacts of spectral response differences on SNO calibration-study examples of FY-3A/MERSI and EOS/MODIS, *Remote Sensing Information*, (7): 51-57.
- YE J, LI W B, WEI Y. 2009. Retrieval of the optical thickness and effective radius of multilayered cloud using MODIS data, *Acta Meteorological Sinica*, (67): 613-622.
- ZHANG T, DING J L, WANG F. 2010. Simulation of image multi-spectrum using field measured endmember spectrum, *Spectroscopy and Spectral Analysis*, (30): 2889-2893.