


## Variabilidad interanual de la temperatura superficial del lago Titicaca usando imágenes MODIS del invierno (2001-2014)

 César Vásquez<sup>\*1,2</sup>, César Aguirre<sup>1</sup>, Michel Chocña<sup>1</sup> y Jhon Guerrero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Lima, Perú

<sup>2</sup>TECSUP, Lima, Perú

Recibido 15 Ago 2021 – Aceptado 12 Ene 2022 – Publicado 01 Abr 2022

### Resumen

Se investigó la variabilidad interanual de la temperatura del agua superficial del lago (LSWT, por sus siglas en inglés) usando imágenes MODIS para el invierno del 2001-2014 en el lago Titicaca  $15^{\circ}45'00''S - 69^{\circ}25'00''O$ . Utilizamos el producto MOD11A2 de temperatura de la superficie terrestre (LST), que renombraremos como LSWT. Los datos LST de detección remota se obtuvieron del sensor MODIS a bordo del satélite Terra como un compuesto de 8 días, con una resolución espacial de 1 km. Durante el invierno austral (junio, julio, y agosto), el producto MOD06L2 cloud fraction mostró el cielo despejado sobre el lago Titicaca en invierno. Se analizó la distribución de LSWT por medio de imágenes, series de tiempo y el coeficiente de variación (Cv). Se consideraron dos regiones del Titicaca, Lago Mayor (LM) y Lago Menor (Lm). Se descubrió que el coeficiente de variación de LSWT para la cuenca principal (LM) durante el periodo de estudio no mostró cambios significativos (Cv <9%). El valor promedio de la temperatura superficial de la cuenca principal (LM) encontrado en esta investigación es aproximadamente  $13.224^{\circ}C$  y del lago menor (Lm) es igual a  $12.695^{\circ}C$ . Finalmente usando el análisis de componentes principales se observa una tendencia positiva desde el 2004 hasta el 2010, año del máximo del PC1 para el Lago Mayor y Lago Menor.

**Palabras clave:** MODIS/Terra, Temperatura, Coeficiente de Variación, Titicaca.

### Interannual variability of the surface temperature of Titicaca lake using MODIS winter images (2001-2014)

#### Abstract

The interannual variability of lake surface water temperature (LSWT) was investigated using MODIS images for winter 2001-2014 at Lake Titicaca  $15^{\circ}45'00''S - 69^{\circ}25'00''O$ . We use the MOD11A2 Earth Surface Temperature (LST) product, which we will rename as LSWT. Remote sensing LST data was obtained from the MODIS sensor onboard the Terra satellite as an 8-day composite, with a spatial resolution of 1 km. During the austral winter (June, July, and August), the product MOD06L2 cloud fraction showed the clear sky over Lake Titicaca in winter. The LSWT distribution was analyzed by means of images, time series and the coefficient of variation (Cv). Two regions of Titicaca were considered, Lake Mayor (LM) and Lake Menor (Lm). It was discovered that the coefficient of variation of LSWT for the main basin (LM) during the study period did not show significant changes (Cv <9%). The average value of the surface temperature of the main basin (LM) found in this investigation is approximately  $13,224^{\circ}C$  and that of the minor lake (Lm) is equal to  $12,695^{\circ}C$ . Finally, using the principal components analysis, a positive trend is observed from 2004 to 2010, the year of the maximum of PC1 for Lago Mayor and Lago Menor.

**Keywords:** MODIS/Terra, temperature, coefficient of variation, Titicaca.

\* cvasquez@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



## 1. Introducción

La temperatura de superficie terrestre (LST) es un parámetro esencial de los procesos físicos que ocurren en la superficie, tanto a nivel regional como global, así como las interacciones superficie-atmósfera y flujos de energía entre la atmósfera y la superficie [1]. Por lo tanto, evaluar la temperatura del agua en los lagos es esencial para entender su función y estado ecológico. Además, los lagos son considerados vigilantes del cambio climático debido a su sensibilidad al medio ambiente [2], y la temperatura del agua superficial del lago (LSWT) permite analizar las condiciones de calidad del agua y el impacto del cambio climático en estos sistemas. Una forma convencional de evaluar el LSWT es mediante el uso de sensores *in situ* para medir temperaturas en estaciones de monitoreo específicas dentro de un sistema. Sin embargo, este enfoque requiere la infraestructura adecuada y el trabajo de campo para instalar y mantener los sensores, lo cual es costoso y, además, requiere mucho tiempo. Cuando los sistemas son muy grandes en extensión como el Lago Titicaca, el colocar sensores solo genera información de un punto; sin embargo, una imagen satelital puede dar una idea de la temperatura de todo el sistema [3].

Los datos de los sensores satelitales proporcionan mejor información sobre la variabilidad de LSWT que aquella que se obtiene por el monitoreo de campo convencional, ya que la mayoría de los sensores modernos tienen capacidades mejoradas con respecto a la resolución espectral, radiométrica, temporal y espacial [4]. Aunque la temperatura del agua superficial del lago (LSWT) derivada del satélite es una descripción en la capa superior, puede proporcionar información importante sobre los patrones de variaciones horizontales de la temperatura del agua en los lagos. Asimismo, la temperatura del agua se ha utilizado en muchos estudios como el análisis de patrones de temperatura y el balance de calor [5], en la estimación de la evaporación [6], los gradientes espaciales de LSWT [7], los patrones de variación temporal del LSWT [8] y la evaluación del impacto de los eventos de El Niño/La Niña [9] y el cambio climático en los lagos [3].

Para detectar la variación de las superficies de los lagos en la meseta tibetana, Zhao *et al.* (2020) [10] propusieron un esquema de detección basado en la temperatura de la superficie terrestre (LST). Aplicaron con éxito una prueba de tendencia para investigar la variación del área del lago de 2000 a 2018 con el uso de la información de temperatura media anual derivada del producto diario LST de imágenes MODIS. Donde la variación temporal de la media anual LST proporciona una forma especial de detectar el año de cambio abrupto en el área del lago. Este trabajo demostró el buen potencial del método basado en LST para el monitoreo y evaluación de áreas lacustres.

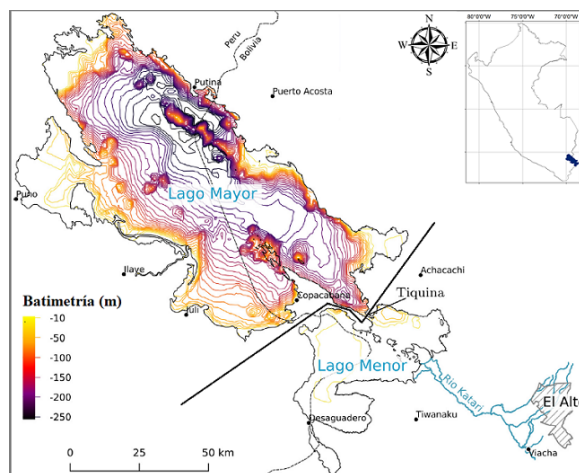
Para examinar los factores más influyentes de la va-

riación espacio-temporal de la temperatura de la superficie del agua (LSWT) de los lagos euroasiáticos de 2001 a 2015, se usaron los datos del nivel 3 del producto de temperatura de la superficie terrestre de MODIS (MOD11A2). Se observaron grandes variaciones espaciales de la diferencia de temperatura diaria, en los lagos de Eurasia. Sin embargo, las variaciones en las diferencias de temperatura diaria fueron pequeñas en los lagos ubicados en latitudes altas y en las regiones de selva tropical. Los lagos poco profundos mostraron una respuesta rápida de LSWT al forzamiento solar y atmosférico, mientras que en los lagos grandes y profundos, esa respuesta fue lenta [11].

En este contexto, el objetivo del presente trabajo, que utiliza principalmente datos satelitales, es caracterizar y estudiar la variabilidad interanual del LSWT en el lago Titicaca en los inviernos del período de 2001-2014.

## 2. Área de estudio

El área de estudio es el lago Titicaca Figura 1, ubicada en el altiplano andino en los Andes centrales, dentro de la meseta del Collao entre los territorios de Perú y Bolivia, a una altitud media de 3812 ms.n.m.



**Figura 1:** Ubicación del área de estudio. Lago Titicaca con sus dos cuencas: Lago Mayor (LM) y Lago Menor (Lm). Modificado de [14].

Posee un área de 8562 km<sup>2</sup>, un volumen total de (895.86 × 10<sup>9</sup> km<sup>3</sup>) y una profundidad máxima de 284 m [12]. Está formado por dos cuerpos de agua separados por el estrecho de Tiquina; el más grande está situado al norte y es denominado Lago Mayor o Chucuito y tiene una superficie de 6450 km<sup>2</sup>, estando en esta parte su mayor profundidad (283 m), cerca de la isla Soto. El otro cuerpo más pequeño llamado Menor o Huiñamarca, que está situado al sur, tiene una superficie de 2112 km<sup>2</sup>, con una profundidad máxima de 45 metros [13]. La bahía de

Puno (Figura 1), también conocida como Golfo de Puno, es un brazo o entrante del lago Titicaca, se encuentra encerrada por las penínsulas de Capachica y Chucuito. Tiene una superficie de aproximadamente 589 km<sup>2</sup>, con un volumen de agua de unos 5 mil millones de m<sup>3</sup>, que varía constantemente, especialmente entre el invierno y el verano. La península Copacabana es la más grande del lago Titicaca. Está unida a tierra firme por el istmo de Yunguyo y separada de la península de Huata por el estrecho conocido como Tiquina [13].

### 3. Datos utilizados

Se utiliza el producto de temperatura de la superficie terrestre (LST), correspondiente al producto MOD11A2 versión 6, obtenido de TERRA (EOS) de la página oficial del Servicio Geológico Americano (USGS, por sus siglas en inglés; <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>). El producto MOD11A2 es el compuesto de 8 días de LST (MOD11A1) con una resolución espacial de 1 km. El conjunto de datos utilizado abarca el periodo 2001-2014. El producto diario MODIS LST (MOD11A1) se calcula a partir de la temperatura de brillo utilizando el algoritmo de Split-Window propuesto por [1].

$$T_s = C + (B_1 + B_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + B_3 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^2}) \left( \frac{T_{31} + T_{32}}{2} \right) + (A_1 + A_2 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + A_3 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon^2}) \left( \frac{T_{31} + T_{32}}{2} \right) \quad (1)$$

$$\epsilon = 0.5(\epsilon_{31} + \epsilon_{32}) \quad (2)$$

$$\Delta\epsilon = (\epsilon_{31} - \epsilon_{32}) \quad (3)$$

$T_{31}$  y  $T_{32}$  son las temperaturas de brillo en las bandas 31 y 32.  $\epsilon_{31}$  y  $\epsilon_{32}$  son las emisividades de la superficie terrestre en estas dos bandas.  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C$  son coeficientes ( $i=1,2,3$ ) y se determinan mediante la interpolación del conjunto de datos multidimensional en tablas de consulta. También se utiliza el producto de Cloud level-2 de MODIS, para MOD06 de Terra con resolución de 5x5 km<sup>2</sup> (con revisita alrededor de las 10:30 AM), el producto cobertura nubosa (Cloud Fraction) MODIS de level-2 son usados en este estudio para el periodo de 2001-2014 (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search/>). Se sabe que la cobertura nubosa es uno de los parámetros microfísicos cruciales de las nubes, las cuales son un factor clave en la modulación del balance de radiación de la Tierra tanto en la superficie como en la parte superior de la atmósfera (TOA) [15]. Por lo tanto, es de gran importancia cuantificar las distribuciones verticales globales y las variaciones de tiempo de las fracciones de nubes. Se utiliza el *software* de procesamiento de imágenes ENVI-4.5 y el lenguaje de programación IDL-7.2 y Octave.

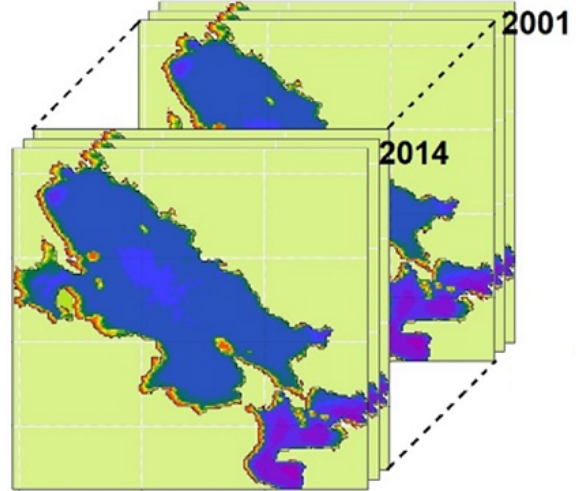
## 4. Metodología

Se dispone de LST-MOD11A2 diurna con una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup> y frecuencia de 8 días para el periodo 2001-2014. Se trabajó con 644 productos LST-MOD11A2, 46 imágenes por año, con los cuales se obtuvieron los promedios mensuales. Se realizó un control de calidad de los datos LST en base a la capa de confiabilidad (QC-day), una vez que se realiza este control, se calcula el LST mensual promedio como la suma de todos los productos de 8 días, comprendidos para un mes. Los datos están en kelvin (K) y se transformaron a grados Celsius (°C) de la siguiente forma [16]:

$$C = (K * 0.02) - 273.15 \quad (4)$$

### Estacionalidad meteorológica

En el caso de la obtención de la estacionalidad meteorológica de invierno austral, se realizó el promedio de los meses de junio, julio y agosto, de todos los años de estudio para el lago Titicaca.



**Figura 2:** Esquema de la obtención de las imágenes LSWT de invierno austral a partir del promedio de los meses de junio, julio y agosto de cada año de estudio en el lago Titicaca.

### Coefficiente de variación $C_v$

La variabilidad de LSWT se determinó mediante el Coeficiente de Variación ( $C_v$ ). Se obtuvo el mapa correspondiente al estadístico básico conocido como coeficiente de variación, expresado en porcentaje, que se calcula a partir de la imagen del promedio, así como de la desviación estándar de todas las imágenes de invierno para el periodo de estudio. A partir de estos últimos se estable el cociente entre las imágenes para luego multiplicarse

por 100. El coeficiente de variación proporciona la variabilidad espacial relativa o proporcional de un número determinado de observaciones. La fórmula que lo define en % es:

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{X}|} * 100 \quad (5)$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar y  $\bar{X}$  es la media en el periodo analizado [17].

### Análisis de componentes principales

El análisis de las componentes principales (ACP) genera combinaciones lineales de intensidades de píxeles multispectrales que no están correlacionadas entre sí y que tienen una varianza máxima. Específicamente, considere una imagen multispectral representada por el vector aleatorio  $\mathbf{X}$  (para el vector de valores de escala de grises) y suponga que  $\langle \mathbf{X} \rangle = \mathbf{0}$ , de modo que la matriz de covarianza está dada por  $\sum = \langle \mathbf{X}\mathbf{X}^T \rangle$ .

$$\underset{\|\mathbf{w}\|=1}{\operatorname{argmax}} \operatorname{var}(\mathbf{t}) \quad (6)$$

Busquemos una combinación lineal  $\mathbf{t} = \mathbf{w}^T \mathbf{X}$  cuya varianza  $\mathbf{w}^T \sum \mathbf{w}$  sea máxima. Esta cantidad puede hacerse trivialmente tan grande como queramos con solo elegir  $\mathbf{w}$  lo suficientemente grande, de modo que la maximización solo tenga sentido si restringimos  $\mathbf{w}$  de alguna manera. Una restricción conveniente es  $\|\mathbf{w}\| = 1$  ó  $\mathbf{w}^T \mathbf{w} = 1$ . Entonces podemos resolver este problema maximizando la función de Lagrange no restringida [18].

$$\underset{\|\mathbf{w}\|=1}{\operatorname{argmax}} (\mathbf{t}^T \mathbf{t}) = \underset{\|\mathbf{w}\|=1}{\operatorname{argmax}} \operatorname{var}(\mathbf{w}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{w}) \quad (7)$$

### Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

#### Imagen promedio de invierno de LSWT en el lago Titicaca en el periodo 2001-2014

La Figura 3 muestra la distribución espacial promedio del LSWT durante el periodo 2001-2014 en el lago Titicaca. Se observa que la cantidad de LSWT sobre el lago para el invierno austral (junio-julio-agosto) se mantiene casi uniforme con un valor alrededor de 13°C.

El Lago Mayor presenta valores de LSWT en el orden de 12-13°C con valores altos cercanos al borde, mientras que el lago Menor presenta un valor promedio entre 11-12°C. Los valores mínimos encontrados, correspondientes a la Figura 3 son dos puntos con valores correspondientes de 10.88°C de lat: 16°30'2.54''S y lon: 68°54'3.52''W y el otro punto es de lat: 16°17'20.97''S y lon: 68°38'19.18''W.

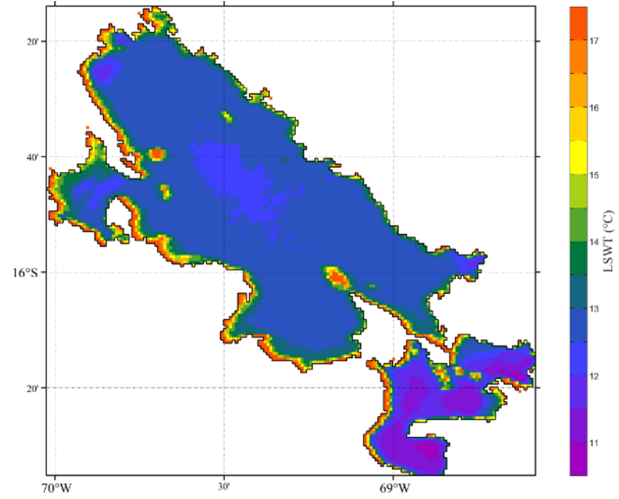


Figura 3: Imagen promedio de los valores de invierno de LSWT en el lago Titicaca para el periodo 2001-2014.

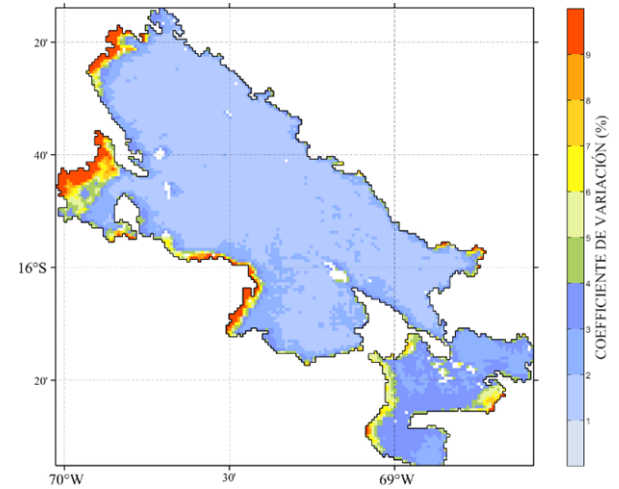
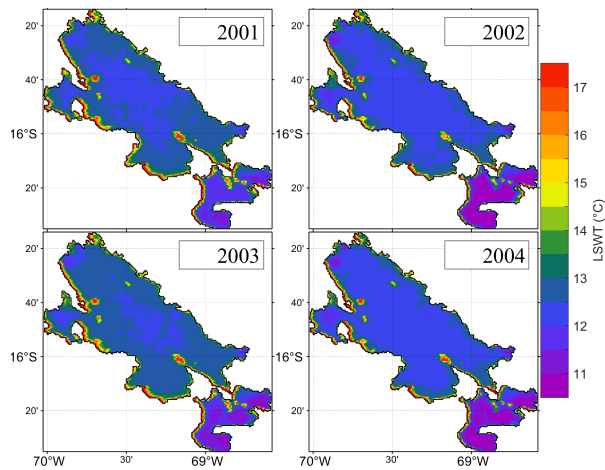


Figura 4: Coeficiente de variación de la estación de invierno de LSWT en el lago Titicaca para el periodo 2001-2014.

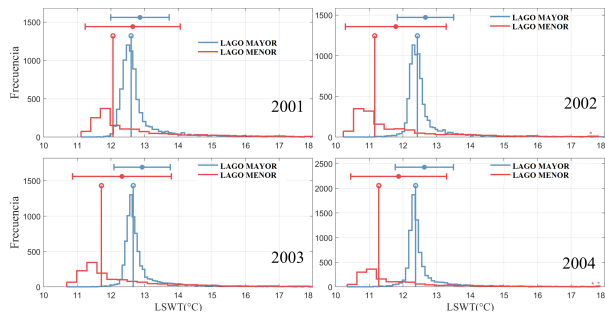
#### Coeficiente de variación de LSWT en invierno en el lago Titicaca en el periodo 2001-2014

La Figura 4 muestra la variabilidad espacial del LSWT para el periodo 2001-2014 representado en el coeficiente de variación, es decir, la variabilidad expresada en porcentajes. El coeficiente de variación muestra la variabilidad de un conjunto de datos, indicando por medio de porcentajes si los valores de una variable están muy alejados del promedio.



**Figura 5:** Coeficiente de variación de LSWT en invierno, para el lago Titicaca en el periodo 2001-2004.

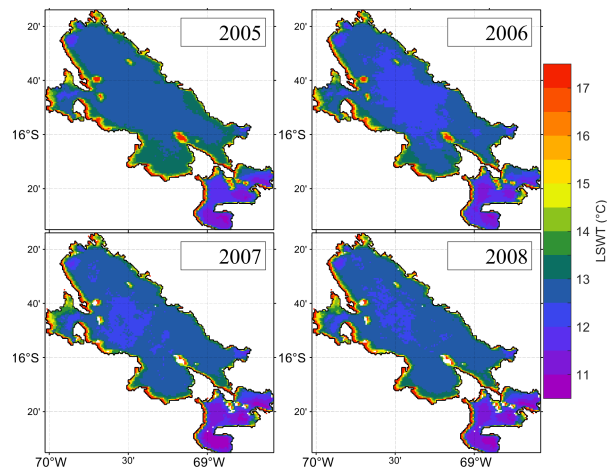
Según el mapa de la Figura 4, la región del lago se caracteriza por sus condiciones homogéneas (menor variabilidad temporal) en el invierno austral. Son notables las regiones en naranja y amarillo que muestran alta variabilidad en las áreas contiguas al borde costero. Se muestran las imágenes correspondientes a los inviernos para cada año de estudio desde 2001 hasta 2014.



**Figura 6:** Histograma de LSWT para el Lago Mayor y Lago Menor en invierno en el lago Titicaca en el periodo 2001-2004.

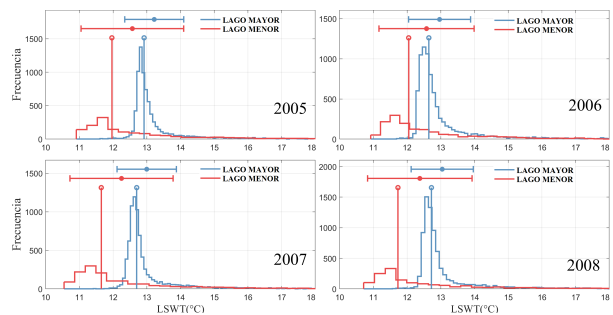
### Análisis de la variación de LSWT en invierno en el lago Titicaca

Se procedió a atenuar las temperaturas mayores a 18°C de cada imagen por año, esto con el fin de poder analizar la distribución de valores de LSWT sin la interferencia de los valores altos que se muestran en los bordes costeros para cada año (Figura 5,7 y 9).



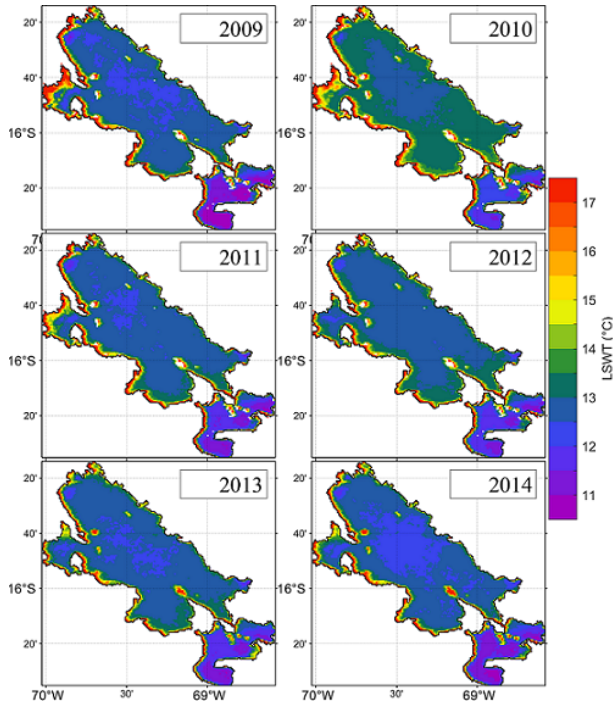
**Figura 7:** Coeficiente de variación de LSWT en invierno, para el lago Titicaca en el periodo 2005-2008.

Se observa en las Figuras 5, 7 y 9 que la distribución del LSWT son parecidas y esto es confirmado por sus histogramas (Figura 6,8 y 10). Se analizó la distribución de los valores de LSWT para cada año en dos áreas distintas (Figura 1), una llamada Lago Mayor y otra llamada Lago Menor. Se observa que la diferencia de temperaturas promedio correspondientes al Lago Mayor y Lago Menor del Titicaca son iguales o menores que 1°C, mientras que la comparación de la diferencia de la mediana es igual o mayor a 1°C, esto se muestra en los histogramas (Figura 6,8 y 10).

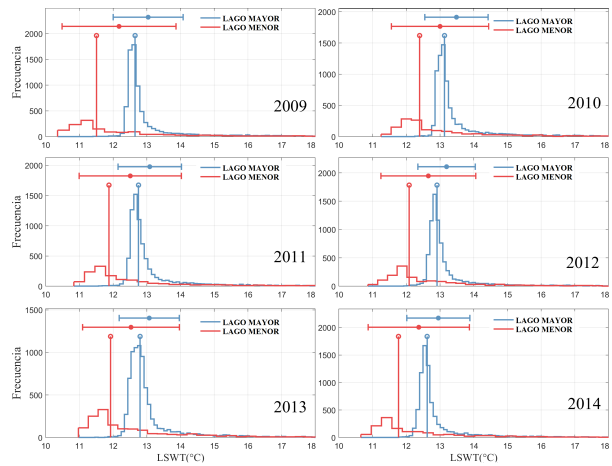


**Figura 8:** Histograma de LSWT para el Lago Mayor y Lago Menor en invierno en el lago Titicaca en el periodo 2005-2008.

**Análisis estadístico de LSWT en invierno en el lago Titicaca**



**Figura 9:** Histogramas de LSWT en invierno, para el lago Titicaca en el periodo 2009-2014.



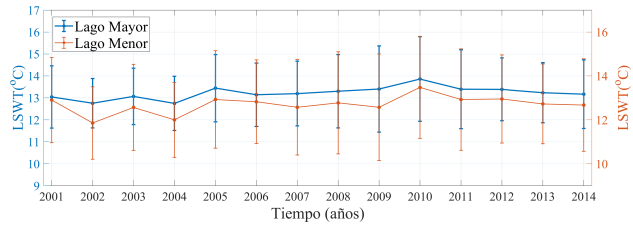
**Figura 10:** Histogramas de LSWT para el Lago Mayor y Lago Menor en invierno en el lago Titicaca en el periodo 2009-2014.

Se mantuvieron todos los valores de LSWT en el lago Titicaca y se analiza el área total del lago (Lago Mayor y Lago Menor) (Figura 1). En la Tabla 1 se muestran los estadísticos básicos para cada imagen de invierno del lago Titicaca. En estas se muestran que los valores de

LSWT se mantienen uniformes durante todo el periodo de estudio, aunque en los años 2009 y 2010 se presentan mayores variabilidades dadas por sus desviaciones estándar (1.8069-2.0717) en comparación con los otros años.

**Serie de tiempo de LSWT en invierno en el lago Titicaca**

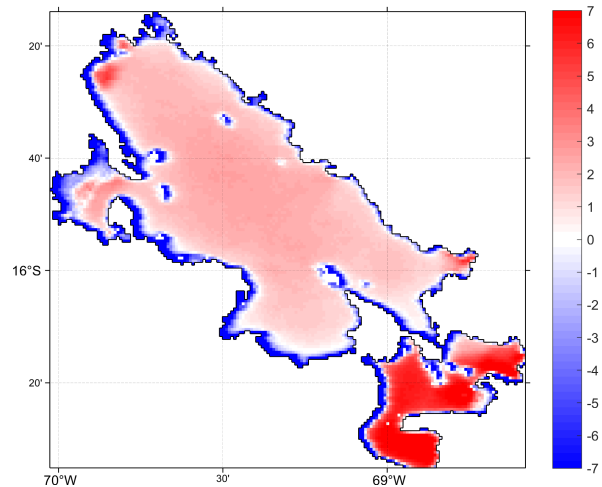
Se analiza la variación temporal del valor promedio de LSWT en cada una de las regiones consideradas (Lago Mayor y Lago Menor). Se observa que en las regiones se mantiene la misma dinámica, pero con una cierta diferencia de aproximadamente 0.5°C (Figura 11).



**Figura 11:** Series de tiempo de LSWT para cada imagen de invierno del lago Titicaca, en el Lago Mayor y Lago Menor.

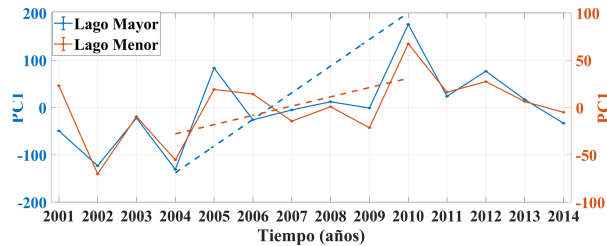
**Análisis de las componentes principales de LSWT en invierno en el lago Titicaca**

El análisis de componentes principales se aplicó a la secuencia de imágenes de invierno de LSWT por año, donde se muestra la variabilidad espacial del primer componente principal (Figura 12) que representa la mayor parte de la varianza, es decir, el 95.6% de la variabilidad total. Posteriormente se realiza dos análisis de PC para cada una de las regiones consideradas (Lago Mayor y Lago Menor) (Figura 13).



**Figura 12:** Estructura espacial del primer componente principal de LSWT en el lago Titicaca para el periodo 2001-2014.

En la Figura 12 se observa el contraste en la distribución espacial en el borde y la parte central de las áreas del Lago Mayor y Lago Menor.

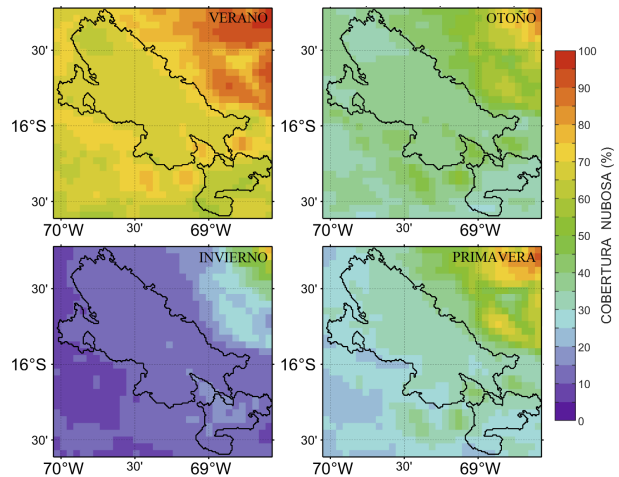


**Figura 13:** Series temporales de las variabilidades temporales de las primeras componentes principales de LSWT en el Lago Mayor y Lago Menor del lago Titicaca.

Se aplicó el ACP al apilado de imágenes de LWST en el lago Titicaca, y se observó una señal dominante que esta caracterizado por el PCI que representa la mayor parte de la varianza. Aquí se obtuvo que la variabilidad temporal de las primeras componentes principales para el Lago Mayor (77.91% de la variabilidad) y Lago Menor (77.87% de la variabilidad) (Figura 13) muestran un incremento constante desde el 2004 hasta el 2010, año en que alcanzaron su máxima amplitud, mostrando que estas series se encuentran en fase durante el periodo de estudio. También se observa que en comparación a la Figura 11 la variabilidad de las primeras componentes principales muestra con mayor detalle el fuerte incremento de la temperatura desde el año 2004 hasta el 2010 en el Lago Mayor y Lago Menor.

### Ciclo estacional del porcentaje de cobertura nubosa sobre el lago Titicaca

Determinamos la cobertura nubosa en porcentaje a nivel estacional de la existencia de cielo despejado sobre el lago Titicaca en el periodo 2001 a 2014. El promedio de la distribución de cobertura nubosa en porcentaje sobre el lago Titicaca para las cuatro estaciones, verano (diciembre-febrero), otoño (marzo-mayo), invierno (junio-agosto), primavera (setiembre-noviembre) se muestran en la Figura 14. La cobertura nubosa tiene un ciclo constante en la atmósfera y está muy ligado a la circulación atmosférica. Los resultados indican que su distribución no es uniforme a nivel horizontal, y en la estación de invierno se registran los menores valores de cobertura nubosa en porcentaje sobre el lago Titicaca.



**Figura 14:** Imagen de la estacionalidad meteorológica de los valores de cobertura nubosa en el lago Titicaca en el periodo 2001-2014.

### Discusión

En la Figura 14 el color rojo nos indica que es muy alta la probabilidad de tener cielo cubierto y el color violeta nos indica la probabilidad de cielo despejado. En esta figura la imagen de invierno muestra que los meses que la conforman son ideales para adquirir imágenes sobre el lago Titicaca. En las Figuras 3 y 12 se observa que en los bordes hay mayor variabilidad y mayores valores de temperatura que al interior del lago, esto puede ser debido a diversos factores antropogénicos como la contaminación de aguas residuales, plantas acuáticas, así como la poca profundidad en los bordes costeros. Por otro lado, también, es debido a la estratificación termal en la superficie del lago Titicaca debida a la radiación del Sol en esta estación del año [19]. Haciendo uso del análisis de componentes principales del apilado de imágenes por año en invierno, se evidencia una tendencia positiva (Figura 13) desde el 2004 hasta el 2010 en el Lago Mayor y Lago Menor, en el año 2010 el valor de LSWT correspondiente a la estación de invierno muestra un elevado valor de promedio ( $13.802^{\circ}\text{C}$ ) y desviación estándar (2.0029) en el lago Titicaca, con respecto al promedio del periodo de estudio ( $13.1429^{\circ}\text{C}$ ), que coincide con los reportes de evento el Niño 2010 en el Pacífico ecuatorial [20]. Este evento el Niño en el Pacífico central es un evento anómalo que en la estación de verano puede ocasionar sequías en los Andes, principalmente en las zona central y zona sur [21] como el reportado en el 2010 [22]. En nuestro caso al observar un incremento de LSWT desde el 2004 al 2010 en la estación de invierno podemos inferir que la variabilidad del océano Pacífico no permite explicar la totalidad de la variabilidad del LSWT en invierno sobre el lago Titicaca.

## Conclusiones

En este trabajo, se caracteriza, en base a la información satelital, los cambios de la temperatura de la superficie del lago durante el invierno austral (junio-julio-agosto, JJA) de 2001 a 2014, esto en función de la existencia de cielo despejado en la zona sur del Perú en el invierno (Figura 14). Analizamos la distribución de LSWT por medio de mapas e histogramas, obteniendo que la distribución de valores de LSWT en las regiones (Lago Mayor y Lago Menor), las cuales mantienen la misma dinámica en el periodo de estudio. Se descubrió que el coeficiente de variación de LSWT diurna de invierno en el lago Titicaca para el periodo de estudio no mostró cambios significativos ( $C_v < 9\%$ ), mientras que en los bordes se presentan los valores más altos. Por medio del método de análisis de componentes principales se resaltó la variabilidad interanual del LSWT en el Lago Mayor y Lago Menor del Titicaca.

Años	Promedio	Mediana	Stdev
2001	13.0228	12.5933	1.5206
2002	12.6122	12.4050	1.2709
2003	12.9893	12.6467	1.4320
2004	12.6307	12.3583	1.3538
2005	13.3634	12.9050	1.6765
2006	13.0945	12.6350	1.5361
2007	13.0994	12.6850	1.6263
2008	13.2206	12.7083	1.8069
2009	13.2743	12.6433	2.0717
2010	13.8026	13.1307	2.0029
2011	13.3230	12.7450	1.8978
2012	13.3204	12.9017	1.5491
2013	13.1546	12.7817	1.4667
2014	13.0924	12.6083	1.6734

**Tabla 1:** Valores promedio, mediana y desviación estándar (Stdev) de LSWT para cada imagen de invierno por año del lago Titicaca.

## Referencias

- [1] Z. Wan y J. Dozier. A generalized Split-window algorithm for retrieving landsurface temperature from space, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4), 892-905 (1996).
- [2] R. Adrian, C. O'Reilly, H. Zagarese, S. Baines, D. Hessen, W. Keller, D. Livingstone, R. Sommaruga, D. Straile, E. Van Donk, G. Weyhenmeyer y M. Winder. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography*, 54(6), 2283-2297 (2009). web: [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2283](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283)
- [3] C. O'Reilly et. al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 10-773 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
- [4] J. Kay, S. Kampf, R. Handcock, K. Cherkauer, A. Gillespie y S. Burges. (2005). Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, 41, 1161-1175.
- [5] E. Alcantara, J. Stech, J. Lorenzetti, M. Bonnet, X. Casamitjana, A. Assireu y E. Leao. Remote sensing of water surface temperature and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. *Remote Sens. Environ.*, 114, 2651-2665 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.06.002>
- [6] S. Sima, A. Ahmadalipour y M. Tajrishy. Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation. *Remote Sens. Environ.*, 136, 374-385 (2013).
- [7] E. Crosman y J. Horel. MODIS-derived surface temperature of the Great Salt Lake. *Remote Sens. Environ.*, 113, 73-81 (2009).
- [8] S. Pareeth, N. Salmaso, R. Adrian y M. Neteler. Homogenised daily lake surface water temperature data generated from multiple satellite sensors: A long-term case study of a large sub-Alpine lake. *Sci. Rep.*, 6, 31251 (2016).
- [9] G. da Luz, L. Guasselli y D. Rocha. Temperature Surface of Guaíba Lake, RS, from time series of MODIS images. *RBRH*, 22, e17. Epub April 20, (2017). web: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716094>
- [10] W. Zhao, D. Xiong, F. Wen y X. Wang. Lake area monitoring based on land surface temperature in the Tibetan Plateau from 2000 to 2018. *Environmental Research Letters* (2020). web: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9b41>
- [11] J. Du, P. Jacinthe, H. Zhou, X. Xiang, B. Zhao, M. Wang y K. Song. Monitoring of water surface temperature of Eurasian large lakes using MODIS land surface temperature product. *Hydrological Processes* (2020). web: <https://doi.org/10.1002/hyp.13830>



- [12] C. Aguirre. Simulación numérica de la hidrodinámica del lago titicaca, frente a las costas de la ciudad de Puno en el Perú. *Tesis de maestría en Física, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. (2009).
- [13] C. Dejoux y A. Iltis. Geomorfología y sedimentación. El Lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual. ed. *Orstom - Hisbol, La Paz, Bolivia*. p. 584 (1991).
- [14] F. Duquesne, V. Vallaey, P. Vidaurre, E. Hanert. A coupled ecohydrodynamic model to predict algal blooms in Lake Titicaca. *Ecological Modelling* (2020). web: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109418>.
- [15] Y. Liu, W. Wu, M. Jensen y T. Toto. Relationship between cloud radiative forcing, cloud fraction and cloud albedo, and new surface-based approach for determining cloud albedo, *Atmos. Chem. Phys.*, 11(14), 7155–7170 (2011).
- [16] Z. Wan. MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD). *Institute for Computational Earth System Science*, Santa Barbara, 75 (1999).
- [17] D. Wilks. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (Vol. Volume 59, p. 464). *Academic Press* (2006).
- [18] M. Canty. Image Analysis, Classification, and Change Detection in Remote Sensing: With Algorithms for Python (4th ed.). CRC Press (2019). web: <https://doi.org/10.1201/9780429464348>
- [19] H. Xu, G. Velaoacha, H. Siguayro, C. Paulino, E. Alburqueque, L. Escudero, Atiquipa, C. Gamarra. Validación de datos satelitales de la concentración de clorofila-a, temperatura superficial y coeficiente de atenuación difusa en el Lago Titicaca. *Inf Inst Mar Perú* Vol.48(3): 367-379 (2021). web: <https://hdl.handle.net/20.500.12958/3593>
- [20] J. Apaéstegui. K. Takahashi, L. Ortlieb, A. Sifedine, J. Macharé. El Fenómeno El Niño durante el último milenio. *Boletín técnico El Niño - IGP* Vol.4 N°4 (2015).
- [21] J. Sulca, M. Vuille, P. Roundy, K. Takahashi, J. Espinoza, Y. Silva, G. Trasmonte, y R. Zubieta. Climatology of extreme cold episodes in the Peruvian Central Andes during Austral Summer: Origin, Types, and Teleconnections Quart. *J. R. Meteorol. Soc.* 144(717):2693-2714 (2018). web: <https://doi.org/10.1002/qj.3398>
- [22] K. Takahashi. Fenómeno El Niño: “Global” vs “Costero”. *Boletín técnico El Niño - IGP* Vol.4 N°4 (2017).