

## Caracterización morfobatimétrica y estimación de sedimentos de la bahía interior de Puno, lago Titicaca, mediante tecnología SIG

### Morphobathymetric characterization and sediments estimating of the Puno's inner bay, Titicaca lake, by GIS technology

Alfredo Loza Del Carpio<sup>1,3</sup>, César Gamarra Peralta<sup>2</sup>, Ninfa Condori Aliaga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional del Altiplano Puno, Facultad de Ciencias Biológicas, Área de Ecología; <sup>2</sup>Instituto del Mar del Perú, Laboratorio Continental Puno. <sup>3</sup>Correspondencia: [alozadc@yahoo.es](mailto:alozadc@yahoo.es)

#### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido 20-12-2016  
Artículo aceptado 10-06-2016  
Online: 25-06-2016

#### PALABRAS CLAVES:

Isobatas  
morfología lagos  
perfiles de profundidad  
Sistemas de Información Geográfica

#### ARTICLE INFO

Article received 20-12-2016  
Article accepted 10-06-2016  
Online: 25-03-2016

#### KEY WORDS:

Isobaths  
lake morphology  
depth profiles  
Geographic Information Systems

#### RESUMEN

Los ecosistemas lénticos, tienden a sufrir cambios morfométricos y batimétricos con el paso del tiempo. Esta condición en la bahía interior de Puno, aún no ha sido detallada, por lo que el presente conllevó a su caracterización en los años 2010 y 2012, para compararla con la del año 1975, además de estimar el volumen de sedimento acumulado en el lecho lacustre desde esa fecha. Para esto se digitalizaron las cartas batimétricas de 1975 y se hicieron levantamientos actuales mediante el uso de ecosonda y aplicación de tecnologías SIG; luego se trazaron isóbatas y construyeron mapas para comparar las variaciones. La estimación de sedimentos acumulados se realizó por diferencias de volumen de agua y cambios de profundidad entre los años mencionados. Los resultados refieren que las condiciones batimétricas han cambiado relativamente, manteniendo un fondo lacustre irregular, con profundidades máximas de 7.76 m para 1975, 7.07 m para 2010 y 7.19 para el 2012. Sus mayores áreas están ocupadas por profundidades menores a 1 m y los mayores volúmenes en las profundidades de 3 a 4 m. Los perfiles evidencian que la cubeta tiene un talud con mayor profundidad hacia la ciudad de Puno. El área para 1975 fue de 15.79 km<sup>2</sup> y para el 2012 de 15.9 km<sup>2</sup>; para el 2012 el volumen fue de 39 millones de m<sup>3</sup>, menor a 1975 que superó los 42 millones. El volumen de sedimentos acumulado desde 1975 hasta el año 2012 fue de 887352.02 m<sup>3</sup>, siendo la tasa de acumulación de 23982.48 m<sup>3</sup>/año y 4.1 mm/año.

#### ABSTRACT

Lentic ecosystems, suffers morphometric and bathymetric changes in the course of time. This condition at Puno's interior bay, has not yet been detailed, by which this research was orientated to its characterization in the years 2010 and 2012 to compare with 1975, in addition to estimate sediment volume accumulated in the water bed from that date. It digitalized bathymetric charts of 1975 and at present were done new charts by mean ecosound and GIS technology application to compare variations. Sediments accumulates volume was estimated by differences of water volume and in-depth changes between years mentioned. Results refer than bathymetric conditions have changed relatively, keeping an irregular profundity, maximum depths were 7.76 m for 1975, 7.07 m for 2010 and 7.19 by 2012. Largest areas are occupied by lower depths to 1 m and higher volumes in the depths of 3-4 m. Profiles evidence that the bucket has bigger inclination and depth toward Puno's city. 1975 area was 15.79 km<sup>2</sup> and for 2010 and 2012 was 15.9 km<sup>2</sup>; 2012 volume was 39 million m<sup>3</sup>, less than 1975 with more than 42 million. Sediment volume accumulated from 1975 until 2012 was 887352.02 m<sup>3</sup>, and accumulation rate of 23982.48 m<sup>3</sup>/year or 4.1 mm/year.

## INTRODUCCIÓN

Los cuerpos de agua continentales constituyen las principales fuentes de agua dulce que permiten la subsistencia humana y posibilitan el desarrollo de sus principales actividades productivas, por lo que su protección, aprovechamiento planificado y gestión sostenible es de vital importancia para cualquier región y una prioridad dentro de las políticas ambientales (Margalef, 1983). Sin embargo actualmente diversas problemáticas afectan su disponibilidad y calidad, principalmente por causas antropogénicas que traen consigo procesos de contaminación, dilapidación, inadecuado aprovechamiento, a los que suma problemáticas globales como el cambio climático. La implementación de programas de monitoreo, recuperación y manejo de cuerpos de agua continentales son fundamentales para garantizar su permanencia en el tiempo, tanto en calidad como en cantidad.

El lago Titicaca es quizás el recurso hídrico de agua dulce más importante del Perú, no solo por su gran superficie (más de 4000 km<sup>2</sup> en el lado peruano), sino porque provee múltiples beneficios socioeconómicos y ambientales y constituye una reserva de agua dulce vital para el futuro (RNT, 2003). La bahía interior de Puno es una porción que no supera el 1% de todo el lago, sin embargo sus 16 km<sup>2</sup> no han sido valorados adecuadamente ya que en la actualidad es una cubeta casi colapsada ecológicamente y aún a pesar de ello continúa proveyendo beneficios, entre las que destacan sus servicios de agua potable y la actividad turística. Pretender seguir obteniendo beneficios socioeconómicos y ambientales e incluso buscar alternativas de remediación y restauración requiere un mejor conocimiento de la estructura y funcionamiento de este ecosistema acuático y previo a planificar medidas y estrategias de gestión, se requieren reconocer adecuadamente sus características limnológicas; destacando dentro de ello sus características estructurales referentes a su morfología, sedimentación y batimetría.

Son importantes los estudios de batimetría y morfometría en ecosistemas lacustres porque permiten planificar apropiadamente acciones de manejo, restauración y aprovechamiento de recursos; la forma y tamaño de un lago afectan sus condiciones físicas, químicas y biológicas y posibilitan establecer criterios para diversos usos y son necesarios también

para emprender otros estudios limnológicos e hidrológicos (Wetzel y Likens, 2010). La morfometría permite conocer también el contenido calórico y la estabilidad de la columna de agua, la productividad biológica, las tasas de ciclaje de nutrientes, incluyendo los procesos evolutivos del sistema lacustre (Wetzel, 1981). La caracterización morfométrica de un cuerpo de agua es el punto de partida de las investigaciones limnológicas, pues permiten determinar estaciones de muestreo y genera una idea global sobre el funcionamiento del sistema considerando sus interfases agua – aire y agua – sedimento; además es necesario para investigar sobre procesos de erosión, cargas de nutrientes, balances de masa, contenido calórico, estabilidad térmica, comunidades, productividad biológica, etc. (Montoya-Moreno, 2008).

Los sedimentos constituyen el límite inferior de los ecosistemas acuáticos y representa la acumulación de materiales arrastrados o alóctonos (arcillas, fragmentos de rocas, arenas, tierras) o bien producidos en la misma masa de agua o autóctonos (organismos muertos, excrementos, materia orgánica) (Margalef, 1983). Los procesos de sedimentación en los lagos están relacionados estrechamente con los patrones hidrológicos de flujo y la topografía de la cubeta, los cuales influyen el régimen hidrodinámico (Håkanson, 1982). La producción de sedimentos es un problema ambiental que conlleva a la colmatación, constituyéndose como una de las principales afecciones de los embalses a nivel mundial; los sedimentos procedentes de las cuencas de drenaje son retenidos en gran parte por los embalses, provocando importantes efectos sobre la calidad hidromorfológica y en los ecosistemas acuáticos afectados (Martínez et al., 2015). Los lagos someros como la bahía interior de Puno, son generalmente polimícticos y naturalmente más productivos que los lagos profundos, son susceptibles a ser más rápidamente sedimentables y sufrir procesos de eutrofización más acelerados (Monzón, 1984).

En la actualidad la tecnología ha provisto de métodos modernos y precisos que facilitan la obtención de información ecológica y limnológica de diferentes tipos de ecosistemas, siendo los Sistemas de Información Geográfica (SIG) las de mayor relevancia y aplicabilidad. El uso de equipos automatizados para medir la morfología y sedimentos

de los lagos en comparación con métodos tradicionales, ahorra tiempo y ofrece mayor precisión (Lombardo, 2014; Martínez et al., 2015) y si se tienen sistematizados una importante cantidad de datos permiten estructurar modelos predictivos y pronosticar posibles efectos de sus cambios en el futuro.

En ese contexto, la investigación pretende aportar al conocimiento de las características morfobatimétricas de la bahía interior de Puno y sus variaciones en el tiempo, así como sus variaciones sedimentarias, a través del uso de la tecnología SIG, cuya información posteriormente posibilite aportar lineamientos para la implementación de evaluaciones limnológicas y en la planificación de medidas de recuperación, restauración y gestión de este recurso hídrico, el que actualmente se encuentra en un permanente deterioro ecológico y ambiental.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ámbito de estudio

El estudio se realizó en la bahía interior de Puno (BIP), ubicada a orillas de la ciudad del mismo nombre sobre los 3810 msnm. Es somera, cerrada y de poco flujo, características que, combinados con los altos ingresos de nutrientes procedentes de la ciudad de Puno, hacen de este ecosistema una zona severamente contaminada (Northcote, 1991). Está ubicada en la parte Nor – Oeste del lago Titicaca y sus límites al Norte son con el sector Huaje y la Universidad Nacional del Altiplano, por el Sur con las localidades de Chimu y Jayllihuaya, por el Este se ubica la línea imaginaria de unos 4 km que une los promontorios de Chimu y Chulluni (Morales et al 1991) (Figura 1).



Figura 1. Bahía interior de Puno, la línea roja limita su cubeta (Fuente Google Earth, 2009).

### Determinación de las características morfobatimétricas de la bahía interior de Puno mediante método SIG

La morfometría de los años 1975, 2010 y 2012 fue calculada utilizando tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG), según las referencias de Fernández (2003), Gernaldi y Piccolo (2008) y Quiroz et al. (2009). Para 1975 se partió desde la Carta Batimétrica HIDRONAV 6525 de la Marina de Guerra del Perú, a escala 1:25000, Primera Edición 1977, la que fue escaneada y convertida a formato digital JPG para su digitalización y georeferenciación en Software ArcGis 10, Datum WGS 84 y coordenadas UTM 19 Sur; desde ella se obtuvo la información cuantificada de los diferentes niveles de profundidad (en metros) y de la línea de orilla, con sus respectivas coordenadas. Para los años 2010 y 2012 se inició con un levantamiento batimétrico en campo, recorriendo una grilla establecida en gabinete por toda el área de la BIP a bordo de una embarcación con motor fuera de borda a una velocidad promedio de 5 nudos, registrando la profundidad y posición geográfica mediante ecosonda LOWRENCE modelo LCx 37C, en la frecuencia de 200 KHz, con GPS integrado y transducer remolcable; adicionalmente se recorrió toda la zona accesible de la orilla de la bahía comprendida entre la isla Esteves y Chimu, georeferenciando con un GPS marca Garmin Etrex Vista HCx para hacer las correcciones de delimitación del cuerpo de agua y como línea superficial de cero metros. En el año 2010 se levantó la información con 2403 puntos y para el año 2012 con 487 puntos.

### Procesamiento y análisis de información

La información fue procesada en ArcGis 10 en la siguiente secuencia:

- *Creación del Shape de profundidad.* La información de ubicación y profundidad se alimentó al SIG con datos de longitud (x), latitud (y) y profundidad (z). El perímetro se caracterizó con la georeferenciación de orilla y utilizando imágenes satelitales (Google Earth), cargada al mismo shape de profundidad bajo atributo de profundidad cero.
- *Creación digital de superficie.* Las superficies de profundidad se construyeron utilizando herramienta 3D Analyst Tools/Raster Interpolation de ArcGis 10 y Golden Surfer 10, obteniéndose un archivo de interpolación raster donde cada pixel tuvo un valor de profundidad.

- *Isobatas*. Se construyeron a partir de imagen raster de interpolación, con un rango de 5 a 0.50 m de profundidad y con un intervalo de 1 m entre ellos.

Los parámetros y dimensiones morfométricas determinadas fueron (Wetzel y Likens, 2010; Rivera Rondón et al., 2010; Telteu y Zaharia, 2012):

- *Longitud máxima* (l). Distancia de la superficie entre puntos más distantes de la orilla.
- *Anchura o amplitud máxima* (b). Distancia máxima de la superficie de la bahía, en ángulo recto de la línea de longitud máxima. La anchura media (b), es igual al área dividida por la longitud máxima:  $b = A/l$ .
- *Área* (A). Determinada por integración digital.
- *Volumen* (V). Integración de áreas de cada estrato a profundidades sucesivas, tomadas desde la superficie hasta la profundidad máxima. Se determinó haciendo la suma de todos los volúmenes de los estratos:  $V = h/3 (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1A_2})$ . Donde V es el volumen y h el espesor vertical de cada estrato de agua, dado por la diferencia entre dos isobatas contiguas, A1 es el área de la cara superior del estrato y A2 el área de la cara inferior del estrato de agua.
- *Profundidad Máxima* ( $Z_m$ ). La mayor profundidad de la bahía.
- *Profundidad media* (Z). Volumen dividido entre el área de superficie:  $Z = V/A_0$
- *Profundidad relativa* ( $Z_r$ ). Profundidad máxima expresada como porcentaje del diámetro medio:  $Z_r = (50 Z_m \sqrt{\pi}) / \sqrt{A_0}$
- *Perímetro o Línea de Orilla* (L). Determinada usando datos tomados *in situ* mediante GPS y corregidos con imágenes satelitales georreferenciadas.
- *Desarrollo de la línea costera* ( $D_c$ ). Cociente entre el perímetro de la bahía y el perímetro de la circunferencia de la misma área:  $D_c = L/2\sqrt{\pi A_0}$

### Estimación del volumen de sedimentos acumulados

Caracterizada la batimetría en los años 1975, 2010 y 2012 de la bahía interior de Puno, más los cálculos de volúmenes de agua de la cubeta en esos años, se obtuvieron estimaciones del volumen de sedimentos acumulados y/o sus variaciones como resultado de las diferencias en los cambios existentes en las profundidades y de los cambios en los volúmenes de agua.

Para ello las cotas se homogenizaron a una misma

escala limnográfica, que se obtuvo del promedio histórico del nivel del lago Titicaca según el SENAMHI, siendo necesario también conocer las cotas del nivel del lago en la fecha que se realizó el levantamiento de información batimétrica. Así para 1975 al mes de mayo fue de 3809.99 msnm, para el 2010 al mes de mayo fue 3809.21 msnm, para el 2012 al mes de junio fue 3809.76 msnm.

La estimación del volumen del sedimento acumulado por diferencia de volúmenes de agua se obtuvo:  $V_{s1} = V_{1975} - V_{2010}$  y  $V_{s2} = V_{1975} - V_{2012}$ ; donde  $V_{s1}$  son Los volúmenes de sedimentos acumulados entre 1975 y 2010 y  $V_{s2}$  los volúmenes de sedimentos acumulados entre 1975 y 2012; V = volumen de agua. Según estas relaciones se estimó la acumulación interanual y una tasa aproximada de sedimentos acumulados anualmente.

## RESULTADOS

### Caracterización de los principales parámetros morfométricos de la BIP

La morfología general de la BIP describe un espejo de agua de forma casi cuadrada, está limitada por el Este mediante una línea imaginaria que une los promontorios de Chimu y Chulluni, más allá de la cual se encuentran los totorales de la Reserva Nacional del Titicaca (Figura 1). Los parámetros morfométricos no tuvieron variaciones trascendentales en cada uno de los años evaluados, la longitud máxima siempre superó los 5 km, aunque algo mayor en 1975 con 5.35 km debido también a la cota más alta que llegó el nivel del lago en ese año (3809.99 msnm). El ancho máximo también tuvo valores similares alcanzando casi los 4 km (Tabla 1). El área en los tres años alcanzó más o menos los 16 km<sup>2</sup>, el volumen total tuvo variaciones desde los 39 a 41 millones de m<sup>3</sup>. La profundidad máxima se presentó en el año 1975 con 7.40 m y la menor en el 2012 con 7.19 m. El perímetro fue mayor en el año 2010 con 22 km y menor en el año 1975 con 19 km (Tabla 1). Los valores de desarrollo de línea costera (DLC) son índices que explican la modificación del contorno de un lago, para el caso de la BIP, en cada año estos valores fueron casi constantes (de 1.45 a 1.51) e indican baja sinuosidad en el contorno y una forma subcircular, que no tuvo considerables modificaciones desde 1975 hasta el 2012. La profundidad relativa explica baja profundidad con respecto a la superficie indicando que se trata una

cubeta relativamente somera. El índice área de la cuenca/volumen ( $Ac/V$ ) se relaciona con los parámetros tróficos (Catalán, 1987), mientras este valor sea más bajo mayor oligotrofia; el valor de este índice en la BIP fue de 1.81, lo cual indica efectivamente que se trata de un cuerpo eutrófico (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características morfométricas de la BIP para tres años, determinadas mediante tecnologías SIG.

Parámetro morfométrico	Medida	1975	2010	2012
Longitud máxima	km	5.35	5.12	5.11
Ancho máximo	km	3.90	3.38	3.41
Área	km <sup>2</sup>	15.79	15.91	15.91
Área	m <sup>2</sup>	15790113	15913195	15913609
Volumen	m <sup>3</sup>	41284990.06	39593074.35	39347091.02
Profundidad máxima	m	7.40	7.21	7.19
Profundidad media	m	2.62	2.48	2.47
Profundidad relativa	%	0.17	0.18	0.18
Perímetro	km	19.27	22.09	21.95
Desarrollo línea costera	forma	1.51	1.45	1.47
Área de la cuenca	m <sup>2</sup>			71030000
Índice área cuenca/volumen	m <sup>-1</sup>			1.81

### Características batimétricas de la BIP y sus variaciones

Las características batimétricas generales de la BIP en los tres años evaluados se detallan en la Tabla 2, donde la profundidad máxima para el año 1975 es 7.40 m y para el año 2012 fue de 7.19 m (21 cm menos que en el año 1975). Pero es necesario precisar que en 1975 en el mes de junio (el mismo que para el 2012) el nivel del lago fue de 3810.37 msnm y la profundidad máxima para ese mes debió ser de 7.76 m (38 cm mas), es decir 59 cm más que en junio del 2012, siendo esa la disminución total de la profundidad máxima y no sólo los 21 cm. Así, las profundidades corregidas en todos los años para el mes de junio (Tabla 2) evidencian que las profundidades máximas disminuyeron con el paso de los años.

**Tabla 2.** Principales valores batimétricos de la BIP y su comparación interanual

PARÁMETROS	AÑOS		
	1975 (oct)	2010 (may)	2012 (jun)
Nivel en el mes msnm	3809.99	3809.21	3809.76
Nivel para junio todos los años (msnm)	3810.37	3809.07	3809.76
Profundidad máxima mes evaluado (m)	7.40	7.21	7.19
Profundidad máxima corregida (m) junio	7.78	7.07	7.19
Profundidad media (m)	2.62	2.48	2.47
Profundidad relativa (proporción)	0,17	0,18	0,18
Diferencia profundidad máxima corregida (1975 – 2012) (m)			0.59
Diferencia profundidad media (1975 – 2012) (m)			0.15

La profundidad media como índice batimétrico (cociente entre volumen y área de la bahía) para 1975 fue de 2.62 m, mayor a la del 2012 con 2.47 m. Las diferencias entre profundidades medias en los años 1975 y 2012 indican que el lecho lacustre se ha incrementado en 15 cm (Tabla 2), lo que significa que en los 37 años, la tasa de incremento de sedimentos en todo el lecho de la BIP fue de 0.41 cm/año o 4.1 mm/año; teniendo en cuenta además que en la zonas de máxima profundidad los sedimentos aumentaron 59 cm, es decir 15.95 mm/año. Estos valores reiteran la disminución de las profundidades de la BIP, principalmente por el incremento de sedimentos en el lecho.

La relación entre el área del lago, por donde entra la energía desde el exterior, y la profundidad, a través de la cual se disipa la energía, es de gran importancia en la dinámica biológica de un lago y esta relación se puede expresar con la profundidad relativa ( $Z_r$ ) (Vega et al., 2005). En la BIP su valor fluctúa entre 0.17 y 0.18, que indica que los factores externos tienen poca influencia en la estabilidad de la columna de agua, básicamente por su poca profundidad.

### Variaciones y características actuales de las isóbatas en la BIP

Las características batimétricas de la BIP entre 1975 y el 2012 evidencian algunos cambios, principalmente un mayor área a los 4 m de profundidad en 1975, lo que es indicador también que existió mayor volumen a ese nivel; en ese año se observa además una orientación de la cubeta más profunda hacia la ciudad de Puno superando los 7 m y el lecho lacustre es más irregular ya que las isóbatas forman fosas sinuosas e intercaladas. Es notoria la conexión entre la cubeta profunda con la bahía exterior mediante un canal de 6 m de profundidad (canal Chimu); en esas épocas dicho canal era ocasionalmente dragado para el tránsito de embarcaciones de gran envergadura (Figura 2a). A diferencia, para el año 2012 (similarmente que para el 2010) los fondos son más regulares y homogéneos, con áreas menos profundas y la cubeta mayor, aunque sigue orientada hacia la ciudad de Puno, se une difusamente con la bahía exterior y el canal Chimu es menos profundo (menor a 6 m). Las áreas menores a 4 m de profundidad son mucho más amplias que en 1975 (Figura 2b).

Las Figuras 2a y 2b permiten apreciar adicionalmente que en el año 1975 las orillas de la BIP en casi toda su periferia estaban densamente pobladas por macrófitas acuáticas (*Schoenoplectus tatora* y otras sumergidas), cubriendo aproximadamente un 20% del área, en cambio en el 2012 sólo se aprecia una pequeña extensión hacia el Suroeste que no cubre ni el 5%. Aunque hacia el Este continúa habiendo importante cobertura de macrófitas que impide la conexión con la bahía exterior, pero en zonas aledañas a la ciudad su presencia es prácticamente nula con excepción de algunas matas dispersas de totora. Es notorio también que el espejo de agua para el 2012 traspasa la línea imaginaria, lo que indica una disminución de macrófitas también por esta zona.

La batimetría evaluada desde 1975 al 2012 muestra en general un patrón básico, con ligeros cambios, debidos principalmente a los paulatinos procesos de sedimentación por el arrastre de material desde las fuertes pendientes adyacentes a la BIP para colmatar luego el lecho lacustre. Sin embargo otras causas de los cambios batimétricos se deban a los fuertes vientos ocasionales, turbulencias y flujos internos que también suelen modificar el lecho, aunque entre las razones antrópicas más importantes se debe incluir la descarga de aguas residuales sin tratamiento previo, las fuertes escorrentías en la época de lluvias desde el sistema orográfico que rodea la ciudad, cuyo crecimiento urbano a devastado la cubierta vegetal que protegía naturalmente la erosión de los suelos; los permanentes movimientos producidos por embarcaciones turísticas que utilizan potentes motores, podrían también aportar a los cambios batimétricos y de los fondos lacustres

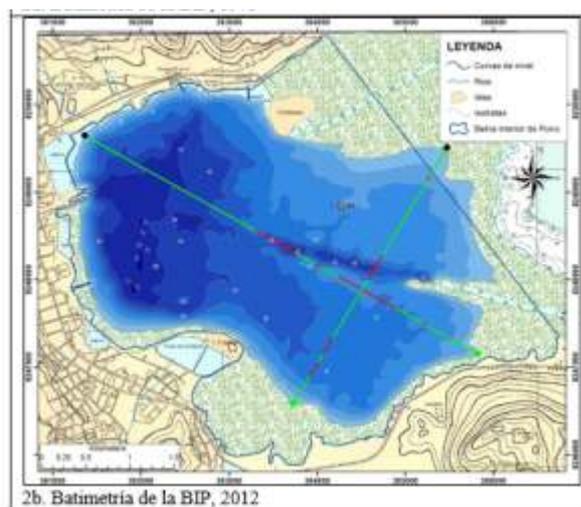
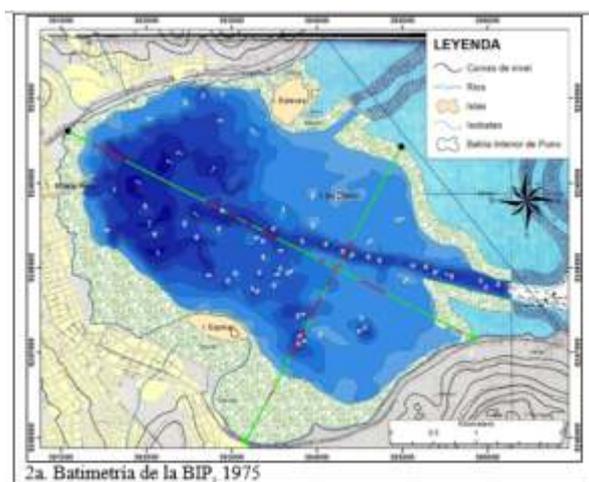
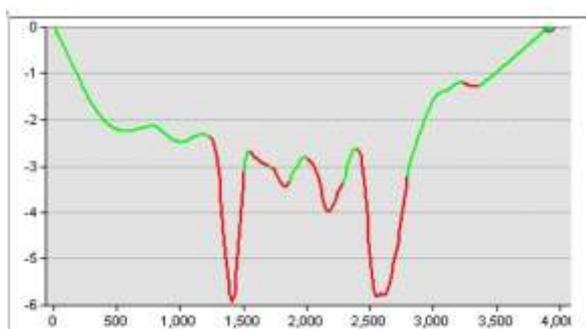


Figura 2. Evolución de la batimetría en la BIP desde 1975 hasta el 2012. Líneas roja y verde constituyen el largo y el ancho máximo de la cubeta, las secciones rojas son referencias para los perfiles de profundidad de las Figuras 4 y 5.

### Cambios en los perfiles de profundidad en la BIP

Los perfiles de profundidad del ancho y largo máximo de la BIP fueron trazados en áreas exclusivamente de espejo de agua, obviando interferencias como islotes y totorales. Los cambios del lecho en el ancho máximo de la BIP para los años evaluados se muestran en la Figura 3, las líneas están orientadas de Noreste (desde los 0 m) a Suroeste (hasta más de 3000 m de largo); las secciones rojas forman las depresiones en la cubeta y coinciden con las líneas rojas del ancho máximo de la Figura 3.

Los perfiles confirman las variaciones en la forma de la cubeta entre los años 1975 al 2012. En 1975 el fondo fue más irregular presentándose dos fosas importantes de hasta 6 m; una de ellas perteneciente al canal de Chimu y la otra ubicada entre las inmediaciones de Salcedo y la isla Espinar y entre estas se aprecian otras dos depresiones pequeñas entre 3 y 4 m de profundidad. En el 2012 la máxima depresión conforma una sola fosa cuya profundidad sólo alcanza los 5 m, es decir durante 35 años el canal se ha colmatado con 1 m de sedimentos; así mismo las caídas del talud y la pendiente en el lado Suroeste de la línea que conforma el ancho máximo es mucho más pronunciada que en 1975 y el relieve del lecho lacustre de la BIP ya no es tan irregular, apreciándose como única depresión profunda el canal de Chimu.



3a. Perfil del ancho máximo, 1975

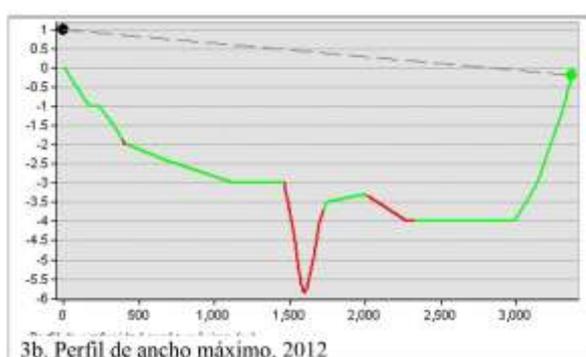
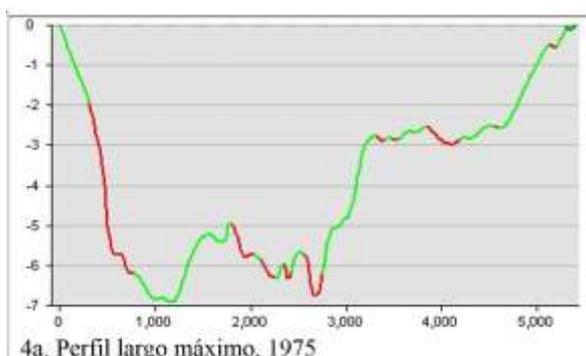


Figura 3. Perfiles de profundidad del ancho máximo de la BIP, años 1975 y 2012

En cuanto al perfil del largo máximo de la BIP, se aprecia que desde la orilla nace una pendiente fuerte que forma la parte más profunda de la cubeta, alcanzando los 7 m en 1975 y exactamente los 6 m en los años 2010 y 2012, lo que explica que en 37 años la parte más profunda de la BIP ha acumulado aproximadamente 1 m de sedimentos. El relieve del lecho en esta sección se mantuvo irregular (Figura 5)



4a. Perfil largo máximo, 1975

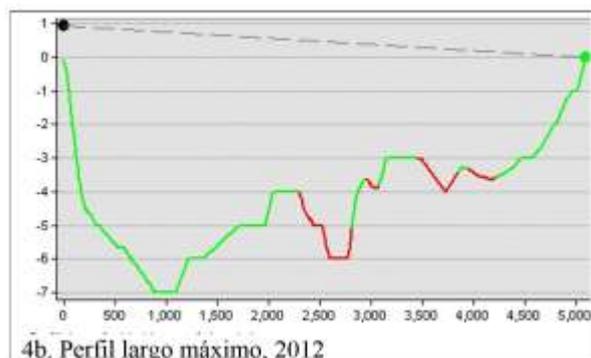


Figura 4. Perfiles de profundidad del largo máximo para la BIP durante los años 1975 y 2012.

### Relación superficie - volumen

Las superficies entre isóbatas evidencian que la mayor área de la BIP se encuentra entre profundidades de 0 y 1 m, lo que predomina en los tres años de evaluación, superando los 4 km<sup>2</sup>; ello abarca todos los contornos de la bahía en los que incluyen espacios con totoraes y otras macrófitas sumergidas. Luego las profundidades entre 2 y 3 m llegan a cubrir un área superior a los 3 km<sup>2</sup>, seguido por las profundidades entre 3 y 4 m que cubren unos 2.5 km<sup>2</sup>; aunque en los años 2010 y 2012 es algo mayor el área que ocupan los 3 y 4 m de profundidad. La menor superficie es la que tienen profundidades de 7 m a más, que en ningún caso supera los 0.5 km<sup>2</sup> (Tabla 3). El área total de la BIP ha variado ligeramente de acuerdo a los años: en el 2010 y 2012 alcanzó 15.91 km<sup>2</sup> y en 1975 los 15.79 km<sup>2</sup>, lo que significa un mantenimiento de la superficie del espejo de agua a través de los años. En todos los casos al momento del levantamiento batimétrico las cotas del nivel del lago superaban los 3809 msnm (Tabla 3), y aunque las diferencias entre estas cotas para cada año deberían marcar la tendencia de que a mayor cota mayor área, esto no ocurre así debido a que en el transcurso de los 37 años definitivamente existe una modificación del contorno del área que luego se manifiesta en el área total de la BIP.

Tabla 3. Tendencias del área total y según profundidades en la BIP de Puno entre 1975 y 2012.

Profundidad (m)	ÁREA (km <sup>2</sup> )			2012 (%)
	1975 (Oct)	2010 (May)	2012 (Jun)	
0 - 1	4.11	4.97	4.99	31.4
1 - 2	2,16	1,48	1.31	8.2
2 - 3	3,96	2,85	2.61	16.4
3 - 4	1,17	2,34	2.57	16.2
4 - 5	1,73	1,83	1.87	11.7
5 - 6	1,45	1,46	1.47	9.2
6 - 7	1,08	0,97	1.05	6.6
7 a mas	0,14	0,0005	0.03	0.2
<b>TOTAL</b>	<b>15.79</b>	<b>15.91</b>	<b>15.91</b>	<b>100</b>
<b>Nivel msnm</b>	<b>3809.99</b>	<b>3809.21</b>	<b>3809.76</b>	
<b>Profundidad máxima</b>	<b>7.40</b>	<b>7.21</b>	<b>7.19</b>	

La distribución de volúmenes según profundidades (Tabla 4) tuvo más bien una alta variación, tanto a nivel de cada año como entre isóbatas; así para 1975 el mayor volumen de agua estuvo depositado entre las profundidades de 2 a 3 m con más de 9 millones de m<sup>3</sup>, para el año 2010 entre los 4 y 5 m con unos 8 millones de m<sup>3</sup> y para el año 2012 las mayores cantidades se han dado en las profundidades de 3 a 4 m con 8.8 millones de m<sup>3</sup>. El volumen total de la BIP para 1975 alcanza los 41.3 millones de m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta también que la profundidad máxima en este periodo fue de 7.4 m; y la menor en el 2010 con 39 millones de m<sup>3</sup>.

**Tabla 4.** Cambios en los volúmenes de agua en la BIP según profundidades y años, determinados mediante tecnologías SIG.

Profundidad (m)	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )			2012 (%)
	1975	2010	2012	
0 - 1	1153234,90	523000,21	536449,163	1.4
1 - 2	3161835,91	2260088,38	1987721,31	5.1
2 - 3	9534641,37	7106698,43	6493913,52	16.5
3 - 4	4000915,26	7852915,59	7835986,13	19.9
4 - 5	7666715,81	8076307,14	8244125,13	20.9
5 - 6	7914339,42	7834014,72	8121969,71	20.6
6 - 7	6888112,97	5936660,47	6085099,76	15.5
7 a mas	965194,41	3389,41	41826,299	0.1
<b>TOTAL</b>	<b>41284990,06</b>	<b>39593074,35</b>	<b>39347091,022</b>	<b>100</b>
<b>Nivel msnm</b>	3809.99	3809.21	3809.76	
<b>Profundidad máxima (m)</b>	7.40	7.21	7.19	

#### Estimación del volumen de sedimentos en la BIP

En la bahía interior de Puno la distribución de los sedimentos fue irregular, las principales áreas de deposición guardan relación con los efluentes de aguas residuales domésticas así como los de aguas pluviales. Tal es así que las zonas con mayor acumulación de sedimentos se encuentran por la zona Espinar, Muelle Puno, Terminal Terrestre, UNA Puno (JICA, 2000) y es probable que actualmente existan ingresos importantes por el barrio Vallecito, Salcedo, Laykakota, entre otros.

La Tabla 5 contiene en detalle los incrementos del volumen de sedimentos acumulados desde 1975 hasta el 2012. Entre esos años se han acumulado unos 887532 m<sup>3</sup> de sedimentos en la BIP, los cuales probablemente tienen como fuente más importante las aguas residuales que ingresan a la bahía desde la ciudad de Puno y las escorrentías de las lluvias que arrastran material sólido desde las microcuencas adyacentes; de acuerdo a esto la tasa de acumulación hasta el 2012 fue de 23982.48 m<sup>3</sup> por año, esto significa una acumulación de sedimentos de 1.5 L/m<sup>2</sup>/año en los 16 km<sup>2</sup> aproximados de la BIP, lo que a su vez implica 4.1 mm/año en grosor. Los volúmenes cada vez mayores de aguas residuales que

ingresan directamente al lago, sin un tratamiento apropiado o sin ningún tratamiento, aporta definitivamente abundante carga orgánica que se acumulan en el fondo para conformar lodos y sedimentos. Las escorrentías en las épocas de lluvias traerían también considerables cantidades de sedimentos desde los suelos erosionados de las microcuencas adyacentes.

**Tabla 5.** Volúmenes de sedimentos acumulados en la BIP desde 1975 hasta el 2012.

AÑO	Volumen de sedimentos (m <sup>3</sup> )	Tasa incremento anual
1975	0.0	0.0
2012	887352.02	23982.48 m <sup>3</sup> /año
Tasa de incremento de lecho lacustre en la BIP en volumen		1.5 litros/m <sup>2</sup> /año 150 mm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> /año
Tasa de incremento de lecho lacustre en la BIP en espesor		4.1 mm/año

La figura 5 ilustra mejor los cambios en el lecho lacustre de la BIP a partir del año 1975 hasta el 2012, en base a las variaciones de la profundidad y la distancia de la línea de longitud máxima, desde la orilla en el sector Vallecito hasta los 700 m en la parte central de la BIP. En el mencionado sector las profundidades máximas variaron desde los 6 m hasta los 7 m para el año 1975, a diferencia del año 2012 donde las profundidades máximas fluctúan entre los 5 m y 6 m, lo que ratifica la acumulación aproximada de 1 m de sedimentos en los 37 años.

En 1975 (línea azul) la pendiente general del talud es mayor, pero con una zona más llana entre los 125 y 250 m de distancia y luego recién la pendiente incrementa para caer en una zona más profunda; sin embargo esta línea evidencia también menor profundidad en esta sección, comparado con el lecho del 2012 (línea rosada). Efectivamente, en esta parte el lecho del 2012 es más profundo (de 2 m a 4 m) y la pendiente de caída es progresiva, siendo el espacio entre la variación de estos dos lechos (flecha roja) el sustrato que ha venido desmoronándose en estos años probablemente por el ingreso de diversos afluentes. Luego se observa acumulación de una capa de sedimentos entre los 375 y 675 m, representado por la menor profundidad del 2012 en comparación con la del 1975 (flecha verde), que representa el sedimento acumulado en los 37 años. Las estimaciones realizadas explican una disminución de las profundidades en la BIP, lo cual hace que el fondo se configure progresivamente como un espacio más llano

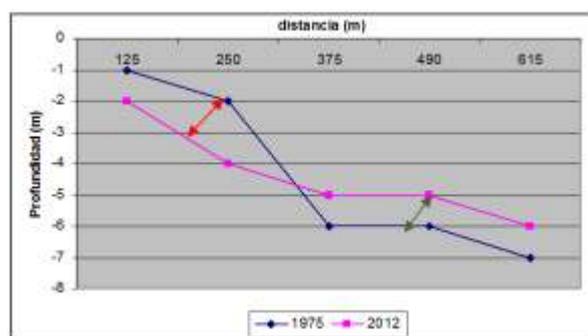


Figura 5. Variaciones en la profundidad, el movimiento y la acumulación de sedimentos en la BIP comparados entre los años 1975 y 2012, hasta los 700 m de la línea de longitud máxima, desde la orilla.

## DISCUSIÓN

Según los cálculos morfobatimétricos con el método SIG para el año 1975, la BIP tuvo 15.79 km<sup>2</sup>; Morales *et al.* (1991) para ese mismo año determinaron un área de 16.1 km<sup>2</sup>, denotando una leve diferencia debido probablemente a las metodologías utilizadas. Para el 2010 y 2012 no se realizaron evaluaciones batimétricas de la BIP, aparte de la que se reporta en este estudio, cuyos resultados fueron de 15.91 km<sup>2</sup> para ambos años, valores ligeramente superiores a los anteriores, lo que nos evidencia que en general la superficie de la BIP no ha variado de modo manifiesto.

En cuanto a los volúmenes de la BIP Morales *et al.* (1991) reportaron valores algo mayores para 1975 (43.7 millones de m<sup>3</sup>), comparados con nuestros cálculos que para ese año fue de 41.3 millones de m<sup>3</sup>; se sugiere también que estas diferencias se deben a los métodos utilizados en cada caso (batimetría convencional y ecosonda – SIG en nuestro caso). Sin embargo ambos resultados son superiores a las determinaciones del 2010 y 2012 por el método SIG, alcanzando los 39.4 millones de m<sup>3</sup> para este último año; ello sugiere una disminución en el volumen de entre 2 a 4 millones de m<sup>3</sup> de agua en los 37 años transcurridos entre 1975 y el 2012; la causa es tal vez la disminución de las profundidades de la cubeta por la acumulación paulatina de sedimentos en el fondo. Morales *et al.* (1991) reportan en 7 m la profundidad máxima de la BIP para 1975, con nuestros cálculos se determinó exactamente en 7.40 m para ese mismo año; para los años 2010 y 2012 fueron de 7.21 m y 7.19 m respectivamente, valores inferiores que ratifican la disminución en su profundidad y por tanto una disminución de los volúmenes de agua. Así

mismo, los cálculos de profundidad media para 1975, tanto los de Morales *et al.* (1991) (2.7 m) y los nuestros (2.93 m) fueron menores que los del 2012 que llegaron a 3.42 m; este índice disminuye cuando los valores de volumen y superficie son altos como en el año 1975 (Montoya – Moreno, 2008), lo que confirma la disminución de los volúmenes de agua de la BIP en los últimos años.

Como análisis adicional, el mapa batimétrico de 1975 sugiere que para esos años las orillas de la BIP estaban ampliamente cubiertas por vegetación macrofítica (*Schoenoplectus* principalmente) cubriendo aproximadamente el 20% de su área y para el 2012 no cubren ni el 5%, lo que coincide con la referencia de Collot (1980), quien indica que hasta inicios de los años 70 los totorales y otras macrófitas eran abundantes en las inmediaciones de la ciudad Puno; similarmente Ocola y Torres (1997) reportan una disminución de 33% de áreas de totorales en la BIP desde 1982 a 1997 y una disminución de hasta 99% de macrofitas sumergidas. Es probable que los procesos de contaminación por aguas residuales de la ciudad de Puno hayan afectado negativamente el desarrollo de la vegetación acuática.

En cuanto a los procesos de sedimentación en el lago Titicaca, Binford *et al.* (1991) en la zona de Huiñaimarca determinaron una tasa de sedimentación de 9 mg/cm<sup>2</sup>/año para un período de 143 años, y específicamente para los años 1984 a 1986 determinó una tasa de 15.2 mg/cm<sup>2</sup>/año, una tasa mucho más elevada que en años anteriores. Rodrigo y Wirrmann (1991) refieren que las tasas de sedimentación en el lago Titicaca varían de acuerdo al tipo de facies: en facies carbonatadas es de 0.5 mm/año para el lago Mayor y en facies organo-detrítica como el lago Menor es de 0.2 mm/año; la bahía interior de Puno podría considerarse como facie orgánica por sus altos niveles de materia orgánica (superiores a 50%). Con nuestros cálculos para la BIP se determinó una tasa de incremento en sedimentos de 4.1 mm/año o en volumen de 150 mm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>/año, valores muy superiores al de otras partes del lago, incluso a lagos de otras latitudes como el Sanabria cuya tasa de sedimentación es de 1 mm/año (Vega *et al.*, 2005) y en general en la mayoría de lagos la tasa de sedimentación es de 1 mm a 3 mm/año (Margalef, 1983).

El JICA (2000) calculó un volumen de 277225 m<sup>3</sup> de sedimentos orgánicos dispuestos en el lecho de la

BIP, correspondiente a una descarga de 40 años (1959 – 1999). Con nuestro estudio se estimó un volumen de 887352 m<sup>3</sup> en una descarga de 37 años (1975 – 2012); las metodologías de cálculo fueron distintas, pero además nuestra evaluación incluye sedimentos inorgánicos y las acumulaciones desde la década del 2000, donde las tasas de incremento por obvias razones fueron mayores (incremento poblacional, crecimiento urbano, cambio climático). En la actualidad existen reportes de diferentes regiones del planeta donde las tasas de sedimentación tienen importantes incrementos debido al calentamiento global (Foster et al., 2012; Francés y Bussi, 2014), lo que repercute en la intensidad de precipitaciones, erosión del suelo y mayor evaporación de los espejos de agua, fenómeno que también podría acelerar los procesos de sedimentación en la BIP.

Los resultados confirman que la BIP tiene importantes fuentes de ingreso de sedimentos, los que podrían estar determinados principalmente por el ingreso directo o sin tratamiento adecuado de las aguas residuales de la ciudad de Puno y de las escorrentías de las microcuencas adyacentes. Binford et al. (1991), refieren que las tasas netas de acumulación de sedimentos son influenciadas por muchos factores, los más importantes son la proporción del tamaño de la cuenca con respecto al lago, geología del terreno, suelos, morfometría del lago y cuenca, vegetación, actividades humanas y productividad del lago. En efecto la BIP tiene varias de estas particularidades que la hacen sensible a elevadas tasas de sedimentación: fuertes pendientes de la cuenca, suelos muy erosionables, la morfometría con fuertes taludes hacia la fosa y diversas actividades humanas que contribuyen a la generación de sedimentos. Las macrofitas en las zonas litorales regulan ingresos de sedimentos y nutrientes (Wetzel, 1981), pero como en la actualidad en la BIP ya casi no existen estos organismos, su acción tampoco es trascendental en este aspecto.

En 1984 la ciudad de Puno generaba 196.4 L/seg y unos 1276 kg/día de carga orgánica (Pacoricona et al., 1991), para el 2005 descargaba unos 12528 m<sup>3</sup> de aguas residuales por día y se estimaba que para el 2015 se produciría un caudal máximo de 295 m<sup>3</sup>/seg de aguas residuales (EMSAPUNO, 2007); además que la ciudad de Puno está circunscrita por microcuencas que forman 14 quebradas principales, que finalmente drenan hacia la BIP siguiendo la

pendiente natural del terreno (ATA – MINCETUR, 2003). Basado en ello podemos confirmar que estas dos son las principales fuentes de ingreso de sedimentos a la BIP y son las causas para las que se debe plantear las correspondientes alternativas de manejo y solución.

## CONCLUSIONES

Se ha constatado algunos cambios en las características morfométricas de la BIP, principalmente en la batimetría y en la forma de la cubeta, desde el año 1975 hasta el 2012. Se aprecia una disminución en las profundidades máximas, la desaparición de algunas fosas profundas, así como la colmatación del lecho acuático con sedimentos cuyas fuentes pueden ser las aguas residuales y escorrentías; existe también una tendencia a nivelarse el sustrato del fondo, desapareciendo las irregularidades del perfil que eran comunes en 1975. Las escasas referencias en general son coincidentes con algunos de nuestros cálculos, con lo que nos permite concluir que aunque la superficie de la BIP se mantiene, sus volúmenes de agua muestran disminución, debido a la disminución de su profundidad por la colmatación del lecho acuático con sedimentos procedentes de la escorrentía y de las aguas residuales.

La morfobatimetría del 2012 correspondería a las condiciones más actuales de la BIP, por lo que estas deben tenerse en cuenta para considerar acciones de evaluación limnológica, estrategias de restauración y recuperación del hábitat, gestión del recurso hídrico, manejo de recursos hidrobiológicos, entre otras; pero además se debe considerar las posibles tendencias al cambio, así como las posibilidades de que en un futuro la cubeta sea progresivamente colmatada con sedimentos, si no se plantean estrategias de manejo orientadas al establecimiento de adecuados sistemas de tratamiento de aguas residuales y control de escorrentías en las partes altas de las microcuencas adyacentes a la BIP.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asesores Técnicos Asociados (ATA) - Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR) (2003). *Diagnóstico Ambiental de la Bahía Interior de Puno*. Lima Perú: Segundo Informe Final – Tercera Versión.

- Binford, Michael, Mark Brenner y Daniel Engstrom (1991). "Patrones de sedimentación temporal en la zona litoral del Huiñaimarca". En *El Lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual*, Claude Dejoux y Andre Iltis (Ed.): 47 - 58. La Paz: Hisbol- ORSTOM.
- Empresa Municipal de Saneamiento Básico (EMSA PUNO) (2007). *Evaluación Planta de Tratamiento Espinar*. Puno: Informe Técnico.
- Fernández, L. (2003). "Técnicas de teledetección y SIG para caracterización, inventario y monitoreo de recursos hídricos". En *El agua en Iberoamérica, Aportes para la integración entre los organismos de gestión y centros de investigación*, CYTED XVII Aprovechamiento y gestión de recursos hídricos: 49-54. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Foster I, K. Rowntree, J. Boardman y T. Mighall (2012). "Changing sediment yield and sediment dynamics in the Karoo uplands, South Africa; post-European impacts". *Land Degradation & Development*. Vol 23: 8 - 22.
- Francés, F. y G. Bussi (2014). "Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido". *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua* 1: 14-25
- Geraldí, A. y M. Piccolo (2008). "Estudio batimétrico de la laguna Epecuén con aplicación de SIG". *Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur*: 214 p. Buenos Aires, Argentina.
- Hakanson L. (1982). "Bottom dynamics in lakes". *Hidrobiología*. Vol 91: 9-22.
- Instituto del Mar del Perú (IMARPE) (2010). *Evaluación de la calidad ambiental del lago Titicaca*. Puno, Perú: Informe Técnico, resultados del componente sedimentología y geoquímica.
- JICA (2000). *Análisis de Sedimentos de la Bahía Interior de Puno, Lago Titicaca*. Puno, Perú: Documento Técnico.
- Lombardo, U. (2014). "Quantitative morphometric analysis of lakes using GIS: rectangularity  $R$ , ellipticity  $E$ , orientation  $O$ , and the rectangularity vs. ellipticity index, REI". *Cartography and Geographic Information Science*. Vol 41 Nro 4: 340 – 347.
- Margalef, Ramón (1983). *Limnología*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Martínez S., G. Conesa, L. García y C. Pérez (2015). "Estimación de aportes sedimentarios a embalses de pequeñas cuencas mediterráneas mediante GeoWEPP. Ensayo en la cuenca vertiente del río Mula al embalse de la Cierva (cuenca del río Segura)". *Limnetica*, Vol 34 Nro 1: 41-56.
- Montoya – Moreno, Y. (2008). "Morfométrica de un sistema fluviolacustre tropical, Antioquia, Colombia". *Caldasia* Vol 30 Nro 2: 413 – 420.
- Monzón, P. (1984). "Sedimentación lacustre". En *Sedimentación fluvial*, Volumen 1 de Ciclo seminarios de sedimentología - I.G.M.E, División de Geología del Instituto Geográfico y Minero: 194. España, Madrid: Ministerio de Industria y Energía, Centro de Publicaciones.
- Morales, Pedro, Thomas Northcote, Wilfredo Zea y M. Vásquez (1991). "Efectos de la eutrofización sobre las condiciones físicas". En *Contaminación en el lago Titicaca, Perú: capacitación, investigación y manejo*, T. Northcote, P. Morales, D. Levy y M. Greaven (Ed.): 21 – 34. Vancouver, Canadá: Northburn Printers and Stationers Ltd.
- Northcote, Thomas (1991). "Eutrofización y problemas de polución". En *El Lago Titicaca: Síntesis del conocimiento limnológico actual*, Claude Dejoux y André Iltis (Ed): 563 – 572. La Paz: Hisbol - ORSTOM.
- Ocola, Juan y José Torres (1997). *Evaluación de la Eutrofización sobre el Comportamiento de la Flora Acuática Sumergida en el Bahía Interior de Puno*. Puno, Perú: Informe Técnico, Proyecto Especial Lago Titicaca.
- Pacoricona, F., R. Kistriz y R. Berolatti (1991). "Manejo de las aguas residuales en Puno: problemas y soluciones alternativas". En *Contaminación en el lago Titicaca, Perú: capacitación, investigación y manejo*. T. Northcote, P. Morales, D. Levy y M. Greaven (Ed.): 257 – 276. Vancouver, Canada: Northburn Printers and Stationers Ltd.

- Quiroz, O.; A. Romanelli, D. Martinez y E. Bocanegra (2009). “Los sistemas de información geográfica como herramienta para los estudios limnológicos, Caso de aplicación en un lago somero en ambiente de llanura, Provincia de Buenos Aires, Argentina”. *Revista Gestión y Ambiente*, Vol 12 Nro 2: 73 -86.
- Reserva Nacional del Titicaca (RNT) (2003). *Plan Maestro de la Reserva Nacional del Titicaca*. Lima: Instituto Nacional de Recursos Naturales.
- Rico, E.; A. Chicote; M. Gonzales y C. Montes (1995). “Batimetría y análisis morfométrico del lago de Arreo (N. España)”. *Limnética*, Vol 11 Nro 1: 51-58.
- Rivera Rondón, C.A.; A. Zapata y J.Ch. Donato Rondón (2010). “Estudio morfométrico del lago Guatavita (Colombia)”. *Acta Biológica Colombiana*, Vol 15 Nro 3: 131-144.
- Rodrigo, Luis y Denis Wirrmann (1991). “Aspecto general de la sedimentación actual”. En *El Lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual*, Claude Dejoux y Andre Iltis (Ed.): 39 – 43. La Paz: Hisbol - ORSTOM.
- Telteu, Camelia E. y Liliana Zaharia (2012). “Morphometrical and dynamical features of the South Dobrogea lakes, Romania”. *Procedia Environmental Sciences*, Vol 14 Nro 1: 164–176.
- Vega J.C., C. De Hoyos, J. J. Aldasoro, J. De Miguel y H. Fraile (2005). “Nuevos datos morfométricos para el Lago de Sanabria”. *Limnética*, Vol 24 Nros 1-2: 115-122.
- Wetzel, Robert (1981). *Limnología*. Barcelona: Ediciones Omega, Segunda Edición.
- Wetzel, Robert y Gene Likens (2010). *Limnological Analyses*. United States of America: Publisher Springer Science, Third edition.
- Wirrmann, Denis (1991). “Morfología y batimetría”. En *El Lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual*, Claude Dejoux y André Iltis (Ed.): 31 – 37. La Paz, Bolivia: Hisbol - ORSTOM.