



Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca

©RobertHofstede



Oficina Regional para América del Sur



Institut de recherche
pour le développement

La designación de entidades geográficas y la presentación del material en esta publicación no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la UICN respecto a la condición jurídica de ningún país, territorio o área, o de sus autoridades, o referente a la delimitación de sus fronteras y límites.

Los puntos de vista que se expresan en esta publicación no reflejan necesariamente los de la UICN.

Publicado por: UICN, Quito, Ecuador



IRD Institut de Recherche pour Le Développement.

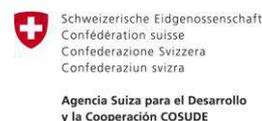


Derechos reservados: © 2014 Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales.

Se autoriza la reproducción de esta publicación con fines educativos y otros fines no comerciales sin permiso escrito previo de parte de quien detenta los derechos de autor con tal de que se mencione la fuente.

Se prohíbe reproducir esta publicación para venderla o para otros fines comerciales sin permiso escrito previo de quien detenta los derechos de autor.

Con el auspicio de:



Con la colaboración de:



UMSA – Universidad Mayor de San Andrés
La Paz, Bolivia



UMSS – Universidad Mayor de San Simón,
Cochabamba, Bolivia

Citación: M. Pouilly; X. Lazzaro; D. Point; M. Aguirre (2014). Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca. IRD - UICN, Quito, Ecuador. 320 pp.

Revisión: Philippe Vauchel (IRD), Bernard Francou (IRD), Jorge Molina (UMSA), François Marie Gibon (IRD).

Editores: UICN–Mario Aguirre; IRD–Marc Pouilly, Xavier Lazzaro & DavidPoint

Portada: Robert Hofstede

Impresión: Talleres Gráficos PÉREZ , graficaleopez@gmail.com

Depósito Legal: n° 4-1-196-14PO, La Paz, Bolivia

ISBN: n°978-99974-41-84-3

Disponible en: www.uicn.org/sur

Prólogo

Trabajando por el Lago Más...

El lago Titicaca es único en el mundo. Es el lago de los superlativos: el mayor lago de agua dulce de América del Sur, así como el más alto (3.810 m s.n.m.) de los grandes lagos del mundo; es uno de los veinte lagos más antiguos en la Tierra, pero como se lo conoce actualmente se formó hace unos 9.000 años; y es, además, el mayor lago transfronterizo del continente, compartido entre la República del Perú y el Estado Plurinacional de Bolivia. Está constituido por dos lagos de características distintas conectados a través del Estrecho de Tiquina, uno somero, el Lago Menor al Sur, y el otro muy profundo, el Lago Mayor, al Norte. Al estar ubicado geográficamente en una zona tropical, pero a gran altura, está sujeto a condiciones climáticas alpinas; en consecuencia, sus aguas nunca se congelan. La estratificación térmica de sus aguas es muy débil; la radiación solar es intensa y penetra a gran profundidad en sus aguas transparentes, durante todo el año. Otra característica peculiar de este lago es que se encuentra al interior de un sistema endorreico; el drenaje superficial de sus aguas no alcanza el mar y se pierde en depresiones y salares del sur del Altiplano. Alimentado principalmente por el río Ramis en el Perú, y las lluvias durante unos pocos meses, la mayor parte de las pérdidas de agua se da por su intensa tasa de evaporación.

Por sus dimensiones, el Lago Titicaca tiene una influencia notoria en las condiciones climáticas locales de la región norte del Altiplano, altamente favorables a las actividades agropastorales, así como a la pesca y la piscicultura, que contrastan con las condiciones áridas del sur del Altiplano, caracterizado por los salares de Coipasa y Uyuni, así como las zonas desérticas de Sur Lípez. Estas condiciones, favorables a la vida, han ayudado al florecimiento de asentamientos humanos y civilizaciones con una enorme riqueza cultural que se han extendido a todo el continente. Hoy, el “Lago Sagrado” asegura directamente la vida productiva y cultural de más de tres millones de habitantes.

A pesar de estas peculiaridades y de todos los servicios que brinda a las comunidades ribereñas y a los grandes centros urbanos como Puno en el Perú, y El Alto en Bolivia, el Lago Titicaca es el último de los grandes lagos del planeta que carece de un sistema de vigilancia constante de la calidad de sus aguas, de su balance hídrico, de la productividad de sus recursos hidrobiológicos. Igualmente, de una red de observaciones automatizadas que determinen la evolución espacio-

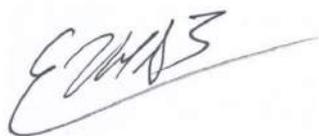
temporal de los indicadores claves para la clasificación de los niveles de deterioración de la masa de agua, así como la alerta anticipada del desarrollo de eventos indeseables de eutrofización y/o contaminación.

La última síntesis de los conocimientos ambientales y socio-económicos sobre el Lago Titicaca se encuentra en una publicación de ORSTOM (ex.- IRD), editado por Iltis & Dejoux (1991), que hasta ahora prevalece. Se trata de un compendio de trabajos multidisciplinarios colectivos realizados entre 1970 y 1990.

Con estos antecedentes y en su esfuerzo por promover la gestión integrada de los recursos hídricos, el IRD y la Oficina Regional para América del Sur de la UICN ofrecen este estudio, cuyo objetivo es proveer información técnica actualizada como un insumo para la gestión concertada y sostenible de los recursos hídricos e hidrobiológicos de este simbólico ecosistema.

Estamos convencidos de que el trabajo que hemos desarrollado se verá acompañado más adelante de muchos otros que combinarán los conocimientos científicos y ancestrales involucrados en el manejo del agua y que serán de utilidad para la toma de decisiones políticas transfronterizas concertadas, con bases técnicas sólidas. Con ello, sin duda, será posible optimizar la gestión de los recursos hídricos e hidrobiológicos del Lago Titicaca y mejorar la calidad de vida de las poblaciones circunlacustres, frente a los desafíos que representan los cambios globales de hoy.

Junio de 2014



Dr. Víctor Inchausti

Director Regional

UICN - Oficina Regional para América del Sur

Quito, Ecuador



Dr. Jacques Gardon

Representante del IRD en Bolivia

La Paz, Bolivia



Preambulo

La Oficina Regional para América del Sur de la UICN y el IRD firmaron en 2012 un convenio de cooperación para el desarrollo de estudios y proyectos que promuevan la gestión sustentable de los recursos hídricos y fortalezcan los conocimientos sobre los ecosistemas. El presente estudio de línea base es parte de este esfuerzo común, con el objetivo de constituirse como un documento de apoyo a la ALT Perú-Bolivia para la actualización de su Plan Director y/o para la formulación de una estrategia binacional de gestión integrada de recursos hídricos e hidrobiológicos.

El estudio reúne en 12 capítulos, las contribuciones de 35 especialistas del IRD, UICN, de la UMSA, UMSS, UNIBOL, RUMBOL SRL, WE_AMBIENTE & TECNOLOGIA y CEEDI en Bolivia, del IMARPE, IGP, SENAMHI en el Perú, de la Fundación Miguel Lillo (CONICET) en Argentina, y del IRD, MNHN y LOCEAN en Francia. Esta obra cubre varios aspectos de hidrobiología, hidroquímica, biodiversidad, funcionamiento ecológico, contaminación y servicios ecosistémicos del Lago y su cuenca.

Se destacan diversos resultados y recomendaciones importantes: El nivel del agua ha variado de 5 m entre un mínimo en 1944 y un máximo en 1986, en relación con las variabilidades térmicas del Atlántico y Pacífico tropicales; se requiere más investigaciones sobre las relaciones entre ciclos hidrológicos y procesos atmosféricos (Capítulo A-1). Los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Desaguadero se redujeron entre 1991 y

2008 con la reducción de los aportes al Lago; se necesita actualizar la información hidrológica y meteorológica generada después de 1990 (Capítulo A-2). Como solamente se dispone de datos hasta 1996, es urgente actualizar el monitoreo hidrológico y hidroquímico (Capítulo A-3). El uso de sensores remotos desde 1998 representa un gran aporte para la clasificación de esta información en el sistema TDPS; se propone un plan de monitoreo espacio-temporal en base a imágenes de satélites (Capítulo A-4). Con los criterios utilizados para clasificar y regionalizar los humedales del sistema TDPS, se recomienda desarrollar una red virtual de información sobre sus estados de conservación y servicios ecosistémicos (Capítulo B-1). Entre los dos géneros de peces nativos, es urgente revisar el género *Orestias* para explicar su alta variabilidad fenotípica y desarrollar un plan estratégico de conservación (Capítulo B-2). En base a la predominante literatura gris, se identifica una falta de monitoreo limnológico y se propone la implementación del observatorio ambiental binacional (Capítulo B-3). A partir de una descripción cronológica se plantea un monitoreo de las actividades pesqueras, la caracterización de los servicios ecosistémicos, y un análisis de su percepción socio-ambiental (Capítulo C-1). De acuerdo a las características físico-químicas, las aguas superficiales del río Desaguadero no son aptas para el consumo humano, mientras que las de los lagos Uru-Uru y Poopó no son aptas a ningún uso (Capítulo C-2). La variación del nivel de agua, la intensa actividad minera de la región y la longitud de las cadenas tróficas influyen la bioacumulación de metales pesados en organismos acuáticos, en particular la bioamplificación del mercurio (Capítulo C-3). Para la gestión y restauración de los ríos Desaguadero, lago Poopó y Salar de Coipasa, se propone desarrollar un Índice de Integridad Biótica (IBI) en todo el sistema TDPS, con una red de biomonitoreo utilizando los macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores (Capítulo C-4). Con la falta de información sobre la demanda de agua en el sistema TDPS, la distribución de las especies y su dependencia al hábitat, se propone un plan de estudio biológico para desarrollar una herramienta de evaluación del caudal ecológico a nivel de cuencas internas (Capítulo C-5).

CALIDAD DE LA INFORMACION

La información compilada y sintetizada en este documento proviene de diferentes fuentes y en particular de trabajos científicos (artículos en revista científica especializada, tesis, libros, informes), de consultoría (informes) o de fuentes secundarias como artículos de periódicos.

El valor y la calidad de la información, de las conclusiones y de las recomendaciones dependen de esa primera clasificación pero también del contenido de la publicación y en particular se consideró como elemento clave de revisión y de interpretación la descripción de

los datos de base y de la metodología para su obtención. La bibliografía fue clasificada de la siguiente forma:

Categoría A:

Información científica (artículos publicados en revistas indexadas, documentos o informes con base científica) que presenta una base de datos sólida y confiable así que una metodología estandarizada (datos de campo, mediciones *in situ*, calibraciones, datos espaciales) en relación con otras disciplinas.

Categoría B:

Información valida a nivel nacional y/o regional con control de calidad proveniente de proyectos desarrollados por Instituciones Gubernamentales.

Categoría C:

Información proveniente de documentos de consultorías e informes.

Categoría D:

Información que no presenta respaldo científico. Se ha procurado en lo más posible utilizar información procedente de las categorías A y B aunque en ciertos casos, se ha recurrido a los otros tipos de información.

RESPONSABILIDAD Y PROCESO DE REVISION

El contenido de los capítulos y en especial las ideas y opiniones así que la calidad de los textos son de responsabilidad de cada autor. El correo electrónico del autor principal está indicado al inicio de cada capítulo para un contacto directo. Una lista completa (dirección, teléfono, correo electrónico) de contactos de todos los co-autores se encuentra al final del informe.

Para mejorar la calidad del informe se buscó tener una revisión por expertos externos a la redacción de los capítulos. Queremos agradecer a los siguientes especialistas que apoyaron a este proceso: Philippe Vauchel (IRD), Bernard Francou (IRD), Jorge Molina (UMSA) y Francois Marie Gibon (IRD).

ÍNDICE GENERAL

PROLOGO

PREÁMBULO

Parte A- HIDROLOGIA E HIDROQUIMICA

A-1. EVOLUCION DEL NIVEL DEL LAGO TITICACA DURANTE EL SIGLO XX	1
A-2. LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL SISTEMA TDPS	15
A-3. HIDROQUÍMICA DE LA CUENCA ENDORREICA DEL ALTIPLANO (SISTEMA TDPS)	41
A-4. BALANCE Y PERSPECTIVAS DEL USO DE LA TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL SISTEMA TDPS	81

PARTE B- BIODIVERSIDAD Y FUNCIONAMIENTO ECOLÓGICO

B-1. CLASIFICACIÓN Y REGIONALIZACIÓN DE LOS HUMEDALES DEL SISTEMA TDPS	99
B-2. BIODIVERSIDAD ÍCTICA EN EL LAGO TITICACA	137
B-3. FUNCIONAMIENTO LIMNOLÓGICO Y FOTOBIOLOGIA DEL LAGO TITICACA	157

PARTE C- CONTAMINACIÓN Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

C-1. USO ACTUAL DE RECURSOS ACUÁTICOS Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL SISTEMA TDP	223
C-2. CONTAMINACIÓN EN METALES PESADOS EN EL SISTEMA TDP	255
C-3. CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CADENA TRÓFICA DE LOS LAGOS TITICACA, URU-URU Y POOPÓ	269
C-4. BIOMONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUAS EN EL SISTEMA TDPS	283
C-5. CAUDAL AMBIENTAL: PERSPECTIVAS DE EVALUACIÓN EN EL SISTEMA TDPS	291
LISTA DE CONTACTOS DE LOS AUTORES	309

Parte A

HIDROLOGÍA E HIDROQUÍMICA

A-1

EVOLUCION DEL NIVEL DEL LAGO TITICACA DURANTE EL SIGLO XX 1

Josyane Ronchail – UPMC-LOCEAN, Paris, Francia

Jhan Carlo Espinoza – IGP, Lima , Perú

David Labat – IRD-GET, Toulouse, Francia

Jacques Callède – IRD-GET, Brasilia, Brasil

Waldo Lavado – SENAMHI-PERU, Lima, Perú

A-2

LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL SISTEMA TDPS 15

Jorge Molina Carpio – UMSA-IHH, La Paz, Bolivia

Frédéric Satgé – IRD-GET, La Paz, Bolivia

Ramiro Pillco Zola – UMSA-IHH, La Paz, Bolivia

A-3

HIDROQUÍMICA DE LA CUENCA ENDORREICA DEL ALTIPLANO (SISTEMA TDPS) 41

Jorge Quintanilla Aguirre – UMSA-IIQ, La Paz, Bolivia

Israel Quino Lima – UMSA-IIQ, La Paz, Bolivia

A-4

BALANCE Y PERSPECTIVAS DEL USO DE LA TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL SISTEMA TDPS 81

Jean Michel Martinez – IRD-GET, Toulouse, Francia

María del Carmen Mendoza España – WE_AMBIENTE & TECNOLOGÍA, La Paz, Bolivia



A-1

***EVOLUCION DEL NIVEL DEL LAGO TITICACA DURANTE
EL SIGLO XX***

***EVOLUTION OF THE TITICACA LAKE LEVEL DURING THE
20TH CENTURY***

Josyane Ronchail, UPMC-LOCEAN, josyane.ronchail@locean-ipsl.upmc.fr

Jhan Carlo Espinoza, IGP

David Labat, IRD-GET

Jacques Callède, IRD-GET

Waldo Lavado, SENAMHI-PERU

RESUMEN:

El nivel del Lago Titicaca ha cambiado significativamente durante el siglo XX. Una diferencia de cinco metros se observa entre los dos extremos, 3806,7 m en 1944 y 3811,6 en 1986. No hay tendencia en el nivel del lago, los cambios se presentan a modo de oscilaciones de baja frecuencia y son caracterizados por una ruptura al inicio de los años setenta con valores más altas después. Esta particularidad es también observada en las lluvias de Bolivia y en algunos grandes ríos sur americanos de regiones tropicales y subtropicales, tal como el Amazonas y el Paraná. La variabilidad del nivel del lago está relacionada con la de los océanos Pacífico y Atlántico extra tropicales y también con el Atlántico tropical Sur. El crecimiento anual del nivel del lago que es la diferencia entre el valor máximo anual en abril y el mínimo en diciembre, presenta contrariamente una variabilidad a alta frecuencia tal como la lluvia en La Paz-San Calixto. Esta variabilidad está asociada con las condiciones térmicas de los océanos tropicales: el crecimiento del nivel del lago es mayor durante eventos La Niña y cuando el océano Atlántico tropical norte es más frío de lo normal. Estas relaciones son significativas, pero sin embargo son bastante débiles.

PALABRAS CLAVE: LLUVIA, TEMPERATURA DE SUPERFICIE DEL MAR, AMERICA DEL SUR, VARIABILIDAD

SUMMARY:

The level of Lake Titicaca changed considerably during the 20th century. A five meters difference is registered between two extremes, 3806, 7 m in 1944 and 3811, 6 in 1986. The absence of trend and low frequency oscillations characterize the changes in the lake level as well as a break point at the beginning of the seventies with increased values afterwards. This last feature is also observed in rainfall and further in the discharge values of tropical and subtropical South American large rivers as the Amazon and the Parana Rivers. The lake level is related to long-term oscillations in the extra tropical Atlantic and Pacific oceans sea surface temperatures. The annual increment of the lake computed between its highest level in April and its lowest level in December, presents on the contrary a high frequency variability related to the rainfall in San Calixto-La Paz. This variability is associated with the heat conditions of the tropical oceans: the level increment is higher during La Niña and when the tropical northern Atlantic is cooler than usual. Though significant, these relations are rather weak.

KEY-WORDS: RAINFALL, SEA SURFACE TEMPERATURE, SOUTH AMERICA, VARIABILITY

A1.1. INTRODUCCIÓN

El Altiplano, extenso llano endorreico caracterizado por una elevación entre 3650 y 3900 metros, está ubicado en los Andes centrales (14°-22° Sur y 66°-71° Oeste), entre las cordilleras orientales y occidentales que culminan a más de 6000 metros de altura. La cordillera Real al Este obstaculiza la llegada de los vientos alisios húmedos desde la cuenca amazónica. El lago Titicaca, uno de los sistemas hidrológicos del Altiplano, ubicado en la parte de sotavento, recibe 680 mm de lluvia por año (Roche *et al.* 1990), mucho menos que el lado oriental de los Andes. Además, la cuenca del lago Titicaca está caracterizada por un gradiente Norte-Sur con lluvias que disminuyen desde 800 mm por año (1300 mm en el lago mismo) hasta 300 mm en el Sur, en la región del lago Poopó (Roche *et al.* 1990, Guyot *et al.* 1990, Roche *et al.* 1992). El abastecimiento del lago se hace con la lluvia (47%) y con el agua de los ríos (53%), principalmente el río Ramis (Roche *et al.* 1992). El lago pierde agua mediante la evapotranspiración (91%) y el desagua en el río Desaguadero (9%). La temperatura media anual en la cuenca del lago comprende entre 7 y 10°C (Roche *et al.* 1992).

La estación de lluvia se produce desde diciembre hasta marzo, con un máximo de lluvia en enero, y proporciona más o menos 70% de las lluvias anuales. El invierno austral, contrariamente, es una estación seca. El ciclo anual de las lluvias en el Altiplano está relacionado con la circulación atmosférica de alto nivel. En verano, vientos del Este favorecen la subida del aire amazónico húmedo hasta el Altiplano y las lluvias resultan también del movimiento hacia sur del Jet subtropical y de la presencia de la Alta de Bolivia (Aceituno & Montecinos 1993, Garreaud 2000, Garreaud *et al.* 2003). El aire húmedo de bajo nivel del Atlántico norte llega hasta el trópico mediante el sistema del moznón sudamericano (SAMS - Zhou & Lau 1998) y está parcialmente reciclado en la cuenca amazónica

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

(Vimeux *et al.* 2006). En invierno, vientos de alto nivel del oeste y el fin del monzón explican condiciones secas.

En los Andes centrales, llueve menos durante la estación de lluvia cuando se producen eventos El Niño, es decir cuando anomalías positivas de temperatura de superficie del mar (TSM) son observadas en el Pacífico ecuatorial (Kessler 1971, Francou & Pizarro 1985, Aceituno 1988, Ronchail 1995 y 1998, Aceituno & Garreaud 1995, Lenters & Cook 1999, Vuille 1999, Vuille *et al.* 2000, Garreaud & Aceituno 2001, Francou *et al.* 2003, Lagos *et al.* 2008, Lavado *et al.* 2012, Seiler *et al.* 2013). Vuille *et al.* (2000), Ronchail & Gallaire (2006) y Lagos *et al.* (2008) muestran que las variaciones de las TSM del Pacífico ecuatorial central explican mejor la variabilidad de la lluvia que las TSM del Pacífico ecuatorial Este. Las anomalías negativas de lluvia durante El Niño coinciden con vientos de oeste reforzados en el Altiplano, lo que inhibe la llegada de aire húmedo desde la cuenca amazónica (Garreaud & Aceituno 2001). Sin embargo, Ronchail (1998) y Vuille *et al.* (2000) muestran que esta relación no es necesariamente lineal como se pensaba. En efecto, la relación entre El Niño (respectivamente La Niña) y eventos secos (respectivamente húmedos) en el Altiplano es bastante débil. Más allá, como el signo y la fuerza del viento zonal son bastante independientes del Niño Oscilación Austral (ENSO), no hay una relación sencilla entre ENSO y la lluvia en el Lago Titicaca y en el Altiplano.

El Atlántico tropical, fuente de vapor de agua para varias regiones tropicales de América del Sur, es otro origen de variabilidad interanual de la lluvia en el Altiplano. En este sentido, Melice & Roucou (1998) y Baker *et al.* (2001) muestran que el aumento anual del nivel del Lago Titicaca está correlacionado negativamente con las TSM del Atlántico tropical norte, es decir que es más fuerte cuando las TSM están más frías de lo normal. Hastenrath *et al.* (2004) revelan que las lluvias son más abundantes cuando los alisios son más fuertes de lo normal y cuando la zona de convergencia intertropical (ZCIT) se encuentra desplazada hacia sur, lo que corresponde a un gradiente norte - sur disminuido de la TSM del Atlántico, con anomalías frías/calientes en el Norte/Sur. Adicionalmente, y en adecuación con lo precedente, lluvias inferiores a lo normal son descritas en los Andes tropicales de Perú cuando las TSM del Atlántico norte tropical son más calientes de lo normal (Espinoza *et al.* 2011, Lavado *et al.* 2012).

La Oscilación Décadal del Pacífico (PDO) es descrita como una variabilidad a largo plazo parecida a El Niño. Durante su fase positiva, anomalías positivas (negativas) de la TSM se observan en el Pacífico tropical (extra tropical) (Zhang *et al.* 1997). Garreaud *et al.* (2008) muestran que anomalías negativas de lluvia se producen en América del Sur tropical durante la fase positiva de la PDO. Por otro lado, Seiler *et al.* (2013) revela que no existe relación entre PDO y lluvia en los Andes de Bolivia.

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

Una apreciación más profundizada de la variabilidad actual del nivel del lago Titicaca es muy importante ya que las orillas del lago son densamente pobladas y cultivadas (Montes de Oca 2005). Por esta razón, este trabajo tiene el objetivo de analizar la variabilidad del nivel del lago para poner en evidencia eventuales tendencias y rupturas, y de relacionar esta variabilidad con la lluvia y con la hidrológica sudamericana. Finalmente, nuestro objetivo es relacionar la variabilidad del nivel del lago con indicadores oceánicos que podrían ser predictores de la hidrológica del lago Titicaca.

A1.2. DATOS Y METODOS

En este trabajo se emplea los datos mensuales del nivel del Lago Titicaca en Puno, disponibles para el periodo 1914-2009, tomando como referencia 3800 m de altitud. Estos datos tal como los datos de lluvia de la estación de La Paz-San Calixto proceden de los Servicios Nacionales de Hidrología y Meteorología respectivamente de Perú y Bolivia. Los valores de caudales de ríos sudamericanos provienen del Global Runoff Data Center y del Observatorio sobre la hidrogeodinámica de la cuenca amazónica (ORE-HYBAM, www.ore-hybam.org).

Para explicar la variabilidad del nivel del lago diversos índices climáticos regionales son utilizados: TSM mensuales (1915–2009) en el Atlántico tropical norte (TNA, 4–24°N, 58–14 °O) y sur (TSA, 0–20 °S, 30–0°O) calculados a partir de los datos de SST v3b (Smith et al., 2008). Se calcula también la diferencia entre TNA y TSA para obtener el gradiente de TSM en el Atlántico tropical. También son considerados el Atlantic Meridional Mode (AMM) que representa la variabilidad meridional del Atlántico y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) que representa la variabilidad a largo plazo del Atlántico norte. En la región Pacífico, se utilizan dos índices que sintetizan la variabilidad del Pacífico ecuatorial central (Índice C) y oriental (índice E-ENSO), los cuales, por construcción, son independientes (Takahashi et al., 2011, <http://www.met.igp.gob.pe/datos/EC.txt>). La PDO también es considerada. AMO, AMM y PDO provienen del Climatic Prediction Centre of the National Oceanic and Atmospheric Administration (CPC-NOAA, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>). Este centro proporciona también datos globales mensuales de TSM, disponibles con una resolución de 2x2 grados de latitud-longitud (Reynolds & Smith 1994). Esos datos fueron obtenidos del centro de datos de la NOAA.

Métodos clásicos como la correlación de Pearson y análisis en composiciones fueron utilizados en este trabajo para medir las relaciones entre las series hidrológicas y los índices oceánicos. Tests de Buishand, Pettitt y de Lee y Heghinian que permiten la detección de cambios en las series temporales fueron también aplicados, así como el test de Student para comparar promedios.

A1.3. VARIABILIDAD DEL NIVEL DEL LAGO

A1.3.1. NIVEL DEL LAGO

Las variaciones del nivel del lago (LEV) durante el periodo 1915-2009 son relevantes (Figure A1-1). El rango de variación del nivel del lago es de aproximadamente 5 metros, desde 3806,7 m en 1944 hasta 3811,6 en 1986. La estación de lluvia de 1985-86 fue desastrosa y debido a un nivel muy alto del lago y a un número muy elevado de personas afectadas, el gobierno peruano decidió un plan de emergencia y llama a la ayuda internacional (Sztorch *et al.* 1989). Por el contrario, niveles muy bajos durante los años cuarenta han sido atribuidos a ocurrencias repetidas de eventos El Niño entre 1936 y 1943 (Martin *et al.* 1993).

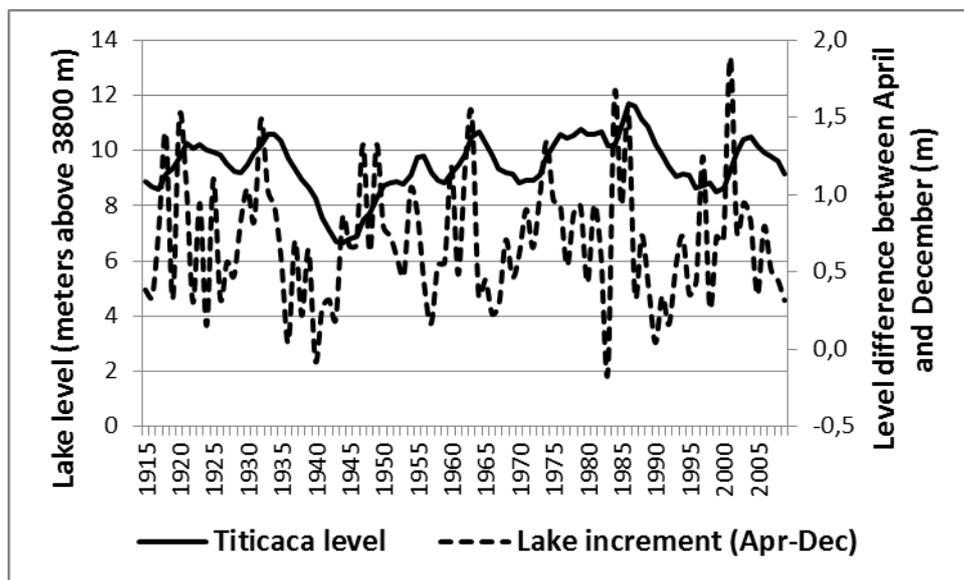


Figura A1-1: Nivel anual (LEV) del lago Titicaca (metros sobre 3800 m) y diferencia anual entre los niveles de abril y de diciembre del año anterior (DIF-LEV, metros)

No hay tendencia en la serie de los niveles del lago Titicaca pero un examen visual muestra una variabilidad caracterizada por fluctuaciones de baja frecuencia, con varios picos durante el siglo, que necesitan análisis adecuados. La fluctuación más fuerte se observó durante el periodo 1933-1944 cuando el nivel del lago bajó 5 metros muy rápidamente. Otra disminución importante fue observada en el intervalo 1986-1997, con una disminución de 4,5 m.

El nivel promedio del lago es de 3809,4 m. Una ruptura en la serie centenaria se produjo en 1973 con un incremento significativo ($p=0.01$) del promedio de 0,8 metros después de esta fecha.

A1.3.2. INCREMENTO ANUAL DEL NIVEL DEL LAGO

Carmouze & Aquize (1981) muestran que las fluctuaciones anuales del nivel del lago Titicaca

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

corresponden a las diferencias, a nivel anual, entre los flujos hidrológicos que entran en el lago y los que salen. Así, las variaciones del nivel del lago representan más precisamente las diferencias entre las entradas de agua por la lluvia y los ríos y las salidas debidas a la evapotranspiración y, al final, las fluctuaciones climáticas en la región. Por eso fueron calculadas las diferencias de nivel del lago entre Abril y Diciembre (DIF-LEV) que representan un índice de la actividad de la estación de lluvia. Estos dos meses han sido elegidos porque corresponden a los extremos del ciclo anual del nivel del lago que muestra un desfase de tres meses en comparación al ciclo anual de las lluvias (Figure A1-2). En efecto, los niveles máximos del lago son observados en Abril, mientras que las lluvias son máximas en Enero y los niveles mínimos ocurren Diciembre, cinco meses después del mínimo de lluvia de Junio-Julio.

DIF-LEV muestra una variabilidad de alta frecuencia, con valores negativos cuando hubo ausencia de acumulación como durante El Niño de 1982-83 (-0,15 m) hasta incrementos sustanciales como por ejemplo en 2001-02 (+1,89 m), siendo el valor promedio 0,69 m. Un desfase de tiempo muy claro aparece entre años de fuerte (o débil) DIF-LEV y de elevado (o bajo) LEV. Por ejemplo, los niveles muy bajos de los años cuarenta son consecuencia de valores débiles consecutivos durante diez años del incremento anual. Lo mismo puede ser observado al inicio del siglo XXI. Contrariamente, niveles elevados siguen repetidos valores fuertes de DIF-LEV. Mientras que la correlación entre el nivel del lago y el incremento anual es muy baja, las correlaciones con desfases son significativas cuando DIF-LEV antecede a LEV en 2 ó 3 años (0,39 y 0,40 respectivamente, significativo al 99%).

No hay ruptura en la serie centenaria de incremento anual de nivel del lago.

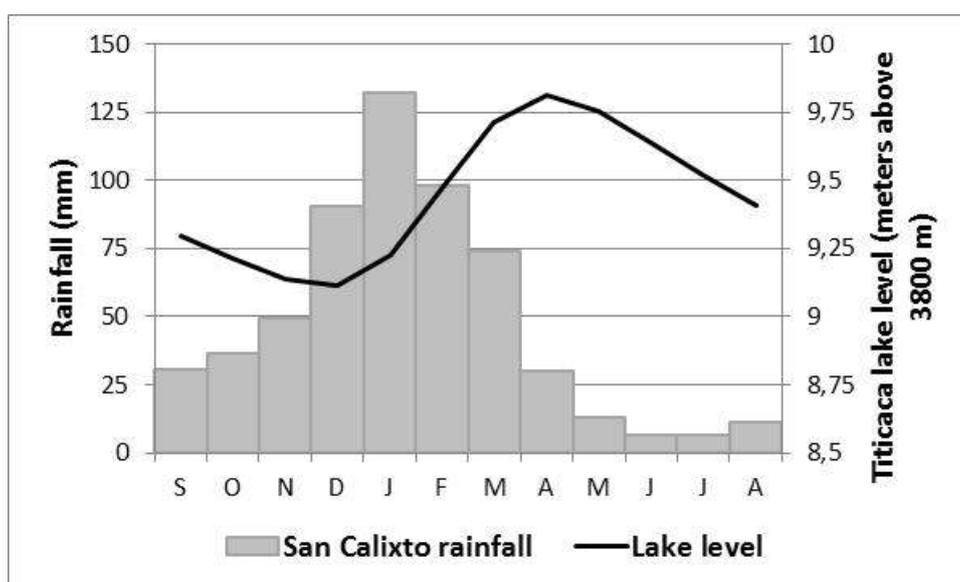


Figura A1-2: Valores mensuales del nivel del lago Titicaca (1915-2009) sobre 3800 metros y lluvia en San Calixto-La Paz (1918-2005).

A1.3.3. RELACIONES CON LA LLUVIA EN LA PAZ

La estación meteorológica de San Calixto-La Paz (16,3°S; 68,1°O) ubicada a unos cien kilómetros del lago es una de las pocas estaciones en el Altiplano con una serie larga de datos (1918-2004). La correlación entre las lluvias anuales y DIF-LEV resulta significativa ($r=0,56$, $p<0,001$). Las correlaciones entre los datos mensuales de enero, febrero y marzo, en el centro de la estación de lluvia, también son significativas. Este resultado confirma que DIF-LEV representa el clima anual. Por el contrario, el nivel del lago no está correlacionado con las lluvias anuales.

Para evitar los sesgos debido a la linealidad de la correlación de Pearson, se realizaron análisis en composiciones para comparar i) las lluvias durante años de alto nivel del lago (> 10 m) y años de bajo nivel (< 9 m), y ii) años con un importante incremento del nivel del lago (valor promedio de DIF-LEV más una desviación estándar, i.e. 1,1 m) con años de poca acumulación (valor promedio de DIF-LEV menos una desviación estándar, i.e. 1,1 m). Las diferencias son evaluadas utilizando el test de Student.

Como esperado, las lluvias son significativamente menores cuando el nivel del lago (Tabla A1-1) y DIF-LEV (Tabla A1-2) tienen valores bajos. Sin embargo, las diferencias de lluvia son mucho más importantes cuando se comparan fuertes y débiles DIF-LEV que cuando se comparan elevados y bajos niveles del lago.

Tabla A1-1: Valores promedios del nivel (m) del Lago Titicaca, de su incremento entre abril y diciembre (m), de la lluvia en San Calixto- La Paz (mm), de los caudales en ríos sudamericanos ($m^3.s^{-1}$) y de índices océano-atmosféricos, durante episodios de nivel por debajo de 9 m y por encima de 10 m. Los valores en negrita son significativos con 95% probabilidad. Ob = Óbidos; CB = Ciudad Bolívar; PP = Puerto Pilcomayo; T = Timbúes; PI = Paso de los Indios; PL = Paso de los Libres.

	Promedio durante LEV < 9m	Promedio durante LEV > 10 m	Probabilidad (Student)
Titicaca nivel	8,28	10,53	0,00
Titicaca DIF-LEV	0,62	0,76	0,17
San Calixto lluvia	543	604	0,01
Amazonas Ob	161308	168723	0,03
Orinoco CB	31448	31850	0,66
Paraguay PP	3147	4178	0,00
Paraná T	14526	16780	0,01
Neuquén PI	297	347	0,10
Uruguay PL	3977	4318	0,45
PDO	-0,08	0,31	0,06
index E	-0,18	-0,23	0,77
index C	-0,53	-0,35	0,40
AMO	0,04	-0,08	0,00
AMM	0,86	-0,27	0,05
TNA	0,09	-0,09	0,47
TSA	-0,27	0,28	0,02
TNA-TSA	0,36	-0,37	0,00

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

Para terminar, se nota que, tal como el nivel del lago, las lluvias en La Paz-San Calixto presentan una ruptura en 1972, con un aumento de las lluvias anuales de 9% después de esta fecha. Este resultado es consistente con la identificación de una ruptura en las lluvias de Bolivia al inicio de los años setenta (Ronchail 1997).

Tabla A1-2: Valores promedios del nivel (m) del lago Titicaca, de su incremento entre Abril y Diciembre del año anterior (m), de la lluvia en San Calixto- La Paz (mm), de los caudales en ríos sudamericanos ($m^3.s^{-1}$) y de índices océano-atmosféricos, durante episodios de incremento anual del nivel del lago por debajo del promedio menos una desviación estándar (0,3m) y por encima del promedio más una desviación estándar (1,1m). Los valores en negrita son significativos con 95% de probabilidad. Ob representa Óbidos; CB, Ciudad Bolívar; PP, Puerto Pilcomayo; T, Timbúes; PI, Paso de los Indios; PL, Paso de los Libres.

	DIF-LEV > promedio más una desviación estándar	DIF-LEV < promedio menos una desviación estándar	Probabilidad (Student)
Titicaca nivel	9,56	9,10	0,28
Titicaca DIF-LEV	1,41	0,13	0,00
San Calixto lluvia	655	473	0,00
Amazonas Ob	160833	166333	0,33
Orinoco CB	31633	29622	0,17
Paraguay PP	4091	3609	0,45
Paraná T	17124	16177	0,46
Neuquén PI	375	312	0,27
Uruguay PL	4654	4646	0,99
PDO	-0,21	0,56	0,03
ENSO index E	-0,35	0,24	0,13
ENSO index C	-0,67	0,07	0,01
AMO	-0,03	0,02	0,42
AMM	-0,44	-0,23	0,78
TNA	-0,49	0,11	0,10
TSA	-0,15	0,03	0,63
TNA-TSA	-0,35	0,08	0,26

A1.3.4. RELACIONES CON LOS CAUDALES DE RÍOS SUR AMERICANOS

Para comparar la variabilidad del lago Titicaca con la variabilidad hidrológica en Sudamérica, fueron realizados, como antes, análisis de correlación y composiciones entre LEV y DIF-LEV y los caudales anuales de algunos grandes ríos. El nivel del lago (LEV) está correlacionado positivamente ($p=0,01$) con los caudales del río Paraguay en Puerto Pilcomayo y del río Paraná en Timbúes. Adicionalmente, el análisis en composiciones de los niveles muestra que los caudales del río Amazonas en Óbidos son menores cuando el nivel del lago es bajo. Una característica común al lago y a los ríos es una ruptura en los años setenta, en 1971 en el río Amazonas, 1973 en el río Paraná, 1977 en el río Paraguay,

como ya lo mostraron Callède *et al.* (2004), Garcia & Mechoso (2005) y Collischon *et al.* (2001). Este resultado sugiere que la variabilidad del nivel del lago hace parte de una variación del clima de gran escala y a baja frecuencia en América del Sur. Contrariamente, el incremento anual del nivel del lago (DIF-LEV) no está asociado con los caudales de ríos Sudamericanos.

A1.4. INDICES OCEANO-ATMOSFERICOS Y NIVEL DEL LAGO TITICACA

La Figure A1-3 muestra la correlación (1915-2009) entre el nivel anual del lago y las TSM global, promediadas durante el ciclo anual septiembre-agosto. El nivel del lago está significativamente y negativamente correlacionado con la TSM de los océanos del hemisferio norte, a media y alta latitud, y positivamente correlacionado con las TSM tropicales y, en particular, con las TSM del Atlántico Sur. Esto significa que niveles altos del lago son asociados con temperaturas más altas de lo normal en el Atlántico sur y más bajas de lo normal en los océanos Atlántico y Pacífico norte. Esos resultados son confirmados cuando se comparan los valores de diferentes índices océano-atmosféricos durante episodios más bajos que 3809m del nivel del lago y más altos que 3810m (Tabla A1-1). La AMO, que representa la variabilidad del Atlántico norte, es muy diferente entre los dos casos. El Atlántico norte es más frío cuando el nivel del lago es alto. Además, la TSM del Atlántico sur es más elevada cuando el nivel del lago es alto y, en consecuencia, los índices TNA-TSA y AMM que representan el gradiente meridional de TSM en el Atlántico, es bajo. La asociación a baja frecuencia entre el dipolo meridional del Atlántico y la variabilidad a largo plazo de las lluvias en Bolivia ya ha sido descrita por Ronchail (1997). Esos resultados son también coherentes con los de Folland *et al.* (1986) y Baines & Folland (2007) que relatan cambios globales en el océano y la atmósfera al final de los años sesenta.

La Figure A1-4 muestra la correlación entre DIF-LEV e la TSM global. La variabilidad del incremento anual del nivel del lago está relacionado con las TSM tropicales, en el Pacífico y en el Atlántico norte. Fuertes DIF-LEV se producen cuando el Pacífico ecuatorial está frío (eventos La Niña y PDO negativa), tal como el Atlántico norte. Esas relaciones son relativamente débiles ($r \sim -0.30$ para Índice C), pero son confirmadas cuando se comparan los índices C, PDO y TNA durante eventos de alto y bajo incremento de nivel del lago (Tabla 2).

Esos resultados son consistentes con descubrimientos previos sobre las relaciones entre lluvias en los Andes tropicales y ENSO y las TSM del Atlántico tropical norte. Lo cual ha sido también observado en las lluvias y los caudales de la parte Oeste de la cuenca amazónica (Espinoza *et al.* 2013).

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

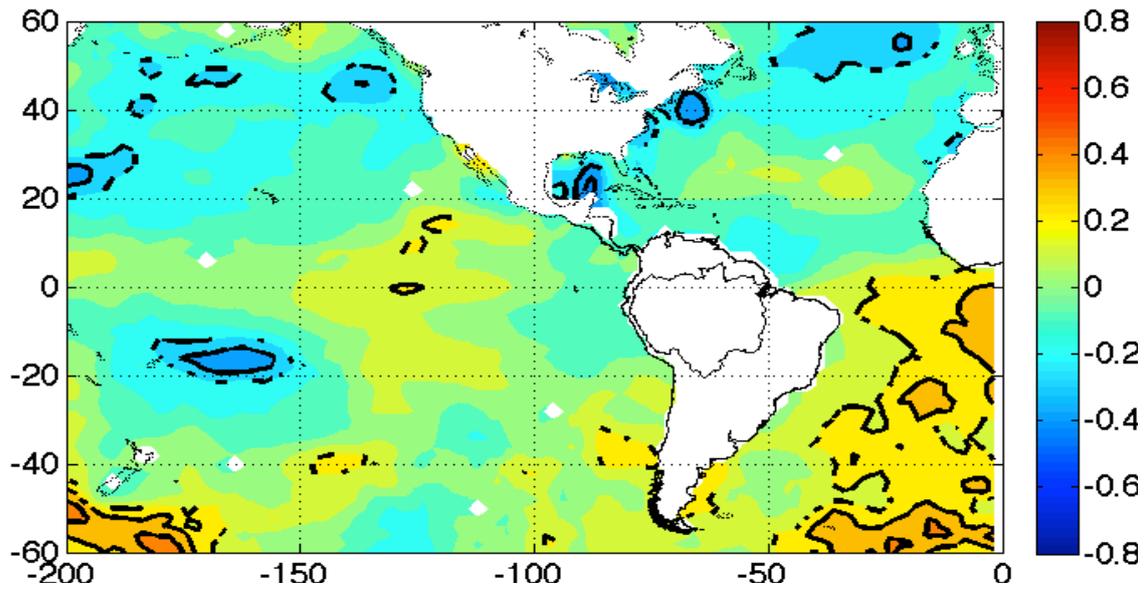


Figura A1-3: Correlaciones entre el nivel anual del lago Titicaca y la temperatura anual (septiembre-agosto) de la superficie del mar. 1915-2009. Las líneas negras muestran las zonas con correlaciones significativas con una probabilidad de 90%.

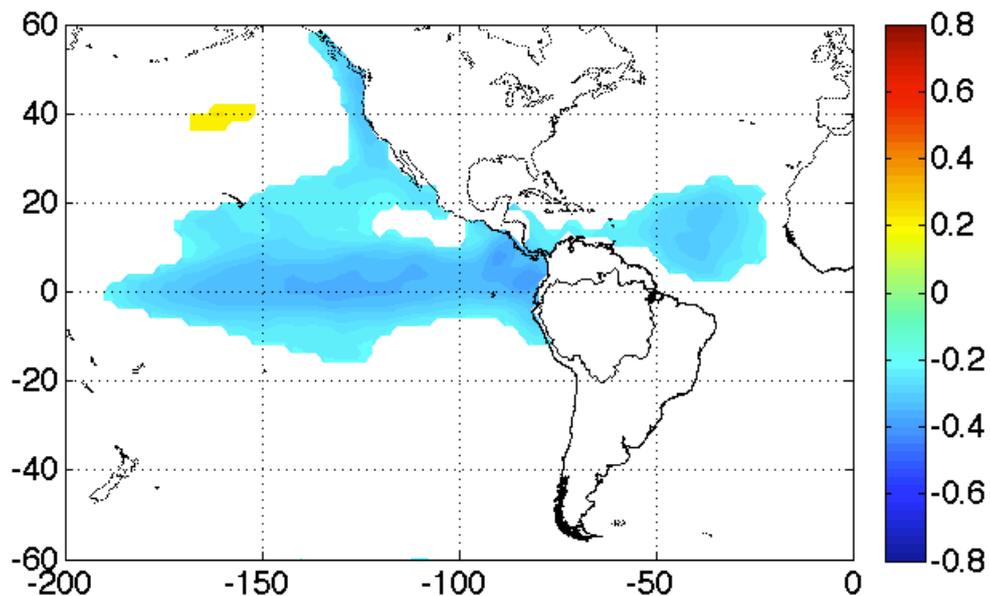


Figura A1-4: Correlaciones entre la diferencia de nivel del lago Titicaca entre abril y diciembre del año anterior y la temperatura anual (septiembre-agosto) de la superficie del mar. 1915-2009. Son solamente representados los valores de correlaciones significativas con una probabilidad de 95%.

A1.5. CONCLUSION

En este trabajo se analiza la evolución del nivel del lago Titicaca desde 1915 hasta 2009. Es un primer enfoque que necesita más investigaciones, especialmente sobre los ciclos que parecen en las series hidrológicas y sobre los procesos atmosféricos que vinculan océanos y la hidrológica continental.

Durante el siglo pasado, el nivel del lago Titicaca no presentó tendencia, sino oscilaciones de largo plazo con valores muy bajos en los años cuarenta y muy altos durante los años ochenta. Casi cinco metros diferencian esos dos periodos, lo que es muy importante cuando se considera la densidad de la población que vive cerca del lago.

La ocurrencia de una ruptura en la serie temporal del nivel del lago al inicio de los años setenta con un incremento después, es otra particularidad del Titicaca. Esto es también observado en las lluvias de Bolivia y en los caudales de varios ríos Sudamericanos. Periodos con altos niveles son caracterizados por temperaturas de superficie del mar frías en las latitudes medias y altas del Atlántico norte y condiciones opuestas en el Atlántico Sur.

El nivel del lago resulta de incrementos anuales, diferencias entre los niveles extremos del lago en abril (nivel máximo) y en diciembre (nivel mínimo). El incremento anual está relacionado con las lluvias en La Paz-San Calixto y, ambos, con la variabilidad a alta frecuencia de las TSM de los océanos tropicales. El incremento del lago es elevado durante los eventos La Niña y cuando el Atlántico tropical norte está frío. Sin embargo, estas relaciones son bastante débiles.

A1.6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aceituno 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the south American sector. Part I : surface climate. *Mon. Weather Rev.* 116: 505-524.
- Aceituno, P., Montecinos, A. 1993. Circulation anomalies associated with dry and wet periods in the South American Altiplano. *Proc. Fourth Int. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology*, Hobart, Australia. *Am. Meteor. Soc.*, pp. 330-331.
- Aceituno, P. and Garreaud, R 1995. Impacto de los fenomenos El Niño y La Niña en regimenes fluviometricos andinos. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingenieria Hidraulica*, 10: 33-43,
- Baines P. and Folland C. K. 2007. Evidence for a Rapid Global Climate Shift across the Late 1960s. *J. of Climate*, 20: 2721-2744
- Baker P.A., Seltzer G.O., Fritz S.C., Dunbar R.B., Grove, M.J., Tapia, P.M., Cross, S.L., Rowe, H.D., Broda, J.P. 2001 The history of South American tropical precipitation for the past 25000 years, *Science*, 291: 640-643.
- Callède J., Guyot J.L., Ronchail J., L'Hôte Y., Niel H., de Oliveira E. 2004. Evolution du débit de l'Amazone à Obidos de 1902 à 1999. *Hydrological Sciences*, 49: 85-97.
- Carmouze, J.P., Aquize J.E. 1981. La régulation hydrique du Lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 14(4): 311-328.
- Collischon W., C.E.M. Tucci et R.T. Clarke 2001. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climat change? *J. Hydrol.* 245 : 218-238.
- Espinoza J.C., Ronchail J., Guyot J.L., Junquas C., Vauchel P., Lavado W.S., Drapeau G., Pombosa R. 2011. Climate variability and extremes drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13406, doi:10.1029/2011GL047862.
- Espinoza J.C., Ronchail J., Frappart F., Lavado W., Santini W., Guyot J.L. 2013. The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon basin) during the 1970 – 2012 period: A focus on the 2012 flood. *Journal of Hydrometeorology*. doi: 10.1175/JHM-D-12-0100.1.
- Folland C.K., Palmer T.N. and Parker D.E. 1986. Sahel rainfall and woldwide sea temperature, 1901-1985. *Nature*, 320: 602-607.

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

- Francou B., Pizarro, L. 1985. El Niño y la sequía en los altos Andes centrales (Perú y Bolivia). *Bull. Inst. Français d'Etudes Andines*, 14: 1-18.
- Francou B, Vuille M, Wagnon P, Mendoza J, Sicart JE. 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16 °S. *Journal of Geophysical Research* 108: D5, 4154, DOI: 10.1029/2002JD002959.
- García N. O. and Mechoso C. R. 2005. Variability in the discharge of South American rivers and in climate. *Hydrol. Sci. J.*, 50(3) : 459-478. DOI: 10.1623/hysj.50.3.459.65030
- Garreaud R.D., 2000. Intraseasonal variability of moisture and rainfall over the South American Altiplano, *Monthly Weather Review*, 128: 3337-3346.
- Garreaud R.D., Aceituno, P. 2001. Interannual rainfall variability over the South American Altiplano. *Journal of Climate*, 14:2779-2789.
- Garreaud, R.D., Vuille M., Compagnucci R., Marengo J. 2008 Present-day South American climate, *Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* doi:10.1016/j.palaeo.2007.10.032
- Guyot J.L, Roche M.A., Noriega L., Calle H. , Quintanilla J. 1990. Salinities and sediment transport in the Bolivian highlands. *J. of Hydrology*, 113: 147-162.
- Hastenrath S., Polzin D., Francou B. 2004. Circulation Variability Reflected in Ice Core and Lake Records of the Southern Tropical Andes, *Climatic Change*, 64: 361-375.
- Kessler, A. 1971. ¿Será posible pronosticar las variaciones de nivel de las aguas del lago Titicaca ? *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, 90: 5-10.
- Lavado C., W.S., Ronchail, J., Labat, D., Espinoza, J.C. and Guyot, J.L. 2012. Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas watersheds. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (4): 1–18.
- Lagos P., Silva Y., Nickl E. and Mosquera K. 2008. El Niño –related precipitation variability in Peru. *Adv. Geosc.*, 14: 231-237.
- Lenters, J.D., Cook K.H. 1999. Summertime precipitation variability over South America: role of the large-scale circulation. *Mon. Weather Rev.*, 127: 409-431.
- Martin L., Fournier, M., Mourguiart P., Siffedine A. , Turq, B, Absy M.L., Flexor, J-M. 1993. Southern oscillation signal in South American paleoclimatic data of the last 7000 years. *Quaternary Research*, 39: 338-346.
- Melice J. L., Roucou P. 1998. Decadal time scale variability recorded in the Quelccaya summit ice core d18O isotopic ratio series and its relation with the sea surface temperature. *Climate dynamics*, 14: 117-132.
- Montes de Oca I. 2005. *Enciclopedia geográfica de Bolivia*. Editora Atenea S.R.L. La Paz, 871p.
- Roche M.A., Aliaga A., Campos J., Pena J., Cortes J., Rocha N. 1990. Hétérogénéité des précipitations sur la Cordillère des Andes Boliviennes (Heterogeneity of rainfall on the Bolivian Andean Cordillera). *Hydrology in Mountainous Regions – I-Hydrological Measurements; the Water Cycle*, IAHS Publishers: Wallingford UK, 193: 381–388.
- Roche M.A. , Bourges J., Cortes J., Mattos R. 1992. Climatology and hydrology of the lake Titicaca, in Dejoux, C. and A. Iltis (editors) 1992 *Lake Titicaca: A Synthesis of Limnological Knowledge*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 68: 63-88.
- Ronchail J. 1995. Variabilidad interannual de las precipitaciones en Bolivia. *Bull. Inst. Français d'Etudes Andines*, 24: 369-378.
- Ronchail J. 1997. Interdecadal variability of rainfall in Bolivia and sea surface temperatures: Preprints P1.33 for the Fifth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, April, 7-12, 1997, Pretoria, South Africa, 6. Published by the American Meteorological Society, Boston, Mass.
- Ronchail J. 1998. Variabilité pluviométrique en Bolivie lors des phases extrêmes de l'Oscillation Australe du Pacifique (1950-1993). *Bull. Inst. Français d'Etudes Andines*, 27: 687-698.
- Ronchail J and R. Gallaire 2006. ENSO and rainfall along the Zongo valley (Bolivia), from the Altiplano to the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, 26: 1223-1236.
- Sztorch, L., Gicquel, V. and Desenclos, J. C. 1989. The Relief Operation in Puno District, Peru, after the 1986 Floods of Lake Titicaca. *Disasters*, 13: 33–43. doi: 10.1111/j.1467-7717.1989.tb00693.x
- Seiler, C., R. W. A. Hutjes, P. Kabat 2013: Climate Variability and Trends in Bolivia. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52:

A-1 Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el Siglo XX

130–146. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0105.1>

- Smith, T.M., R.W. Reynolds, T.C. Peterson, and J Lawrimore 2008: Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006). *Journal of Climate*, 21: 2283-2296. DOI: 10.1175/2007JCLI2100.1
- Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova y B. Dewitte. 2011. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, *Geophysical Research Letters*. 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364
- Vimeux, F., Gallaire, R., Bony, S., Hoffman G., Chiang, J.C.H. 2006. What are the climate controls on the dD in precipitation in the Zongo valley (Bolivia)? Implications for the Illimani ice core interpretation. *Earth and Planetary Sciences letters*, 240: 205-20.
- Vuille, M. 1999. Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the Southern Oscillation, *International Journal of Climatology*, 19: 1579-1600.
- Vuille M., Bradley, R.S., Keimig F. 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research*, 105: 12447-12460.
- Vuille M, Bradley R.S., Healy R., Werner M., Hardy M.D.R. 2003. Modeling d18O in precipitation over the tropical Americas: 2. Simulation of the stable isotope signal in Andean ice cores. *Journal of geophysical research*, 108, NO. D6, 4175, doi:10.1029/2001JD002039.
- Zhang, Y., J.M. Wallace, D.S. Battisti, 1997: ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *Journal of Climate*, 10: 1004-1020
- Zhou J, Lau KM. 1998. Does a monsoon climate exist over South America? *Journal of Climate* 11: 1020–1040.



A-2

LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL SISTEMA TDPS

WATER RESOURCES IN THE TDPS SYSTEM

Jorge Molina Carpio, UMSA-IHH, jmolina_ihh@accelerate.com

Frédéric Satgé, IRD-GET

Ramiro Pillco Zola, UMSA-IHH

RESUMEN

El frágil equilibrio del sistema hídrico del Altiplano central de Sudamérica y las crecientes presiones antrópicas motivaron a los gobiernos de Perú y Bolivia a realizar estudios extensivos que culminaron en un Plan Director Binacional (1993) que definió el caudal medio anual que se podría aprovechar en todo el sistema sin poner en riesgo su sostenibilidad. Este caudal se estimó en 20 m³/s, repartidos en partes iguales entre los dos países. La Autoridad Binacional del Sistema Hídrico TDPS (ALT) fue creada por ambos gobiernos para ejecutar el Plan Director, actualizándolo continuamente en base a la información generada y proporcionada por los dos países. El presente análisis muestra una significativa reducción de los recursos hídricos superficiales en la parte media del sistema (cuenca del río Desaguadero), durante el periodo reciente 1991-08, con respecto al periodo 1965-90 usado en el Plan Director. Esta reducción del caudal del río Desaguadero se explica ante todo por la reducción de los aportes del lago Titicaca, del que el río Desaguadero es emisario. Estos resultados plantean la necesidad de actualizar el Plan Director. Sin embargo, la ALT no actualizó sus bases de datos hidroclimáticos después del año 1990. Tampoco dispone de datos de demanda y uso del agua en el sistema TDPS. Se proponen varias recomendaciones para mejorar el flujo de información y la gestión del agua en el sistema.

PALABRAS-CLAVE: RECURSOS HÍDRICOS, SISTEMA TDPS, GESTIÓN DEL AGUA

SUMMARY

The fragile equilibrium of the Altiplano water system and the growing anthropogenic pressures on it motivated the Governments of Peru and Bolivia to conduct extensive studies that culminated in a Binational Master Plan (1993), which defined the average annual flow that could be used throughout the system without jeopardizing their sustainability. This flow was estimated at 20 m³/s to be shared in equal parts by the two countries. A Binational Authority (ALT) was created by both Governments to implement the Master Plan, continuously updating it based on the information generated and supplied by the two countries. This analysis shows a significant reduction of water flow in the middle part of the system (the Desaguadero River basin) between 1991 and 2008, compared to the period 1965-90 used in the Master Plan. Flow reduction of the Desaguadero River is explained primarily by the reduction of the contributions of the Lake Titicaca, from which the Desaguadero River is the emissary. These results raise the need to update the Master Plan. However, the ALT did not update their hydrological and meteorological databases since 1990. It also lacks information on water demand and use in the TDPS system. Several recommendations are proposed with the aim of improving both the information flux and water management in the system.

KEY-WORDS: WATER RESOURCES, TDPS SYSTEM, WATER MANAGEMENT

A2.1. INTRODUCCIÓN

El Altiplano es una meseta endorreica que se extiende en los Andes Centrales de Sudamérica, entre 3.700 y 4.300 m de altitud. Está situado entre dos ramales de Los Andes, denominados Cordillera Oriental y Occidental, que lo separan de la Amazonía al Este y de la cuenca desértica del Pacífico al Oeste.

El sistema hídrico del Altiplano se caracteriza por la presencia de dos grandes lagos (Titicaca y Poopó) conectados por el río Desaguadero y dos grandes salares al sur (Figura A2-1). El río Desaguadero lleva el caudal excedente del lago Titicaca al lago Poopó, del cual es la principal fuente de agua. Esos cuerpos de agua dan origen al acrónimo TDPS (Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa) con que se conoce al sistema, cuya superficie es de 144000 km², excluyendo al Salar de Uyuni y la región altiplánica al sur de este salar. El punto más alto del sistema TDPS es el volcán Sajama (6542 m).

El sistema presenta un gradiente de precipitación Norte-Sur y Este-Oeste (ver Figura A2-2). Las zonas norte y Este, que limitan con la cuenca amazónica, son las más húmedas, con valores hasta 1100 mm/año en la parte norte. En contraste, el extremo sudoeste del sistema recibe precipitaciones del orden de 200 mm/año. Se presenta otro máximo, con precipitaciones superiores a 1300 mm/año, sobre el lago Titicaca, asociado a los efectos locales de ese cuerpo de agua. Más del 70% de la precipitación anual ocurre durante el verano austral (diciembre a marzo), transportada como vapor precipitable por los vientos alisios desde el Atlántico Tropical y la extensa llanura amazónica al Este. Ese origen y las condiciones secas y estables determinadas por el Anticiclón Sudoriental del Pacífico,

son los principales factores del gradiente pluviométrico del sistema TDPS (Vuille *et al.* 2000).

La evapotranspiración potencial (ETP) ha sido estimada (Intecsa *et al.* 1993b) en un rango de 1000 a 1850 mm/año, con los valores más altos en la parte sur del sistema.

El sistema hídrico es muy sensible a las variaciones climáticas (Pillco & Bengtsson 2007). El lago Poopó, de 3000 km² de superficie a nivel de vertido, es muy poco profundo y puede secarse a veces. Rara vez tiene flujo de salida. El lago Titicaca es más grande (8400 km² de superficie en promedio) y profundo. Durante diversos periodos durante el cuaternario, el sistema ha pasado alternativamente de estar ocupado en gran parte de su superficie por uno o dos grandes lagos, hasta situaciones en que el único cuerpo de agua era el lago Titicaca, con una superficie y profundidad muy inferiores a las actuales (Clayton & Clapperton 1995, Blodgett *et al.* 1997, Fritz *et al.* 2004). Cambios relativamente modestos de las condiciones de precipitación y evaporación son suficientes para cambiar el estado hidrológico del sistema.

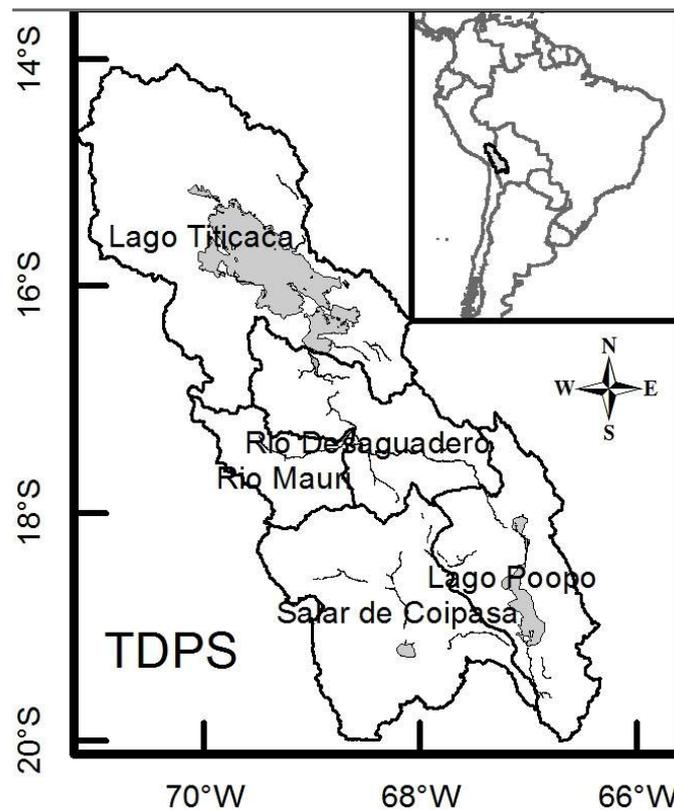


Figura A2-1: Sistema TDPS y subcuencas principales. Fuente: Intecsa *et al.* 1993c

A-2 Los recursos hídricos del sistema TDPS

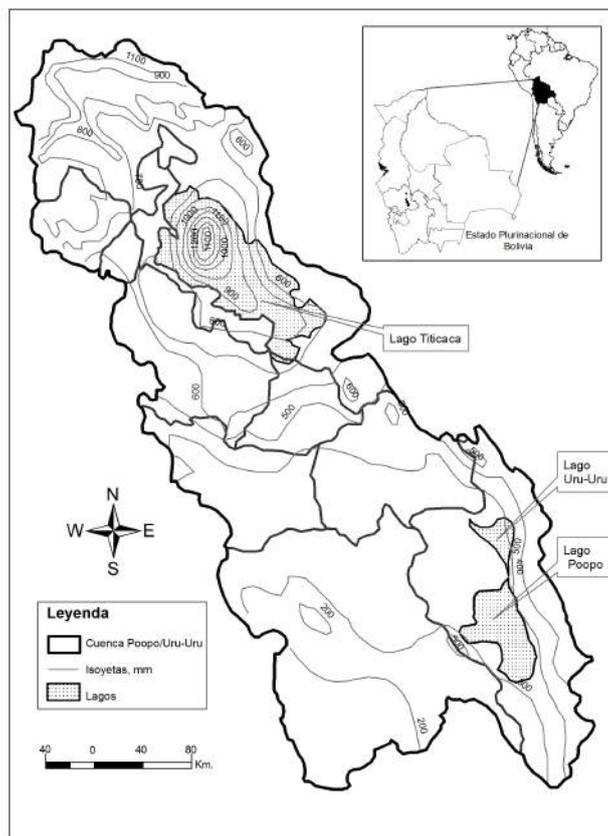


Figura A2-2: Isoyetas de precipitación media anual, 1960-90. Fuente: Intecsa et al. 1993b

Un episodio de sequía alrededor de 1100 DC fue devastador para la civilización de Tiwanaku (Binford et al 1997).

El frágil equilibrio del sistema hídrico y las crecientes presiones antrópicas motivaron a los gobiernos de Perú y Bolivia a realizar estudios extensivos que culminaron en un Plan Director Binacional (Intecsa et al. 1993a). El Plan Director definió, entre otras cosas, el caudal que se podría aprovechar en todo el sistema sin poner en riesgo su sostenibilidad. Ese caudal se estimó en 20 m³/s, repartidos en partes iguales entre los dos países. Los 10 m³/s correspondientes a Perú provendrían ante todo del aprovechamiento de las aguas de los tributarios del lago Titicaca, mientras que Bolivia aprovecharía 10 m³/s principalmente del río Desaguadero. La Autoridad Binacional del Sistema Hídrico TDPS (ALT) fue creada por ambos gobiernos para ejecutar el Plan Director, y para actualizarlo continuamente en base a la información que generaran y proporcionaran por dos países.

Este capítulo analiza los recursos hídricos del sistema TDPS y su variabilidad espacial y temporal. Debido a las diferencias en información y estudios disponibles, el análisis se realizó por subcuencas: lago Titicaca, río Desaguadero y lago Poopó.

A2.2. LA CUENCA DEL LAGO TITICACA

La cuenca del lago Titicaca ocupa la parte alta del sistema TDPS, entre 14°S y 17°S de latitud y 71°W y 68°W de longitud. Su superficie es de 56 270 km². El sector norte y oeste de la cuenca pertenece a Perú y el sector sur y este a Bolivia. La cuenca está dividida en varias sub-cuencas, cinco de las cuales contribuyen con el 66,6 % de los aportes de agua al lago. Ellas son las cuencas de los ríos Ramis (28.3%), Coata (16.4%), llave (12.6%), Huancané (6.5%) y Suches (2.8%) (Carmouze & Aquize 1981). El nivel medio del lago es de 3810 m, que corresponde a una superficie de 8400 km² y un volumen medio de 930.106 km³ (Intecsa *et al.* 1993d). El lago está compuesto de dos partes: el lago mayor (7131 km²) y el lago menor (1426 km²), conectados por el estrecho de Tiquina (Boulanger & Aquize 1981). La bahía de Puno se ubica en la parte noroeste del lago mayor. El emisario del lago Titicaca es el río Desaguadero, que desemboca en el lago Poopó.

Varias estimaciones del balance hídrico del lago Titicaca fueron desarrolladas previamente (Kessler & Monheim 1966, Richerson 1977, Carmouze *et al.* 1977, Carmouze & Aquize 1981, Lozada 1985, Roche *et al.* 1992a). El último balance hídrico fue desarrollado para el periodo de 1965-90 a escala de tiempo mensual por Intecsa *et al.* (1993d). Roche *et al.* (1992a) propuso la ecuación 1 de balance hídrico del lago Titicaca.

Ecuación A2-1: Balance hídrico de la cuenca del Lago Titicaca

$$P + Q_t + Q_n = E + Q_d + Q_i + Q_e + \Delta H$$

P = Precipitación en el lago; **Q_t**=Aporte de los tributarios; **Q_n** = Aporte freático; **E** = Evaporación del lago; **Q_d** = Pérdidas por exutorio Desaguadero; **Q_i** = Infiltración profunda; **Q_e**= Exportación (trasvase) artificial eventual fuera de la cuenca; **Δ_H** = Variación del almacenamiento.

La Tabla A2-1 sintetiza los resultados del balance hídrico del lago según diversos autores. Por falta de información y conocimiento, los parámetros **Q_n**, **Q_i** no fueron estudiados o estimados en todos los estudios. Los autores concluyeron que **P** y **Q_t** representan cada uno alrededor del 50% del aporte total al lago. Respecto a las salidas, todos destacaron que la evaporación es predominante: 90% del total. Los autores que incluyeron infiltración (Carmouze *et al.* 1977, Carmouze & Aquize 1981, Lozada 1985)) estimaron una salida por el río Desaguadero menor (aproximadamente 2%) que los otros (Kessler & Monheim 1966, Roche *et al.* 1992a) (aproximadamente 10%).

A-2 Los recursos hídricos del sistema TDPS

Tabla A2-1: Componentes del balance hídrico según estudios previos. P y E (mm/año), Q (10^9 m³/año).

Autores	Periodo	P	Qt	Qn	E	Qi	Qd	Qe
Kessler & Monheim 1966	1957-1961	910	4.70		1480		8	
Carmouze <i>et al.</i> 1977	1956-1973	895	6.75		1550	0.62	0.66	
Carmouze & Aquize, 1981	1964-1978	1064	8.25		1718	8.25	0.22	
Lozada 1985	1968-1982	977	8.86		1670	1.67	0.39	
Roche <i>et al.</i> 1992 ^a	1968-1987	880	8.51		1670		1.36	

Los aportes de los tributarios y las salidas por el río Desaguadero pudieron ser medidos y evaluados con relativa precisión. Al contrario, la lluvia que cae en el lago y la evaporación desde éste solo pudieron ser estimadas a partir de una red de estaciones meteorológicas ubicadas en su mayoría fuera del lago. Solamente 2 (Isla Taquile, Isla del Sol) de las 35 estaciones pluviométricas usadas en el Plan Director (1965-90), estaban ubicadas dentro de los límites de lago. Además solamente pudieron usarse los registros de evaporación de cinco estaciones.

Los Servicios Nacionales de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Perú y Bolivia fueron la fuente de los datos utilizados en los estudios mencionados en la Tabla A2-1. Intecsa *et al* (1993b 1993c) crearon una base de datos hasta el año 1990, de paso mensual, cuya administración es responsabilidad de la Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Sistema TDPS (ALT). La ALT no actualizó esa base de datos. Por esa razón y por las dificultades de acceso a los datos peruanos, aún no es posible llevar a cabo el balance hídrico del lago para el periodo 1990–2012. Presentamos a continuación las condiciones que se requieren para realizar un balance hídrico del lago Titicaca, tomando en cuenta las incertidumbres en la evaluación del aporte por lluvia y de las salidas por evaporación en el lago.

A2.2.1. PRECIPITACIÓN EN EL LAGO

Contribuyendo con más de 50 % del aporte, las lluvias sobre el espejo de agua del lago constituyen el principal aporte de agua del sistema. Sin embargo, la lluvia se mide localmente por medio de estaciones pluviométricas cuyos datos tienen que ser extrapolados a gran escala. De manera general, los datos de la cuenca del lago Titicaca pueden agruparse en tres periodos: 1965 hasta 1990 ; 1990 hasta 2002 ; 2002 hasta la fecha.

Las 19 estaciones ubicadas en el territorio boliviano y usadas durante el periodo 1965-90 (Intecsa *et al.* 1993d) estaban bien distribuidas alrededor del lago (Figura A2-3) y disponían de registros relativamente completos. Para el periodo 1990-2002, se dispone de registros diarios en 26

estaciones de la parte boliviana, completos en más del 70%. Después de 2002 el número de estaciones bajó a 21. El Plan Director (Intecsa *et al.* 1993d) recomendó instalar estaciones pluviométricas suplementarias. Sin embargo esas estaciones debían ser ubicadas en islas del lago (Isla Suana, Isla Campanario, Isla Pulpito, etc...) para obtener información más robusta de la lluvia que cae en el lago mismo. Actualmente la situación es similar a la que existía antes de 1990. La región cuenta con 2 estaciones suplementarias, pero 2 estaciones en lugares clave (Copacati y Taraco) no funcionan y ninguna estación ha sido instalada en otra isla.

Estimar la lluvia sobre el lago a partir de estaciones ubicadas en las riberas no lleva a resultados sólidos. En medios tropicales la precipitación presenta una gran variación temporal y espacial, por lo que la extrapolación de datos de lluvia (Thiessen, Krigging, etc...) a gran escala es una aproximación sujeta a errores. Además por la humedad atmosférica asociada al lago, la precipitación es mayor dentro del espejo de agua que en las estaciones fuera de éste que se usarían para estimar esa precipitación. Este fenómeno fue observado localmente en las estaciones ubicadas en las islas Taquile (norte) e Isla del Sol (sur) (Roche *et al.* 1992a).

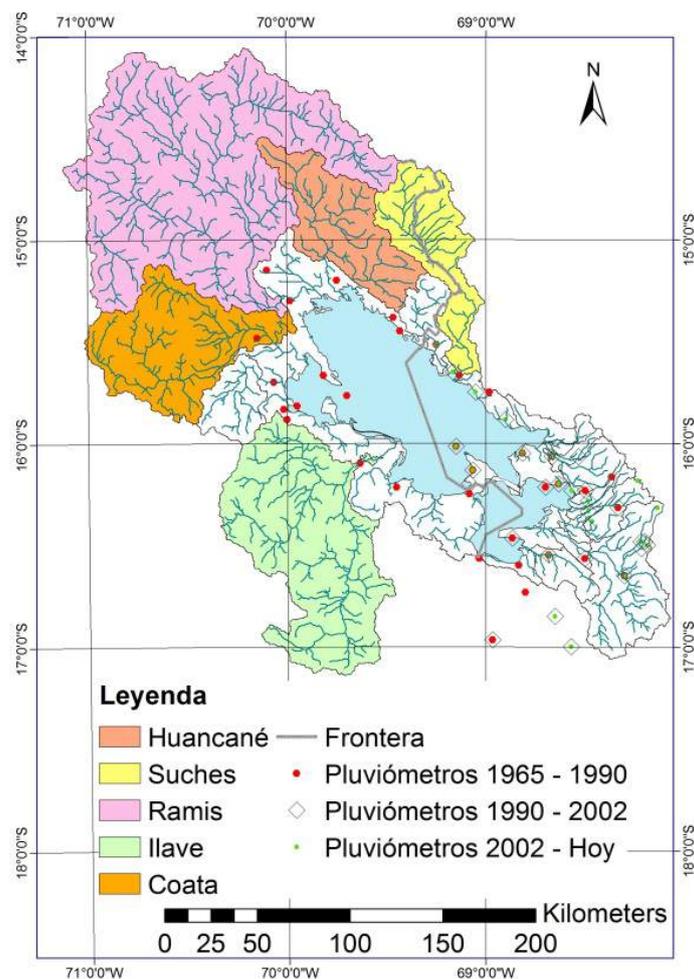


Figura A2-3: Cuenca del Lago Titicaca y localización de las estaciones pluviométricas

A-2 Los recursos hídricos del sistema TDPS

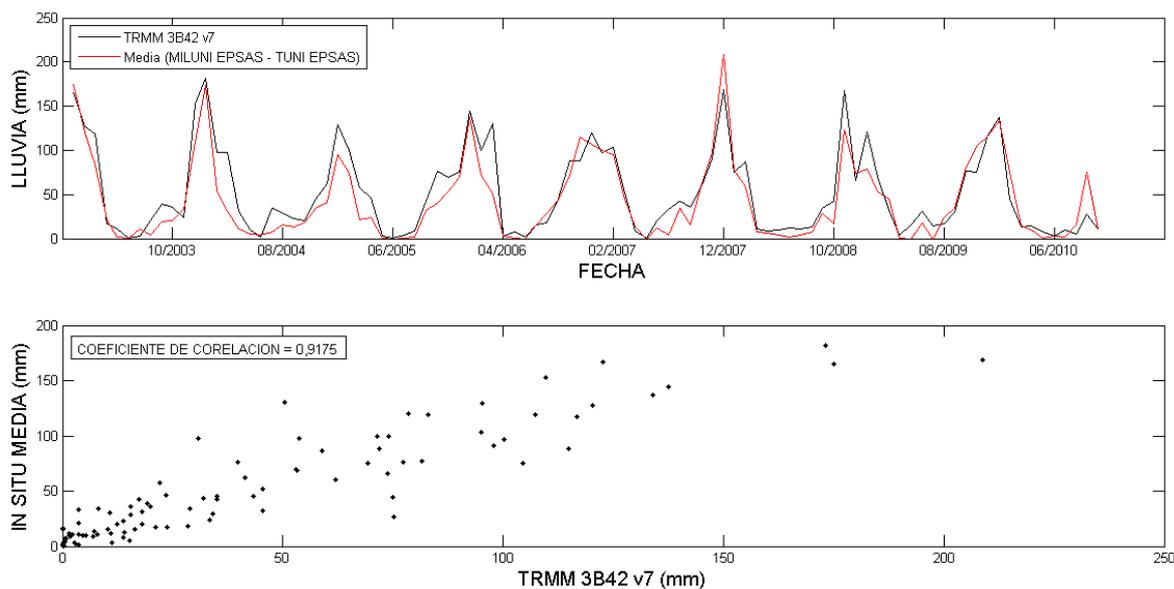


Figura A2-4: Series temporales de lluvia mensuales (arriba) y correlación (abajo) de datos TRMM y pluviómetros

Desde 1998 se dispone de datos de lluvia a escala global estimados a partir de satélite. De los diferentes productos disponibles, el Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y el del Climate Prediction Center MORPHing (CMORPH) ya fueron evaluados y usados a gran escala con buenos resultados (Gao & Liu 2013, Thiemig *et al.* 2012, Collischonn *et al.* 2008, entre otros).

Con una resolución espacial de 0.25° y temporal diaria, este tipo de datos puede ser una alternativa complementaria a la red terrestre. La Figura A2-4 muestra una comparación entre datos de la última versión TRMM (TRMM 3B42 v7) y pluviómetros, para el periodo 2003-2010. Como los registros satelitales representan una lluvia media del área del píxel, la comparación se realizó con el promedio de dos estaciones terrestres por píxel (Figura A2-4).

A2.2.2. EVAPORACIÓN DEL LAGO

Representando aproximadamente 90 % de las salidas de agua, la evaporación es el componente más importante del balance hídrico del Lago Titicaca. Varios estudios han intentado estimar la evaporación del lago. Los resultados se presentan en la Tabla A2-2. El rango de valores estimados de evaporación, de 1480 a 1990 mm/año, es atribuible a las diferencias en periodo, metodología y registros, pero también a la variabilidad temporal del comportamiento del lago.

Tabla A2-2: Estimación de la evaporación del lago Titicaca (mm/año)

Referencias	Evaporación	Periodo	Metodología
Kessler & Monheim 1966	1480	1957-1961	Balance hídrico
Richerson 1977	1334-1990	1973	Balance hídrico – Balance térmico
Carmouze <i>et al.</i> 1977	1550	1956-1973	Balance hídrico
Carmouze & Aquize 1981	1718	1964-1978	Balance hídrico
Carmouze <i>et al.</i> 1983	1720	1954-1978	Balance energético
Lozada 1985	1670	1968-1983	Tanque clase A

Algunos autores calcularon las pérdidas por infiltración profunda (Carmouze *et al.* 1977, Carmouze & Aquize 1981, Lozada 1985), aplicando el método de balance de cloro. Tomando en cuenta la falta de información sobre la hidrogeología de la región (Gumiel 1988, Guyot & Gumiel 1990, Roche *et al.* 1992a) calcularon una pérdida “total” de 1630 mm/año, que incluye evaporación, pérdidas por infiltración profunda y aporte del acuífero superficial (freático).

En el ámbito del estudio del Plan Director, la evaporación fue determinada a partir de datos de cinco tanques de clase A ubicados en las márgenes de lago. Tomando en cuenta que una disminución de la temperatura del lago corresponde a un incremento de la evaporación y, al contrario, un incremento de la temperatura del lago corresponde a una disminución de la evaporación, se llevó a cabo una campaña de medición de temperatura del agua del lago en 38 puntos (Figura A2-5) para mejorar la estimación de la evaporación. En el estudio se recomendó continuar con campañas de mediciones de temperatura del lago 4 veces al año en 12 puntos: 10 en el lago mayor, 1 en el lago menor y 1 en la bahía de Puno. Tal seguimiento permitiría una mejor evaluación de la evaporación del lago, pero no se llevó a cabo.

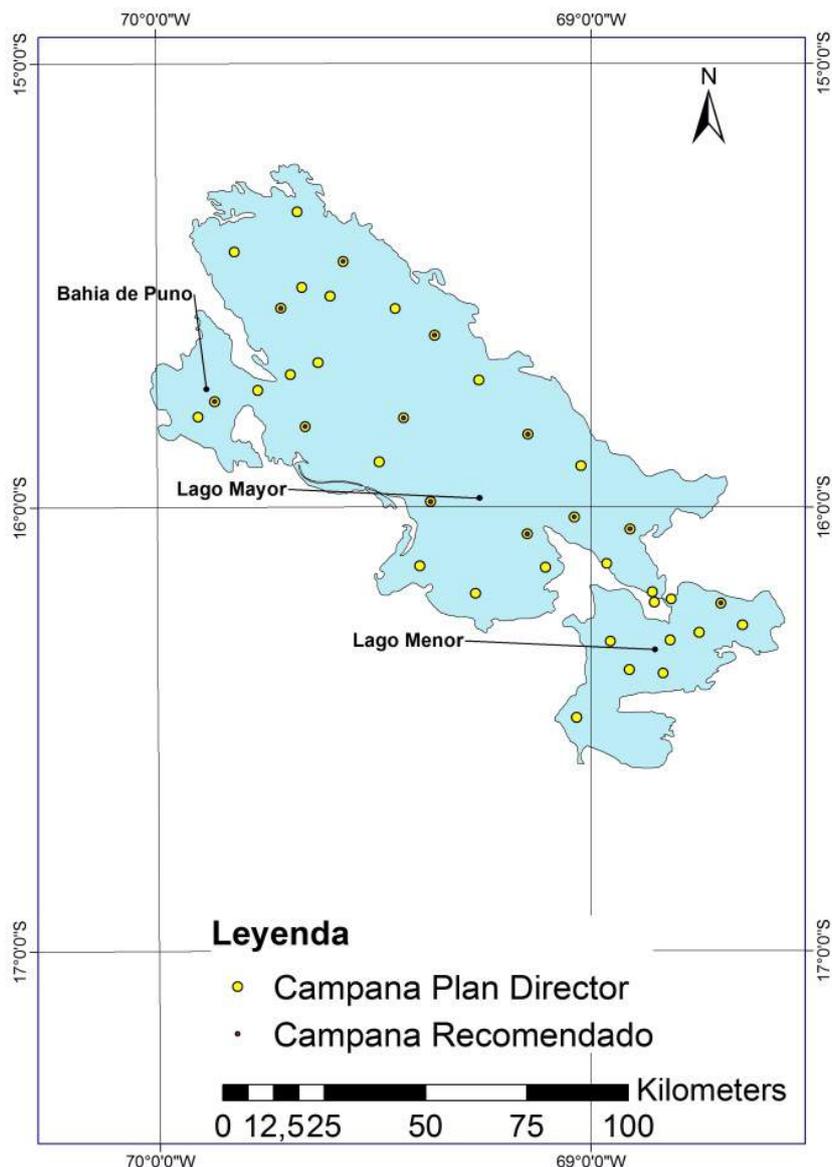


Figura A2-5: Localización de los puntos de mediciones para un seguimiento de la temperatura del agua del Lago Titicaca

Declaux *et al.* (2007) compararon resultados previos de Carmouze *et al.* (1992) entre 1964 y 1978 con evaporación obtenida a partir de cinco modelos de cálculo de evaporación, que solamente necesitan datos fáciles de obtener (radiación solar y temperatura del aire). Dos modelos (ABTEW y MAKING) destacaron por su mejor correlación y menor desviación con los datos de referencia. Tomando en cuenta la baja disponibilidad de datos en la cuenca, esos modelos podrían constituir una alternativa para la estimación de la evaporación del lago en el periodo 1990–2012.

A2.3. LA CUENCA DEL RÍO DESAGUADERO

El río Desaguadero nace en el extremo sudoccidental del lago Titicaca y desemboca en el lago Poopó. La subcuenca del río Desaguadero se sitúa entre 16°S y 18°S de latitud y 67°W y 70°W de longitud y

drena un área de 29850 km², medida entre la estación hidrométrica de Puente Internacional en la población de Desaguadero y la estación de Chuquiña (Intecsa *et al.* 1993c). De esa superficie, 9800 km² pertenecen a la subcuenca del río Maure-Mauri (río denominado Maure en Perú y Mauri en Bolivia), su principal afluente. La cuenca del río Maure-Mauri ocupa la porción sudoccidental del Altiplano Central (Figura A2-1), entre 6300 y 3795 metros sobre el nivel del mar. El río Maure-Mauri nace en la cordillera occidental al oeste, de origen volcánico.

A partir de la confluencia con el río Maure-Mauri cerca a la población de Calacoto, el río Desaguadero sufre cambios morfológicos significativos. Su pendiente aumenta con respecto al tramo aguas arriba de Calacoto, y con ello, su velocidad de flujo. Se observa también que el tamaño medio del material del cauce del río Desaguadero se incrementa, debido a los aportes de sedimentos más gruesos, provenientes sobre todo del río Blanco, afluente del río Maure-Mauri.

En las cercanías de la población de La Joya, inmediatamente aguas abajo de la estación hidrométrica de Chuquiña, el río Desaguadero se divide en dos brazos. Sobre el brazo izquierdo se encuentra el lago Uru Uru y casi todos los sistemas de riego importantes del Bajo Desaguadero. Debido a diversos problemas, como la sedimentación, el caudal que fluye por el brazo izquierdo tiende a disminuir con el tiempo. Se estima que actualmente representa en promedio entre un 30 y 40% del caudal del río en la estación hidrométrica Chuquiña. Los dos brazos principales se subdividen a su vez en múltiples canales que desembocan, en último término, en el lago Poopó.

Tabla A2-3: Estaciones hidrométricas de la cuenca del río Desaguadero

Estación Hidrométrica	Coordenadas (°)		Hidrografía		Altitud m	País	Dpto
	Latitud	Longitud	Subcuenca	Río			
Vilacota	-17.07	-70.04	Mauri	Quilvire	4480	Perú	Tacna
Kovire (Ancoaque)	-17.20	-69.94	Mauri	Ancoaque	4391	Perú	Tacna
Chuapalca	-17.30	-69.64	Mauri	Mauri	4158	Perú	Tacna
Frontera	-17.40	-69.46	Mauri	Mauri	4000	Perú	Tacna
Bocatoma Uchusuma	-17.58	-69.64	Mauri	Uchusuma	4260	Perú	Tacna
Abaroa Mauri	-17.52	-69.25	Mauri	Mauri	3950	Bolivia	La Paz
Abaroa Caquena	-17.53	-69.25	Mauri	Caquena	3950	Bolivia	La Paz
Calacoto Mauri	-17.30	-68.65	Mauri	Mauri	3792	Bolivia	La Paz
Aguallamaya	-16.82	-68.90	Desag.	Desag.	3805	Bolivia	La Paz
Calacoto Desaguadero	-17.25	-68.61	Desag	Desag.	3790	Bolivia	La Paz
Ulloma	-17.49	-68.49	Desag	Desag.	3775	Bolivia	La Paz
Chuquiña	-17.78	-67.46	Desag	Desag.	3710	Bolivia	Oruro

A-2 Los recursos hídricos del sistema TDPS

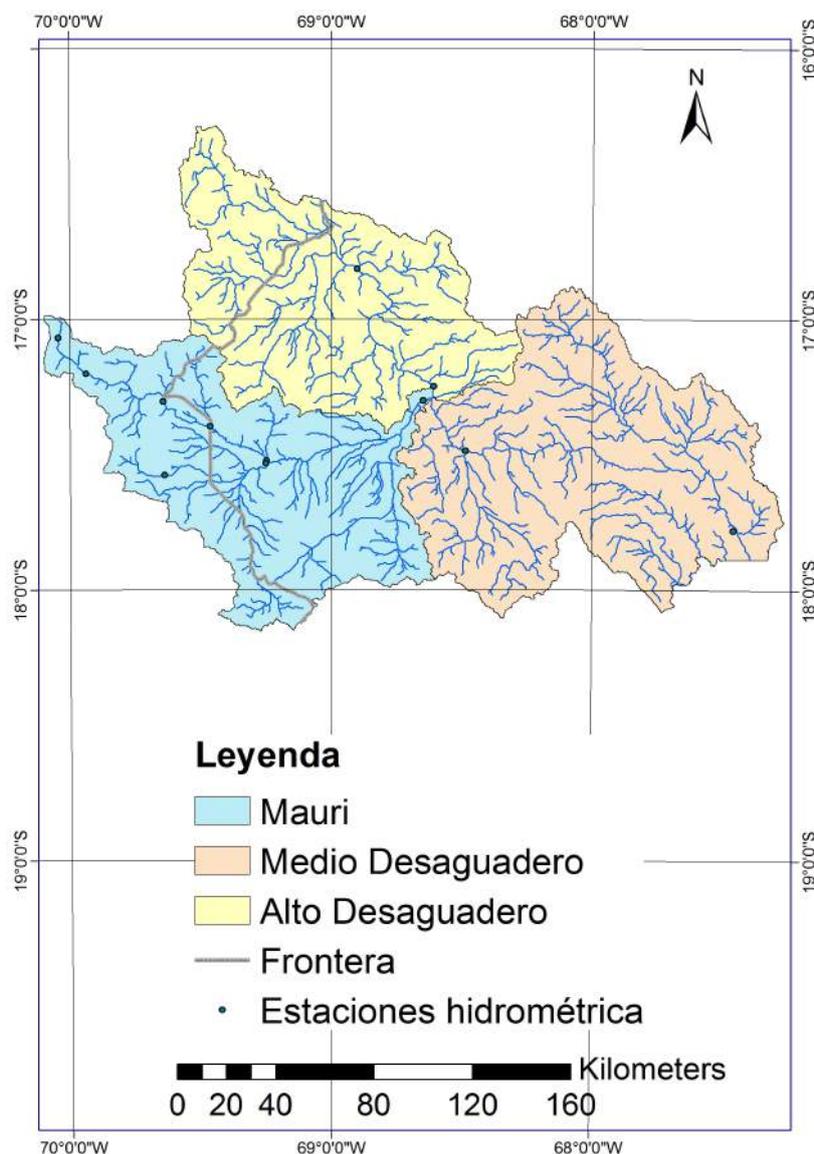


Figura A2-6: Ubicación de estaciones hidrométricas de la cuenca Maure-Mauri-Desaguadero.

La temperatura media anual está influenciada principalmente por la altitud, con rangos de variación de 2 a 8 °C entre 3800 y 4400 msnm en la subcuenca del Maure-Mauri, En la planicie altiplánica a lo largo del río Desaguadero y en los alrededores del lago Poopó, la temperatura media oscila entre 7.5 y 11 °C, con los valores más altos en las cercanías de Oruro y Chuquiña. La variación diaria de la temperatura (15-25 °C) es más grande que la variación estacional.

La Figura A2-6 muestra la ubicación y la Tabla A2-3 la lista de estaciones hidrométricas cuyos datos estuvieron disponibles para el presente análisis (Gutiérrez & Molina 2012). El primer grupo de 5 estaciones se ubica en la cuenca alta del río Maure-Mauri en Perú. Las otras 7 estaciones están situadas en Bolivia, tres de ellas en la cuenca del río Maure-Mauri. Los registros 1965-90 de 6 de las 7 estaciones bolivianas fueron analizados en el Plan Director (Intecsa *et al.* 1993c). La excepción es Aguallamaya, que en 1992 reemplazó a Puente Internacional como estación de control a la salida del

lago Titicaca, lo que se justifica por las características hidráulicas y morfológicas del tramo inicial del río Desaguadero (Rocabado *et al.* 2011).

La Figura A2-7 muestra los caudales medios mensuales en forma de hidrógramas para la estación de Calacoto Mauri y las tres estaciones situadas sobre el río Desaguadero. Si bien existe una fuerte variación intermensual, se observa también que el flujo base (de época de estiaje) es importante, especialmente el del río Maure-Mauri en Calacoto. El comportamiento de la estación de Calacoto Desaguadero, con un máximo anual en Marzo, está influenciado por el lago Titicaca, que alcanza su nivel máximo en abril para un año medio.

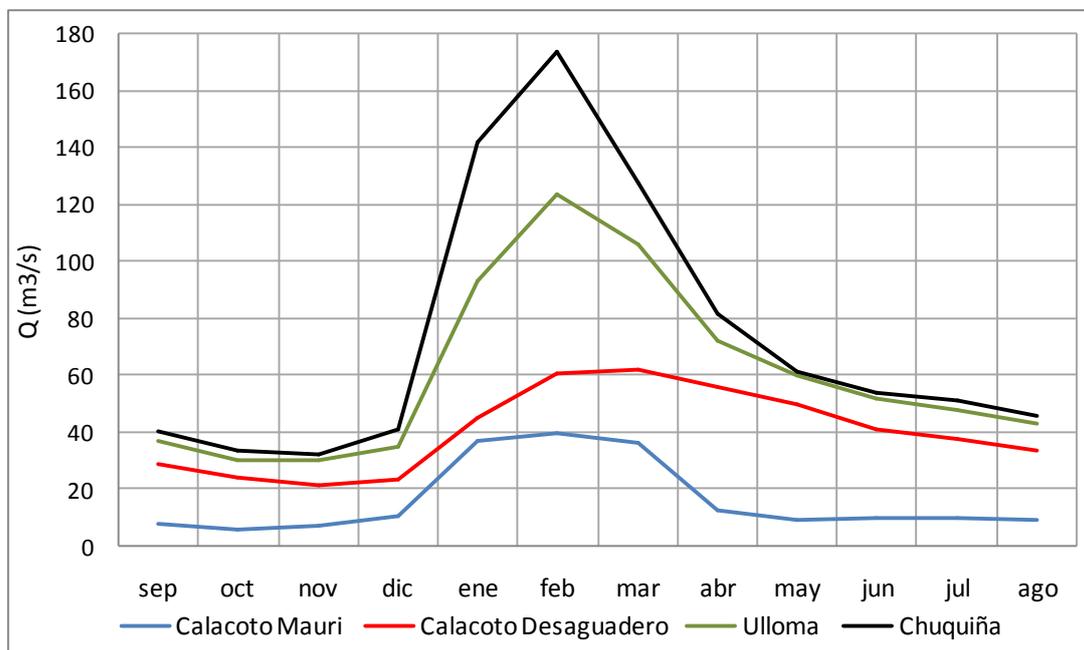


Figura A2-7: Hidrógrama medio en Calacoto Mauri y estaciones del río Desaguadero, periodo 1965-08. Fuente: Gutiérrez & Molina, 2012.

La variabilidad interanual del escurrimiento se analiza mediante el vector regional de tres estaciones hidrométricas situadas sobre el río Desaguadero (Figura A2-8) y de las estaciones situadas sobre el río Maure-Mauri, desde Vilacota hasta Calacoto (Figura A2-9). Se utilizó el año hidrológico septiembre-agosto. Un índice del vector superior a 1 indica un año húmedo en que el caudal o escurrimiento del grupo de estaciones fue superior el promedio interanual. Un valor inferior a 1 indica un año deficitario. El vector del grupo se muestra como línea roja gruesa.

En el caso del río Desaguadero se observa una gran variación interanual, con años como el 1985-86 en que el vector regional superó el valor de 4 y años en que estuvo por debajo de 0.3. Se observa también que la variación interanual del vector en la cuenca del río Maure-Mauri es considerablemente más baja que la que se presenta sobre el río Desaguadero. Además permite

A-2 Los recursos hídricos del sistema TDPS

caracterizar al periodo anterior a 1972 y la década del 90 como periodos secos en ambas subcuencas.

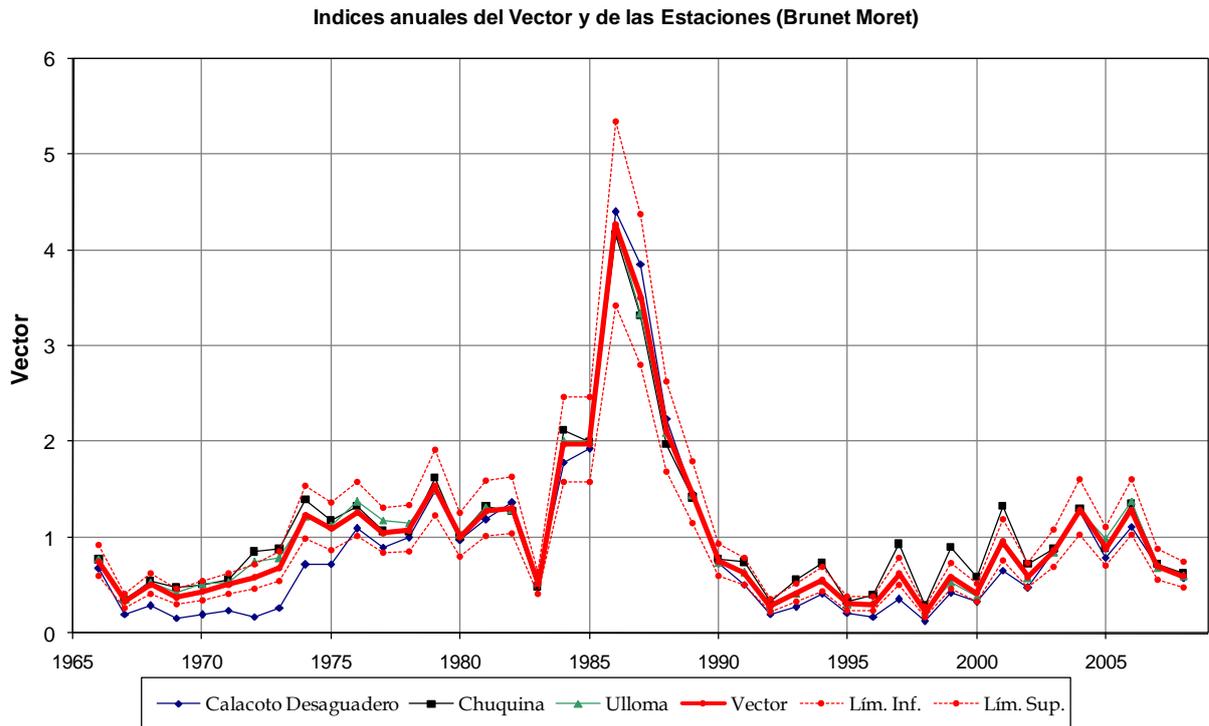


Figura A2-8: Vector regional de las estaciones del río Desaguadero, 1965-08. Fuente: Gutiérrez & Molina 2012.

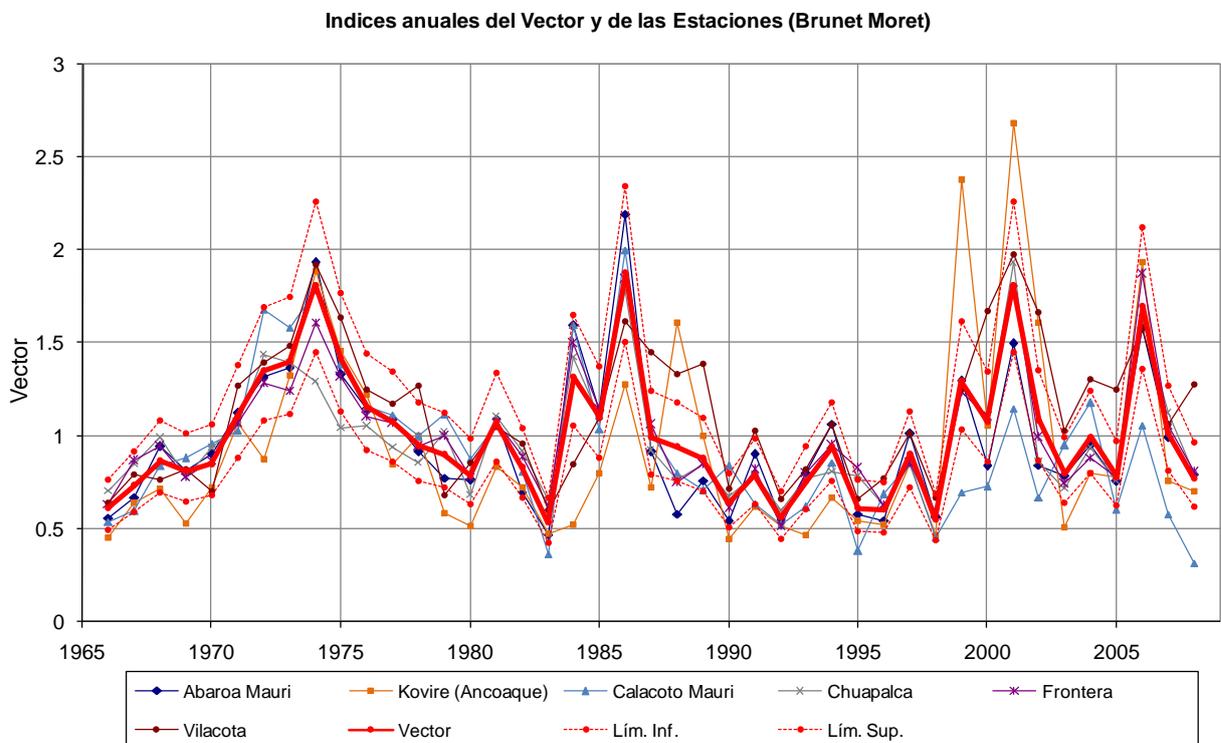


Figura A2-9: Vector regional de las estaciones del río Maure-Mauri, 1965-08. Fuente: Gutiérrez & Molina 2012.

La Tabla A2-4 muestra el caudal medio por periodos, en 11 estaciones de la cuenca. En estaciones hidrométricas de la cuenca alta del río Mauri donde se producen extracciones, como Kovire o Bocatoma Uchusuma, la tabla A2-4 muestra los caudales antes de que se produzca la extracción, es decir, caudales naturales o naturalizados. Para el conjunto del periodo 1965-08, el caudal específico medio de la subcuenca entre Calacoto Desaguadero y Chuquiña, de 21700 km² de superficie, fue de 1.3 l/s-km², equivalentes a una lámina de escurrimiento q=41 mm/año. Este valor es significativamente inferior al estimado en el Balance Hídrico de Bolivia (Roche *et al.* 1992b) para el periodo 1968-82: q=52 mm/año, precipitación media P=413 mm/año y evapotranspiración real de 361 mm/año.

Se observa una considerable reducción (42-54%) de los caudales registrados en las estaciones sobre el río Desaguadero, con respecto al periodo 1965-1990 evaluado en el Plan Director. Confirmando ese comportamiento, el lago Poopó, cuya existencia depende del aporte del río Desaguadero, se secó dos veces durante la década del 90 (Pillco y Bengtsson 2007). La reducción es menor (7-40%) en las estaciones de la cuenca media y baja del río Maure-Mauri. Las estaciones situadas en las cabeceras de cuenca del río Maure-Mauri (Vilacota, Kovire y Uchusuma) no muestran reducción de caudal.

Tabla A2-4: Caudal medio (m³/s) por periodo. Fuente: Gutiérrez & Molina, 2012

Estación hidrométrica	Caudal promedio anual por período			Relación
	Qa(65-90)	Qb(91-08)	Q(65-08)	Qb/Qa
Vilacota	0.35	0.36	0.36	1.04
Kovire	0.55	0.61	0.58	1.11
Chuapalca	3.16	2.95	3.07	0.93
Frontera	3.96	3.67	3.84	0.93
Bocatoma Uchusuma	0.83	0.87	0.84	1.05
Abaroa Mauri	5.05	4.47	4.81	0.89
Abaroa Caquena	2.86	1.73	2.39	0.60
Calacoto Mauri	18.7	12.5	16.1	0.67
Calacoto Desaguadero	51.9	23.8	40.1	0.46
Ulloma	77.0	38.3	60.8	0.50
Chuquiña	89.1	52.0	73.6	0.58

A-2 Los recursos hídricos del sistema TDPS

Se plantean tres hipótesis para explicar la significativa reducción del flujo en las estaciones situadas a lo largo del río Desaguadero para el periodo 1991-08:

1. Reducción de los aportes del lago Titicaca al río Desaguadero
2. Disminución del escurrimiento en la cuenca como consecuencia de la disminución de la precipitación media, con respecto al periodo 1965-90
3. Incremento de la extracción de agua en la cuenca alta del río Maure-Mauri y a lo largo del río Desaguadero.

Un análisis de los datos muestra que la primera hipótesis es la que explica la mayor parte de la reducción del caudal del río Desaguadero entre los periodos 1965-90 y 1991-08. En la Tabla 4 se observa que en la estación de Calacoto Desaguadero, donde el caudal registrado proviene en su mayor parte del lago Titicaca (durante el periodo 2003-08 el caudal registrado en Aguallamaya representó el 90% del caudal en Calacoto Desaguadero), la reducción de caudal fue de 28.1 m³/s (51.9-23.8), es decir un 75% de la reducción de caudal en Chuquiña (37.1 m³/s= 89.1-52.0).

El caudal medio registrado en Calacoto Desaguadero durante el periodo 1991-08, de 23.8 m³/s, es incluso inferior al valor de 27.8 m³/s estimado por simulación en Aguallamaya para el periodo 1920-92 (Maidana 2013), que sirvió como base para definir los caudales de aprovechamiento en la Cuenca. Aguallamaya es el punto de control hidrométrico que se usa actualmente como punto de salida del lago Titicaca.

La Figura A2-10 muestra el vector regional de las estaciones pluviométricas de la cuenca, para dos grupos regionales: el formado por las estaciones de la cuenca del río Maure-Mauri y el formado por las estaciones de la cuenca del río Desaguadero medio e inferior. El valor medio del vector para el periodo 1991-08 muestra que, con respecto al periodo 1965-90, la lluvia media anual se redujo en 6% en el periodo 1991-08 para el grupo Maure-Mauri y en 11% para el grupo Desaguadero. Debido al proceso precipitación-escurrimiento, la disminución relativa (%) del escurrimiento debió ser mayor. Se observa que a nivel interanual, el comportamiento del vector de la precipitación es similar al de escurrimiento (Figura A2-9) en la cuenca del río Maure-Mauri, pero presenta diferencias para las estaciones del río Desaguadero, debido a la influencia del lago Titicaca.

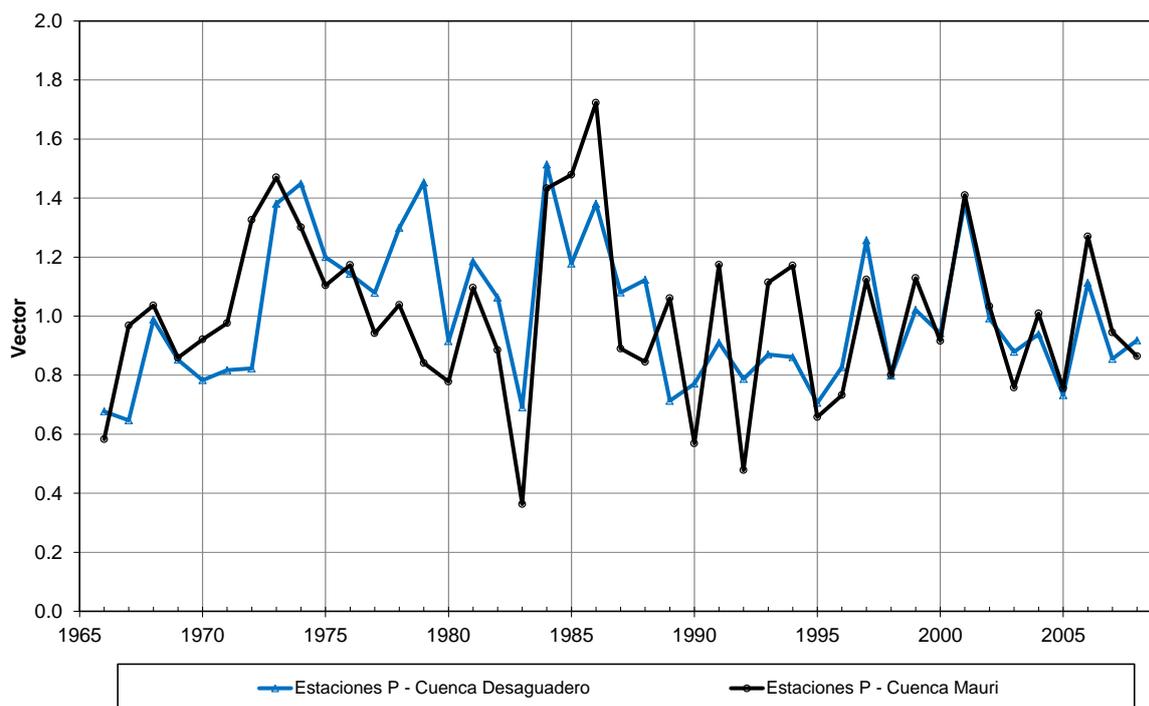


Figura A2-10: Vector regional de las estaciones pluviométricas de los ríos Maure-Mauri y Desaguadero, 1965-08. Fuente: Gutiérrez y Molina, 2012.

Vuille *et al.* (2000) observaron que a nivel interanual existe una significativa relación entre la precipitación DEF (diciembre a febrero) en el sector occidental del Altiplano y los eventos ENSO (El Niño Southern Oscillation), asociados a su vez a las anomalías de la temperatura superficial del Pacífico (SSTA). La precipitación DEF (y por tanto la precipitación anual) tiende a ser inferior (superior) al promedio durante eventos El Niño (La Niña). Esta relación es evidente (Figura A2-10), especialmente en la subcuenca del río Maure-Mauri, durante los fuertes eventos El Niño de 1982-83, 1991-92 y 1997-98. Sin embargo, si para un año particular el pico del evento ENSO no coincide con el verano austral, su influencia será limitada (Vuille & Bradley 2010). El comportamiento de la precipitación a escala decadal puede relacionarse con índices como la PDO (Pacific-Decadal Oscillation).

El caudal medio extraído y trasvasado de la cuenca del río Maure-Mauri a la cuenca del Pacífico en Perú, se incrementó de 0.93 m³/s (1965-90) a 1.46 m³/s (1991-2008) (Molina *et al.* 2012). Los usuarios de riego del río Desaguadero aguas arriba de Chuquiña incrementaron la extracción media de 2.09 m³/s durante el periodo 1965-90 a 4.72 m³/s durante el periodo 1991-2008 (Molina *et al.* 2012). En el caso de los usuarios de riego del Desaguadero, una parte no determinada (algunos estudios sugieren 20%) retorna al río principal. Esto no ocurre con los trasvases. El incremento total de la extracción (3.15 m³/s) representa 8% de la reducción de caudal en Chuquiña entre los dos

periodos.

Sin embargo, el incremento proyectado de los trasvases en Perú y de la extracción de agua para riego en Bolivia podrían aumentar la importancia relativa de esas extracciones y por tanto, el impacto sobre los usuarios del agua y los ecosistemas que dependen de ese recurso en la cuenca de los ríos Maure-Mauri y Desaguadero (Molina *et al.* 2012, Orsag *et al.* 2007).

La disminución de la oferta de agua durante el periodo reciente 1991-08 sugiere la necesidad de revisar y actualizar el Plan Director.

A2.4. LA SUBCUENCA DE LOS LAGOS POOPÓ Y URU URU

La subcuenca de los lagos Poopó y Uru-Uru ocupa la parte sudoriental del sistema TDPS. Aloja dos lagos intermitentes, el primero extenso y poco profundo, el segundo más pequeño y muy plano (Figura A2-11). Este subsistema hídrico se encuentra entre 17°S y 20°S de latitud y 66°W y 68°W de longitud, con un área total de drenaje de 24 013 km². El lago Poopó tiene una elevación media de 3686 m. El subsistema cuenta con 22 tributarios regionales que se originan en su mayoría en la cordillera Oriental, además del río Desaguadero, que es su fuente principal de agua (Pillco & Bengtsson 2007). El río Lakajawira es el efluente que conecta al lago Poopó con el salar de Coipasa. En los últimos 50 años, el río Lakajawira llevó agua una sola vez, por lo que el subsistema hídrico del lago Poopó puede ser considerado terminal (Pillco & Bengtsson 2007).

El 40 % de la superficie de la subcuenca es montañosa, otro 15 % está ocupado por cuerpos de agua (lagos Poopó y Uru-Uru) y el resto es una planicie extensa con una elevación cercana a 3700 m. El lago Poopó 3011 km² a su nivel máximo y una profundidad máxima de 2.37 m. El lago Uru-Uru tiene una superficie de 280 km², con una profundidad de 0.75 m (Pillco & Bengtsson 2006).

A2.4.1. PRECIPITACIÓN

Dos terceras partes del sistema tienen clima semiárido y la parte sur clima árido. La precipitación media del periodo 1960-2002 fue de 372 mm, con una gradiente decreciente norte-sur. La evapotranspiración potencial media fue estimada en 1500 mm/año (Roche *et al.* 1992). La variación diaria de la temperatura (15-30°C) es más grande que la variación estacional, con valores extremos de -20 °C por la noche hasta 20°C durante el día.

La Figura A2-12 muestra la serie 1960-2002 de precipitación total anual, promediada con 5 puntos de observación. Los valores mínimos, de alrededor de 200 mm, se registraron los años 1966 y 1998. Los valores máximos, alrededor de 600 mm, se registraron los años 1963 y 1985. La variabilidad interanual está asociada con eventos ENSO, en forma similar a la subcuenca Mauri-Desaguadero.

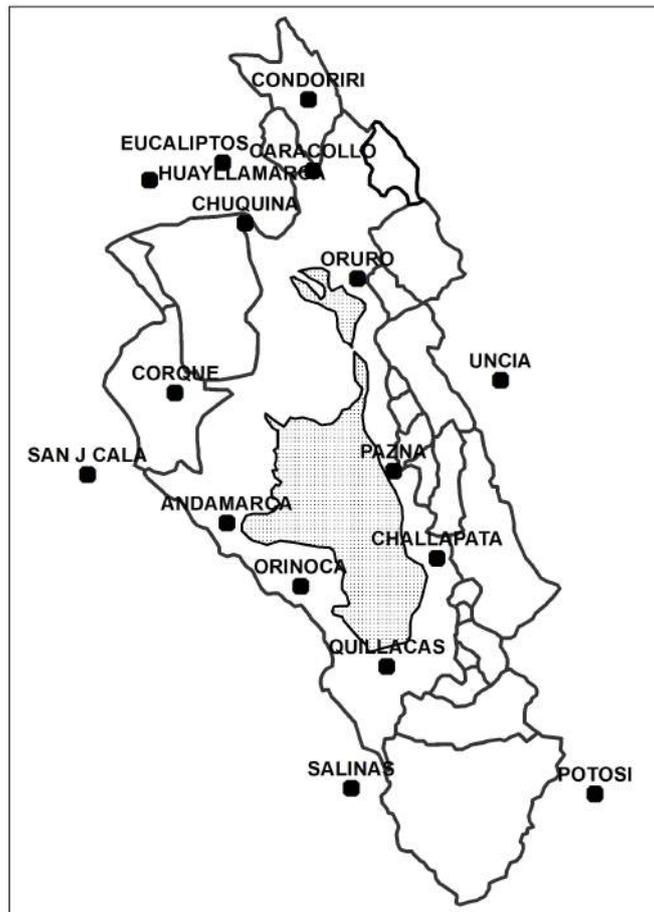


Figura A2-11: Subcuencas del sistema Poopó-Uru Uru, y red de estaciones meteorológicas

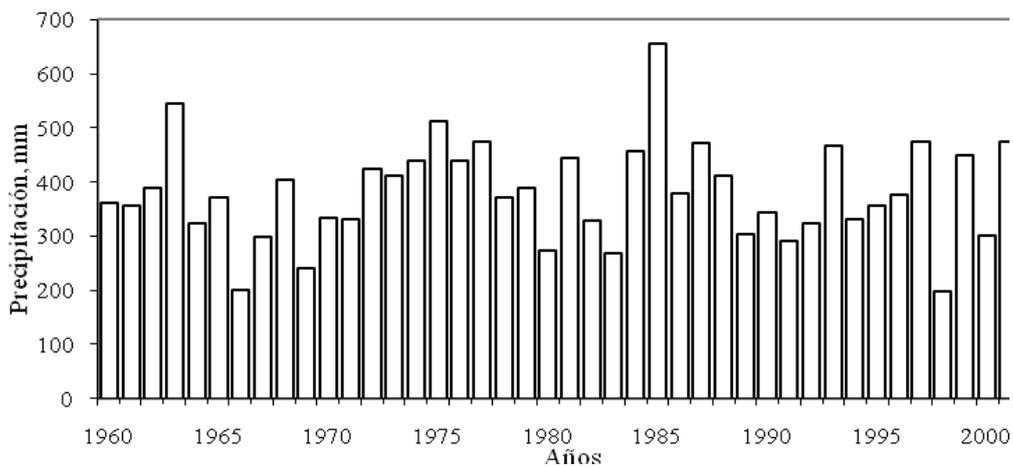


Figura A2-12: Variabilidad interanual de la precipitación 1960-2002, según promedio de 5 estaciones

A2.4.2. BALANCE HÍDRICO DEL LAGO POOPÓ

Pillco & Bengtsson (2007) desarrollaron un balance hídrico del Lago Poopó para el periodo

A-2 Los recursos hídricos del sistema TDPS

septiembre 2000 a diciembre 2001. Ante la falta de niveles de agua observados, los autores recurrieron al uso de imágenes de satélite para determinar la variación de los espejos de agua y luego los niveles. El cálculo se realizó con la siguiente relación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = (Q_{Desaguadero} + Q_{Regional}) / A_{Lago} + P - E$$

Donde: $\frac{\partial h}{\partial t}$ es el cambio de nivel de agua, $Q_{Desaguadero}$ es el caudal de ingreso aportado por el río Desaguadero, $Q_{Regional}$ es el caudal de ingreso por medio de los ríos regionales; A_{Lago} es el área de espejo de agua, P es la precipitación directa sobre el lago y E es la evaporación desde la superficie del agua.

Durante el periodo de estudio (16 meses) la precipitación acumulada fue de 580 mm, la evaporación acumulada de 2436 mm; y la profundidad media del lago fue 1.08 m. El lago Poopó llegó a una profundidad máxima es 1.84 m, lo que indica que el lago tuvo una buena recuperación durante la época lluviosa, debido especialmente a las intensas lluvias y aporte del río Desaguadero durante el mes de febrero 2001.

Los niveles del lago Poopó suben 0.5 a 2 m durante tres a cuatro meses en la época húmeda y decaen a un ritmo más lento (0.8 a 0.9 m) durante la época seca, en que se reduce el flujo del río Desaguadero. Si al final de la época húmeda el nivel de agua es apenas 1 m, existe la probabilidad de que en la siguiente estación seca el lago desaparezca (Pillco & Bengtsson 2006).

Los mismos autores (Pillco & Bengtsson 2006) llevaron a cabo otro balance hídrico sobre un periodo más extenso: 1960-2002. Durante ese periodo (52 años) el caudal promedio de ingreso por el río Desaguadero, medido en la estación de Chuquiña, fue de 66 m³/s. El caudal promedio aportado por los ríos regionales se estimó en 8 m³/s mediante un modelo precipitación-escurrimiento, con variaciones desde cero hasta 200 m³/s (Figura A2-13).

El balance hídrico del lago Poopó está estrechamente ligado al flujo del río Desaguadero, que le aporta los excedentes del lago Titicaca. Se observa que cuando la descarga del Titicaca es escasa, los niveles de agua en el lago Poopó alcanzan sus valores mínimos extremos (por ejemplo: 1994-1997). Como se observa en la Figura A2-14 existe sincronía entre los niveles de agua de ambos lagos: la fluctuación de nivel de agua en el Titicaca define en gran medida los niveles de agua en el lago Poopó, eventualmente estabilizándolo o, por el contrario, causando inundaciones.

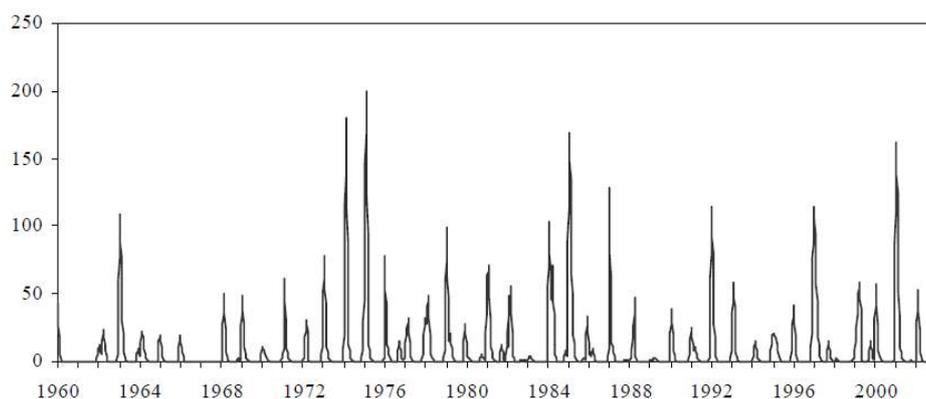


Figura A2-13: Caudal de aporte de total simulados a nivel mensual para los 22 ríos regionales. Fuente: Pillco & Bengtsson 2006.

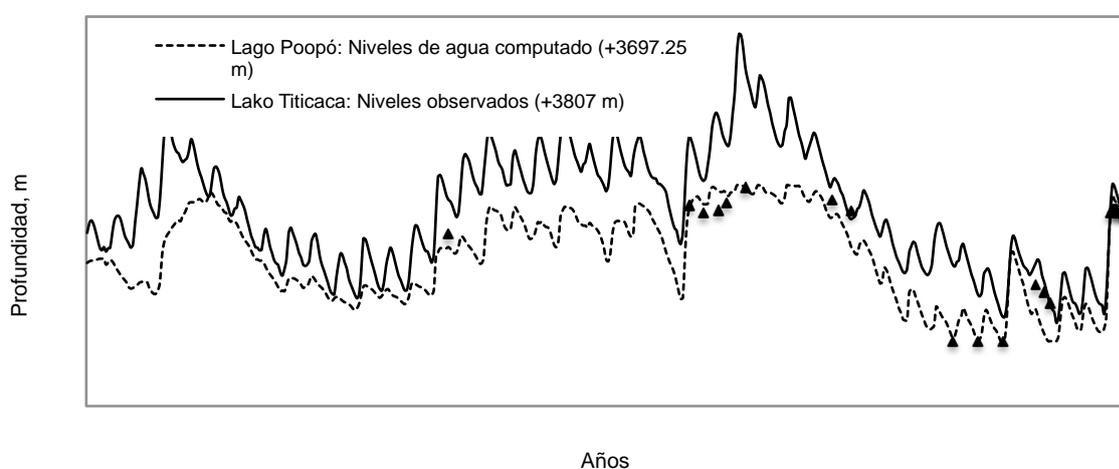


Figura A2-14: Variación de niveles de agua en los Lagos Titicaca y Poopó 1960-2002. Fuente: Pillco & Bengtsson 2006.

A2.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A2.5.1. CONCLUSIONES

- No fue posible llevar a cabo el balance hídrico del lago Titicaca para el periodo posterior a 1990 por la falta de datos de la parte peruana de la cuenca.
- Varias de las recomendaciones del Plan Director no se cumplieron o se ejecutaron parcialmente. Son importantes para el balance hídrico del lago Titicaca las recomendaciones sobre la instalación de nuevas estaciones meteorológicas en islas del lago y sobre las campañas periódicas de medición de temperatura.
- El número de estaciones meteorológicas en operación en la parte boliviana del sistema TDPS disminuyó en años recientes y en particular durante la década del 2000.

A-2 Los recursos hídricos del sistema TDPS

- Se requiere más información y estudios sobre hidrogeología y aguas subterráneas en todo el sistema hídrico TDPS.
- La ALT no actualizó las bases de datos hidroclimáticos de los estudios del Plan Director, por lo que esa institución maneja información que concluye el año 1990. Tampoco dispone de datos de demanda y uso del agua en el sistema TDPS. Estas deficiencias limitan el rol y la capacidad de la institución para cumplir sus propios objetivos y metas. El presente análisis muestra la importancia de disponer de información amplia y bien sustentada para planificar y tomar decisiones.
- Se observó una significativa reducción de los caudales registrados en los puntos de control de la cuenca Mauri-Desaguadero, durante el periodo más reciente 1991-08, con respecto a los periodos 1965-90 y 1920-90, usados en los estudios del Plan Director del sistema TDPS. La excepción a ese comportamiento fueron las estaciones de cabecera de la cuenca del río Maure-Mauri.
- La reducción del caudal del río Desaguadero durante el periodo 1991-08 se explica ante todo por la reducción de los aportes del lago Titicaca. Otras dos hipótesis (disminución del escurrimiento en la cuenca como consecuencia de la disminución de la precipitación media e incremento de la extracción de agua) explican el resto.
- No se estudiaron las causas de la disminución de los aportes del lago Titicaca al río Desaguadero y el lago Poopó durante el periodo 1991-2008 por falta de información sobre la subcuenca del lago Titicaca.
- Los proyectos de aprovechamiento y trasvase ya ejecutados por ambos países ya provocaron una significativa disminución de los caudales de varios ríos de la cuenca. Se prevé que los proyectos planificados o en construcción provoquen una reducción adicional. Esa reducción tendría potencialmente impactos negativos sobre los ecosistemas y podría poner en riesgo el equilibrio global del sistema hídrico.

A2.5.2. RECOMENDACIONES

- Es necesario **cumplir con las recomendaciones del Plan Director sobre la evaluación del Balance Hídrico del lago Titicaca** (número y ubicación de estaciones pluviométricas, mediciones de temperatura, etc.).

- Se recomienda **considerar el uso de datos de satélite** (TRMM 3B47) en conjunto con datos de estaciones terrestres para mejorar la estimación de la lluvia, así como realizar estudios sobre hidrogeología y aguas subterráneas en todo el sistema hídrico TDPS.
- Los resultados del presente análisis plantean la **necesidad urgente de actualizar y validar la información generada después de 1990**, incorporándola al sistema integral de información que debería desarrollar y manejar la ALT. Este sistema debe servir como apoyo a la toma de decisión de los actores y autoridades competentes de ambos países.
- Se recomienda **implementar el Observatorio Ambiental Binacional del lago Titicaca – TDPS**, en los términos y condiciones planteados por sus proponentes (IRD) y apoyada en una red básica de observación.
- Con la información actualizada, se recomienda **revisar y actualizar el Plan Director**, considerando el análisis de tendencias (clima) y su posible efecto sobre la disponibilidad y demanda de recursos hídricos.
- Por la posibilidad de integrar la información y contribuir a hacerla transparente a los actores y tomadores de decisión, se recomienda el **uso de un modelo de gestión del agua**. Implementar un modelo de este tipo para todo el sistema TDPS debería ser una tarea prioritaria para la ALT. El modelo permitiría evaluar en todo momento el funcionamiento del sistema y ayudaría a tomar decisiones apropiadas sobre los proyectos a ser implementados y por tanto, a cumplir sus metas y evaluar sus impactos.

I. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Boulanger, B., & Aquize Jaen, E. 1981. Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant. *Hydrobiol. trop.*14(4): 269 – 287.
- Binford, M., Kolata, A., Brenner, M., Janusek, J., Seddon, M. & Curtis, J. 1997. Climate Variation and the Rise and Fall of an Andean Civilization. *Quaternary Research* 47: 235-248.
- Blodgett, T., Lenters, J. & Isacks, B. 1997. Constraints on the Origin of Paleolake Expansions in the Central Andes. *Earth Interactions*, 1: 1-28.
- Carmouze, J., & Aquize, E. 1981. La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Hydrobiol. trop.*14(4): 311–328.
- Carmouze, J., Aquize, E., Arze, C., & Quintanilla, J. 1983. Bilan énergétique du lac Titicaca. *Hydrobiol. trop.*16(2): 135–144.
- Carmouze, J., Arce, C., & Quintanilla, J. 1977. LA REGULATION HYDRIQUE DES LACS TITICACA ET POOPO. *Cahier O.R.ST.O.M., Sér. Hydrobiol.* 11(4): 269 – 283.
- Clayton, J.D. & Clapperton, C.M. 1995. The last glacial cycle and paleolake synchrony in the southern Bolivian Altiplano: Cerro Azanaques case study. *Bulletin IFEA*, 24: 563-571, Lima.

A-2 Los recursos hídricos del sistema TDPS

- Collischonn, B., Collischonn, W., & Tucci, C. E. M. 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology* 360(1-4): 207–216. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.032
- Delcaux, F., Coucrain, A., & Condom, T. 2007. Evaporation estimation on Lake Titicaca : a synthesis review and modelling. *Hydrological Processes* 1677(January): 1664–1677. doi:10.1002/hyp
- Fritz, S.C., Baker, P.A., Lowenstein, T.K., Seltzer, G.O., Rigsby, C.A., Dwyer, G.S., Tapia, P.M., Arnolds, K.K., Ku, T.L., & Luo, S.D. 2004. Hydrologic variation during the last 170 000 years in the southern hemisphere tropics of South America. *Quaternary Research* 61: 95-104.
- Gao, Y. C., & Liu, M. F. 2013. Evaluation of high-resolution satellite precipitation products using rain gauge observations over the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(2): 837–849. doi:10.5194/hess-17-837-2013
- Gumiel, D. 1988. Prospección hidrogeológica del area altiplanica del PMPR II - La Paz, CEE-CORDEPAZ, 92 p.
- Guyot, J.-L., & Gumiel, D. 1990. Premières données du Nord de l' Altiplano bolivien. *Hydrogéologie* 3: 159–164.
- Gutiérrez, B. & Molina C., J. 2012. Estudio de Hidrología en las cuencas Mauri y Desaguadero, Informe Final. La Paz, 85 p.
- Intecsa, CNR, AIC 1993a. Plan Director Global Binacional de Protección – Prevención de inundaciones y aprovechamiento de los recursos del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y Salar de Coipasa (Sistema TDPS), Resumen Ejecutivo. La Paz, Bolivia. 100 p.
- Intecsa, CNR, AIC 1993b. Plan Director Global Binacional, Estudio de Climatología. La Paz, Bolivia.
- Intecsa, CNR, AIC 1993c. Plan Director Global Binacional, Estudios de Hidrología. La Paz, Bolivia.
- Intecsa, CNR, AIC 1993d. Plan Director Global Binacional Modelos matematicos del sistema hidrico T.D.P.S. Modelo del balance hidrico del Lago Titicaca.
- Kessler, A., & Monheim, F. 1966. El balance hidrológico del lago Titicaca, una contribución al aprovechamiento de sus aguas. *Conferencia Regional Latinoamericana / Union Geografica Internacional* 3: 412–422.
- Lozada, G. 1985. Balance hídrico de la cuenca del lago Titicaca. La Paz, 120 p.
- Maidana, E. 2013. Gestión de los Recursos Hídricos en el Sistema TDPS (Plan Director Global Binacional). II Simposio Internacional Lago Titicaca-TDPS, Puno.
- Molina, J., Gutiérrez B. & Salázar D. 2012. Uso y asignación del agua en la cuenca de los ríos Mauri y Desaguadero. La Paz, 165 p.
- Orsag, V., Chungara J., Guisbert, P. & Cruz, R. 2007. Estudio de Calidad de aguas y Evaluación Ambiental en las cuencas de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero. La Paz, mayo de 2007, 330 p.
- Pillco, R. & Bengtsson, L. 2006. Long-term and extreme water level variations of the shallow Lake Poopó, Bolivia. *Hydrological Sciences Journal* 51: 98-114.
- Pillco, R. & Bengtsson, L. 2007. The behavior of the Bolivian Altiplano lakes in varying climate. *Journal of Hydrological Sciences* (submitted).
- Pillco, Z., R. 2007. Response of Bolivian Altiplano Lakes to Seasonal and anual climate variation (Doctoral Thesis). Lund University, Sweden, ISSN 1101-9824
- Richerson, P. J. 1977. THE LIMNOLOGY OF LAKE TITICACA (PERU-BOLIVIA), A Large, High Altitude Tropical Lake. *Institute of Ecology Publication* 14 : 78p., multigr
- Rocabado, G., Abán, N. & Montesinos, J. 2011. Plan de Monitoreo de Calidad de Agua en el Sistema Hídrico Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coipasa – Bolivia. La Paz, 61 p.
- Roche, M., A., Bourges, J., Cortez, J. & Mattos, R. 1992a. Climatology and hydrology of the Lake Titicaca basin. In: Dejoux, C., Iltis, A. (Eds.), *Lake Titicaca. A Synthesis of Limnological Knowledge*, Monographiae Biologicae, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht. Vol. 68: 63-104..
- Roche, M.A., Fernández, C., Aliaga, A., Peña, J., Salas, E. & Montañón, J.L. 1992b. Balance hídrico superficial de Bolivia. Publicación PHICAB, La Paz, 28 p.
- Salazar, D. 2011. Estudio de la demanda de agua en la Cuenca del Desaguadero. La Paz, 83 p.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., Levizzani, V., & De roo, A. 2012. Validation of Satellite-Based Precipitation Products over Sparsely Gauged African River Basins. *Journal of Hydrometeorology* 13(6): 1760–1783. doi:10.1175/JHM-D-12-032.1

Vuille M., Bradley R. & Keimig F. 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research*, 105(D10): 12447-1260.

Vuille M. & Bradley R 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical sea surface temperature anomalies. No publicado.



A-3

HIDROQUÍMICA DE LA CUENCA ENDORREICA DEL ALTIPLANO (SISTEMA TDPS)

HYDROCHEMISTRY OF THE ENDORHEIC ALTIPLANO WATERSHED (TDPS SYSTEM)

Jorge Quintanilla Aguirre, UMSA-IIQ La Paz, Bolivia, hidroqui@gmail.com

Israel Quino Lima, UMSA IIQ La Paz, Bolivia, israelquino@hotmail.com

RESUMEN

Los estudios hidroquímicos y de contaminación se desarrollaron en la cuenca del Sistema TDPS con el objetivo de evaluar las características fisicoquímicas de las aguas superficiales y subterráneas, y establecer el grado de contaminación de la cuenca, a través del análisis de agua y lodos (sedimentos) con especial atención en las zonas críticas de contaminación. De la interpretación de los diferentes tipos de análisis y considerando que se refiere a un periodo de sequía (1983 a 1996), se puede concluir que hay salinización natural de la cuenca, propagándose desde Calacoto (sobre el río Desaguadero) hasta los lagos UruUru y Poopó en los que el proceso natural de transformarse en sales se acelera por atravesar años secos.

Al sur de la cuenca endorreica, se nota una contaminación natural por Arsénico, cuyos valores elevados se detectaron desde Eucaliptus (al noroeste de Oruro) hacia el lago Poopó, debido principalmente al proceso de lixiviación por la fragilidad de los niveles freáticos y la salinización del medio. Así también existe una contaminación por sílice disuelta, boro, cloruros, sulfatos, sodio y calcio. Se incrementa la contaminación antrópica tanto en el área urbana (Puno, Viacha, Copacabana, Desaguadero, El Alto, Oruro) debido a problemas de contaminación bacteriológica resultante de los desechos domésticos también con wólfram, estaño, cobalto, cadmio, níquel, antimonio y plomo el área rural.

Asimismo, en esta área existe contaminación industrial, por afluentes mineros que desembocan o desembocaron en los lagos UruUru, Poopó y el río Desaguadero, ya que la disposición final de las colas y desmontes, por el efecto de las lluvias y lixiviación contaminan el medio ambiente cuyo resultado negativo se refleja en el deterioro y extinción de la fauna piscícola.

Referente a los lodos, los lugares más contaminados son: el río Coata y el lago UruUru, que presentan elevadas concentraciones de cadmio, cobre, manganeso y zinc. Ello se refleja en el elevado grado de contaminación en la cadena trófica.

En general las aguas superficiales no son aptas para el consumo humano y presentan riesgos para el consumo animal y riego. En cambio, las aguas subterráneas muestran en la cuenca del río Desaguadero mejores características fisicoquímicas.

PALABRAS CLAVE: HIDROQUÍMICA, CONTAMINACIÓN, CUENCA HIDROGRÁFICA, RECURSO HÍDRICO, CALIDAD DEL AGUA

SUMMARY

The hydrochemistry and contamination studies were performed in the basin of the system TDP basin with the aim of evaluating the physicochemical characteristics of the superficial water and groundwater levels, and establishing the degree of contamination of the basin, through the analysis of water and sludge (sediments) with special attention where critical contamination areas were found.

Based on the analysis performed during drought period, it can be concluded that a natural salinization is occurring in the basin, spreading from Calacoto (in the Desaguadero river) to the lakes UruUru and Poopó. The natural process of becoming salar is accelerating during dry years. The south of the basin shows natural arsenic contamination, which high values were detected from the Eucaliptus town (northwest from Oruro) toward the Poopó lake, due mainly to of the lixiviation process caused by the desalinization process of the superficial groundwater levels, as well as by dissolved silica, boron, chlorides, sulphates, sodium, and calcium.

Human contamination in urban areas (Puno, Cohana, Viacha, Copacabana, Desaguadero, El Alto, Oruro) bring problems from bacteriological contamination resultant of the domestic waste, to wolfram, tin, cobalt, cadmium, nickel, antimony and lead in the rural areas.

Also at the south of the basin, industrial contamination exists, coming from mining where rivers which end on UruUru and Poopó Lakes or on the Desaguadero River, since there have been none appropriate for the wastes final disposition. Those mining wastes contaminate the environment whit negative effects reflected on the deterioration and extinction of the fish fauna.

With respect to the sludges, the polluted places are: Coata River and the UruUru lake, those that present high concentrations of: cadmium, copper, manganese, mercury and lead. The Poopó lake presents high concentrations of: cadmium, copper, manganese and zinc, which indicates the high degree of contamination on the trophic chain.

In general the superficial waters are not good for human consumption and they present risks for animal consumption and irrigation. On the other hand, the underground waters at the Desaguadero River shows best conditions in his physicochemical characteristics.

KEYWORDS: HYDROCHEMISTRY, CONTAMINATION, BASIN, WATER RESOURCE, WATER QUALITY

PRIMERA PARTE: Subcuenca del Lago Titicaca

A3.1 INTRODUCCIÓN

El Lago Titicaca tiene un espejo de agua de 8 400 km² y una cuenca de 56 000 km². La pluviometría media anual varía de 800 mm año⁻¹ en el Lago Titicaca, a menos de 300 mm año⁻¹ en el Salar de Coipasa (Mariaca 1985). Los niveles del Lago, registrados desde 1912, muestran una fluctuación máxima de 6,3 metros. El río Desaguadero constituye el único efluente (salida) del Lago y recorre cerca de 400 km, hasta su desembocadura en el Lago Poopó. En su transcurso se presentan una serie de fenómenos erosivos que, combinados con su pendiente media de 45 cm km⁻¹, dan a su cuenca una fluviomorfología compleja, esto limita su capacidad de cauce a 200 m³ s⁻¹, siendo por esto necesario realizar continuas mejoras en su cauce.

En ausencia de estudios más recientes en la subcuenca del Lago Titicaca (lo que ilustra el notable vacío de información actualizada), esta primera parte sintetiza los resultados de un estudio que tuvo como meta final la elaboración del Plan Director Global Binacional de Protección – Prevención de inundaciones y aprovechamiento de los recursos del Sistema TDP (Quintanilla *et al.* 1993). La evaluación corresponde a un periodo de déficit pluviométrico entre 1983 y 1996.

Los resultados fisicoquímicos de parámetros representativos corresponden al período de 1989 a 1996, considerado como un período de régimen de déficit pluviométrico, con una frecuencia bimensual; cuyos resultados se encuentran sintetizados en la explicación de los resultados fisicoquímicos y su respectivo diagnóstico hidroquímico.

Es importante resaltar que a partir del año 2000, disminuyeron de forma importante los trabajos de investigación hidroquímicos en la subcuenca del Lago Titicaca y río Desaguadero (su principal efluente), debido a varios factores internos y externos a Bolivia, tales como: priorización de la investigación en áreas deprimidas social y ambientalmente en las políticas del Gobierno de Bolivia, adecuación del Sistema de las Universidades Estatales, de sus políticas y planes de investigación, cambios de políticas de apoyo de la Cooperación Internacional.

Estas causas llevaron a profundizar y aumentar los trabajos de investigación en la Sub cuenca de los Lagos Poopó y Uru Uru situados al Sur de la cuenca Endorreica del Altiplano de Bolivia. También por ser un área deprimida, árida con constante déficit pluviométrico, importantes impactos negativos por la intensa actividad minera que ocasiona el deterioro y la contaminación de los recursos naturales de la zona y en especial del recurso hídrico (tanto superficial como subterráneo).

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

A3.1.1 RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS DE PARÁMETROS REPRESENTATIVOS

Los análisis químicos de las muestras de agua colectadas con frecuencia bimensual se efectuaron mediante espectrometría UV-Visible, colorimetría, electrometría, espectrometría de absorción atómica y con generador de hidruros, además de un espectrofotómetro HACH- DREL 2000 para los análisis de campo.

A3.1.2 AGUAS SUPERFICIALES

El análisis que se detalla corresponde a 648 muestras y más de 21 000 análisis en 36 puntos de muestreo de agua superficial en la cuenca que incluye el Lago Titicaca, el río Desaguadero y los lagos Uru Uru y Poopó (Sistema TDP) (Fig. A3-1 y Tab. A3-1).

Tabla A3-1.- Puntos de muestreo de las aguas superficiales (Quintanilla 1996). Los números corresponden a los indicados en la Fig. A3-1.

Punto de muestreo	Zona de ubicación	Nombre del río y/o lago
1	Puente Internacional	Desaguadero
2	Vado	Lucuchata
3	Aguallamaya C	Desaguadero
4	Hutokhollo	Jachajahuira
5	Nazacara	Desaguadero
6	Copa Pujo Pampa	Khillhuiri
7	Calacoto - Desaguadero	Desaguadero
8	Calacoto - Mauri	Mauri
9	Vhitipampa	Cañuma
10	Ulloma	Desaguadero
11	Ulloma	Caranguilla
12	Callampa (Puente Japonés)	Desaguadero
13	Eucaliptus	Desaguadero
14	Chuquiña	Desaguadero
15	La Joya	Desaguadero
16	Puente Español	Desaguadero
17	Sirca Pata	Desaguadero
18	Toledo Desaguadero	Puente Desaguadero
19	Poopó	Desaguadero
20	Machacamarca	Huanuni
21	Poopó	Poopó
22	Pazña	Antequera
23	HuañaKhava	Jachusuma
24	Huari	Azanaques
25	Jalantañas Pampa	Cortadera
26	Quillacas	Sevaruyo
27	Quillacas	Marques
28	San Miguel de Pampa	Lacajahuira Aullagas
29	Pazña - Chacakollo	Lago Poopó
30	Huancane - Peninsula	Lago Poopó
31	HuañaKawa - Cerro	Lago Poopó Gloria Pata
32	Challapata - Patamanta	Lago Poopó
33	Huari Huaña Pampa	Lago Poopó
34	Perú 1	Ramis
35	Perú 2	Coata
36	Perú 3	Ilave

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

Salinidad: Se observaron bajas concentraciones de TDS (sólidos totales disueltos) en afluentes al Lago Titicaca, Puente Internacional y río Mauri (0,3 a 0,9 g l⁻¹). Ellas se incrementaban hacia el Sur desde Calacoto (1,8 g l⁻¹), hasta el Lago Poopó con valores extremos de 107 g l⁻¹ en primavera.

Ión Sodio: En los afluentes del Lago Titicaca, en los ríos Desaguadero a la salida del Lago y Mauri, las concentraciones variarán entre 40 y 240 mg l⁻¹. En el Lago Poopó, la concentración varía de 4,1 a 30 g l⁻¹; sin embargo se notaba una ligera disminución en el río Lacajahuira, a la salida del Lago Poopó.

Ión Cloruro: En los afluentes del Lago Titicaca se han hallado concentraciones promedio entre 25 a 350 mg l⁻¹. Sin embargo, en el río Desaguadero los valores se iban incrementando aguas abajo del Puente Internacional, alcanzando en primavera sus máximas concentraciones en el Lago Poopó (20 a 30 g l⁻¹). Se ha notado también una disminución a la salida del Lago Poopó, por el río Lacajahuira, debido posiblemente a una sedimentación de este elemento en el Lago. Sus concentraciones han variado desde 7 hasta a 18 g l⁻¹ según Carmouze *et al.* (1978).

Ión sulfato: En los afluentes al Lago Titicaca y el Puente Internacional, río Mauri, Puente Japonés, Chuquiña y Puente español se han presentado valores entre 40 y 300 mg l⁻¹. En el Lago Poopó, la concentración ha sido 10 veces mayor que en el Río Desaguadero, alcanzando en primavera y verano sus máximas concentraciones (8-19 g l⁻¹) y evolucionando desde 2 a 6 g l⁻¹ en su composición media.

Otros iones: Las concentraciones en el sistema han tendido a incrementarse del norte al sur de la cuenca TDP, especialmente en la región del Lago Poopó, con valores superiores a los límites permisibles, en los siguientes iones: calcio, magnesio, potasio y boratos.

Hierro y Manganeso: Al norte de la cuenca, los valores estaban dentro de los rangos normales (en promedio 0,1 mg l⁻¹). Se ha determinado contaminación por estos elementos en la mayoría de los afluentes del Lago Poopó, pero simultáneamente una disminución sensible en sus concentraciones.

Zinc, Cobre, Plata, Cianuros y Níquel: No se detectó contaminación por estos elementos.

Estaño: En todos los puntos muestreados se registraron valores superiores al límite permisible para consumo humano (0,05 mg l⁻¹). Los valores iban de 0,3 a 7,2 mg l⁻¹ y aparentemente su presencia se consideraba natural en el Sistema TDP.

Plomo: Los valores al norte de la cuenca, el Río Desaguadero, Calacoto, Puente Japonés, Chuquiña,

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

Puente Español al Sur de la ciudad de Oruro y el Río Mauri han sido normales (alrededor de $0,02 \text{ mg l}^{-1}$). Pero las cuencas de los lagos Uru Uru y Poopó han registrado valores para cualquier consumo de $0,15$ a $0,30 \text{ mg l}^{-1}$, siendo aptas para riego.

Antimonio: Solo el Lago Poopó ha presentado concentraciones ligeramente superiores a los límites para consumo humano ($0,5 \text{ mg l}^{-1}$), con valores que se situaban entre $0,7$ a $0,8 \text{ mg l}^{-1}$.

Arsénico: En los puntos de Eucaliptus, Chuquiña, Puente Español y en los lagos Uru Uru y Poopó, las concentraciones elevadas ($0,6$ a $0,8 \text{ mg l}^{-1}$) hacían que el agua no sea apta para ningún consumo.

Cadmio: En la parte norte hasta La Joya, incluido el Río Mauri, se registraron valores inferiores a $0,009 \text{ mg l}^{-1}$. Pero, al Sur del Puente Español en los lagos Uru Uru y Poopó, las concentraciones eran altas, llegando a niveles de $0,2 \text{ mg l}^{-1}$, que inhabilitan las aguas superficiales para cualquier uso.

Cobalto: Tiene el mismo comportamiento que el cadmio, desde el norte de la cuenca hasta La Joya. En cambio, las concentraciones en los lagos Uru Uru y Poopó eran elevadas, llegando a niveles de $0,50 \text{ mg l}^{-1}$ que hacen que el agua no era apta para ningún uso, según los límites de la OPS (1985), Ayers & Westcot (1984) y OPS (1987).

Existe una aparente tendencia al incremento en las concentraciones de los diferentes elementos químicos, de norte a sur del Sistema TDP, las cuales alcanzan valores muy críticos en la región de los lagos Uru Uru y Poopó.

Las ocurrencias de periodos lluviosos en el sistema ejercen una influencia directa y rápida en la calidad de las aguas, pues por efectos de la dilución resultante, se modifican notablemente las características fisicoquímicas de las mismas, tanto a lo largo del año como entre años secos y años húmedos.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

como por sus contenidos de cloro, sodio y sílice en el caso de los ríos Mauri y Desaguadero. Adicionalmente, se tienen restricciones físicas (como color, turbidez y material en suspensión), características que con un tratamiento primario se podrían eliminar sin dificultades.

Para el uso animal (abrevamiento) las aguas de los ríos afluentes al Lago Titicaca (Ramis, Coata e llave) no tienen restricciones; mientras que las aguas de los ríos Mauri y Desaguadero tienen limitaciones estacionales de cloro, sodio y boro.

Para fines de riego, los siguientes puntos no son aptos para este fin ya que sus aguas evolucionan desde C3S3 a C4S4: ríos Jachajahuira y Cañuma (afluentes al Río Desaguadero norte), Río Desaguadero aguas debajo de Calacoto; más aún los lagos Uru Uru y Poopó en sus afluentes: ríos Poopó y Cortadera.

En el Puente Internacional se registraron bajas concentraciones de oxígeno disuelto, lo que se debería a la contaminación doméstica (resultado del aumento de la población estable y flotante y de las poblaciones fronterizas de Desaguadero) y a las basuras que, además provocan el desarrollo de la flora saprófita anormal que consume una mayor cantidad de oxígeno disuelto.

En los lagos Uru Uru y Poopó existe una deficiencia permanente de oxígeno disuelto, deficiencia que se incrementa con la disminución del volumen de agua en los años secos (insaturación constante que lleva a una anoxia crónica), ya que en muchos lugares se aíslan puntos de agua que luego se convierten en aguas estancadas y que el caso de Oruro, se agrava con las descargas de los afluentes domésticos de la ciudad.

Es necesario subrayar las situaciones críticas puntuales que ocurren en El Alto, Cochabamba y Oruro (Bolivia) y en Puno (Perú), donde se han identificado problemas muy graves de contaminación antrópica, frente a los cuales resulta necesaria una intervención de control, con tratamiento de afluentes en plantas adecuadas, para la disminución de la carga contaminante.

En función de la evolución de la conductividad y del total de sólidos disueltos, es importante subrayar el papel regulador de la salinidad que tienen tanto el Lago Titicaca como el Río Mauri, sobre la evolución (dilución) de la cuenca sur del Sistema TDP.

El río Mauri es el principal aportador natural de sílice disuelta a la cuenca sur del Desaguadero, con valores que alcanzan hasta 81 mg l^{-1} , como resultado de la presencia de series eruptivas en la cabecera de la cuenca del río.

A3.1.3 AGUAS SUBTERRÁNEAS

Se analizaron 37 muestras distribuidas en Perú y Bolivia (Fig. A3-2 y Tabla A3-2) y 33 pozos de la provincia Aroma del Departamento de La Paz, de los cuales son citados tres en la mencionada Tabla.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

Conductividad y Total de Sólidos Disueltos (TDS): De los 37 puntos muestreados, solo el río Coata, Illpa y San Miguel de Llanga, mostraron valores elevados que hacen que las aguas no sean aptas para cualquier uso. En el sector de Aroma, sólo los pozos de Kollpa Pampa, Umala y río Kheto presentaron aguas no aptas para ningún uso.

Tabla A3-2.- Puntos de muestreo de aguas subterráneas (Quintanilla 1996). Los números corresponden a los de la Fig. A3-2.

Puntos de muestreo	Zona de ubicación	Ordenados por cuenca/sector	Puntos de muestreo	Zona de ubicación	Ordenados por cuenca/sector
1	Sucapaya	Ramis	20	Pariri	Keka
11	San Pedro de Callampa	Ramis	23	Estación Belén	Achacachi
13	Collana	Ramis	24	Achacachi Norte	Achacachi
15	Sacaso	Ramis	21	Ilata Centro Catari	Catari
16	Caminaca	Ramis	22	San Antonio	Catari
2	Juliaca	Coata	25	Lacaya	Catari
8	Corisuyo	Coata	37	Tilata	Catari
10	Coata	Coata	26	P.C. Jahuirá Pampa	Tiwuanacu
14	Rancho	Coata	27	P.C. Jahuirá Pampa	Tiwuanacu
3	Mullacani	Ilave	28	Khasa Achuta	Tiwuanacu
4	Lupaca	Ilave	29	Estrodi	Desaguadero
5	Jayu - Jayu	Ilave	30	Jesús de Machaca	Desaguadero
6	Ancaca	Ilave	31	San Miguel de Llanga	Desaguadero
12	Callampa	Ilave	32	Santa Cruz de Cumi	Desaguadero
17	Rosacani	Ilave	34	Puerto de Chila Huala	Desaguadero
18	Callata	Ilave	35	Estación Humachuco	Desaguadero
19	Chijichava	Ilave	33	Javita Pampa	Desaguadero
36	Jayu - Jayu	Ilave	A1	Quebrada Sevencani	Aroma
7	Illpa - Atuncolla - I	Illpa	A2	Kollpa Pampa	Aroma
9	Illpa - Atuncolla - II	Illpa	A3	Sora Sora	Aroma

Dureza: Las aguas muestreadas eran blandas o semiduras, con valores inferiores a 30°d, salvo en las cuencas de los ríos Coata e Illpa donde las aguas eran duras.

Alcalinidad Total: Considerando el valor límite para todo uso de 610 mg l⁻¹, la mayoría de los puntos

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

de muestreo estaban por debajo del mismo, excepto en las cuencas de Coata e Illpa y para Aroma en algunos pozos.

Sulfatos: De toda la cuenca, incluyendo Aroma, solo 2 pozos (Illpa y Coata, en Perú) presentaron valores superiores al límite para consumo humano (400 mg l^{-1}).

Cloruros: Solo siete pozos de toda el área de estudio han presentado valores superiores al límite permisible para agua potable (250 mg l^{-1}): uno en la cuenca de Illpa, y dos en Aroma (Kollpa Pampa y Quebrada Sevencani). Los otros cuatro con valores superiores al límite para riego (400 mg l^{-1}) están ubicados en Illpa, Coata, San Miguel de Llanga y Sora Sora.

Boratos: Solo cinco pozos de los 37 superaron el límite para cualquier uso (11 mg l^{-1}): tres en la cuenca del río Ramis, uno en la del río Coata y uno en la del río Desaguadero (San Miguel de Llanga). En Aroma las aguas de cuatro pozos no eran aptas para ningún uso, uno de los cuales era Kollpa Pampa.

Calcio: Solo dos análisis han presentado concentraciones superiores al límite para consumo humano (200 mg l^{-1}): uno en Coata y otro en Aroma.

Magnesio: De los 37 pozos (TDPS), solo uno en la cuenca de Coata han presentado valores superiores al límite de consumo y riego (200 mg l^{-1}).

Sodio: En 7 muestras se encontraron valores superiores a la norma para consumo humano (120 mg l^{-1}): dos en el área de Illpa, uno en Coata, San Miguel de Llanga y Javita Pampa. Dos eran en Aroma incluyendo el de Quebrada Sevencani. De estas, por sus elevadas concentraciones, cuatro no eran aptas para ningún uso.

Potasio: En todos los pozos muestreados, el potasio ha estado por debajo de 1000 mg l^{-1} (límite para consumo humano).

Hierro: Su concentración se encuentre por encima de la norma para agua potable ($0,30 \text{ mg l}^{-1}$) en pozos tanto en Perú como en Bolivia: cuenca de los ríos Ilave e Illpa, Achacachi, Tiahuanaco y 11 pozos de Aroma incluyendo la Quebrada Sevencani. Además 10 pozos presentaban valores superiores a $1,00 \text{ mg l}^{-1}$, no siendo aptos para ningún tipo de consumo.

Desde un punto de vista fisicoquímico y con fines de consumo doméstico, la calidad de las aguas subterráneas muestreadas fue mejor que la de las aguas superficiales, y salvo raras excepciones, eran aptas para consumo en general.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

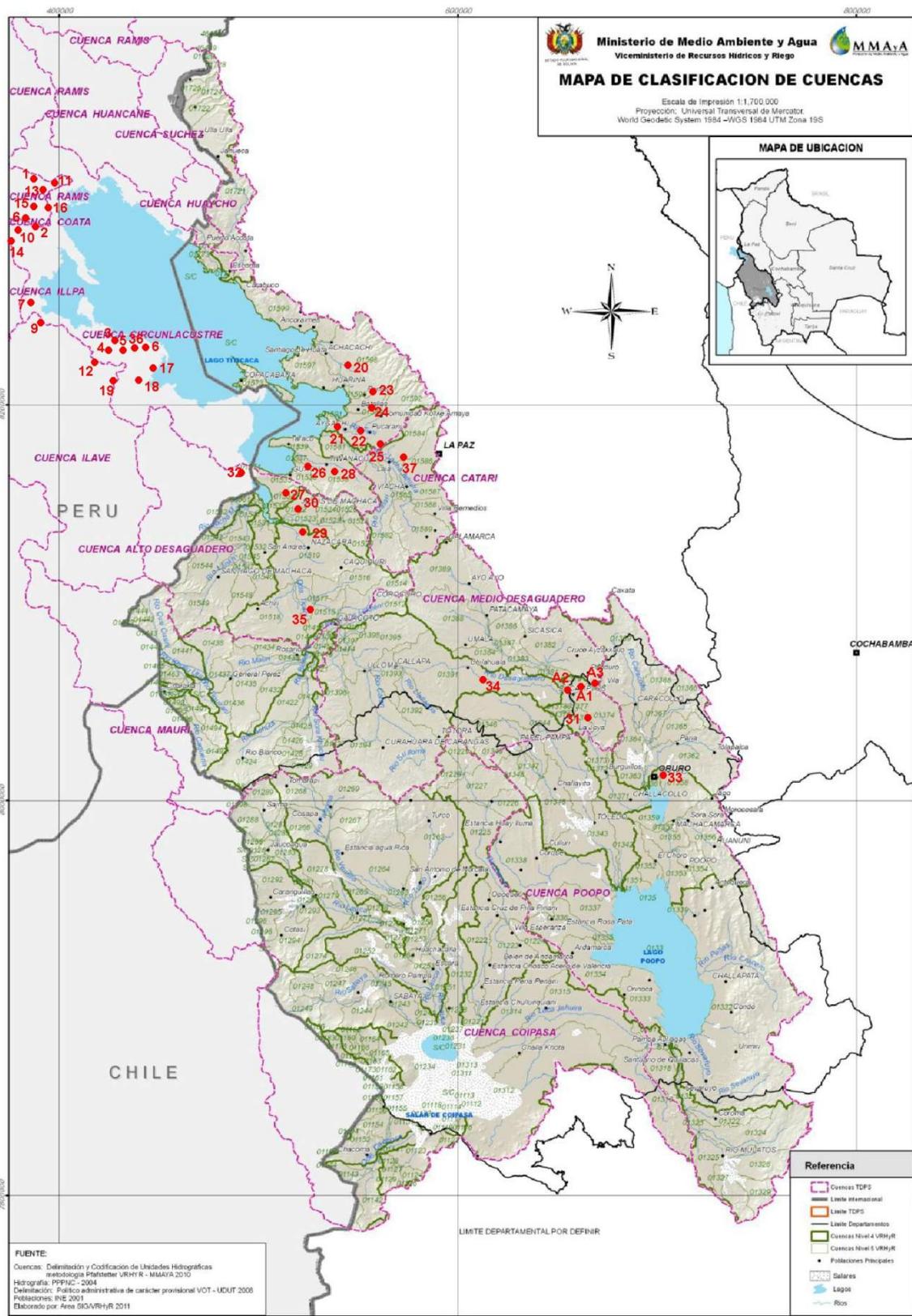


Figura A3-2- Ubicación de puntos de muestreo de los pozos (A. subterráneos), Quintanilla 1996 (Mapa base de MMAyA, 2010/2011).

Los pozos no aptos para riego eran los de Illpa, Coata, San Miguel de Llanga en el sistema TDPS y los de quebrada Sevencani, Kollpa Pampa y Sora Sora en Aroma.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

La aptitud para consumo humano, en la mayoría de las fuentes, se halla dentro de la potabilidad (aceptables, regulares, buenas y muy buenas), salvo en muy pocos casos, en algunas zonas donde sus características de dureza y composición química sobrepasan los límites permisibles, bacteriológicamente, y por el grado de contaminación, se restringió su uso, clasificándose como mediocres o malas.

Los tipos de agua subterránea predominante en el sistema fueron: cálcicas – magnésicas – sódicas – sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

En algunas cuencas hidrogeológicas, se han detectado, localmente, una contaminación de los acuíferos, de origen mineralógico – toxico y también biológico principalmente en los pozos someros ubicados aguas debajo de focos de contaminación (pozos sépticos, plantas de aguas servidas, ríos conduciendo aguas negras, desechos industriales y otros).

La conductividad eléctrica (CE) en el contexto general del sistema, como un indicador del contenido total de sales disueltas en el agua, evoluciono en el espacio con tenores que siguen una tendencia creciente del norte al sur entre $500 < CE < 5000$ micromhos cm^{-1} a $25^{\circ}C$. Según este rango de conductividad las aguas presentaron una salinidad baja, media, alta y muy alta. Asimismo se distingue otra tendencia general de aumento de conductividad en el sentido nor-este hacia sur-oeste, en las cuencas hidrogeológicas cuyas fuentes de recarga provienen de los deshielos nor-este hacia sur-oeste, en las cuencas hidrogeológicas cuyas fuentes de recarga provienen de los deshielos de la Cordillera Oriental, con un rango de $500 < CE < 1000$ micromhos cm^{-1} a $25^{\circ}C$.

Dentro de la cuenca hidrogeológica, el tenor de la conductividad eléctrica evoluciono en forma creciente, en el sentido del escurrimiento Sin embargo, se presentaron también tendencias locales que dependen de las condiciones geológicas del subsuelo y de los gradientes hidráulicos que regulan la renovación de las aguas subterráneas. De otro lado, la salinidad global depende también del tipo de acuífero captado por la fuente. Así, en algunos sectores de Bolivia, en pozos someros y profundos ubicados muy próximos entre sí, se registraron valores diferentes de conductividad, con lo cual se evidencia que al existir acuíferos diferenciados en profundidad, la salinidad varía en función de las características de dichos acuíferos. El pH en la mayoría de las zonas hidrogeológicas fluctuó entre 6,5 y 8,5 con lo que se establece que las aguas son ligeramente ácidas, neutras y alcalinas.

De los 39 pozos muestreados, solo 2 no eran aptos para uso potable ni para consumo de los animales: San Miguel de Llanga (río Desaguadero), Coata, zona de Illpa Perú.

Para uso en riego, se utilizo nuevamente el concepto de la toxicidad iónica específica, relacionada con la salinidad y la concentración relativa de sodio en relación con calcio, magnesio y pH.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

Las muestras de agua obtenidas de los pozos en función de su uso para riego; y tomando en cuenta que al combinar las distintas clases de salinidad (conductividad) y de la peligrosidad por el sodio intercambiable; podemos señalar que: bajo las actuales condiciones de riego y drenaje, las aguas de los pozos N°9 y 7 en Illpa, N°10 en Coata y N°31 en San Miguel de Llanga no son aptas para su empleo en riego.

A3.1.4 LODOS (SEDIMENTOS)

De los 12 puntos muestreados (Fig. A3-3), los lugares más contaminados son el río Coata (aguas abajo de Juliaca) y el Lago Uru Uru. Los sedimentos de cadmio, cobre, manganeso, mercurio y plomo observados en el Coata son superiores a los límites admisibles por las normas vigentes, especialmente a la altura de Juliaca (Quintanilla *et al.*, 1995). En el recorrido hacia el pueblo de Coata, el contenido de contaminantes disminuye ligeramente, pero no llega a situarse por debajo del límite admisible.

El Lago Uru Uru presentó contaminación por plomo. Además presentó valores altos de contaminación por cobre, manganeso y mercurio. Tanto el río Coata aguas abajo de Juliaca como el Lago Uru Uru son receptores de contaminación producto de las actividades industriales principalmente mineras (Quintanilla *et al.* 2001).

El Lago Poopó presentó concentraciones elevadas de cadmio (en Huari), cobre, manganeso y cinc, también productos de las actividades mineras de la región (ingenios Poopó y Bolívar). Asimismo estudios realizados con los tejidos de los peces del Lago Poopó (pejerrey y orestias), han comprobado la presencia de metales pesados (plomo, cobre, cadmio, cobalto, níquel, cromo, antimonio, estaño, manganeso, cinc, etc.), lo mismo que en macrófitas y algas. Ello indica el elevado grado de contaminación en toda la cadena ecológica (Marín 2002).

La incidencia del complejo minero Bolívar se manifiesta de forma particular cerca de Wilañeque, donde desembocan los ríos que drenan esta región.

En los lodos no se han detectado problemas de contaminación por arsénico, cobalto, cromo, níquel o plata.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

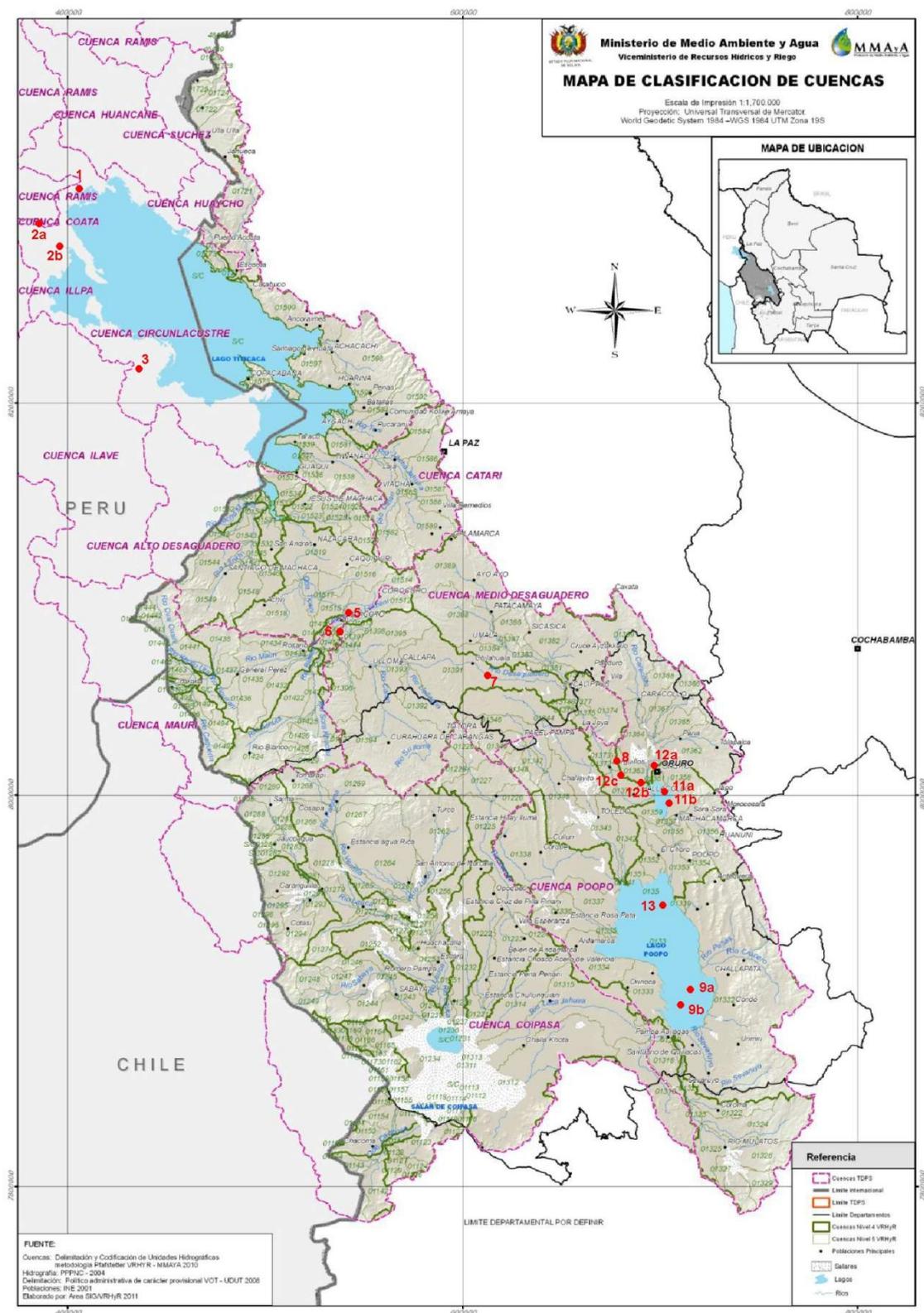


Figura A3-3 Ubicación de puntos de muestreo de lodos (sedimentos), Quintanilla 1996 (Mapa base de MMAyA, 2010/2011)

A3.2 DIAGNOSTICO HIDROQUÍMICO

Una primera consideración que emerge de los análisis de las aguas superficiales es que la cuenca puede dividirse en 5 tramos, según la salinidad de sus aguas:

- El lago Titicaca y sus afluentes, con agua de salinidad baja.
- La parte situada entre el Puente Internacional y Calacoto, en el Desaguadero con aguas un poco más salinas.
- La confluencia del río Desaguadero con el río Mauri, con salinidad baja.
- La zona que va desde aguas abajo de la confluencia del Desaguadero y Mauri hasta el Puente Español, con aguas salinas.
- La zona del extremo sur del Río Desaguadero con aguas cada vez más salinas hasta llegar al máximo en el Lago Poopó y en el Salar de Coipasa.

La calidad del agua del Sistema TDPS es muy variable y presenta problemáticas bien diferenciadas. Así, en el Lago Titicaca se puede señalar que prácticamente no existen problemas, a no ser de eutrofización por algas en la Bahía de Puno (Perú) y la Bahía de Cohana (Bolivia), debido a los despojos disueltos sin tratamiento de aguas servidas de la ciudad. Algunos ríos tienen problemas localizados de contaminación minera: como en la cuenca del Coata y en la cuenca sur del altiplano a partir de La Joya. Por otro lado, se tiene contaminación puntual por despojos domésticos en Desaguaderos y en Oruro. Finalmente existen problemas de salinización, gran parte de estos originados naturalmente.

Los problemas de calidad de las aguas más importantes que se han identificado en el Sistema TDPS son:

- Salinización natural, gradual desde el Puente Japonés hacia el sur de la cuenca, haciéndose más grave en los lagos Uru Uru y Poopó cuyo proceso natural de transformarse en salares, se acelera cuando ocurren años secos.
- Contaminación natural, particularmente con arsénico, cuyos valores altos se detectaron desde Eucaliptus hacia el sur de la cuenca, debido probablemente a la salinización del medio.
- Contaminación antrópica, sobre todo en el área urbana: Puno, Cohana, Viacha, El Alto y Oruro, con problemas de contaminación bacteriológica debida a los desechos domésticos (basuras y aguas servidas) y defectos en sus redes de alcantarillado (a veces inexistentes). Esta situación resulta de una falta de planificación e implementación de un programa de saneamiento ambiental y el incumplimiento de las reglamentaciones sobre lanzamiento de desechos líquidos y sólidos en cuerpos de agua, que ocasionan además contaminación inorgánica.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

Asimismo, en varias áreas urbanas de las ciudades citadas existe contaminación industrial, especialmente al sur de la cuenca, por afluentes mineros que desembocan (o desembocaron) en los lagos Uru Uru y Poopó. Como no existe una adecuada disposición final de los inertes y desmontes, que por efecto de lluvias y lixiviación contaminan el medio ambiente, el resultado negativo se ve en el deterioro y la extinción de la fauna piscícola.

SEGUNDA PARTE: Subcuenca Lagos Poopó y Uru Uru

A3.3 INTRODUCCIÓN

A3.3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Altiplano Boliviano, planicie extensa y desértica con una altura aproximada de 3750 m.s.n.m, se encuentra entre dos cordilleras con cumbres que alcanzan los 6000 m.s.n.m. Esta región se caracteriza como una zona con escasez manifiesta de agua y por ende con muchas limitaciones para el desarrollo de la agricultura. Con la disminución paulatina de la capa de nieve en las cordilleras, conflictos en el uso del agua por distintos sectores, la contaminación de las aguas superficiales como consecuencia de actividades mineras y la contaminación natural, el recurso hídrico se encuentra cada vez más en peligro, transformándose en un tema de atención.

El Altiplano es el producto de la acumulación de sedimentos cuaternarios en un antiguo ambiente lacustre y fluvio-lacustre. El sistema cuaternario tiene gran importancia por servir de reservorio principal de aguas subterráneas. La planicie está interrumpida por las serranías inter-altiplánicas donde afloran rocas de diferentes edades pero mayormente Terciarias (Montes de Oca 1997, ALT 1999c). Se ha supuesto que la creación de los grandes paleo-lagos se debía a altas tasas de precipitación y a cambios en la circulación atmosférica, mientras otros sugirieron que la pérdida de los glaciares podría haber significado una contribución importante en la creación de los mismos. Durante el Pleistoceno medio, el **Lago Ballivián** se situaba alrededor del actual Lago Titicaca y se extendía hasta Ulloma (río Desaguadero). El Lago estaba limitado por un alto topográfico entre Collapa y Ulloma, que impidió su extensión hacia la cuenca del Poopó. El Lago alcanzó una superficie 50% superior del Lago actual. Los depósitos más altos conocidos fueron encontrados hacia los 3850 m.s.n.m. En este mismo período, se formaba el **lago Escara** en el Sur (actuales cuencas de Uyuni, Coipasa y Poopó). Sin embargo, las deposiciones de sedimentos en las cuencas no son conclusivas

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

sobre la extensión que tenía este lago, pero es probable que el nivel del agua alcanzara los 3780 m.s.n.m. (Fig. A3-4). Después de este período, el nivel del agua bajó bruscamente, y siguió un período de erosión regresiva, que dio lugar al desarrollo del río Desaguadero actual, estableciéndose una comunicación entre la cuenca del Lago Titicaca y la cuenca del Lago Poopó (Fig. A3-5).

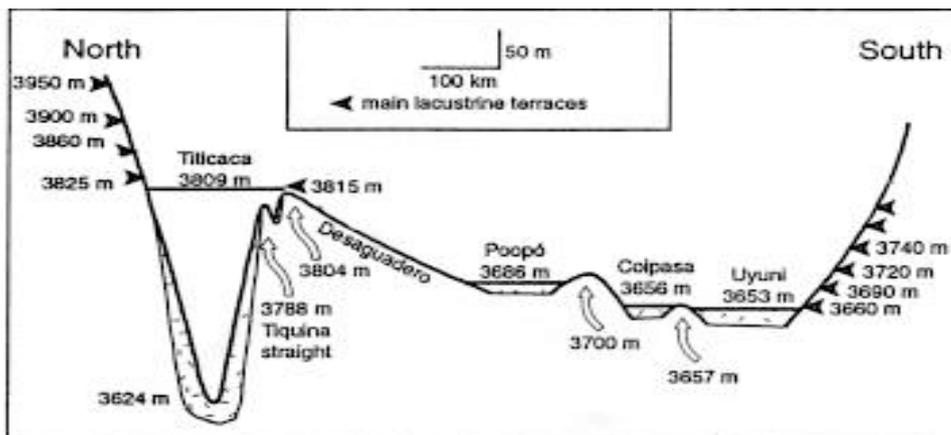


Figura A3-4. Corte topográfico entre el Altiplano, lagos y salares (Risacher 2001).

La cuenca endorreica o cerrada del Altiplano, conocida también como sistema TDPS (Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salares), está ubicada entre los 14°38' a 22°58' de latitud sur y 66°14' a 69°40' de longitud oeste, cubre 145 176 km² de superficie (Fig. A3-6), donde la Cuenca del Lago Poopó ocupa una superficie de 16 343 km² (SNHN 2001).

El Lago Poopó se encuentra ubicado a una altitud de 3 686 m.s.n.m. y su superficie asciende a 2 520 km². En 1994-1995, este lago se secó casi completamente. Sus aguas son poco profundas, registrándose niveles inferiores a un metro. La mayoría de los ríos aportantes no llegan a desembocar al lago, perdiéndose en extensas planicies a su alrededor, lo que permite formar extensas áreas denominadas bofedales.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

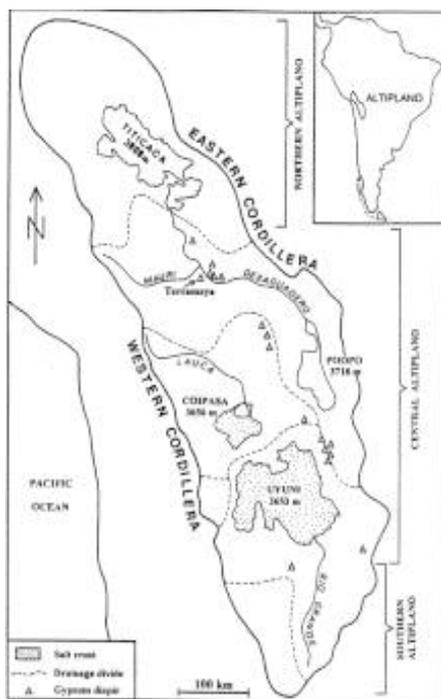


Figura A3-5. Mapa esquemático del Altiplano (Risacher2001).

El Lago Poopó recibe metales pesados y aguas ácidas de minas a través de los ríos del norte y noreste. El Lago Uru Uru, ubicado al sur de la ciudad de Oruro, se origina por el desborde del río Desaguadero sobre una pampa de inundación. Por falta de drenaje adecuado este lago se encuentra en un ciclo de sequía-llenado.

En el Altiplano, el comportamiento de los vientos es muy variable, en verano, soplan del Sureste, mientras en invierno soplan desde el Oeste (Montes de Oca 1997). Los fuertes vientos en el Altiplano dan lugar a acumulaciones de arena, campos de dunas y producen procesos de erosión eólica. Son bien conocidos los arenales del Altiplano central (en los alrededores de Oruro, el Lago Poopó y el Salar de Coipasa) y del Altiplano Sur (Uyuni y Lípez).

Con relación a las lluvias, la región del Lago Poopó tiene un promedio de precipitación de 400 mm año⁻¹. Sin embargo esta región se caracteriza por condiciones climáticas extremas, como sequías prolongadas, granizadas y además inundaciones en la época de lluvias, ocasionando variaciones en los recursos hídricos, como muestra la Fig. A3-7 del Lago Poopó.

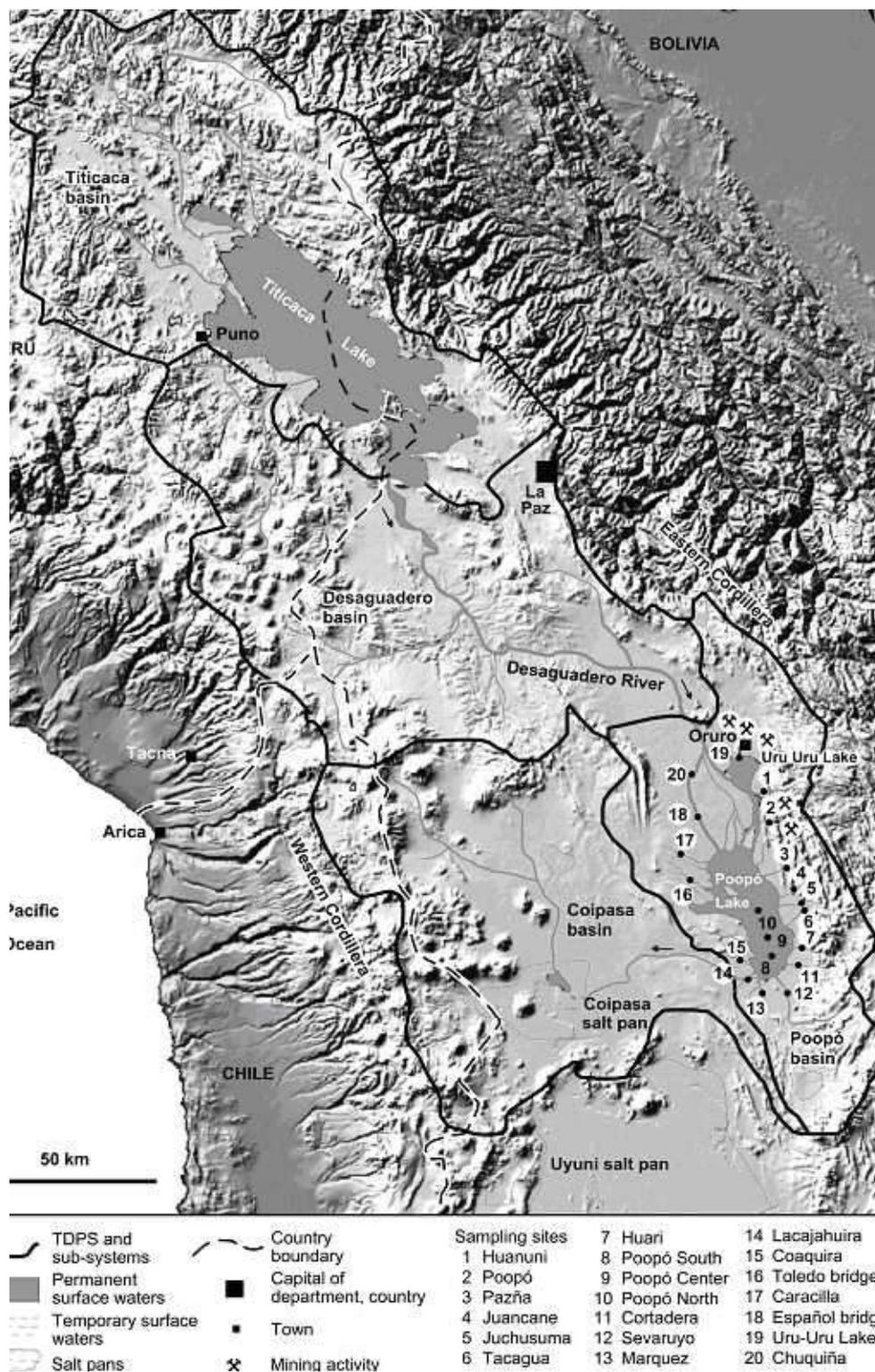


Figura A3-6. Altiplano Central Boliviano con el sistema TDPS. Principales sitios con actividad minera en la Cuenca del Lago Poopó y puntos de muestreo de agua superficial, subterránea y sedimentos

La evapotranspiración (cantidad de agua transferida hacia la atmósfera por procesos de evaporación del agua interceptada por el suelo y de la transpiración de las plantas) sobre la subcuenca del Lago

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

Poopó llega a 315 mm año^{-1} , ó sea 85,1% de las precipitaciones, y de 1473 mm año^{-1} sobre el Lago. Sobre el conjunto, se tiene una evapotranspiración media de 440 mm año^{-1} ó 93,6% de la precipitación.

El escurrimiento varía de norte a sur, disminuyendo en un 12% para la subcuenca del río Desaguadero y 20% para las cuencas del Salar de Coipasa y Salar de Uyuni.

El lago Poopó tiene un perímetro de 330 kilómetros, una altitud media de 3718 m.s.n.m..(Risacher 2001) y profundidades que se extienden de 0,5 hasta 2,5m. La superficie del agua en el lago es muy variable, de acuerdo con su naturaleza de lago de meseta deposicional (UNEP 1996). Estas mesetas y especialmente la región sur, son propensas a inundaciones durante el período de lluvias.

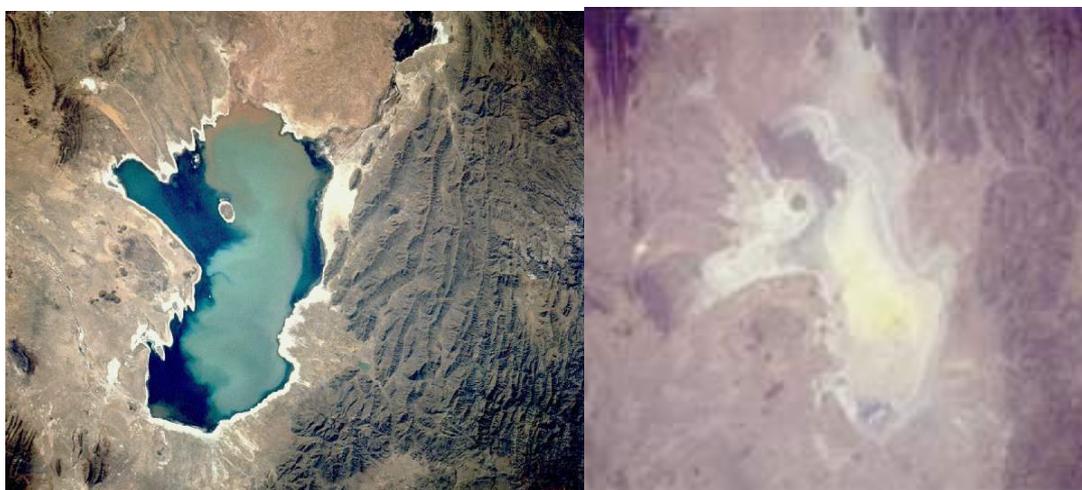


Figura A3-7. El Lago Poopó en condiciones extremas (izquierda, 1986, foto No. STS 048-72-49 NASA, derecha 1995, foto No. STS 064-91-22 NASA).

Antes de converger en el Lago Poopó, el río Desaguadero se divide en dos brazos; el primero entra directamente al Lago Poopó, mientras que el segundo entra al Lago Uru Uru, que tiene una superficie de 150 km^2 , y un perímetro de 128 km (UNEP 1996). El caudal del Desaguadero tiene un promedio de $35.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Este volumen aumenta aguas abajo debido a los tributarios y cuando pasa por Chuquiña, alcanza un promedio de $89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, siendo enero, febrero y marzo los meses del flujo máximo. La cuenca tiene otros ríos de importancia tales como el Sora Sora, Pazña, Sevaruyo, Márquez, y Lacajahuira (130 km de largo) el que a través qué Lago Poopó vierte sus aguas en el período lluvioso al Salar de Coipasa (WMO 1994).El área de la cuenca del Lago Poopó tiene en general condiciones extremas, tales como inundaciones, sequías, heladas, variaciones de temperatura bastante considerables entre el día y la noche.

En el área de estudio, existen los depósitos de estaño (principalmente Llallagua y Huanuni),

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

depósitos de wolfram (Redwood 1987) y principalmente de zinc, bismuto, plomo y las venas polimetálicas de plata. Existen también depósitos de cobre, situados sobre todo a lo largo de la parte este de la cuenca, depósitos de antimonio y oro situados en la misma región y depósitos de sal, especialmente cloruro de sodio. Todos estos minerales han sido y son extraídos por varias minas en la región, cuyos depósitos se componen de plomo, plata, antimonio, cobre, estaño y cianuro, además de sulfuros y sulfatos. En estas operaciones mineras, solamente considerando las del norte del lago, se toma agua del río Desaguadero a un caudal aproximado de 28 l s^{-1} y posteriormente se son eliminadas sin ningún reciclaje o tratamiento previo. Por lo tanto, el río se carga de residuos de un pH fuertemente ácido o en algunos casos fuertemente alcalino, además de lavados sulfurosos que se llegan directamente a los lagos Uru Uru y Poopó y por lo tanto, las concentraciones de metales pesados se incrementan notoriamente. En el caso de la fundición de Vinto, situada en la ciudad de Oruro donde se funden cantidades considerables de mineral, se produce un impacto significativo para el medio ambiente, particularmente en el aire donde las emisiones del sulfuro y cianuro sobrepasan los límites permisibles. El río de Sora Sora recibe las aguas efluentes de minas y de plantas de concentración en la región, este río, además de un nivel de acidez extrema en el pH, tiene altas concentraciones de cobre, cinc y otros elementos tóxicos. En el río Desaguadero, las concentraciones disueltas de la sal y las concentraciones de metales pesados son relativamente altas. Sin embargo, el río Huari, Sevaruyo, y Márquez - los tributarios de Poopó - tienen composiciones típicas de cursos naturales del agua, con concentraciones de metales pesados debajo de los límites de detección.

Todas las condiciones críticas climáticas mencionadas anteriormente sumadas a los factores sociales y a los problemas de contaminación de origen natural por la presencia de depósitos polimetálicos con contenidos de elementos tóxicos, sumada a la intensa actividad minera y metalúrgica, hacen de la región del lago Poopó un área ambientalmente crítica, convirtiéndola en objeto de estudio y de aplicación de medidas de remediación.

A3.3.2 METODOLOGÍA

Con el fin de estudiar el origen y el transporte de los metales pesados en la región del Lago Poopó, particularmente, plomo, arsénico, hierro, cadmio y zinc, se han tomado muestras en aguas superficiales, agua subterránea, sedimento y biota.

Las muestras han sido tomadas por un período comprendido entre el 2001 y 2005 en diferentes épocas del año, época seca o de estiaje y época de lluvias con el objeto de observar la variación estacional en las concentraciones de los diferentes elementos.

A3.3.2.1 ANÁLISIS DEL AGUA SUPERFICIAL Y DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Se analizaron además de los metales pesados mencionados anteriormente, otros parámetros como pH, conductividad, sólidos suspendidos, temperatura, potencial redox, alcalinidad, sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, nitratos, fosfatos, carbonatos y bicarbonatos.

Las muestras del agua superficial y del agua subterránea fueron recogidas y filtradas con un filtro 0,45 mm de porosidad estándar que se divide en dos botellas plásticas Nansen, una para el análisis fisicoquímico y la segunda del para el análisis de metales pesados (cadmio, zinc, arsénico, plomo y hierro) previamente acidificada con ácido nítrico. El TDS y la conductividad fueron medidos en campo con un conductivímetro/TDS-meter (modelo 44600 de HACH) y la temperatura, pH y Eh, también en campo, con un modelo portátil 50058 de EC10 pH/mV/temperature-meter.

A3.3.2.2 ANÁLISIS DE SEDIMENTO Y BIOTA

Para los análisis del sedimento, aproximadamente un kilogramo del sedimento y un kilogramo de muestras de la planta fueron recogidos en bolsas del polipropileno, de todos los ríos y de los lagos Uru Uru y Poopó. Aproximadamente 100 g de cada muestra del sedimento o de la planta, representante para la muestra de 1 kilogramo han sido analizados. Las muestras fueron secadas en la temperatura ambiente, se digitaron con una mezcla de ácido clorhídrico y de ácido nítrico y finalmente se analizaron los metales pesados con GFAAS.

En los mismos sitios de muestreo, se tomaron las muestras de plantas acuáticas en la cantidad mencionada de las siguientes especies, predominantemente *Myriophyllum* sp., *Potamogeton* sp., *Schoenoplectus tatora* sp. (Totora) y *Bacharis juncea* sp. Las plantas fueron secadas previamente al proceso de digestión.

Los puntos de muestreo, tanto de aguas superficiales además de los sedimentos y biota comprenden los ríos de la cuenca del lago Poopó y los lagos Uru Uru y Poopó, para las muestras de aguas subterráneas se tomaron muestras en pozos a lo largo de la cuenca como se puede observar en la Figura A3-8.

A3.4 RESULTADOS

A3.4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RÍOS Y LAGOS DE LA CUENCA

De acuerdo a la geología de la cuenca, la formación de los ríos y lagos y la cantidad de actividades

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

mineras, se puede clasificar a la cuenca del Lago Poopó en cuatro áreas claramente definidas:

(1) Los ríos del Norte y Noreste, los cuales descargan sus aguas en los lagos Poopó y Uru Uru y tienen además la influencia de las actividades mineras (puntos de muestreo 1- 4 Fig. A3-8). La calidad de las aguas de estos ríos se caracteriza por tener bajos valores de pH como el caso del río Sora Sora y Pazña ($2.2 \leq \text{pH} \leq 4.0$), pero también valores elevados de pH como el caso del río Poopó ($8.3 \leq \text{pH} \leq 9.6$), el cual recibe alrededor del 28% de aguas termales, razón por la cual tiene un valor elevado de pH (García 2006). Debido a las diferentes actividades mineras, estos ríos tienen concentraciones bastante significativas de metales pesados, valores como 0.6 mg l^{-1} de Cd, 0.27 mg l^{-1} de Pb, 2.07 mg l^{-1} de As, 4.8 mg l^{-1} de Fe y 7.5 mg l^{-1} de Zn.

(2) Los ríos del sur, sudeste y oeste, descargan también al Lago Poopó, sin embargo no tienen influencia de las actividades mineras (puntos de muestreo 5-7, 11-13, 15-18, 20 Fig. A3-8). La calidad de las aguas en estos ríos es neutral o ligeramente alcalina ($7.0 \leq \text{pH} \leq 8.9$) y tiene además bajas concentraciones de metales pesados en comparación con el primer grupo de muestras (0.4 mg l^{-1} de Cd, 0.07 mg l^{-1} de Pb, 0.34 mg l^{-1} de As, 0.3 mg l^{-1} de Fe y 0.3 mg l^{-1} de Zn).

(3) El Río Lacajahuira (punto de muestreo 14, Fig. A3-8). Este río representa la única salida del Lago Poopó, sin embargo, es una pequeña porción la que llega a descargar en el Salar de Coipasa situado al sudeste, debido a que las aguas suben únicamente en el período de lluvias.

(4) Lago Poopó (puntos de muestreo 8-10). Este lago, recibe los afluentes mencionados en los puntos (1) y (2). La calidad del agua del Lago Poopó, se caracteriza por ser alcalina ($8.2 \leq \text{pH} \leq 8.6$). Concentraciones elevadas de sulfatos, cloruros, sodio y otros iones principales determinan la calidad de sus aguas. Además, este lago recibe minerales y cargas de sedimento de todos los ríos del grupo 1 y 2. Tiene además solamente una pequeña salida con un flujo promedio de $2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, valor que corresponde a la estación lluviosa. Durante la época seca, el agua del Lago Poopó no tiene descarga alguna y éste se constituye en un sumidero de sólidos disueltos y sedimentos.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

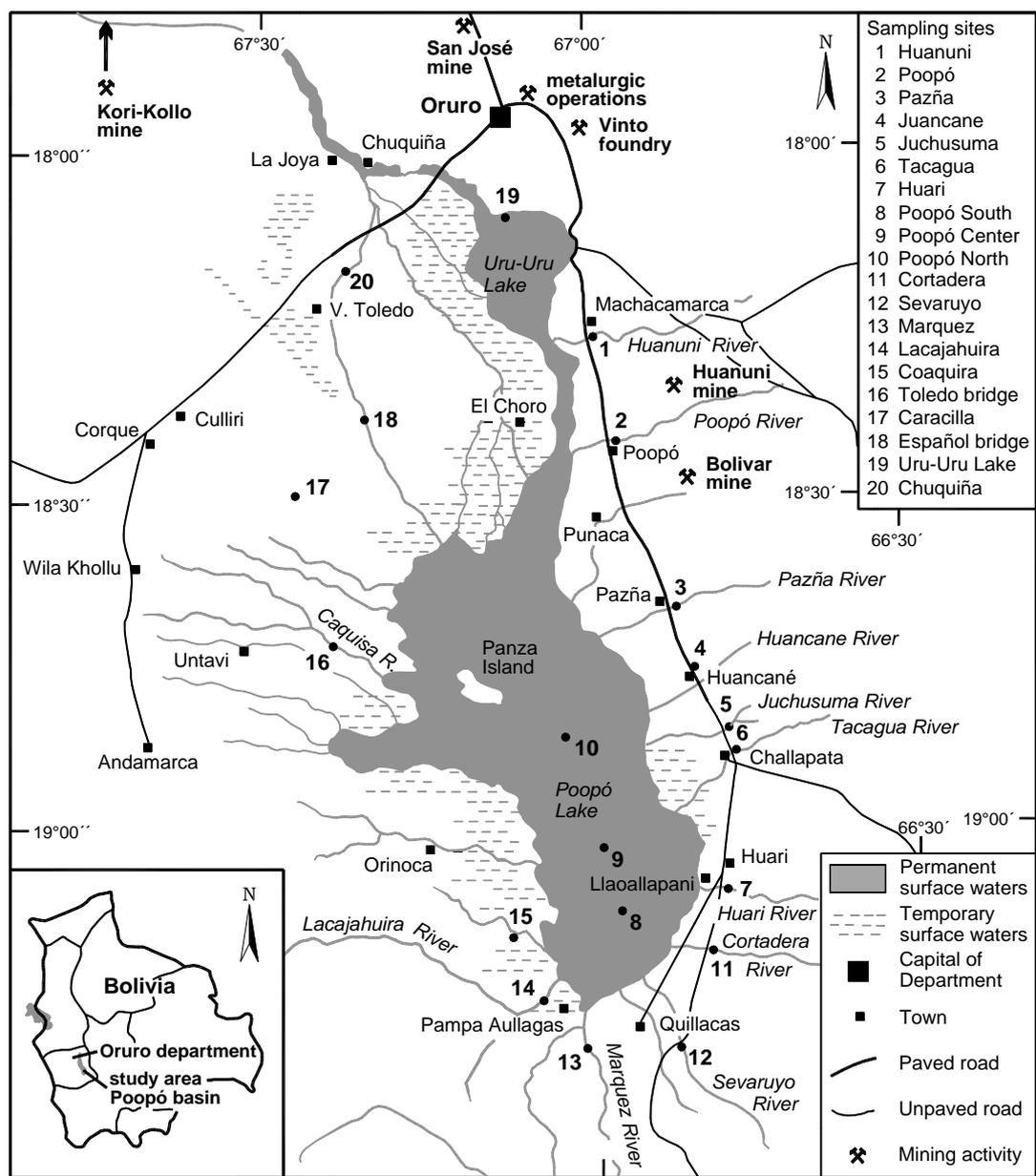


Figura A3-8. La Cuenca del Lago Poopó y las actividades mineras. Ubicación de los puntos de muestreo de agua subterránea, agua superficial, sedimentos y plantas acuáticas. Con excepción de las aguas subterráneas, las muestras se tomaron de los puntos 1 – 20. Para el caso de las aguas subterráneas los puntos son 1-7 y 11-20. (Quintanilla 2002).

Las concentraciones de los elementos en este lago son: SO_4^{2-} : 2900-6000 mg l^{-1} , Cl^- : 11800-12900 mg l^{-1} ; Cd : $\leq 3.0 \text{ mg l}^{-1}$, Pb : 0.24-0.53 mg l^{-1} , As : 0.02-0.22 mg l^{-1} , Fe : 0.1-0.2 mg l^{-1} , Zn : 0.1 mg l^{-1} , valores que comparando con la reglamentación nacional e internacional nos indica que la calidad de sus aguas son malas, no pudiendo asignar un uso para actividad alguna y menos para el consumo humano.

A3.4.2 VARIACIÓN ESTACIONAL

De acuerdo a varios estudios realizados previamente, (PPO – 2, 1996) se conoce que las concentraciones de los metales pesados tienen una variación estacional a lo largo del año, por lo cual es importante tomar varias muestras y realizar un estudio de la región comparando los resultados de las diferentes estaciones.

Realizando una comparación de las concentraciones de sulfatos, arsénico y metales pesados del agua superficial y las muestras de sedimentos que han sido tomadas tanto en la época seca como en la época de lluvias, mostraron diferencias significativas. Un promedio de los valores del periodo seco y lluvioso correspondiente al periodo del 2001 – 2005 se pueden ver en las Tablas A3-3 y A3-4. Los cambios estacionales son claramente identificables principalmente en las aguas superficiales y principalmente en elementos como el hierro y el arsénico correspondientes a las muestras de sedimentos.

El transporte de los sólidos en suspensión en los ríos es significativamente elevado durante el período de lluvias (Tabla A3-3). Sin embargo, es notable que el arsénico y los metales pesados en las muestras de sedimentos tengan una variación estacional menor (Tabla A3-4).

No se ha identificado una influencia estacional de carga de sedimentos en aguas superficiales bastante significativa en relación a la composición química de las aguas superficiales, principalmente en los sólidos en suspensión de las muestras de agua. Analizando las concentraciones de arsénico y de metales pesados en las muestras de sedimentos de los ríos (Tabla A3-4) se observa claramente que el cadmio está presente únicamente en los sedimentos de ríos influenciados por actividades mineras, sin embargo el arsénico, plomo, hierro y zinc están presentes en todas las muestras de sedimentos.

Las concentraciones de zinc y plomo son significativamente elevadas en los ríos con influencia minera, pero además el hierro y arsénico están presentes en cantidades similares en los sedimentos de ambos grupos de ríos. Los diferentes elementos en los ríos se diluyen en el período de lluvias donde se incrementan considerablemente las precipitaciones y por tanto, decrecen también las concentraciones de sulfatos.

En el Lago Poopó, las concentraciones de cloruros y sulfatos son las más elevadas durante la época de lluvias y ambos aniones tienen comportamientos similares. En contraste, las concentraciones elevadas de sulfato en el lago Poopó en la época de lluvias se explica por el incremento en el nivel de agua del lago y las inundaciones de las áreas marginales durante la primera parte de la estación lluviosa.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

Tabla A3-3. Concentraciones de cloruros, sulfatos y metales pesados de aguas superficiales de los principales ríos y lagos de la Cuenca del Lago Poopó (valores promedio de la estación seca y del periodo de lluvias por un periodo de tiempo de 5 años 2001-2005, para la ubicación de los puntos ver Fig. A3-9. (García M.E. 2006)

Punto de muestreo	pH		Cloruros		Sulfatos		Pb		Cd		As		Fe		Zn		SS	
	Unid.		(mg l ⁻¹)		(mg l ⁻¹)		(mg l ⁻¹)		(mg l ⁻¹)		(mg l ⁻¹)							
	PS	PL	PS	PL	PS	PL	PS	PL	PS	PL	PS	PL	PS	PL	PS	PL	PS	PL
1 Huanuni	2.2	4.0	25	200	400	100	0.05	0.31	0.2	<dl	0.11	0.02	1.0	1.3	3.2	7.0	210	250
2 Poopó	9.6	8.3	2300	2100	250	50	<dl	0.05	0.7	<dl	2.13	1.31	0.4	0.1	0.3	0.5	190	370
3 Pazña	3.5	3.1	250	200	700	600	0.05	0.09	0.5	<dl	<dl	0.01	4.5	4.8	3.9	7.2	220	470
4 Huancane	8.4	7.7	140	430	50	30	<dl	0.07	0.1	0.2	0.01	0.01	<dl	<dl	0.8	0.9	80	230
5 Juchusuma	8.2	8.9	20	2150	150	50	<dl	<dl	0.1	<dl	0.01	0.01	<dl	<dl	0.1	0.1	70	14
6 Tacagua	8.2	9.0	85	300	60	50	<dl	<dl	0.1	<dl	0.02	0.02	<dl	<dl	0.1	0.1	80	220
7 Huari	7.5	7.7	215	135	<dl	<dl	<dl	0.05	<dl	<dl	0.01	0.01	<dl	<dl	0.1	0.1	70	50
8 Poopó S.	8.4	8.5	6540	1293	3000	5600	0.24	0.53	3.5	<dl	0.22	0.02	<dl	0.1	0.1	0.1	150	260
9 Poopó C.	8.5	8.6	6530	1	2900	6000	0.24	0.51	3.0	<dl	0.22	0.02	<dl	0.2	0.1	0.1	170	260
10 Poopó N.	8.2	8.3	6700	1177	2900	5600	0.26	0.50	3.2	<dl	0.20	0.02	<dl	0.2	<dl	0.1	190	270
11 Cortadera	7.6	8.9	200	6	200	40	<dl	0.05	<dl	<dl	0.01	0.25	<dl	<dl	<dl	0.1	70	140
12 Sevaruyo	7.0	7.1	289	1293	<dl	<dl	<dl	0.05	<dl	<dl	0.02	0.10	<dl	<dl	<dl	<dl	50	160
13 Marquez	7.5	8.6	90	1	80	50	<dl	0.05	<dl	<dl	0.01	0.12	<dl	<dl	<dl	<dl	140	190
14 Lacajahuira	6.1	9.8	115	80	200	700	<dl	0.11	0.2	0.1	0.03	<dl	<dl	<dl	0.1	0.2	200	350
15 Coaquira	8.0	8.4	768	50	200	100	<dl	0.05	<dl	<dl	0.01	0.14	<dl	<dl	<dl	<dl	230	260
16 Pte Toledo	8.3	8.4	280	20	300	100	<dl	<dl	0.3	<dl	0.01	0.31	<dl	<dl	<dl	<dl	220	340
17 Caracilla	8.0	8.1	338	85	250	150	<dl	0.07	0.2	<dl	0.01	0.15	<dl	<dl	0.1	<dl	100	180
18 Pte Español	8.5	8.9	355	1280	100	100	<dl	0.05	0.2	0.1	0.02	0.19	<dl	<dl	0.1	0.1	110	200
19 Uru-Uru L.	9.9	10.4	120	1110	150	200	0.05	0.10	0.2	<dl	0.02	0.30	0.5	0.6	0.1	0.1	180	250
20 Chuquiña	7.6	7.9	122	20	300	100	0.05	<dl	0.1	<dl	0.05	0.18	0.5	0.7	0.4	0.2	70	120

PS: Periodo Seco; PL: Período de Lluvias; SS: Sólidos en suspensión, dl: Límite de detección

Grandes cantidades de sales precipitadas que contienen predominantemente cloruros y sulfatos son redisueltas (Fig. A3-9), causando un incremento de las concentraciones de sulfatos y cloruros en el agua del lago. Posteriormente, al final del período lluvioso, la concentración de los iones disueltos decrece nuevamente, probablemente debido a la disolución por el agua de las lluvias y una baja mineralización de un flujo interno de las aguas de los ríos.

En el área de estudio, donde las piritas y arsenopiritas son fuentes importantes de arsénico en agua y suelo, los sulfatos juegan un importante rol acelerando la oxidación de la arsenopirita (Tallant 2005).

El plomo en las muestras de sedimentos, muestra una variación estacional poco significativa a

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

excepción de la muestra correspondiente al río Poopó, donde se encontraron los valores mas elevados registrados durante el período de estiaje (8800 mg l⁻¹), 54 veces mas elevado que en la época de lluvias (70 mg l⁻¹). Este río tiene un pH alcalino durante el período seco (9,6). Durante el periodo de lluvias, donde el pH decrece (a pH 8,3), el plomo el lógicamente disuelto y transportado hacia el Lago Poopó.

Tabla A3-4. Contenido de metales pesados en sedimentos provenientes de los principales ríos y lagos de la Cuenca del Lago Poopó (valores promedio del periodo seco y de lluvias por el período 2001-2004, para la ubicación de los puntos ver la Fig. A3-9. (García 2006).

		Pb		Cd		As		Fe		Zn	
Punto de muestreo		(mg kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)	
		PS	PL	PS	PL	PS	PL	PS	PL	PS	PL
1	Huanuni	290	170	<dl	<dl	570	530	37700	58600	150	200
2	Poopó	8800	170	130	40	2400	550	55200	47100	1700	1800
3	Pazña	150	270	<dl	<dl	620	790	38000	53000	60	1000
4	Huancane	30	20	<dl	<dl	200	540	25500	27000	60	270
5	Jachusuma	30	20	<dl	<dl	500	600	12000	0	60	20
6	Tacagua	30	20	<dl	<dl	430	650	14300	25400	40	50
7	Huari	50	30	<dl	<dl	430	630	13200	19400	60	300
8	Poopó S.	250	270	20	30	200	600	3000	16500	100	200
9	Poopó C.	230	240	20	20	140	450	3900	3900	30	30
10	Poopó N.	250	280	20	20	140	500	15000	4000	20	30
11	Cortadera	150	20	<dl	<dl	350	600	5500	16800	370	50
12	Sevaruyo	50	20	<dl	<dl	280	600	4100	28000	50	80
13	Marquez	50	20	<dl	<dl	400	660	24000	7400	50	150
14	Lacajahuira	50	40	<dl	<dl	270	300	11000	17100	100	350
15	Coaquira	30	20	<dl	<dl	210	550	4800	33600	70	250
16	Pte Toledo	20	20	<dl	<dl	500	600	2000	16500	30	20
17	Caracilla	50	20	<dl	<dl	570	570	16500	19600	100	60
18	Pte Español	120	40	<dl	<dl	570	580	8000	21100	60	170
19	Uru-Uru L.	90	50	<dl	<dl	600	630	39000	34000	180	250
20	Chuquiña	190	50	<dl	<dl	540	700	30000	33000	170	70
									13500		

PS: Período seco; PL: Período de lluvias; SS: Sólidos Suspendidos; dl: límite de detección

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

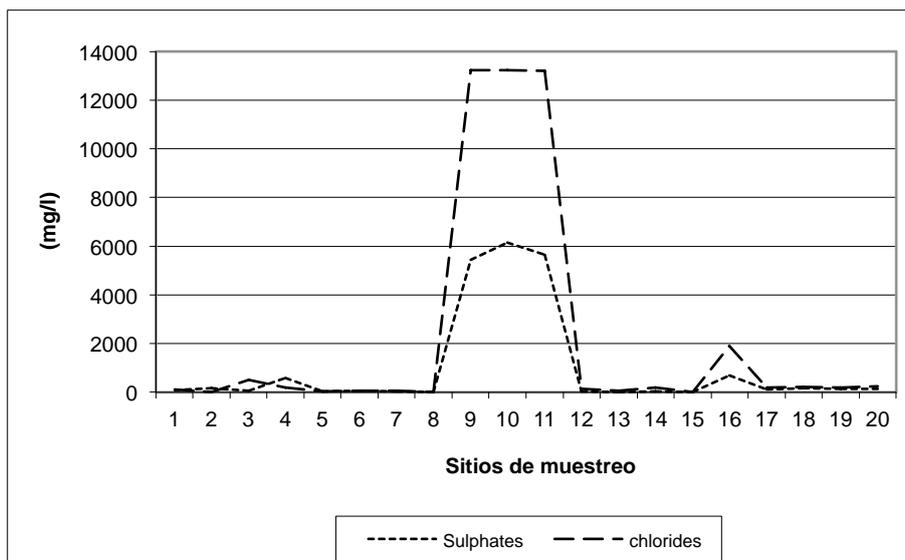


Figura A3-9. Concentraciones de sulfatos y cloruros en un periodo de inicio de las lluvias donde se observan las mayores concentraciones en las muestras correspondientes al Lago Poopó. (García 2006).

La cantidad de sólidos en suspensión del río Poopó se incrementa durante el periodo de lluvias, por lo cual también se aumenta el transporte de plomo al lago. En relación a las otras muestras de aguas superficiales, las concentraciones de plomo son más elevadas la época de lluvias, quedando en la época de estiaje valores de plomo menores al límite de detección con excepción del punto de muestreo correspondiente a Chuquiña.

El lago Poopó es el único cuerpo de agua con concentraciones bastante elevadas de plomo en el período de estiaje ($0,24 - 0,26 \text{ mg l}^{-1}$), donde obviamente se incrementa en el período de lluvias a $0,5-0,53 \text{ mg l}^{-1}$. Este incremento en época húmeda puede ser explicado como en el caso del sulfato, es decir por un incremento en el flujo de transporte de plomo proveniente de los ríos por un aumento de sus caudales. En la época seca, el plomo disminuye su concentración debido a procesos inorgánicos que tienen lugar en la ribera del lago como precipitación de sales de plomo y también por procesos orgánicos como una adsorción de este elemento por plantas acuáticas como macrófitas, que puede tener concentraciones de hasta 900 mg kg^{-1} (García 2006).

En relación al cadmio, en todas las muestras de aguas superficiales, la concentración de este elemento durante la época seca dentro del Lago Poopó se encontró entre los $3,0-3,5 \text{ mg l}^{-1}$), sin embargo durante la época de lluvias, las concentraciones fueron menores al límite de detección a excepción del río Poopó donde la concentración de cadmio fue de $0,01 \text{ mg l}^{-1}$.

Es bastante interesante el observar las muestras que corresponden al área no afectada por la minería (muestras 11-13, 15-20), los valores de los diferentes elementos son en general, menores al límite de detección ($0,015 \text{ mg l}^{-1}$ para Pb, $0,01 \text{ mg l}^{-1}$ para As, $0,005 \text{ mg l}^{-1}$ para Cd, $0,01 \text{ mg l}^{-1}$ para Fe y $0,012$

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

mg l⁻¹ para Zn.

Esto indica que casi todo el cadmio transportado estaría en forma disuelta. En relación a las muestras de sedimentos no se observa una interacción directa entre la fase acuosa y el sedimento, la reducción drástica de cadmio en el Lago Poopó durante el período de lluvias no podría deberse a un proceso de sedimentación, sino más bien a otros mecanismos que deben ser estudiados, como la interacción de microorganismos.

El cadmio en las muestras de plantas acuáticas mostró valores de 20 mg kg⁻¹(García 2006).

Las concentraciones de arsénico disminuyeron durante el período de estiaje en los ríos Sora Sora y Poopó, mostrando un comportamiento contrario al de los otros ríos donde los valores se incrementan durante el período de lluvias. En la cuenca, de modo general, las concentraciones de arsénico son constantes o incrementan durante el período de lluvias en las muestras de sedimentos a excepción del río Poopó (Tabla A3-4).

Los ríos del sur y sudeste de la cuenca del Lago Poopó, ríos no afectados por las actividades mineras (muestras 11-13, 15-20), tienen de modo general las concentraciones más elevadas de arsénico, incluso mayores a las muestras del norte y noreste, principalmente en las muestras correspondientes a las aguas subterráneas, debido a una disolución natural de los minerales con contenido de arsénico ya que la geología de esta región muestra depósitos polimetálicos constituidos en esta zona, los cuales liberan al ambiente el arsénico no solamente por la lluvia sino también por oxidación microbiana de la arsenopirita. Los valores más elevados que se registraron en la época de lluvias son (0,01 – 0,38 mg l⁻¹) y en la época seca están en el rango de 0,01-0,05 mg l⁻¹.

El arsénico correspondiente a las muestras del Lago Poopó tiene valores entre 0,20 – 0,22 mg l⁻¹) que se registraron en el período de estiaje y valores menores durante el período de lluvias, siendo esta diferencia el principal contraste con el plomo en las muestras del lago. Se observa también que una significativa cantidad de arsénico es adsorbida por sedimentos y plantas, considerando además que la solubilidad del arsénico es más elevada que la solubilidad del plomo en condiciones alcalinas, por tanto, durante la evaporación del lago, en la época seca el arsénico se mantiene en solución mientras que el plomo queda precipitado.

En contraste con los elementos mencionados anteriormente, el hierro y el zinc, no mostraron variaciones estacionales significativas. Los valores más elevados fueron encontrados en el río Sora Sora y el río Pazña, situados al noreste de la cuenca del Lago Poopó, ríos que se encuentran fuertemente influenciados por intensas actividades mineras y por tanto por drenajes ácidos de mina donde los valores de pH se encuentran en un rango de 2.2 – 4.0.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

Estos pH bajos llevan a un incremento en la solubilidad del hierro. Así, las concentraciones encontradas tienen valores entre 1.0 - 4.8 mg l⁻¹, de modo que este elemento es transportado en forma disuelta hacia el Lago Poopó. Aquí, los valores alcalinos del lago (8,2-8,6) disminuyen la solubilidad del hierro, dando lugar a la formación de fases sólidas minerales, reduciendo las concentraciones entre 0,1 – 0,2 mg l⁻¹ (valor que es aproximadamente constante a lo largo del año). En algunos puntos de muestreo, el hierro contenido en los sedimentos se debe probablemente a los intensos períodos de lluvia que transporta grandes cantidades de minerales, situación contraria a la del período seco.

A3.4.3 AGUAS TERMALES

Los flujos naturales de agua que surgen del interior de la tierra, son denominados manantiales. En nuestra región existen varios manantiales; específicamente de aguas calientes llamados “Aguas Termales”. Su origen es ígneo, donde las aguas son calentadas por el contacto con cuerpos ígneos presentes en el área, las cuales buscan conductos como fallas y fracturas existentes en las rocas, para emerger (Llanque, 2005).

La composición de estas aguas varía según la naturaleza del suelo o la roca de su lecho. Ellas contienen sales minerales o gases que pueden tener efectos diferentes sobre el cuerpo humano que los que tiene el agua corriente.

La importancia del recurso termal y su amplia gama de aplicaciones en actividades económicas de diversa índole, en su mayoría relacionadas al turismo y a la medicina, debería impulsar la inversión de capitales, para la promoción y difusión de los mismos.

La existencia de agua caliente, ha hecho que los usos que se le dan sean diversos, desde el aseo personal, el lavado de ropa y lana, hasta la cocción de alimentos o simplemente como lugar de recreación y esparcimiento.

Se pudo observar en la mayoría de los lugares, similitud en los ecosistemas existentes en torno a las aguas termales, variando según la geografía que presenta cada una de éstas. Una característica particular de estos lugares, es la biodiversidad, puesto que en la mayor parte de estas zonas, se tiene la presencia de bofedales y otros, sobre todo en las riberas de los ríos (Llanque, 2005).

Cabe destacar que la provincia Avaroa posee la mayor cantidad de fuentes termales en el Departamento de Oruro y se pudo evidenciar la presencia de 35 fuentes termales, distribuidas en 24 zonas.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

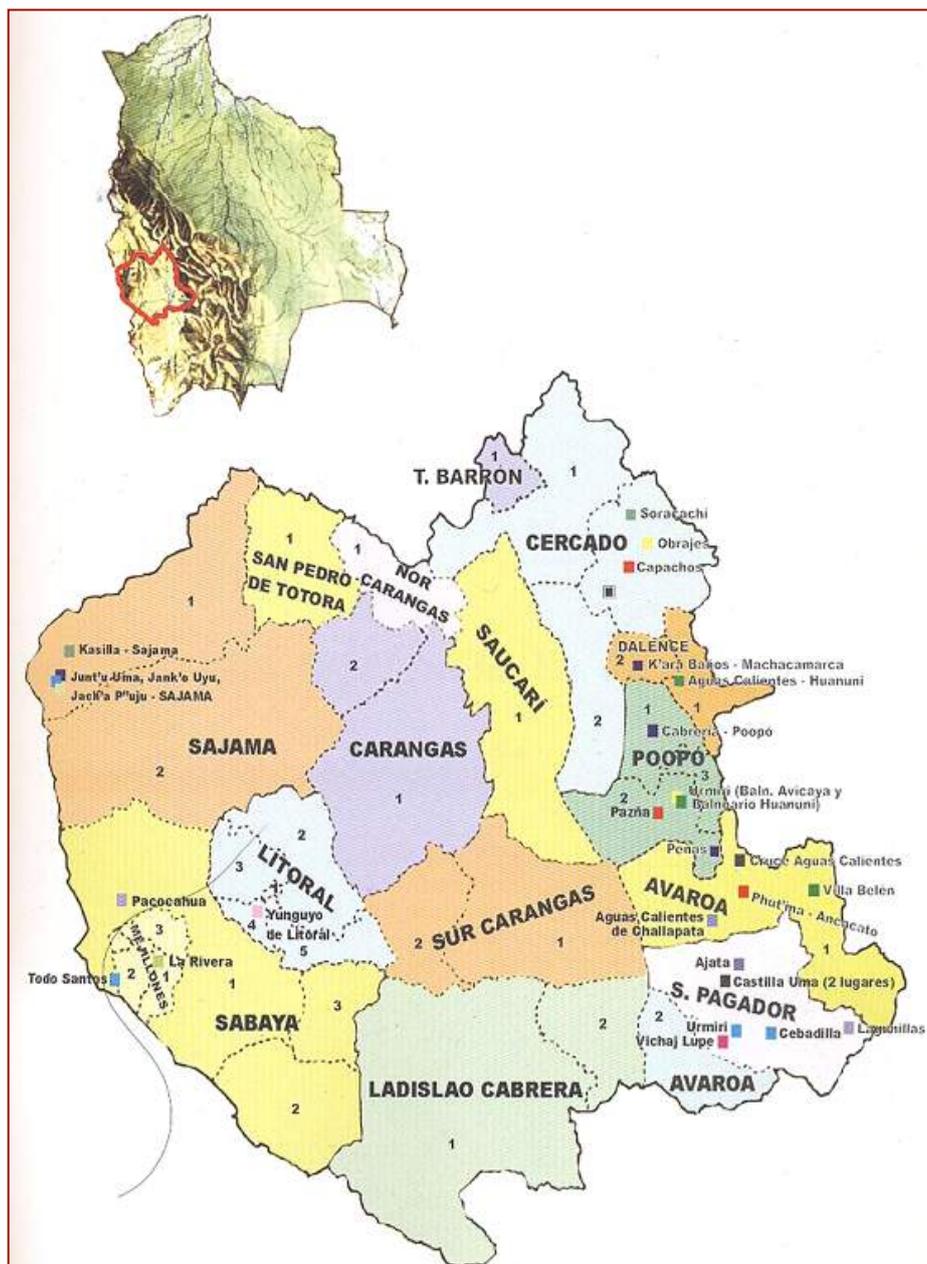


Figura A3-10. Ubicación de las termas en el departamento de Oruro (Llanque 2005)

Dentro de sus características físicas referentes a sus temperaturas registradas, se clasifican en: A) Hipotermiales ($T \geq 40^{\circ}\text{C}$): Soracachi, Capachos, Cabrera – Poopó, Avicaya, Pazña, Aguas Calientes Challapata. B) Mesotermiales ($40^{\circ}\text{C} > T > 30^{\circ}\text{C}$): Machacamarca, Aguas Calientes Huanuni, Bañerario Huanuni.

Sus componentes químicos, por la falta de datos no se pudieron caracterizar los constituyentes fundamentales menores y trazas de estas aguas. Según datos aislados, los elementos mayores tendrían la siguiente composición: sulfuradas, cloruradas, bicarbonatadas, sulfatadas, ferruginosas, carbónicas o gaseosas y radioactivas o radónicas.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

Conductividad: Este parámetro determina de manera preliminar la calidad de las aguas clasificadas en: a) Aguas Dulces: Aguas Calientes Huanuni, b) Salobres: Balneario Huanuni, Pazña, Avicaya, Soracachi, Capachos, y c) Salinos: Machacamarca, Cabrería Poopó, Aguas Calientes Challapata.

Dureza: La dureza que presentan estas aguas sobrepasan los rangos normales, ubicándose dentro de las muy duras. Esto se debe a la presencia de rocas calcáreas en el sector, y se clasifican en: a) Ligeramente muy duras: Soracachi, Capachos, b) Medianamente muy duras: Avicaya, c) Altamente muy duras: Machacamarca, Cabrería Poopó, Balneario Huanuni y Pazña, y d) Muy altamente duras: Aguas Calientes Challapata (Llanque et al).

Iones Dominantes: Dentro del análisis hidroquímico superficial de estas aguas, se determinó que existe una fase muy marcada de aniones cloruros Cl^- en relación a los cationes sodio Na^+ , que a medida que las concentraciones de este anión crecen, la calidad del agua se vuelve más salina. Ocurre lo contrario cuando las concentraciones de los cationes sodio Na^+ son superiores a las del anión Cl^- , se tiene una calidad de agua dulce (Aguas Calientes Huanuni).

Tabla A3-5. Análisis Químico de las aguas termales (Llanque 2005).

No.	Ubicación	Temp. °C	pH	Cond.	Alcalinidad mval/l	Cl mg/l	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Dureza mg/l	NO3 mg/l
1	Capachos	54,00	7,63	3650,00	13,70	879,40	716,90	32,67			133,50	-0,50
2	Obrajes	72,00	-	-	-	-	-	-			-	-
8	Pazña	56,75	7,86	9240,00	7,00	2988,10	1733,80	127,10			567,10	
3	Balneario Huanuni (Urmiri)	37,00	7,58	4200,00	6,20	1268,80	782,20	73,83			477,90	
4	Balneario Avicaya (Urmiri)	55,00	7,36	5880,00	8,55	1758,80	943,30	96,46			345,10	
5	Cabrería Poopo	55,50	7,45	14710,00	6,30	5136,30	3188,40	187,40			615,10	-0,50
6	K'ara baño (Machacamarca)	38,50	7,54	26980,00	11,60	9310,00	4479,10	259,90			682,00	0,58
7	Q'oñi Yaku (Soracachi)	71,50	8,29	2260,00	20,40	227,50	542,60	22,54			173,20	0,60
8	Kasilla Sajama	47,00	7,65	2080,00	6,15	424,40	373,70	373,70			287,80	-0,50
9	Juntu Uma Sajama	82,00	8,09	5510,00	3,60	1601,30	1157,00	128,00			137,30	0,77
10	Janko Huyo Sajama	47,00	7,63	1818,00	5,30	367,50	328,90	59,69			281,90	0,89
11	Aguas Calientes Huanuni	33,00	8,44	1294,00	2,80	199,50	232,30	15,40			154,90	1,34
12	Aguas Calientes Challapata	49,00	7,69	63450,00	8,60	21087,50	14140,00	501,10			2272,10	0,64
13	Phut'ina (Ancacuto)	42,50	7,69	23050,00	6,80	7385,00	4457,30	134,14			320,10	0,32
14	Cruce Aguas Calientes	59,00	6,75	1715,00	4,40	274,80	295,00	270,60			229,50	0,69
15	Orkoruma (Castilla Uma)	56,00	7,52	2370,00	5,80	411,30	394,90	29,56			161,60	0,88
16	Kachuruma (Castilla Uma)	65,00	7,93	3320,00	5,25	805,00	588,70	76,62			208,50	0,81
17	Malliri (Peñas)	44,00	7,41	4720,00	8,58	1290,00	896,00	69,90	91,49	10,82	273,00	
18	Cebadilla (Huari)	21,00	7,54	8330,00	10,10	2550,60	1579,50	138,80	87,08	3,83	233,20	
19	Kañuacunka (Lagunillas)	71,50	7,73	750,00	5,80	19,30	129,50	6,50	45,75	17,29	185,50	
20	Challuma (Villa Belen)	67,00	7,47	4860,00	8,20	1264,40	958,20	94,10	84,46	12,78	263,50	
21	Yunguyo de Litoral	24,00	6,56	1465,00		350,86	220,80	22,10			103,40	0,62
22	La Rivera	29,00	7,48	890,00		106,32	77,60	13,40			301,20	-0,05
23	Aguas Calientes (Todos Santos)	35,00	7,35	865,00		65,56	102,80	21,40			225,40	-0,05
24	Pacocahua	40,00	6,96	1371,00		175,43	168,90	17,90			303,20	-0,05

A3.5. CONCLUSIONES

En este estudio se han podido diferenciar procesos de influencia en los cambios de las concentraciones de los metales pesados como: la variación estacional que afecta directamente a los

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

valores de As, Pb, Cd, Fe, y Zn; el transporte de éstos por el incremento en el flujo de los ríos, además de las interacciones de las plantas acuáticas en los cuerpos de agua y principalmente en el lago Poopó, sin dejar de lado el importante rol de los microorganismos en la oxidación de minerales como la arsenopirita.

Los valores más elevados de plomo se encontraron en la época de lluvias, sin embargo el cadmio mostró un comportamiento diferente donde las mayores concentraciones se identificaron en la época seca. Respecto al arsénico, las concentraciones más elevadas de este elemento están en las muestras que corresponden al Lago Poopó en el período seco. Sin embargo en los ríos, principalmente aquellos no influenciados por las actividades mineras, los valores más elevados de arsénico se presentan en la época de lluvias, indicando que en ambas regiones, tanto la región influenciada por la minería como la región que únicamente tiene contaminación natural, existe una movilidad del arsénico por la oxidación de arsenopirita y la influencia de microbios y plantas.

Tanto el hierro como el zinc no mostraron una intensa variación estacional. Se identificó que el caudal de los ríos es un factor muy importante ya que transporta arsénico y metales pesados de los ríos hacia el Lago Poopó en un orden de magnitud mucho mayor lógicamente en la época de lluvias.

Los cambios estacionales en la interacción agua – sedimento son moderados y en las muestras de sedimento analizadas las concentraciones de As, Pb, Cd, Fe y Zn tienen concentraciones similares tanto en la época seca como en la época de lluvias.

Este estudio representa uno de los primeros análisis de la interacción y variación estacional de los elementos mencionados en aguas superficiales en la cuenca del lago Poopó, obviamente otros mecanismos y factores son importantes a ser considerados también y del mismo modo han sido poco estudiados como:

(1) Evaporación: proceso simple típico de la época de lluvias que puede proporcionar una explicación significativa en el incremento de las concentraciones de arsénico en el período seco en las muestras del Lago Poopó. Sin embargo, este proceso viene relacionado con la acumulación de este elemento en plantas acuáticas y la precipitación por microorganismos. Este mecanismo explica también la reducción de las concentraciones de sulfatos en los ríos en la época de lluvias, causado por una disolución y dilución por efecto de las precipitaciones

(2) Disolución: en la época de lluvias de las sales precipitadas en los cuerpos de agua, la disolución de las sales de sulfato y cloruro en las riberas de los ríos comienzan a disolverse desde el inicio del periodo lluvioso, cuando las precipitaciones se incrementan aumentando también la disolución de estas sales y por el incremento en el caudal de los ríos, estas son transportadas al Lago Poopó, incrementando la concentración de sulfatos en este punto.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

(3) Incremento en la disolución de sólidos superficiales por el agua de lluvia, que incrementa la erosión y el transporte de sedimentos en la época húmeda. Esto explica las elevadas concentraciones de arsénico observadas en el periodo lluvioso en los ríos del sur, sureste y norte de la Cuenca del Lago Poopó. Además explica también las elevadas concentraciones de plomo en los ríos durante la época de lluvias.

(4) Acumulación de elementos en las plantas acuáticas y la influencia de los microorganismos. Lo cual explica la disminución de las concentraciones de cadmio desde aproximadamente 3.0 mg l^{-1} en la muestra correspondiente al lago Poopó hasta valores por debajo de los límites de detección en el período lluvioso.

(5) El incremento de carga de sedimentos de los ríos y la subsecuente disolución parcial. Lo cual explica la variación de flujo estacional de arsénico y metales pesados (fijados en los sedimentos de los ríos) dentro del Lago Poopó, los cuales acumulan más arsénico y metales pesados con el incremento de la carga.

(6) Cambios en la solubilidad y el pH: no tiene cambios estacionales significativos principalmente en las muestras del Lago Poopó. Sin embargo esto se hace notorio en los ríos influenciados por actividades mineras, donde la variación estacional se hace bastante considerable.

Finalmente, este estudio representa un diagnóstico principalmente de la calidad de las aguas en una de las regiones más deprimidas de Bolivia a partir del cual las poblaciones circundantes tienen la opción de conocer el grado de contaminación existente en los cuerpos de agua que disponen para su propio consumo, para los animales y riego, adicionalmente, tienen la posibilidad a través de estos resultados de poder escoger sitios de agua superficial y subterránea donde los valores de elementos tóxicos son menores a los límites de detección, lo cual les asegura su consumo.

Adicionalmente se dan algunas posibilidades económicamente viables de remediación, sin embargo, este campo está abierto a varias futuras investigaciones así como el estudio del arsénico y los metales pesados en subcuencas con influencia minera que no han sido estudiadas y donde las poblaciones desconocen la calidad del agua que disponen día a día para su propio consumo.

A3.6. VACÍO DE INFORMACIÓN Y RECOMENDACIONES

La contaminación ambiental del área del Sistema TDPS que se detectó (Puno, Cohana, Oruro, Poopó y Uru Uru entre otros), indica un sistema en equilibrio inestable con tendencia hacia una degradación irreversible si no se interviene con acciones de control y de prevención. Por este motivo a continuación se efectúan algunas recomendaciones necesarias para mantener el sistema en

equilibrio:

- Agilizar la **promulgación de la Ley de Aguas**.
- Hacer **cumplir el nuevo Código de Minería**, en lo referente a control y tratamiento de afluentes contaminantes y exigir que todas las empresas mineras (estatales y privadas) a través de las Autoridades Ambientales Competentes, cumplan con el Reglamento en lo concerniente al uso y protección del recurso agua; ya que estas empresas constituyen una de las fuentes principales de contaminación.
- Efectuar un **monitoreo regular en los puntos conflictivos detectados**, no solo de las aguas, sino también del plancton y peces del Lago Poopó, a fin de cuantificar la incorporación de estos elementos tóxicos en la red trófica.
- Se debe promover la **actualización del monitoreo hidroquímico en la cuenca del Lago Titicaca y del Río Desaguadero**, ya que la información integral de esta área data de hace más de 15 años, a fin de poder realizar comparaciones y ver su evolución espacio temporal.
- Para una evaluación completa sobre las características de las aguas termales, se recomienda realizar un **estudio hidrogeoquímico detallado de cada sector donde afloran las aguas termales**, y completar el análisis químico en relación a cationes, aniones y elementos traza (metales pesados), especialmente en el sur del Sistema TDPS.
- Continuar el **monitoreo hidroquímico en forma regular en la cuenca de los lagos Uru Uru y Poopó**, utilizando la red propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) a través del Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VMRH y R), a fin de armonizar y homogenizar la información que se genere a nivel de cuencas hidrográficas y poder fortalecer el banco de datos sobre calidad de aguas.
- **Aplicar regularmente la herramienta ICA (Índice Calidad del Agua)** propuesta, como herramienta de gestión de los recursos hídricos y también para poder realizar predicciones que optimicen su uso y su calidad.
- Realizar **análisis regulares (sistemáticos) de los sedimentos de los lagos Uru Uru y Poopó y de sus afluentes**, a fin de visualizar el origen, evolución y/o acumulación de varios elementos pesados.
- **Cuantificar regularmente la salinidad de las aguas superficiales y el transporte de sedimentos en toda la cuenca**, haciendo énfasis en la región sur, donde hay una continua colmatación de los cauces del Río Desaguadero.
- Prever **monitoreos regulares (fisicoquímicos y bacteriológicos) a las salidas de los sistemas de desagüe en Oruro**, especialmente en la zona Sur, a fin de programar intervenciones de saneamiento.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

- Profundizar el **estudio sistemático de las aguas subterráneas** como alternativa de consumo, para conocer sus límites estacionales (climáticos) asociados a los cambios del nivel freático.
- **Incentivar a nivel rural los cursos o talleres de capacitación y conocimiento** en lo referente al uso y manejo del recurso agua, que comprenderá la higiene y cuidado en su consumo.
- **Analizar el efecto general del dragado flotante** u otro sistema empleado, sobre las aguas, materia en suspensión y traslado de masas de tierras o suelos.
- **Realizar acciones preventivas en regiones o ciudades con potenciales riesgos de contaminación** por ejemplo las bahías de Copacabana y de Cohana (basura, efluentes urbanos, industriales, turismo y saneamiento básico).

A3.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABTEMA & UOB. 2000. Estudio y Evaluación de Totorales en las Cuencas del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Salara de Coipasa .Sistema TDP. La Paz, Bolivia. 76 p.
- Aguirre C., Miranda C. & Verhasselt Y. 2011. Contribución al conocimiento del sistema del Lago Titicaca. Memorias del Simposio Internacional sobre el sistema del lago Titicaca; Academia Nacional de Ciencias. 449 p.
- ALT 1999. Macro zonificación Ambiental del Sistema TDPS, La Paz, Bolivia. 59 p.
- ALT 2000. Evaluación de la Gestión de Riego Tradicional con las Aguas del río Desaguadero en la Región de Chilahualla y el Choro. 26 p.
- ALT 2000. Evaluación del impacto del riego con aguas del río Desaguadero sobre la salinización, Sodificación y acumulación de metales pesados en suelos y vegetación. Sectores Chilahualla y El Choro. Anexos del Informe Principal. 117 p.
- Ampuero I. 1999. Dimensionamiento de una laguna de estabilización para el tratamiento de aguas residuales urbanas en la población de Huanuni. Ingeniería Química -FNI – Tesis Licenciatura - UTO – Oruro . 111 p.
- Arce C. & Álvarez A. 1990. Totoras como descontaminante de aguas en movimiento. Rev. Bol. Quím. La Paz – Bolivia 9: 3 – 8 p.
- Argollo J. & Boero C. 2005. Hydrological impacts of the works of regulation in superficial water transfers on the Altiplano basin - Bolivia. La Paz, Bolivia. 37p.
- Argollo J. & Philippe M. 2001. Lake Quaternary climate history of the Bolivian Altiplano, Quaternary International. La Paz – Bolivia 72: 37-51 p.
- Min B.S. 1987. Algunos Aspectos de Conservación del Recurso Pejerrey en el Lago Poopó. 11 p.
- Beveridge M. 1983. Un Estudio de los Niveles de Metales Pesados en el Lago Poopó, Bolivia. Institute of Aquaculture, University of Stirling, Escocia. 35 p.
- Beveridge M. & Coutts R. 1983. Aspectos de Contaminación del Lago Poopó con Metales Pesados. Universidad de Stirling - Escocia. 44 p.
- Bocángel D. 1999. Efecto de la contaminación de las aguas del lago Uru Uru sobre las comunidades de Macro invertebrados Acuáticos. Carrera Biología UMSA. La Paz, TesisLicenciatura. 137 p.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

- Calizaya A. 2009. Water Resources Management Efforts for Best Water Allocation in the Lake Poopó Basin, Bolivia. Department of Water Resources Engineering Lund Institute of Technology - Lund University, Doctoral Thesis., Suecia. 149 p.
- Capriles O. 1997. Historia de la Minería Boliviana, Ed. Ramin, La Paz, Bolivia. 218 p.
- Carmouze J.P., Arce C. & Quintanilla J. 1977. La Regulation hydrique des lacs Titicaca et Poopó. Pub.Cahier ORSTOM, Serie Hydrobiol. Vol. XI - 4: 269 - 283 p.
- Carmouze J.P., Arce C., Quintanilla J. & Miranda Y. 1978. Circulación de materia: agua – sales disueltas, a través del sistema fluviolacustre del Altiplano: La regulación Hídrica e Hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó. Cahier ORSTOM, ser.geol., Vol. X, N 1: 49 – 69 p.
- Carmouze J.P., Arce C. & Quintanilla J. 1981. Régulationhydrochimique du lac Titicaca et l'hydrochimie de sestributaires. Rev. Hydrobiol. trop, La Paz - Bolivia Vol. 14 - 4: 329 - 348 p.
- Castro J. & Guzmán M. 2003. Evaluación de Nitratos y Fosfatos en afluentes de los lagos Poopó y Uru Uru; Potosí, Bolivia. VI Congreso Boliviano de Química – Potosí. 1-4 p.
- Chura J. 2010. Determinación de la Cobertura Vegetal y Capacidad de Uso de los Suelos del Municipio de Poopó. Facultad de Agronomía. La Paz, Bolivia, Universidad Mayor De San Andrés. Tesis de Licenciatura. 193 p.
- Dames & Moore 2000. Estudio Hidrogeológico de la Mina San José y los acuíferos que suministran agua a la ciudad de Oruro. Informe Final 2: Vías de Transporte de Riesgo: Hidrología Regional, PMAIM - SUBPROYECTO Nº 7. 192 p.
- Dávalos A. & Vargas J. 2006. ¿Quién cuidará de los lagos Uru Uru y Poopó? Centro de Investigación y Servicio Popular (CISEP) – Oruro. 57 p.
- Dejoux C. & Iltis A. 1992. Lake Titicaca, A Synthesis of Limnological Knowledge. Monographiae Biologicae 68, 561 p.
- DIPGIS 2009. La Química de la Cuenca del Poopó (primera parte). DIPGIS, Vol. 1, La Paz. 250 p.
- DIPGIS & UMSA 2006. Intercambio de experiencias en la región de los lagos Uru Uru, Poopó y sus áreas de influencia. Memoria del seminario taller, La Paz, Bolivia. 202 p.
- Ekdahl A. (Ed.) 2007. Water Utilization in a River Basin in the Lake Poopó Region of Bolivia: Problems and Conflicts. Division of Water Resources Engineering, Department of Building and Environmental Technology - Lund University, Lund, Suecia.56 p.
- García M. & Bengtsson B. 2010. On the distribution of saline groundwater in the Poopó Basin, Central Bolivian Highland. VATTEN 66:, Lund, Suecia. 199–203p.
- García M. , Bengtsson L. & Persspn K. 2006. Transport of Arsenic and Heavy Metals to Lake Poopó – Bolivia Natural Leakage and Anthropogenic Effects. Doctoral Thesis, LundUniversity, Suecia. 103 p.
- Guerrero E., De Keiser O. & Córdoba R. 2006. La Aplicación del Enfoque Ecosistémico en la Gestión de los Recursos Hídricos – Análisis de Estudios de caso en América Latina: Aplicación del Enfoque Ecosistémico en la cuenca del Lago Titicaca. UICN – Sur y Mesoamérica y PNUMA; Quito – Ecuador. 17 – 18 p.
- Guisbert E. 2008. Transporte de metales pesados en aguas superficiales de la subcuenca Antequera - Oruro- Bolivia. CLASS. Cochabamba, UMSS. Tesis de Maestría. 75 p.
- Guyot J. & Gumiel D. 1990. Premièresdonnées sur l'hydrogeologie et l'hydrogeochimie du Nord de l'AltiplanoBolivien. RevueHydrogéologie Nº 3: 159 – 164 p.
- Guyot J & Roche M. 1988. Cargas en suspensión, salinidades y transporte de materia sobre el

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

- Altiplano Boliviano. Pub. PHICAB IIQ - ORSTOM - SENAHMI; La Paz – Bolivia. 20 p.
- Jóvenes & Ecologistas 2008. Situación ambiental de la cuenca baja río Desaguadero, lagos Uru Uru y Poopó. CEPA, Potosí, Bolivia. 40-41p.
- Llanque V., Cayetano M., Taquichiri L. & Zabala M. 2005. Junt'uma, Aguas termales en el Departamento de Oruro: Un potencial ignorado. Oruro, Bolivia. CEPA. 140 p.
- MA & VCRH 2007. Plan Nacional de Cuencas (PNC), Marco Conceptual y Estratégico (versión 01).
- Mamani C. 2009. Estudio Ambiental sobre Metales Pesados en la Microcuenca de San Juan de Sora Sora, UTO, Oruro - Bolivia. 170 p.
- Mariaca J. 1985. Balance hídrico superficial, Cuenca del Lago Poopó y los salares de Uyuni y Coipasa. Ingeniería Civil. La Paz, Bolivia, Universidad Mayor de San Andrés. Tesis Licenciatura. 85 p.
- MDSyMA & FONAMA 1994. Uso y Aprovechamiento de las Aguas del lago Titicaca. Memorias del Simposio sobre el lago Titicaca, Pub. Prefectura Depto. La Paz; Copacabana; La Paz – Bolivia: 121 – 126 p.
- MDSyMA & SNM 1996. Aspectos ambientales de los metales y metaloides en el sistema hidrológico del desaguadero, Oruro, Bolivia. 42 p.
- MDSyMA & SNM 1997. Hidrología del área de PPO, Oruro, Bolivia. 62 p.
- Mendizábal M. 2001. Evaluación, Rehabilitación y gestión ambiental de las Lagunas de Huari. Facultad Nacional de Ingeniería. Oruro, Universidad Técnica de Oruro. Licenciatura: 107 p.
- Mendoza D. 2009. Tratamiento de descontaminación de las aguas ácidas de la mina San José, aplicando un sistema combinado de Biorremediación Físicoquímico. DIMA – COMIBOL, La Paz, Bolivia. 43 p.
- Montes de Oca I. 1997. Geografía y Recursos Naturales de Bolivia, 3ª Edición, Edobol La Paz, Bolivia, 614 p.
- Montoya J.C., Amusquívar J., Guzmán G., Quispe D., Blanco R. & Mollo N. 2010. ThuskaUma: Tratamiento de Aguas Ácidas con Fines de Riego. PIEB, Investigación Ambiental; Oruro, Bol. 235 p.
- Montoya J. & Pérez M. 2009. Lago Uru Uru: Evaluación de la Calidad del Agua, Sedimentos y Totora. Oruro, UTO. 145 p.
- Niura A. & Ramos O. 2011. Evaluación Regional de los recursos sub superficiales de la subcuenca del Lago Poopó. La Paz. Rev. Bol. Quím. 28: 63 - 72 p.
- OLDEPESCA 1987. Descripción del lago Titicaca y su cuenca - Parte I. Evaluación de los recursos pesqueros del lago Titicaca, Lima – Perú. 184 p.
- OLDEPESCA 1987. Descripción del lago Titicaca y su cuenca - Parte II. Proyecto: Evaluación de los recursos pesqueros del lago Titicaca; pub. Nº 005. 357 p.
- OLDEPESCA 1987. La Química del lago Titicaca y su relación con el plancton. Proyecto: Evaluación de los recursos pesqueros del lago Titicaca; pub. Nº 004. 321 p.
- OPS & OMS 1985. Guías para la calidad de agua potable, recomendaciones. OPS, Washington USA 1: 136p.
- Ormachea M. 2010. Aplicación del Modelo Químico Visual Minteq para la Especiación de Arsénico Inorgánico en Aguas Subterráneas de la Cuenca del Lago Poopó. IIQ – UMSA La Paz, Bolivia, Universidad Mayor de San Andrés. Tesis de Licenciatura. 102 p.
- Orság V. & Miranda R. 2000. Evaluación del Impacto del Riego con Aguas del Río Desaguadero sobre la Salinización, Sodificación y Acumulación de Metales Pesados en Suelos y Vegetación. ALT. 44

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

p.

- Patureau N. 2008. Contaminación de Aguas Subterráneas en la Ciudad de Oruro - Bolivia y Posibles Soluciones para evitar más polución en el futuro. University Newcastle upon Tyne – Inglaterra. Newcastle, University Newcastle upon Tyne – Inglaterra. Tesis Maestría. 80p.
- Pillco R. 2007. Respuesta de los Lagos del Altiplano de Bolivia a las Variaciones Climáticas Estacionales y Anuales. LundUniversity – Suecia. 13p.
- Plan Piloto Oruro – 003 (PPO-3) 1993. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Swidish Geological. Hidrología del área del PPO, La Paz, Bolivia. 35 p.
- Portugal J. 2010. Los Urus: Aprovechamiento y manejo de recursos acuáticos. LIDEMA – KAS.; La Paz, Bolivia. 300 p.
- Quino I. 2006. Determinación de la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas en región norte y este del lago Poopó. Carrera Ciencias Químicas La Paz, UMSA. Tesis Licenciatura. 103p.
- Quino I. 2009. Modelo espacio temporal hidroquímico de metales pesados dentro de la cuenca Antequera en base a la actividad minera y agrícola. CLASS. Cochabamba, UMSS. Tesis de Maestría. 70p.
- Quino I. & Quintanilla J. 2011. Modelo Espacio – Temporal Hidroquímica de Metales Pesados dentro de la cuenca Antequera en base a la actividad minera y agrícola. Rev. Bol. Quím. La Paz – Bolivia 28: 52 – 62 p.
- Quintanilla J. 1985. Sinopsis de las características físico-químicas del lago Titicaca y Poopó - Bolivia. UniversitaDegliStudi Di Perugia; Rivista di Idrobiologia. 53p
- Quintanilla J. 1988. La Hidroquímica del lago Titicaca y su relación con el plancton. Actas del 2º simposio de la investigación Francesa en Bolivia; ORSTOM - IFEA - CNRS - INAN - IBBA - UMSA: 114 – 125p.
- Quintanilla J. 1994. Evaluación Hidroquímica de la cuenca de los lagos Uru Uru y Poopó. Seminario Taller Regional Sobre el Lago Poopó, UTO - Oruro - Bolivia . 15 p.
- Quintanilla J. & Coudrain R. 1995. Hidroquímica de las Aguas del Altiplano de Bolivia. IIQ – UMSA. 11 p.
- Quintanilla J. 2008. Agua subterránea para el desarrollo humano, problemas y cambios de países en desarrollo. 3er. Congreso Internacional de Agua Subterránea para el Desarrollo Sustentable, La Paz, Bolivia. Memorias. 11p.
- Quintanilla J., García M.E., Ramos O., Niura A., Lorini J., Peláez C & Rotting T. 2012. Síntesis del Diagnóstico Ambiental de la cuenca del Lago Poopó; Oruro – Bolivia. Pub. ASDI – DIPGIS – CEEDI – UMSA; La Paz – Bolivia. 144 p.
- Quintanilla J. & Lorini J. 1993. Sistema Hidrológico del Altiplano, Cuenca del Rio Desaguadero, Bolivia. Informe Final, Tomo I, UMSA, UTO, CEEDI, SENAMHI, Universidad Laval – Quebec. 172 p.
- Quintanilla J. & Marín R. 2002. Efectos ambientales sobre las pesquerías de los ecosistemas de los lagos Uru Uru y Poopó. Instituto de Ecología e Instituto de Investigaciones Químicas – UMSA. 37 p.
- Quintanilla J., Molina J., Lorini J. & Peláez C. 1998. Manifiesto de la Sociedad Civil sobre las Obras de Regulación del sistema TDPS (Puente Internacional – Río Desaguadero). Programa Inicial de Seguimiento Ambiental, Embajada Real de los Países Bajos; La Paz, Bolivia. 67 p.
- Quintanilla J., Ramos O., Niura A. & García ME. 2003. Distribución de metales pesados en aguas superficiales y sedimentos en la subcuenca de los lagos Poopó y Uru Uru, Bolivia. Memoria VI Congreso Boliviano de Química, La Paz, Bolivia. SOBOQUIM. Potosí, Bolivia. 7 p.

A-3 Hidroquímica de la cuenca endorreica del Altiplano (Sistema TDPS)

- Redwood S.D. 1987. The Soledad Caldera, Bolivia: A Miocene caldera with associated epithermal Au-Ag-Cu-Pb-Zn Mineralization: Geol. Soc. American Bull., 99,395-404 p.
- Ricaldi E. 2009. Halos de Contaminación de la Sub-Cuenca del Rio Antequera - Pazña Departamento de Oruro. Instituto de Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. 10 p.
- Ricaldi V. & Flores C. 1994. Políticas y estrategias ambientales para los recursos hídricos regionales. Seminario Taller Regional Sobre el Lago Poopó UTO – Oruro, Bolivia. 11 p.
- Risacher F. & Fritz B. 2001. Bromine geochemistry of Salar de Uyuni and deeper salt crusts, Central Altiplano – Bolivia. Chemical Geology 167, 373-392 p.
- Selander L. & Svan P. 2007. Occurrence and Distribution of Heavy Metals in Lake Poopó, Bolivia. Department of Chemical Engineering del Center for Chemistry and Chemical Engineering y el Department of Water Resources Engineering del Lund Institute of Technology, Lund, Suecia. Tesis Maestría. 78 p.
- SGyM 1999. Inventariación de Recursos Naturales Renovables (Hídricos) y No Renovables (Minerales e Hidrocarburos) del Departamento de Oruro. Boletín del Servicio de Geología y Minería La Paz, N° 24. 51 p.
- TYPSA & PROINTEC 2004. Diagnóstico del nivel de contaminación de los Recursos Hídricos del Lago Titicaca – Bolivia. CAF – Fase III, La Paz. 231 p.
- UNEP 1996. Diagnóstico Ambiental del Sistema Titicaca- Desaguadero- Poopó-Salara de Coipasa. Sistema TDP. Bolivia - Perú. Washington, USA. 223 p.
- UTO & FNI 2009. Neutralización de drenaje ácido de roca - DAR - combinando procesos de lixiviación y recuperación de cobre metálico, INFORME FINAL, Oruro, Bolivia. Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales 1: 62 p.
- UTO-MINCO & KOMEX 2005 – 2007. Evaluación ambiental del lago Poopó y sus ríos tributarios. Monitoreo del lago Poopó y sus ríos tributarios. FUND-ECO; La Paz, Bolivia. 193 p.
- WMO 1994. Guide to Hydrological Practices, N° 168, Geneva – Suiza. 75 p.



A-4

BALANCE Y PERSPECTIVAS DEL USO DE LA TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL SISTEMA TDPS

REVIEW AND PERSPECTIVES OF THE USE OF REMOTE SENSING FOR WATER RESOURCES RESEARCH IN THE TDPS SYSTEM

Jean Michel Martinez, IRD-GET, jean-michel.martinez@ird.fr

María del Carmen Mendoza España – WE_AMBIENTE & TECNOLOGÍA, Bolivia

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el estado actual de la hidrología satelital en el sistema TDPS (Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salares) mediante la información disponible de investigaciones realizadas en diferentes áreas o aplicaciones hidrológicas. La bibliografía reportada fue clasificada como científica y su disponibilidad desde el año 1998 proporciona una clara idea del desarrollo de la hidrología satelital en el sistema TDPS que corresponde a 14 años. Para alcanzar el objetivo planteado se consideraron aspectos como: 1) Las ventajas y limitaciones del uso de sensores remotos y potenciales aportes del uso de esta metodología; 2) Una revisión bibliográfica referida al uso de los sensores remotos en el sistema TDPS y la clasificación respectiva de esta información; 3) La evaluación de vacíos de información basada en la revisión bibliográfica; 4) Una propuesta de un plan de monitoreo espacial y temporal basado en el uso de sensores remotos.

PALABRAS CLAVE: APLICACIONES HIDROLÓGICAS, SENSORES REMOTOS, SISTEMA TDPS

SUMMARY

This document presents a detailed review of the studies dealing with remote sensing and the Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salares (TDPS) system since 1998. The works have been classified as a function of their

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

relevancy and of the different topics / parameters than can accessed through the use of satellite data. The first section introduces the advantages and limits of the use of remote sensing data for hydrology. The second section presents the analysis of the different works making use of remote sensing data that have been published on the TDPS system. Lack of information and gaps in knowledge are discussed and an integrated monitoring plan of the TDPS waters is proposed to strengthen environmental observation and modeling capacities.

KEYWORDS: HYDROLOGICAL APPLICATIONS, REMOTE SENSORS, TDPS SYSTEM

A4.1. INTRODUCCIÓN

La teledetección se define como la medición de las propiedades de un objeto en la superficie terrestre a partir de datos adquiridos de aeronaves y satélites. Por lo tanto permite obtener información de un objeto a distancia sin mantener contacto físico con él (Schowengerdt 2007).

Su estudio se fundamenta en la respuesta espectral de los diferentes materiales u objetos que se denomina firma espectral y la detección e identificación de estos son determinadas por cuatro tipos de resolución (Meneses & Netto 2001): 1) La *Resolución Espacial* se expresa como el tamaño del área mínima en el terreno correspondiente a cada elemento en la imagen, puede variar de 1 m hasta 1,1 Km. dependiendo de la plataforma y del sistema sensor. 2) La *Resolución espectral* se refiere al número de bandas espectrales del sistema sensor a ser utilizado que comprende la posición de las bandas en el espectro y el ancho de bandas. Ésta será mayor cuanto más bandas del espectro sea capaz de manejar. 3) La *Resolución Radiométrica* determina el detalle de la reflectancia de los objetos que son medidos por el sensor, en números digitales. 4) La *Resolución Temporal* representa el tiempo que tarda el satélite en tomar dos imágenes del mismo sitio. En los sistemas orbitales, el retorno del satélite al mismo punto varía de 12 horas a 25 días, conforme el sistema. Cuanto menos tiempo demore el satélite en pasar por el mismo sitio y captar la misma imagen, mayor resolución temporal tendrá. Esta capacidad de recoger la misma porción de terreno cada cierto tiempo hace de la teledetección una herramienta especialmente interesante para estudios multitemporales y de monitoreo.

Las principales aplicaciones del uso de los sensores remotos o de la teledetección son: Monitoreo y evaluación ambiental, monitoreo y detección de cambios globales, agricultura, exploración de recursos renovables naturales y no renovables, cartografía, vigilancia militar (Schowengerdt 2007). Sin embargo, sus aplicaciones en el campo de la hidrología han progresado considerablemente desde

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

1985, debido al desarrollo de sensores específicos (Tabla A4-1) utilizados en las siguientes aplicaciones hidrológicas: Temperatura de la Superficie terrestre y acuática, Humedad de la Superficie del suelo, Cobertura de Nieve y Hielo, Calidad de Aguas, Rugosidad del Paisaje, Cobertura de Vegetación y Uso de Suelos, Precipitación, Humedad, Evapotranspiración, Aplicaciones Radar, Hidrología General, Humedales y Modelación Hidrológica (Owe *et al.* 2001, Shmugge *et al.* 2003).

El objetivo de este trabajo es analizar el estado actual de la hidrología satelital en sus diferentes aplicaciones en el sistema TDPS a través de la calidad de información disponible.

Tabla A4-1- Sensores relevantes utilizados en aplicaciones hidrológicas. Adaptado de Schultz & Engman 2000.

Sensor	Aplicación
AMSR: Advanced Microwave Scanning Radiometer	Estimación de la humedad del suelo
ASAR: Advanced Synthetic Aperture Radar	Estimación del contenido de agua en la nieve
ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer	Estimación del albedo, temperatura superficial y emisividad
CMIS: Conical MW Imager Sounder	Medición de nieve, temperatura superficial terrestre, humedad del suelo
HYDROSTAR	Estimación de la humedad del suelo
MERIS: Medium Resolution Imaging Spectrometer	Para tratar con problemas de irrigación
MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer	Estimación de la cobertura de nieve diaria y máximo 8 días, programación de riego.
OrbView-4 (OrbView 2 y 3)	Monitoreo de calidad de aguas
PR: Precipitation Radar	Estimación de inundaciones, humedad del suelo
SMOS	Estimación de la humedad del suelo
VCL: Vegetation Canopy Lidar	Evapotranspiración, altura de la cubierta vegetal

A4.2. VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL USO DE LOS SENSORES REMOTOS Y POTENCIALES APORTES DEL USO DE LA METODOLOGÍA

El uso de los sensores remotos en los últimos años ha permitido el desarrollo de muchas ciencias debido a las ventajas (Chuvieco 2002, Schmugge *et al.* 2002, Platnick *et al.* 2003) que ofrece:

- Una visión panorámica y cobertura total de la superficie terrestre donde se obtienen imágenes de áreas inaccesibles.

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

- Homogeneidad en la toma de datos y proporciona un formato digital de las imágenes lo que facilita su procesamiento.
- Un amplio conocimiento del espectro proporcionando información de las radiaciones de las regiones no visibles (infrarrojo medio, térmico, microondas).
- Permite determinar los tipos de cobertura que existen sobre un terreno (vegetación, suelos, agua), proporcionando información continua acerca de su variación espacial y temporal.
- Presenta mayor accesibilidad a los conjuntos de datos espaciales y a la cantidad de productos. Por tanto, las diferentes resoluciones espaciales, espectrales, radiométricas y temporales permiten obtener series de datos que proporcionan estimaciones históricas facilitando el proceso de monitoreo.
- La información satelital además de reducir el tiempo invertido en las investigaciones reduce también los costos en comparación con el uso de las fotografías aéreas. En muchos casos, países que cuentan con satélites en órbita ofrecen información gratuita de algunas imágenes disponibles en los sitios web de sus respectivas agencias.

Sin embargo, el uso de sensores remotos también presenta ciertas limitaciones (Villa *et al.* 2009):

- Su uso en diferentes áreas de investigación es complementario a los métodos tradicionales, es decir que de ninguna forma los sustituye.
- Todo trabajo realizado con el uso de sensores remotos precisa de datos de campo para su calibración y validación.
- Gran parte de las imágenes no son accesibles o tienen costos elevados.
- La disponibilidad de datos de sensores multiespectrales puede ser afectada por Interferencias atmosféricas como nubes.
- Complejidad de las técnicas a utilizar y la capacitación de personal especializado.

El uso de sensores remotos puede ser implementado en el sistema TDPS en estudios de monitoreo espacial y temporal de:

- Fluctuaciones geomorfológicas de los ríos y tributarios de las cuencas.
- Uso de suelos en el sistema.
- Distribución y caracterización de la vegetación acuática (macrófitas) en las diferentes cuencas del sistema.
- Estudios de calidad de aguas.
- Estudios de variaciones de niveles de agua.

A4.3. REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA EXISTENTE REFERIDA AL USO DE LOS SENSORES REMOTOS EN EL SISTEMA TDPS

Como resultado de una exhaustiva revisión, la información bibliográfica reportada sobre la hidrología satelital en el sistema TDPS es reducida. La tabla A4-2 muestra la existencia de 14 trabajos, agrupados en siete áreas de interés en el campo de la hidrología y relacionados con el uso de sensores remotos. La mayoría de los trabajos fueron desarrollados en las áreas de *Aplicaciones radar*, *Humedales* y *Temperatura superficial*. La bibliografía existente corresponde a publicaciones científicas o documentos con base científica, desarrollados principalmente en la cuenca del lago Titicaca. Analizando el periodo de tiempo (1998-2012) en que fueron realizadas estas investigaciones podría inferirse el avance en el campo de la hidrología satelital en el sistema TDPS que correspondería a 14 años.

Tabla A4-2- Revisión de la bibliografía existente en diferentes áreas de la Hidrología Satelital para el sistema TDPS. CL: Capítulo de Libro, AC: Artículo Científico e In: Informe.

Área de interés	Nº de trabajos	Tipo de publicación	Año	Sistema TDPS
1) Aplicaciones radar (niveles de agua)	4	CL, AC, AC, AC	2010, 2011, 2012, (som.)	L. Titicaca, L.Titicaca y L. Poopó, L. Titicaca, TDPS
2) Precipitación	1	AC	2001	L. Titicaca
3) Humedad	1	AC	2005	L. Titicaca
4) Nieve	1	AC	1998	L. Poopó y S. de Coipasa
5) Humedales (Bofedales)	3	AC	2003, 2012	L. Titicaca
6) Hidrología general (Albedo planetario)	1	AC	2003	L. Titicaca
7) Temperatura superficial	3	AC, In	2002, 2004	L. Titicaca

También fue consultada la información procedente del II Simposio Internacional del lago Titicaca-TDPS, realizado en marzo de 2013. La Tabla A4-3 hace referencia a 5 trabajos (3 propuestas y 2 trabajos realizados) en el campo de la Hidrología satelital, en las áreas de *Modelación hidrológica* y

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

Calidad de aguas. La mayoría de estos trabajos fueron realizados en la cuenca del lago Titicaca y corresponden a resúmenes compilados en un documento preliminar.

Tabla A4-3- Revisión de la Información (resúmenes) del II Simposio Internacional del lago Titicaca-TDPS en dos áreas de la Hidrología Satelital para el sistema TDPS. PR: Propuesta, TR: Trabajo Realizado.

Área de interés	Nº de trabajos	Tipo de publicación	Año	Sistema TDPS
1) Modelación Hidrológica	1	PR	2013	TDPS
2) Calidad de aguas	4	2 PR, 2 TR	2013	L. Titicaca

La bibliografía existente es descrita de forma cronológica y resumida indicando la cuenca de estudio, el periodo, los datos espaciales utilizados (satélites o sensores) y resultados principales, además de hacer referencia al área de interés o aplicación hidrológica

Entre los primeros trabajos en hidrología satelital reportados para el sistema TDPS, se encuentra el estudio de Vuille & Baumgartner (1998) quienes realizaron un monitoreo temporal de las *nevadas* en la región del lago Poopó y salares, en 6 temporadas de invierno usando datos satelitales de NOAA/AVHRR. Ellos encontraron que las nevadas son más abundantes en el extremo sur del área investigada y en el lado occidental de los Andes. Por otro lado, Garreaud & Aceituno (2001) relacionaron la variabilidad interanual de la *precipitación* con el índice de convección en el altiplano usando datos de reanálisis y medidas de satélite de radiación de onda larga (OLR). Ellos concluyeron que el verano en esta región puede ser seco o húmedo dependiendo del patrón de circulación (este u oeste) de los vientos que asociado a un evento ENSO tiende a ser más seco, con vientos que provienen del oeste. Posteriormente (Wan *et al.* 2002a, Wan *et al.* 2002b) realizaron trabajos sobre la calibración de bandas del Infrarrojo Termal (TIR) de MODIS y la validación del producto LST (Land – Surface Temperature) de MODIS, utilizando datos de mediciones *in situ* de la *temperatura superficial* del lago Titicaca, debido a sus características geográficas y climáticas particulares. Los datos de la temperatura superficial terrestre de EOS MODIS de diferentes sitios de prueba (lagos, pastizales, nieve y campos de arroz) fueron recopilados en un informe sometido a la NASA por Wan (2004).

En el área de la *Hidrología general*, Veissid (2003) analizó las variaciones del albedo planetario en los años 1999 a 2001, en el Norte y Sud del océano Atlántico, en las ciudades de Brasilia, São Paulo, Recife y en el lago Titicaca. Obtuvo los datos de un experimento de celdas solares implementadas en el satélite brasilero (SCD2/MECB) y de un nuevo método de simulación numérica usando datos extraídos de imágenes GOES. Sus resultados reportaron la variabilidad climática en cada región. El mismo año, estudios sobre *Humedales* fueron realizados por Moreau *et al.* (2003) quienes estimaron

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

la biomasa de los bofedales y totoras relacionada al crecimiento estacional, en los humedales del sector este del lago Titicaca y de la cordillera de los Andes. Utilizaron índices de vegetación derivados de NOAA/AVHRR. En otro estudio, Moreau & Le Toan (2003) analizaron la variación espacial y temporal de la biomasa de los bofedales y totoras en los humedales del mismo sector, utilizando datos de satélite radar ERS-SAR.

Entre otros trabajos, Falvey & Garreud (2005) estudiaron el transporte de la *humedad* al altiplano (regiones norte y sur) y su variabilidad mediante datos de observación del experimento SALLJEX (South American Low Level Jet Experiment) y estimaciones del agua precipitable basadas en datos de GPS, imágenes MODIS y radar durante el verano austral (2002 – 2003).

Los trabajos más recientes se encuentran en el área de las *Aplicaciones radar*, como el de Crétaux *et al.* (2010) quienes estudiaron varios lagos continentales, entre ellos el lago Titicaca, donde realizaron mediciones de niveles de agua usando altimetría radar de los satélites Topex/Poseidon (T/P), Geosat Follow On (GFO) y Envisat, para un periodo de 10 años. Los resultados generaron una base de datos de alta precisión y demostraron los usos potenciales de la medición de los niveles de los lagos por teledetección en diferentes aplicaciones (p.e. balance hídrico) además de la importancia como herramienta para el monitoreo hidrológico. En la misma temática, Abarca del Río *et al.* (2012) analizaron la variabilidad de los niveles de agua en el sistema del Lago Poopó y el posible control de esta variabilidad por parte del Lago Titicaca. Ellos compararon los datos altimétricos mensuales de la base de datos generada para el Lago Titicaca (Cretaux *et al.* 2011) con datos mensuales de la superficie del agua del lago Poopó derivados de imágenes MODIS. Sus resultados indicaron que dicha variabilidad proviene de otras cuencas del sistema además del Lago Titicaca atribuida principalmente al incremento potencial del uso del agua (irrigación) a lo largo del río Desaguadero que conecta ambos lagos.

Actualmente Satge *et al.* (Sometido) realizaron una evaluación de la precisión de dos modelos SRTM v4 (Shuttle Radar Topographic Mission) y ASTER GDEM v2 (Modelo de Elevación Digital Global) sobre la cuenca del altiplano (TDPS) usando datos de ICESat / GLAS (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite/Geoscience Laser Altimeter System) para elaborar un nuevo modelo (DEM) corregido que proporcione mejor información de la elevación en la región.

Otro trabajo reciente en el área de *Humedales*, fue desarrollado por Otto *et al.* (2012) quienes analizaron la extensión espacial, distribución y composición de los *humedales* de altura de los Andes (HAWA en inglés) en el noroeste del lago Titicaca mediante imágenes MODIS, Landsat ETM+ y datos de terreno. Ellos reportaron una alta abundancia en la región diferenciando los subtipos de humedales perennes y temporales mediante índices espectrales (NDVI y NDII). También analizaron la

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

diferenciación hidrológica de los subtipos HAWA con respecto a la precipitación a través de MODIS y TRMM-3B43. Ellos reportaron una relación significativa entre los HAWA perennes y la nieve durante el invierno seco y entre los HAWA temporales y la precipitación durante el verano.

En esta revisión también se describe la Información sobre hidrología satelital compilada en el II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS realizado en marzo de 2013 en Puno, Perú. En el área de la *Modelación Hidrológica*, Satge (2013) propone desarrollar un modelo matemático usando datos espaciales para el sistema TDPS, comparando modelos numéricos de terreno, datos satelitales de lluvia, acompañados de datos de campo. Posteriormente se pretende realizar una modelación de tipo lluvia/caudal sobre un periodo de 30 años para caracterizar el comportamiento actual del agua y cuantificar impactos de explotación.

En el área de *Calidad de aguas*, Peña (2013) propone evaluar la experiencia australiana CSIRO Land & Water de los usos de información satelital en sistemas de monitoreo y gestión de recursos hídricos y su potencial aplicación en un contexto global. Por otro lado, Flores *et al.* (2013) plantea estudiar la eutrofización en la Bahía de Cohana, delimitando las áreas de contaminación mediante índices de vegetación y análisis de bandas para evaluar el estado trófico usando un espectro radiómetro e imágenes satelitales Landsat 5-TM y Liss III.

En cuanto a los trabajos presentados, Villegas (2013) realizó un monitoreo ambiental en el lago Titicaca, de los parámetros: temperatura superficial, clorofila, color del agua y abundancia de macrófitas, durante el periodo 2000 – 2011 usando imágenes satelitales MODIS y Landsat. Sus resultados mostraron una variación estacional marcada de la temperatura entre invierno y verano, los valores más altos de clorofila fueron reportados en verano y en las principales bahías todo el año. También Escudero (2013) estudió la variación estacional de la clorofila-a del lago Titicaca usando imágenes MODIS-aqua, para un periodo de 10 años. El reporta a nivel mensual las más altas concentraciones en junio y las más bajas en noviembre y en la serie temporal, las más altas concentraciones en 2007 y las más bajas en 2005.

Analizando la bibliografía disponible en las diferentes áreas o aplicaciones hidrológicas se obtuvo la información de las series de datos temporales generadas en cada investigación a través de diferentes tipos de sensores en el sistema TDPS (Tabla A4-4).

Las series largas de datos temporales (10 a 24 años) fueron observadas en las áreas de *Aplicaciones radar, Precipitación y Humedales*, mientras que las demás áreas presentaron series de datos cortas (1 a 3 años). Esta información permitirá dar continuidad a los mismos estudios o realizar nuevos estudios a partir de los datos existentes. En general son más utilizados los sensores multiespectrales

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

y radar o ambos en varios trabajos.

Tabla A4-4- Información de series de datos temporales y tipos de sensores en las diferentes áreas de la Hidrología Satelital para el sistema TDPS. L.T. Lago Titicaca, L.P. Lago Poopó y S.C. Salar de Coipasa

Área de interés	Tipo de sensor	Series de datos	Sistema TDPS
1) Aplicaciones radar	Altimetría Radar	2000-2009	L.T.
	Altimetría Radar y MODIS	2000-2009	L. T. y L. P.
2) Precipitación	Satélite OLR	1975-1999	L. T.
3) Humedad	MODIS	2002-2003	L. T.
4) Nieve	NOAA/AVHRR	1984,1986,1990-1993	L. P. y S. C.
5) Humedales	NOAA/AVHRR y ERS-SAR Radar	1997-1998	L. T.
	LANDSAT	2000-2001	
	MODIS	2000-2010	
6) Hidrología general	GOES	1999-2001	L. T.
7) Temperatura superficial	MODIS	2000-2001	L. T.

A4.4. CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

Analizando la información disponible podemos clasificarla en cuatro categorías

(Tablas A4-5 y A4-6):

- **Categoría A:** Información científica (artículos publicados en revistas indexadas, documentos o informes con base científica).
Este tipo de información presenta una base de datos sólida y confiable, metodología estandarizada (datos de campo, mediciones *in situ*, calibraciones, datos espaciales) relación con otras disciplinas.
- **Categoría B:** Información válida a nivel nacional y/o regional con control de calidad proveniente de proyectos desarrollados por Instituciones Gubernamentales.
- **Categoría C:** Información proveniente de documentos de consultorías, informes.

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

- **Categoría D:** Información que no presenta respaldo científico.

Tabla A4-5- Clasificación de la información existente en diferentes áreas de la Hidrología Satelital según las categorías enunciadas.

Área de interés	Autores	Tipo de Información	Categoría
1) Aplicaciones radar	Abarca del Río <i>et al.</i> (2012)	Artículo Científico	A
	Crétau <i>et al.</i> (2011)	Artículo Científico	A
	Satge <i>et al.</i> (sometido)	Artículo Científico	A
	Crétau <i>et al.</i> (2010)	Capítulo de libro	A
2) Precipitación	Garreaud & Aceituno (2001)	Artículo Científico	A
3) Humedad	Falvey & Garreaud (2005)	Artículo Científico	A
4) Nieve	Vuille & Baumgartner (1998)	Artículo Científico	A
5) Humedales	Moreau <i>et al.</i> (2003)	Artículo Científico	A
	Moreau & Le Toan (2003)	Artículo Científico	A
	Otto <i>et al.</i> (2011)	Artículo Científico	A
6) Hidrología General	Veissid (2003)	Artículo Científico	A
7) Temperatura Superficial	Wan <i>et al.</i> (2002a)	Artículo Científico	A
	Wan <i>et al.</i> (2002b)	Artículo Científico	A
	Wan (2004)	Informe	A

La información procedente del Simposio Internacional del Lago Titicaca es analizada y clasificada de la siguiente manera:

Tabla A4-6- Clasificación de la información procedente del Simposio en dos áreas de la Hidrología Satelital según las categorías enunciadas.

Área de interés	Autores	Tipo de Información	Categoría
1) Modelación Hidrológica	Satge (2013)	Propuesta	A
2) Calidad de Aguas	Peña (2013)	Propuesta	A
	Flores <i>et al.</i> (2013)	Propuesta	D
	Escudero (2013)	Trabajo realizado	D
	Villegas (2013)	Trabajo realizado	D

El tipo de información clasificada como categoría D que carece de respaldo científico, corresponde a una propuesta y dos trabajos realizados presentados como ponencias. En el caso de la propuesta, esta no considera datos de campo, la metodología que se pretende implementar es imprecisa y no

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

existe un conocimiento del funcionamiento hidrológico y limnológico de la cuenca, ni de los procesos de contaminación en el área de estudio.

En cuanto a los dos estudios realizados ambos se basaron en el análisis directo de las imágenes satelitales, no consideraron datos de campo, ni mediciones de radiometría que permitan calibrar los datos de satélite. Los resultados fueron inferidos de algoritmos que precisan ser validados. Según los resultados obtenidos y su interpretación, se desconoce el funcionamiento hidrológico y limnológico de la cuenca, así como las características particulares que presenta el lago Titicaca como lago tropical de altura.

A4.5. EVALUACIÓN DE VACÍOS DE INFORMACIÓN

En base a la revisión y clasificación de toda la bibliografía disponible sobre Hidrología Satelital en el sistema TDPS, se confirma que la información es escasa, con tan solo 14 trabajos científicos.

Pese al periodo de tiempo (1998-2012) en el que tiene su desarrollo la hidrología satelital en el sistema TDPS, existen varios años donde no se realizaron trabajos al respecto, por ejemplo entre los años 1999 y 2000 y 2006 a 2010.

En general los trabajos científicos en diferentes áreas de la hidrología se reducen a uno en la mayoría de los casos (*Precipitación, Humedad, Nieve, Hidrología General*), las áreas con más trabajos reportados (tres a cuatro) son *Aplicaciones Radar, Humedales y Temperatura Superficial*. No se reportan trabajos en otras áreas importantes de la hidrología. Por el contrario, los trabajos presentados en el II Simposio Internacional del Lago Titicaca, abarcan otras áreas como la *Modelación Hidrológica* y la *Calidad de Aguas*.

Son escasos los trabajos desarrollados en las demás cuencas que conforman el sistema TDPS, la mayoría están concentrados en la cuenca del lago Titicaca.

Analizando la calidad de la información, la mayoría de los trabajos en hidrología satelital corresponden a publicaciones científicas, exceptuando algunos trabajos presentados en el II Simposio Internacional del lago Titicaca-TDPS, los cuales carecen de respaldo científico, debido a que no utilizan una metodología adecuada que considera datos de campo y mediciones de calibración que son esenciales para un estudio con imágenes satelitales. Además no presentan un conocimiento adecuado sobre el funcionamiento hidrológico y limnológico de la cuenca, para plantear propuestas o realizar interpretaciones.

Las series de datos temporales de la mayor parte de los trabajos realizados en diferentes aplicaciones hidrológicas (*Humedad, Hidrología General, Humedales, Temperatura Superficial*) son

cortas de 1 a 3 años. A diferencia de las áreas de *Aplicaciones Radar, Precipitación y Humedales* que presentan series de datos que varían de 10 a 24 años.

No se encuentran disponibles otros estudios realizados por Instituciones Nacionales o Regionales sobre esta temática.

A4.6. PROPUESTA DE UN PLAN DE MONITOREO ESPACIAL Y TEMPORAL MEDIANTE SENSORES REMOTOS

Para optimizar las proyecciones de los modelos (hidrológicos, ecológicos, climáticos), y crear planes de gestión ambiental adaptados, se requieren datos observacionales de buena calidad y mejorar el acceso a los mismos. Para mejorar la comprensión del sistema TDPS y de los cambios ambientales que acontecen, es fundamental desarrollar redes de observación. Sin embargo, registros relativamente cortos pueden no permitir la separación entre la variabilidad natural de los ambientes y la influencia de factores externos, mientras que a más largo plazo una reconstrucción de la condiciones biohidroclimáticas puede colocar las tendencias recientes y los extremos en un contexto más amplio. Así, aparece fundamental la instalación y fortalecimiento de redes de mediciones de campo a nivel local junto con el desarrollo del monitoreo espacial de parámetros claves, a escalas de tiempo y de espacio más grandes.

Un trabajo sobre monitoreo espacial y temporal de la calidad de aguas (materia orgánica, clorofila-a, sedimentos) usando sensores remotos nos parece importante debido al vacío de información que existe (ver arriba). Sin embargo, debido a las características particulares de esta cuenca y en base a la información de estudios previos sobre la productividad primaria, clorofila-a, fitoplancton y macrófitas (Lazzaro com. pers.) es necesario desarrollar métodos adaptados a ambientes oligotróficos característicos de los lagos tropicales de altura. Tal sistema debería considerar:

a) La delimitación del área de estudio, con **estaciones de observación permanentes y planes de muestreo estandarizados**.

b) La extensión de las **zonas observadas *in situ* en el espacio** (escala del sistema) **y el tiempo** (serie temporal superior a 10 años).

En cuanto a la metodología es esencial considerar tres técnicas:

1) Datos de campo: **Toma de muestras *in situ* en superficie y en profundidad** (perfiles) **con métodos estandarizados**, con equipos calibrados previamente para evaluar parámetros hidroclimáticos y de calidad de aguas.

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

2) Datos de mediciones radiométricas: **Mediciones de radiancia e irradiancia tanto en superficie como en profundidad**, para el cálculo posterior de la reflectancia y de la luz disponible para el fitoplancton. Estas mediciones se realizan utilizando un espectro radiómetro calibrado que deben acompañar los datos de campo en forma simultánea o durante la campaña.

3) Imágenes de satélite: Con **correcciones geográficas y atmosféricas y resoluciones espacial, espectral y temporal** adecuadas para el área de estudio y considerar los productos apropiados para los parámetros a analizar.

Los datos de campo que proporcionan el análisis *in situ* de los componentes ópticamente activos (clorofila-a, sedimentos, materia orgánica) serán relacionados con las mediciones radiométricas para entender las propiedades ópticas de estos componentes. A su vez las mediciones radiométricas que proporcionan el conocimiento de las propiedades ópticas de los componentes ópticamente activos (OAC) se relacionarán con las imágenes de satélite para entender su sensibilidad a los parámetros estudiados, mediante el análisis de la reflectancia. Ambos resultados permitirán una calibración y validación de los datos satelitales utilizando técnicas directas e indirectas y la posterior elaboración de mapas temáticos multitemporales. Estos resultados permitirán una adecuada interpretación acompañada de datos e información auxiliar de otras disciplinas (Figura A4-1).

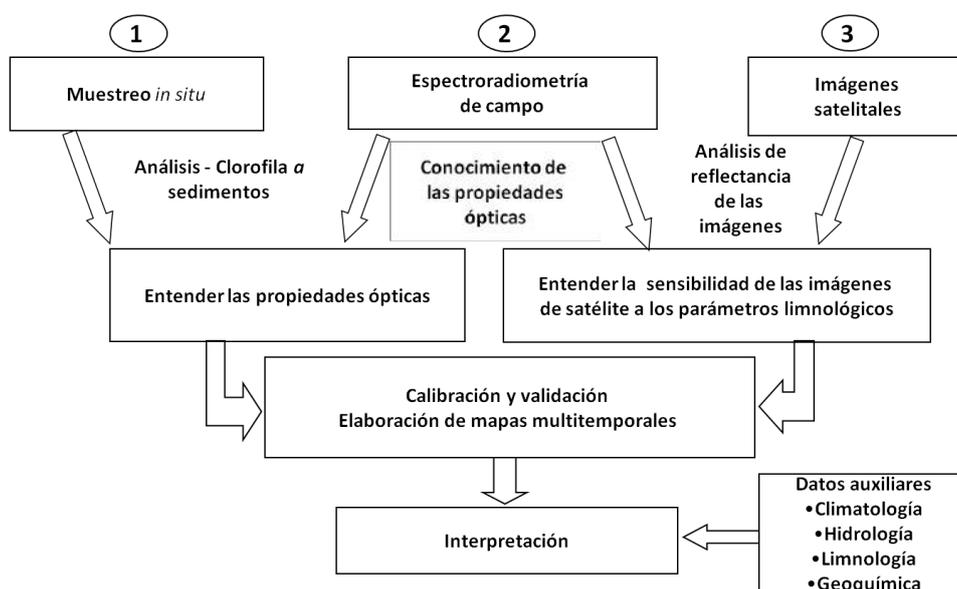


Figura A4-1: Relación de las tres técnicas metodológicas para estudios de monitoreo usando sensores remotos. Adaptado de Mendoza 2013.

A4.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abarca del Rio R., Crétaux J.F., Berge-Nguyen M. & Maisongrande P. 2012. Does Lake Titicaca still control the Lake Poopó system water levels? An investigation using satellite altimetry and MODIS data (2000-2009). *Remote Sensing Letters* 3(8): 707-714.
- Chuvieco E. 2002. *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ed. Ariel. Barcelona, España. 586 pp.
- Crétaux J. F., Calmant S., Abarca del Río A., Kouraev A. & Berge-Nguyen M. 2010. Lakes Studies from Satellite Altimetry. In Vignudelli S., Kostianoy A. G., Cipollini P. & Benviste J. (Eds.) *Handbook on Coastal Altimetry*. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 2-22.
- Crétaux J.F., Jelinski W., Calmant S., Kouraev A., Vuglinski V., Berge-Nguyen M., and M.-C. Gennero, Nino, F., Abarca Del Rio, R., Cazenave, A & Maisongrande, P. (2011). "SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data." *Advances in Space Research* 47: 1497-1507.
- Falvey M. & Garreaud R. D. 2005. Moisture variability over the South American Altiplano during the South American Low Level Jet Experiment (SALLJEX) observing season. *Journal of Geophysical Research* 110: 12 pp.
- Garreaud R. D. & Aceituno P. 2001. Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. *Journal of Climate* 14: 2779-2789.
- Meneses P.R. & Netto J.S.M. 2001. *Sensoriamento Remoto – reflectância dos alvos naturais*. Ed. UNB. Brasília, Brasil.
- Mendoza M. C. 2013. *Detección por satélite de parámetros limnológicos para evaluar la dinámica espacio-temporal de los lagos de planicies de inundación en la Amazonía Central Brasileira*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Moreau S., Bosseno R., Fa Gu Z. & Baret F. 2003. Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and totora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. *Remote Sensing of Environment* 85: 516-529.
- Moreau S. & Le Toan T. 2003. Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing livestock management. *Remote Sensing of Environment* 84: 477-492.
- Otto M., Scherer D. & Richters J. 2011. Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. *Hydrol. Earth Syst. Sci* 15:1713-1727.
- Owe M., Brubaker, K., Ritchie J. & Rango A. (Eds.) 2001. *Remote Sensing and Hidrology 2000*. International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication 267. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK. 610 p.
- Platnick S., King M. D., Ackerman S. A., Menzel W.P., Baum B. A., Riédi J. C. & Frey R. A. 2003. The MODIS Cloud Products: Algorithms and Examples from Terra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41:2. 459-473.
- Satge F., Arsen A., Bonnet M. P., Timouk F., Calmant S., Pilco R., Molina J., Lavado-Casimiro W. & Crétaux J. F. (submitted) Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano's watershed using ICESat/GLAS data.
- Schmugge T. J., Kustas W. P., Ritchie J. C., Jackson T. J. & Rango A. 2002. *Remote Sensing in Hidrology*. *Advances in Water Resources* 25: 1367-1385.
- Schowengerdt R. A. (Eds.) 2007. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. A. Press. United States. 515 p.
- Schultz G. A. & Engman E. T. 2000. Present use and future perspectives of remote sensing in hydrology and water management. In Owe M., Brubaker K., Ritchie J. & Rango A. (Eds.) *Remote Sensing and Hydrology 2000 (Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New México, USA. April 2000)* IAHS Publ. nº 267, 2001. 545-551.
- Veissid N. 2003. New satellite sensor and method for the direct measurement of the planetary albedo, results for 1999, 2000 and 2001 in South America. *Atmospheric Research* 66: 65-82.

A-4 Balance y perspectivas del uso de la teledetección para el estudio de los recursos hídricos en el Sistema TDPS

- Villa G., Arozarena J., Peces J. & Domenech E. 2009. Plan Nacional de Teledetección: Estado Actual y Perspectivas Futuras. In Salomón Montecinos Aranda y Lara Fernández Fornos (Eds.) Teledetección: Agua y Desarrollo sostenible XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud, 23-26 de septiembre de 2009 pp. 521-524.
- Vuille M. & Baumgartner M. F. 1998. Monitoring the regional and temporal variability of winter snowfall in the arid Andes using NOAA/AVHRR data. *Geocarto International* 13 (1): 59-67.
- Wan Z., Zhang Y., Li Z.-L., Wang R., Salomonson V. V., Yves A., Bosseno R. & Hanocq J. F. 2002a. Preliminary estimate of calibration of the moderate resolution imaging spectroradiometer thermal infrared data using Lake Titicaca. *Remote Sensing of Environment* 80: 497-515.
- Wan Z., Zhanga Y. Zhanga Q. & Li Z-L. 2002b. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment* 83: 163-180.
- Wan, Z. 2004. Land Surface Temperature Measurements from EOS MODIS Data. National Aeronautics and Space Administration. 39 p.

LISTA DE REFERENCIAS (II SIMPOSIO INTERNACIONAL DEL LAGO TITICACA)

- Escudero L. 2013. Variación estacional de la clorofila-a del lago Titicaca usando imágenes de satélite MODIS – aqua. Instituto del Mar del Perú – IMARPE. II Simposio Internacional del lago Titicaca – TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.
- Flores M., Castillo E. & Nuñez J. 2013. Delimitación de áreas con diferentes grados de contaminación hídrica (eutrofización en la Bahía de Cohana, con imágenes de satélite Landsat 5-TM y Liss III. Instituto de Investigaciones Geográficas – UMSA. II Simposio Internacional del lago Titicaca - TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.
- Peña J. L. 2013. El rol de las observaciones satelitales en los sistemas de monitoreo de recursos hídricos: Oportunidades y retos. CSIRO Land&Water. II Simposio internacional del lago Titicaca - TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.
- Satge F. 2013. Desarrollo de un modelo de hidrología espacial para la cuenca del TDPS. Institut de Recherche pour le Développement – IRD. II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.
- Villegas Apaza P. R. 2013. Uso de imágenes satelitales para el monitoreo ambiental del Lago Titicaca. Instituto del Mar del Perú - IMARPE, Lima. II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS. Puno, Perú, 7-9 Marzo 2013.

Parte B

BIODIVERSIDAD Y FUNCIONAMIENTO ECOLÓGICO

B-1

CLASIFICACIÓN Y REGIONALIZACIÓN DE LOS HUMEDALES

DEL SISTEMA TDPS

97

Mabel Maldonado – UMSS-ULRA, Cochabamba, Bolivia

Gonzalo Navarro – Consultor independiente, Cochabamba, Bolivia

Francisca Acosta - UMSS-ULRA, Cochabamba, Bolivia

Wanderley Ferreira - RUMBOL, Cochabamba, Bolivia

B-2

BIODIVERSIDAD ÍCTICA EN EL LAGO TITICACA

135

Carla Ibáñez Luna – UMSA-IE, La Paz, Bolivia

Bernard Hugueny - IRD, Paris Francia

Yareli Esquer Garrigos - MNHN, Paris, Francia

Claudia Zepita – UMSA IE, La Paz, Bolivia

Ramiro Gutiérrez UMSA IE, La Paz, Bolivia

B-3

FUNCIONAMIENTO LIMNOLÓGICO Y FOTOBIOLOGIA DEL LAGO TITICACA

155

Xavier Lazzaro – IRD-BOREA & UMSA-UCA, La Paz, Bolivia

César Gamarra Peralta – IMARPE, Puno, Perú



B-1

CLASIFICACIÓN Y REGIONALIZACIÓN DE LOS HUMEDALES DEL SISTEMA TDPS

CLASSIFICATION AND REGIONALIZATION OF WETLANDS IN THE TDPS SYSTEM

Mabel Maldonado - UMSS-ULRA, Cochabamba, Bolivia ; mabelmaldonado.m@fcyt.umss.edu.bo

Gonzalo Navarro – Consultor independiente, Cochabamba, Bolivia

Francisca Acosta - UMSS-ULRA, Cochabamba, Bolivia

Wanderley Ferreira - RUMBOL, Cochabamba, Bolivia

RESUMEN

Se presenta una revisión de los antecedentes sobre el conocimiento ecológico y biogeográfico de los humedales del sistema TDPS, desde el punto de vista de su clasificación y regionalización. El contenido incluye: a) la conceptualización ecológica y biogeográfica existente, b) los criterios utilizados para clasificar y regionalizar los humedales de la Puna boliviana en general y del sistema TDPS en particular, c) el Mapa de Humedales en el Sistema TDPS y la descripción de las unidades ecológico-biogeográficas del mapa, d) una evaluación preliminar de las amenazas sobre los humedales del sistema TDPS en base a un mapa de amenazas. Con este conjunto de información, se establece que los principales vacíos de conocimiento para la clasificación y regionalización de los humedales en el sistema TDPS se centran principalmente en los aspectos ecológicos del ambiente palustre y acuático de los humedales. En base a este diagnóstico se recomienda: a) realizar investigación prioritaria sobre las dinámicas hidrológicas y geo-edáficas que controlan la diferenciación, distribución y evolución de los humedales, sobre las dinámicas sucesionales en los diferentes tipos de humedales como respuesta a procesos antrópicos o naturales, b) completar la información descriptiva sobre los humedales en zonas desconocidas, c) desarrollar una red virtual de información sobre los humedales del Sistema TDPS, y d) evaluar el estado de conservación y de los servicios ecosistémicos que prestan los humedales en el Sistema TDPS.

PALABRAS CLAVE: ECOSISTEMAS PALUSTRES, ECOSISTEMAS ACUÁTICOS, BOFEDALES, PUNA BOLIVIANA

SUMMARY

In the present chapter, we review the existent ecological and bio-geographical knowledge of the wetlands in the TDPS system, based on their classification. Contents include: a) ecological and bio-geographical concepts, b) used criteria to classify and regionalize the wetlands in the Bolivian Puna and the TDPS system, c) a map of the TDPS system wetlands and description of the ecological-biogeographical units in the map and d) a preliminary evaluation of existing threats on the wetlands of the TDPS system. With the available knowledge, we perceive that the main lack of information is centered on the ecological aspects of the riparian/aquatic environment of the wetlands. Therefore, our main recommendations are: a) Perform exhaustive research about the hydrologic dynamics and geo-edaphic features controlling differentiation, distribution and evolution of the wetlands; and whether the different types of wetland arise due to anthropogenic or natural processes, b) to complete the descriptive information of the wetlands on unknown geographical zones, c) to develop a virtual network with information on the wetlands of the TDPS system and d) to evaluate the conservation status of the ecosystem services of the wetlands in the TDPS system.

KEYWORDS: RIPARIAN ECOSYSTEMS, AQUATIC ECOSYSTEMS, PEAT LANDS (BOFEDALES), BOLIVIAN PUNA

B1.1. INTRODUCCIÓN

Los humedales son considerados ambientes de alto valor y fragilidad en los Altos Andes sudamericanos por la importancia socio-económica y cultural que poseen. Debido a que una importante proporción de poblaciones humanas utiliza estos humedales, se encuentran en riesgo los servicios ecosistémicos que prestan, particularmente los relacionados a la provisión de agua para consumo, riego para agricultura y forraje para ganadería.

Por estas razones, desde hace un par de décadas se ha incrementado el interés sobre los humedales en general y de los Altos Andes en particular. Sin embargo, las iniciativas existentes han generado información dispersa y puntual, que aún no permite el desarrollo de herramientas técnicas que apoyen las acciones de gestión y conservación.

En este sentido, los sistemas de clasificación y regionalización son herramientas de fácil interpretación y manejo, pues si están contruidos en base a criterios descriptivos o numéricos, precisos y replicables en el tiempo y espacio, además de propiedades explicativas puede tener propiedades predictivas, por lo cual se pueden generar diversos escenarios de presión natural y antrópica, y predecir los efectos que pueden tener sobre el ecosistema y por ende sobre los servicios ecosistémicos, a fin de que los gestores puedan tomar medidas de prevención, mitigación o adaptación a cambios de diversa índole.

En este contexto, el presente capítulo realiza una revisión de los antecedentes sobre sistemas de clasificación y regionalización desarrollados para los humedales de los Altos Andes en Bolivia, entre los

cuales se incluyen los humedales del sistema TDPS.

B1.2. LOS HUMEDALES DE LOS ALTOS ANDES DE BOLIVIA: CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS

El término humedal fue creado para nominar a una zona húmeda, siendo una de las definiciones mas conocidas la establecida en la Convención sobre los Humedales en Ramsar, Irán (1971) en los siguientes términos: “extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de aguas, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros. También podrán comprender sus zonas ribereñas o costeras adyacentes, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja cuando se encuentren dentro del humedal” (Secretaría Ramsar, 2013)

Desde el punto de vista ecológico, los humedales se definen como cualquier área cubierta por agua poco profunda, por lo menos durante una parte del ciclo anual, en consecuencia los suelos están saturados con agua, de manera continua o esporádica. El factor ecológico clave es la periodicidad de las fluctuaciones del nivel del agua, de esta forma son “ecosistemas de nivel de agua fluctuante estabilizada en pulsaciones” (Odum & Barrett 2006). De esta forma, los humedales serían ecosistemas de transición (ecotonos) entre los sistemas terrestres y acuáticos, con particularidades propias como un hábitat muy heterogéneo, con aguas someras permanentes o estacionales dominadas por plantas acuáticas grandes, y con zonas de suelo saturado o inundado de agua generalmente anóxico habitado por vegetación especializada a estas condiciones (Horne & Goldman 1994).

Si bien las anteriores definiciones especifican que el humedal es la zona de transición entre el ambiente terrestre y acuático, desde el punto de vista ecológico funcional, es imposible separarlo del ambiente acuático al que está asociado, por ello de forma general se utiliza el concepto integrado tal como fue planteado en la Convención de Ramsar, y por Navarro *et al.* (2011) quienes lo aplicaron a los humedales de los Altos Andes en Bolivia.

Según Navarro *et al.* (2011), los humedales incluyen dos tipos de ambientes: el palustre y el acuático, caracterizados como sigue:

- Ambiente palustre: formado por un conjunto de biocenosis que desarrollan sobre suelos hidromórficos, incluyendo desde suelos saturados de agua hasta suelos inundados de forma estacional o permanente. Los ambientes palustres altoandinos son denominados generalmente como “bofedales” en los Andes centrales. Ocasionalmente se usa también el término análogo “vega”, aunque algunos autores restringen el “bofedal” a las comunidades

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

vegetales más inundadas y con morfología de almohadillada o en cojín, denominando “vega” a las praderas o pajonales higrofiticos adyacentes con morfología ondulada o plana y que no forman turba.

- Ambiente acuático: incluye lagos, ríos y charcas con toda la variabilidad morfológica, física y química conocida en los cuales desarrollan biocenosis características formadas por plantas acuáticas, algas, micro y macroinvertebrados, y peces principalmente. Dichas biocenosis desarrollan según los gradientes de profundidad, radiación y temperatura dentro del agua.

B1.3. RASGOS GEOFÍSICOS Y BIOGEOGRÁFICOS DE LOS ALTOS ANDES EN BOLIVIA

En el presente trabajo, designamos Altos Andes a la zona ubicada aproximadamente por encima de los 3 000 m. En Bolivia se extiende sobre tres grandes unidades fisiográficas (Figura B1-1, Maldonado *et al.* 2012):

- La **Cordillera Occidental**: a lo largo de la frontera con Perú y Chile, empieza al sur del Lago Titicaca aproximadamente a los 17º de latitud sur y se prolonga hacia el sur hasta el paralelo 22º. Más que una cordillera típica, es una serie de volcanes y domos volcánicos asentados sobre mesetas volcánicas. Tiene tres secciones:
 - a) La Cordillera Occidental Norte, en el suroeste del Departamento de La Paz y noroeste del Departamento de Oruro
 - b) La Cordillera Occidental Central, ubicada en el sudoeste del Departamento de Oruro y el noroeste del Departamento de Potosí.
 - c) La Cordillera Occidental Meridional, al sudoeste del Departamento de Potosí.
- El **Altiplano**: ubicado entre las Cordilleras Occidental y Oriental, constituye una planicie levemente inclinada de norte a sur, entre unos 4 000 a 3 600 m, atravesada por algunas serranías conocidas como Serranías Interaltiplánicas. Formado por sedimentos recientes (arenas, limos, arcillas) depositados por ríos y lagos. Se diferencian tres zonas: Altiplano Norte, Central y Sur.
 - a) El Altiplano Norte se extiende desde el lago Titicaca hasta aproximadamente el límite de los Departamentos de La Paz y Oruro.
 - b) El Altiplano Central, se extiende por el Departamento de Oruro hasta el sur del lago Poopó.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

- c) El Altiplano Sur, se extiende por el sur del Departamento de Oruro y el centro del Departamento de Potosí, incluyendo los grandes salares de Coipasa y Uyuni..
- La **Cordillera Oriental**: de origen tectónico (es decir originada por plegamientos y levantamientos de la corteza terrestre) ha sido modelada por procesos glaciares y fluviales, el relieve es abrupto con profundos valles. Constituida principalmente por rocas sedimentarias y metamórficas del Paleozoico, incluyendo también áreas importantes con rocas plutónicas (granitos) y volcánicas. Presenta tres fracciones:
 - a) La Cordillera Real que sigue un rumbo Noroeste a Sudeste (Departamento de La Paz), es el sector más alto de la Cordillera Oriental y la única que conserva nieve perpetua sobre los 5 300 m.
 - b) La Cordillera Oriental Central o de Cochabamba (Departamentos de Oruro y Cochabamba) con dirección Este-Oeste.
 - c) La Cordillera Oriental Meridional, con rumbo Norte-Sur cruza los departamentos de Oruro, Potosí, Chuquisaca y Tarija.

Respecto al clima, utilizando Modelo Bioclimático Global de Rivas-Martínez (1996 – 2010), en los Altos Andes de Bolivia se reconocen dos bioclimas:

- **Pluviestacional**, caracterizado por una época muy lluviosa, generalmente de noviembre a abril, con varios meses de lluvias menores, de mayo a octubre, este bioclima puede ser húmedo o subhúmedo en función de la intensidad y duración de la época seca, así como de la cantidad total de precipitación.
- **Xérico**, que presenta una época seca muy larga (generalmente más de seis meses) cuando se produce un marcado déficit hídrico, este bioclima puede ser seco o semiárido debido a la mayor o menor intensidad y duración de la época seca principal, la cual se concentra normalmente entre junio y agosto.

Desde el punto de vista altitudinal, se reconocen los siguientes pisos ecológicos: Altimontano, Altoandino, Subnival y Nival o de nieves perpetuas (Figura B1-1).

Desde el punto de vista biogeográfico (Navarro 2011), los Altos Andes pertenecen a tres Provincias biogeográficas: Puneña Mesofítica, Puneña Xerofítica y Yungueña Peruano-Boliviana.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

El sistema TDPS se ubica en las dos provincias puneñas a las que se hará referencia en lo sucesivo (Figura B1-2):

- La **Puna Mesofítica** se extiende desde el norte del Perú hasta el centro de la Cordillera Oriental de Bolivia, incluyendo la cuenca del lago Titicaca. En Bolivia se ubica sobre el Altiplano Norte y la Cordilleras Oriental (Departamentos de la Paz y Cochabamba) con un bioclima pluviestacional.
- La **Puna Xerofítica** se extiende en el centro-sur de los altos Andes bolivianos, llegando hasta el noroeste argentino, suroeste de Perú y noroeste de Chile. En Bolivia es donde alcanza su mayor extensión, ocupando la Cordillera Occidental, el Altiplano Central y Sur, y la Cordillera Oriental en sus secciones Central y Meridional. El bioclima es xérico en la mayoría de su extensión por debajo de aproximadamente 4.000 m, en tanto que por encima de esta altitud, es pluviestacional, excepto en la Cordillera Occidental Centro-sur y en la Cordillera Oriental Sur donde se mantiene xérico también por encima de los 4 000 m.

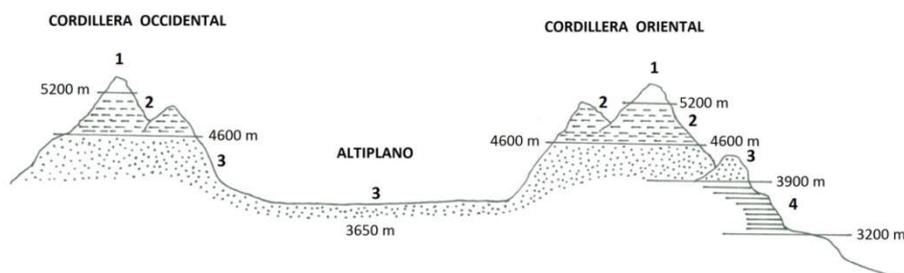


Figura B1-1. Perfil esquemático de los Altos Andes de Bolivia, con sus pisos ecológicos altitudinales y correspondientes pisos bioclimáticos. Los límites altitudinales entre los pisos son solamente promedios orientativos (Extraído de Maldonado et al. 2012).

1- Piso ecológico Nival (piso bioclimático Gélido tropical)

2- Piso ecológico Subnival (piso bioclimático Criorotropical)

3- Piso ecológico Altoandino (piso bioclimático Orotropical). Observación: el Altiplano es altoandino a pesar de su altitud promedio de 3 650 m, debido a intensos fenómenos de inversión térmica que producen temperaturas anormalmente bajas

4- Piso ecológico Altimontano (piso bioclimático Supratropical)

B1.4. RASGOS ECOLÓGICOS DE LOS HUMEDALES DE LOS ALTOS ANDES DE BOLIVIA

Los estudios ecológicos sobre humedales en Bolivia (bajo el concepto integrado mencionado anteriormente) son muy escasos, en general se encuentra información para los componentes palustre y acuático separadamente.

B1.4.1. AMBIENTE PALUSTRE

Antecedentes ecológicos sobre los ambientes palustres de los humedales en los Altos Andes de Bolivia (bofedales) son escasos, mayormente puntuales y dirigidos al bofedal como recurso forrajero, por ejemplo: Valdivia & Massy (1996) estudiaron la composición florística, cobertura y biomasa de zonas de pastoreo en el Departamento de La Paz, Lara & Lenis (1996) realizaron una caracterización ambiental de las vegas altoandinas en los Lípez (Potosí) reuniendo criterios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, edafológicos y de vegetación. El trabajo más extensivo fue realizado por Prieto *et al.* (2003) quienes describieron y clasificaron los bofedales del sistema TDPS, utilizando criterios edáficos, hídricos y vegetacionales.

Una descripción exhaustiva, ecológica, biogeográfica y florística de la vegetación palustre en los Altos Andes de Bolivia, se puede encontrar en Navarro & Maldonado (2002), Navarro & Ferreira (2007) y Navarro (2011). En estas obras se describe la vegetación palustre como parte de las geoserias o grupos de comunidades de la vegetación en conjunto, las cuales además fueron cartografiadas extensivamente.

Una caracterización florístico-ecológica de los bofedales del piso altoandino en las provincias biogeográficas Puneña Mesofítica y Puneña Xerofítica en Bolivia, se encuentra en Navarro *et al.* (2011), estos autores consideran que los bofedales están formados por un mosaico de comunidades biológicas que se ordenan en relación a los gradientes topográficos de humedad y salinidad del suelo, dando lugar a zonaciones que son características y diferenciales para cada tipo de bofedal y de humedal. Las comunidades reconocidas por estos autores son las siguientes:

a) **Bofedal inundado:** comunidades inundadas la mayor parte del año pero sumergidas en el agua; como los tallos y hojas son aéreos, originan formas características de tipo pulvinular en cojines compactos y siempre verdes, si la inundación disminuye pueden ser reemplazados por el bofedal estacional.

Debido a las bajas temperaturas y a la saturación hídrica permanente, se acumulan capas de turba fibrosa, los suelos son del grupo de los Histosoles.

La flora del bofedal inundado está generalmente dominada por especies de Juncáceas, Ciperáceas y

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

Poáceas de los géneros *Distichia*, *Oxychloe*, *Patosia*, *Phylloscirpus*, *Zameioscirpus* y *Deyeuxia*. Se presentan distintas combinaciones florísticas de acuerdo a las condiciones locales de mineralización o salinidad del agua, se reconocen dos variantes florístico-ecológicas principales:

Bofedal inundado de aguas nada o poco mineralizadas: no presenta eflorescencias de sales sobre los cojines de las plantas en época seca, los suelos son Histosoles dístricos con turba fibrosa a fibrosa, las especies diferenciales son: *Distichia filamentosa*, *D. muscoides*, *Deyeuxia jamesonii*, *Patosia clandestina*.

Bofedal inundado de aguas mineralizadas: con eflorescencias de sales sobre los cojines de las plantas en época seca, son importantes en bioclima xérico, pero se presentan también en menor cantidad en áreas con bioclima pluviestacional. Especies diferenciales son: *Oxychloe andina*, *Patosia clandestina* y *Zameioscirpus atacamensis* (no asociados a *Distichia spp.*).

b) **Bofedal estacional:** se sitúa en contacto con el bofedal inundado en zonas ligeramente más elevadas, por lo cual los suelos pasan húmedos solamente algunos meses al año y al final de la época seca las plantas pueden llegar a amarillear o desecarse parcialmente. El bofedal estacional presenta formas desde marcadamente ondulada a casi plana; las plantas dominantes tienen un crecimiento densamente cespitoso o rizomatoso, pero no forman los grandes cojines típicos del bofedal inundado.

Los suelos higromorfos del bofedal estacional no llegan a formar turba, pero los niveles inferiores del suelo están sometidos a procesos de gleyzación por lo cual son del grupo de los Gleysoles.

La composición florística es muy característica predominando las siguientes especies diferenciales: *Plantago tubulosa*, *Phylloscirpus desertícola*, *Eleocharis* grupo *albibracteata*, *Zameioscirpus atacamensis* y *Plantago rígida* (solo en el norte de la Cordillera Oriental). De forma análoga al bofedal inundado, se identifican dos variantes florístico-ecológicas para el bofedal estacional:

Bofedal estacional de aguas nada o poco mineralizadas: en época seca no se producen eflorescencias de sales sobre las plantas o son escasas y dispersas. Los suelos son Gleysoles hístico-dístricos.

Bofedal estacional de aguas mineralizadas: con eflorescencias de sales sobre las plantas y sobre el suelo en época seca. Estas eflorescencias son mucho más importantes en áreas con bioclima xérico, pero se presentan también en áreas con bioclima pluviestacional. Los suelos se clasifican como Gleysoles cálcicos.

c) **Vega salina:** desarrolla únicamente en llanuras aluviales fluviales o fluvio-lacustres del Altiplano xérico central y sur, en altitudes inferiores a los 4.000 m. y en suelos de topografía plana siempre húmedos o saturados de agua, afectados por niveles freáticos poco profundos con aguas mineralizadas o salinas. La vega salina contacta con el bofedal estacional de aguas mineralizadas y

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

hacia las microtopografías más elevadas con el salar o con el pajonal higrofitico salino.

Los suelos son poco húmicos, con texturas finas limo-arcillosas o areno-limosas, son notorios los precipitados blancos de sales (sobre todo de cloruro sódico), que forman costras muy marcadas en época seca. Los suelos se clasifican como Solonchaks gleycos cálcico-sódicos.

La vegetación de la vega salina es una pradera higrofitica baja, dominada por especies herbáceas perennes, cespitosas o rizomatosas, halófitas o halo-tolerantes. Es característica la combinación compuesta por plantas de los bofedales estacionales, como *Phylloscirpus deserticola*, *Plantago tubulosa* y *Zameioscirpus atacamensis*, asociados a halófitas higrofiticas como *Triglochin concinna* y *Baccharis acaulis*.

d) **Pajonal higrofitico:** es la comunidad de bofedal menos influenciada por el agua y por ello ocupan las áreas periféricas, topográficamente más elevadas. Los suelos son estacionalmente muy húmedos o saturados de agua, pero normalmente no se anegan o lo hacen de forma muy somera.

La vegetación es un pajonal bajo, denso a semiabierto, dominado por gramíneas cespitosas o amacollantes. En función del bioclima y la mineralización del bofedal en su conjunto, las combinaciones florísticas varían, diferenciándose dos tipos principales:

Pajonal higrofitico pluviestacional: caracterizado por el predominio de *Aciachne acicularis*, *Festuca humilior* y *Senecio humillimus*.

Pajonal higrofitico xérico: se caracteriza principalmente por el dominio de *Deyeuxia curvula*.

e) **Salar:** se observa únicamente en las partes topográficamente algo más elevadas de los bofedales altiplánicos xéricos, donde contactan con la vega salina, de la que se diferencian por una mayor desecación estacional y una mayor concentración de sales, de forma que quedan cubiertos de una costra blanca continua.

Los suelos del salar se caracterizan por una hidromorfía ocasionada por el estancamiento temporal de las aguas de lluvia, por ello se clasifican como Solonchaks estágnicos cálcico-sódicos.

La vegetación del salar está constituida por una comunidad abierta con baja cobertura, dominada por especies halófitas leñosas y subfruticosas de morfología pulvinular en cojines como: *Anthobryum triandrum*, *Baccharis acaulis*, *Atriplex nitrophiloides*, *Distichlis humilis* y *Sarcocornia pulvinata*. A diferencia de la vega salina, en el salar no existen las plantas de los bofedales estacionales.

B1.4.2. AMBIENTE ACUÁTICO

Los ambientes acuáticos de los humedales en los Altos Andes de Bolivia, han recibido menos atención que los ambientes palustres, siendo su conocimiento todavía fragmentado y puntual. En base a la compilación de trabajos sobre ambientes acuáticos de Bolivia realizada por Navarro & Maldonado

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

(2002), y complementando con publicaciones recientes, se conocen cerca de 70 trabajos ecológicos (excluyendo los trabajos puramente sistemáticos) referidos a los Altos Andes.

La revisión de los mismos permite comentar que desde el punto de vista de la zona geográfica estudiada, 60% de los estudios fueron realizados en la Cordillera Oriental, en su mayoría en la Cordillera de Cochabamba, siendo muy pocos los trabajos en la Cordillera Occidental y el Altiplano. Desde el punto de vista del tipo de ambiente, los ambientes lacustres fueron los más estudiados (44% de los trabajos), les siguen trabajos que integran varios tipos de ambientes, en tanto que ríos y lagunas saladas fueron los menos estudiados. Desde el punto de vista del objeto de estudio, 24 % son estudios limnológicos integrales, porcentajes similares (17 a 18%) tienen los estudios físico-químicos, de fitoplancton, de macroinvertebrados y de zooplancton.

En relación a la vegetación acuática, es el componente estudiado más extensivamente, se halla descrita en los tratados de De La Barra (2003), Molina *et al.* (2007), Navarro & Maldonado (2002), Navarro & Ferreira (2007) y Navarro (2011), como parte de las geoserias o grupos de comunidades vegetales.

Las comunidades acuáticas tradicionalmente reconocidas son las siguientes, para las que se apuntan algunas características generales en los Altos Andes de Bolivia, en base a Navarro *et al.* (2011):

- a) **Vegetación acuática:** comunidades compuestas por varios biotipos de helófitos e hidrófitos, que se ordenan espacialmente en función de la profundidad del agua. La diversificación de las diferentes combinaciones florísticas para profundidades similares, depende principalmente de la mineralización del agua y de la biogeografía. La zonación ideal completa, incluye la vegetación enraizada con comunidades de helófitos litorales y ribereños, e hidrófitos de aguas someras y profundas. También se encuentran comunidades de vegetación flotante de pequeños pleustofitos.
- b) **Plancton:** representado principalmente por organismos errantes en la columna de agua y/o asociados a la vegetación acuática. Se distingue el fitoplancton, conformado por algas y algunas bacterias fotosintetizadoras y el zooplancton constituido por protozoarios, rotíferos y microcrustáceos. El fitoplancton altoandino muestra una variabilidad marcada relacionada con el bioclima, mostrando diferencias importantes entre ambientes pluviestacionales y xéricos, determinadas por la mineralización de sus aguas, lo mismo se puede observar en la comunidad zooplanctónica.
- c) **Macroinvertebrados bentónicos y Perizoon:** incluyen aquellos organismos que viven en el fondo de las lagunas y ríos o que se encuentran asociados a la vegetación acuática respectivamente. Están representados principalmente por anélidos, turbelarios, insectos, crustáceos y moluscos. Estos organismos son los menos conocidos a nivel sistemático en Bolivia, a excepción de los macroinvertebrados del Lago Titicaca. En la zona litoral de las lagunas se encuentran moluscos,

anfípodos, ostrácodos e insectos, mostrando una importante variación relacionada al gradiente de mineralización debido principalmente al bioclima.

d) **Peces:** la ictiofauna de la región altoandina se caracteriza por su baja diversidad y abundancia, en esta región se encuentran citados dos géneros: *Trichomycterus* y *Orestias* con varias especies.

B1.5. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN Y REGIONALIZACIÓN

Se han desarrollado a nivel mundial diferentes sistemas de clasificación de humedales utilizando diversos criterios, ya sean geomorfológicos, funcionales, hidrológicos, hidrogeológicos, etc. Podemos citar los siguientes como ejemplo:

La Convención de Ramsar definió categorías basadas en los principales hábitats presentes en los humedales. En primer nivel reconoce humedales marinos y costeros, continentales y artificiales. Entre los humedales continentales que son los representados en nuestro país, se incluyen ríos, lagos, turberas, pantanos, bosques pantanosos y manantiales entre otros.

En el inventario de humedales de la Región Neotropical (Scott & Carbonell, 1986) se definen categorías también con un criterio de hábitats, estando presentes en Bolivia: ríos (de curso lento o rápido), lagos (de origen fluvial, de agua dulce, de agua salada, embalses y presas), pastizales inundados estacionalmente, bosques cenagosos y turberas.

Desde el punto de vista funcional se reconocen humedales permanentes y estacionales, por criterios estructurales basados en el tipo de plantas dominantes y la cantidad de turba se reconocen: pantanos herbáceos, bosques pantanosos, turberas ácidas dominadas por musgos y turberas alcalinas con macrófitas (Horne & Goldman, 1994).

De acuerdo a sus conexiones con ecosistemas de agua profunda o tierra arriba, se reconocen humedales ribereños (asociados a los ríos), lacustres (asociados a lagos) y palustres (pantanos) (Odum & Barrett, 2006).

Los sistemas de regionalización (es decir para definir regiones o zonas en que los ambientes poseen características diferenciales que pueden representarse cartográficamente) son más escasos. En Bolivia se cuentan aquellos que definen ecoregiones o regiones biogeográficas, como ejemplo están el Mapa de Ecoregiones de Bolivia (Ibisch *et al.* 2003) y el Mapa Biogeográfico de Bolivia (Navarro 2011) desarrollados para ambientes terrestres en base a criterios climáticos florístico-ecológicos y biogeográficos; si bien están desarrollados para ambientes terrestres, implícitamente incluyen la parte palustre de los humedales.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

Para los bofedales de los Altos Andes existen varios trabajos que proponen clasificaciones, algunos de los cuales se citan en la tabla B1-1.

Para ambientes acuáticos son ejemplos los sistemas desarrollados por Wasson *et al.* (2002) para la Cuenca Amazónica de Bolivia, y de Navarro & Maldonado (2002) para Bolivia, ambos definen hidroecoregiones utilizando criterios basados en la organización jerárquica de los sistemas acuáticos, considerando principalmente como factores determinantes el relieve, el clima y la geología.

En el caso específico de los Altos Andes de Bolivia, son todavía escasos los trabajos ecológicos de clasificación y/o regionalización de ambientes y comunidades de los humedales, la mayoría han sido desarrollados para algunos componentes del humedal o para zonas restringidas, por ejemplo siendo Wasson & Marín (1988) propusieron una tipología de los ríos de La Paz, De la Barra (2003) clasificó la vegetación acuática lacustre de Bolivia incluyendo la zona altoandina, Prieto *et al.* (2003) clasifican y regionalizan los bofedales del sistema TDPS.

Tabla B1-1 – Criterios de clasificación y grupos clasificados por diferentes autores para bofedales en los Altos Andes de Bolivia (Elaborado en base a Prieto *et al.* 2003)

AUTOR	CRITERIOS	GRUPOS
ALZÉRRECA (1992)	UBICACIÓN ALTITUDINAL CALIDAD, CANTIDAD Y PERMANENCIA DEL AGUA	BOFEDALES ALTOANDINOS Y ALTIPLÁNICOS BOFEDALES SEMIHÚMEDOS, SEMIÁRIDOS Y ÁRIDOS
BUTTOPLH (1998)	ABUNDANCIA DEL AGUA	BOFEDALES DE MAYOR HUMEDAD, DE HUMEDAD INTERMEDIA Y DE MENOR HUMEDAD
PACHECO (1998)	PERMANENCIA DEL AGUA POSICIÓN GEOGRÁFICA ORIGEN	BOFEDALES CON AGUA PERMANENTE, TEMPORALES Y HALÓFILOS BOFEDALES DE PAMPA Y DE LADERA BOFEDALES NATURALES Y ARTIFICIALES
FIORIO (1996)	COMPOSICIÓN DE LA VEGETACIÓN Y POSICIÓN TOPOGRÁFICA	TRES ZONAS: ZONA CENTRAL, MÁS HÚMEDA E INUNDABLE, CON ESPECIES ACUÁTICAS ZONA INTERMEDIA CON PREDOMINIO DE GRAMÍNEAS Y LEGUMINOSAS ZONA PERIFÉRICA CON <i>STIPA</i> Y OTRAS ESPECIES DE LA ESTEPA
PRIETO <i>ET AL.</i> (2003)	PISO ECOLÓGICO RÉGIMEN HÍDRICO PH DEL SUELO	BOFEDALES ALTOANDINOS Y ALTIPLÁNICOS BOFEDALES HIDROMÓRFICOS Y MÉSICOS BOFEDALES ÁCIDOS, NEUTROS Y ALCALINOS

El único sistema de clasificación desarrollado hasta el momento utilizando el concepto integrado de humedal (es decir integrando el bofedal y el ambiente acuático) es el propuesto por Navarro *et al.* (2011), y la primera regionalización de humedales con estos criterios es el Mapa de Humedales de los Altos Andes de Bolivia de Navarro, Maldonado & Ferreira (2012).

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

El sistema propuesto por Navarro *et al.* (2011) se basa en los siguientes criterios:

- Criterio biogeográfico: se reconocen como unidades biogeográficas las provincias biogeográficas de la Puna Mesofítica y la Puna Xerofítica.
- Criterio fisiográfico: se diferencian 1) humedales de las cordilleras Occidental y Oriental, presentes en Bolivia por encima de 4 000 m de altitud y 2) humedales altiplánicos por debajo de los 4 000 m, tanto en las llanuras del Altiplano propiamente dicho, como en pequeñas cuencas planas intermontanas.
- Criterio bioclimático: según el bioclima sea pluviestacional (subhúmedo o húmedo) o xérico (seco y semiárido) varían las características de las aguas y de los suelos. El clima se ha clasificado de acuerdo al Modelo Bioclimático Global de Rivas-Martínez (1996 – 2010).
- Criterio hidroquímico: puesto que la mineralización del agua (contenido de iones minerales disueltos) es un factor ecológico fundamental en la diversificación de los humedales, que a su vez está relacionado principalmente con la litología y con el bioclima, se consideran categorías de mineralización desde aguas nada a poco mineralizadas, mineralizadas hasta salinas.
- Criterio catenal de paisaje: el concepto de catena constituye modernamente un modelo clave de interpretación integrada de la zonación vegetal y de los ecosistemas, tanto a nivel geobotánico como de ecología y geoquímica del paisaje. Este concepto de geocatena es el eje principal y más novedoso en la presente clasificación de humedales altoandinos, considerando que cada tipo de humedal se caracteriza y diferencia por una peculiar combinación espacial fitotopográfica de comunidades, siendo entonces la combinación o mosaico conjunto de comunidades el rasgo diferencial de cada humedal.
- Criterio biocenótico: se refiere a la composición de las comunidades biológicas palustres y acuáticas de los humedales altoandinos.

B1.6. CLASIFICACIÓN Y REGIONALIZACIÓN DE LOS HUMEDALES DEL SISTEMA TDPS

De acuerdo a los antecedentes presentados, existen dos trabajos de clasificación y regionalización que incluyen la zona del sistema TDPS: 1) el de Prieto *et al.* (2003) que enfoca en los bofedales, presentando un mapa de ubicación y distribución de los mismos para el sistema TDPS, utilizando los criterios mostrados en la tabla 1, y 2) el de Maldonado *et al.* (2012) con los criterios detallados en el anterior acápite y que generaron el Mapa de Humedales de los Altos Andes de Bolivia. Siendo este último un sistema y un mapa que integra los componentes palustre y acuático de los humedales, fue utilizado para generar el Mapa de Humedales del Sistema TDPS en la figura B1-2 y para la descripción de los humedales que se presenta a continuación.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

Como se observa en la figura B1-2 y en la tabla B1-3, en el sistema TDPS están representados 7 de los 8 tipos de humedales definidos por en el Mapa de Humedales (el único que no está presente es el Humedal Cordillerano Xérico de Lípez Suroccidental).

Tabla B1-3. Tipos de humedales definidos en el Mapa de Humedales de los Altos Andes de Bolivia (Navarro, Ferreira y Maldonado 2012) que se encuentran presentes en el sistema TDPS

PROVINCIA BIOGEOGRÁFICA	SECTOR BIOGEOGRÁFICO	BIOClima	CLASE FISIOGRÁFICA	TIPO DE HUMEDAL
PUNA MESOFÍTICA	PUNA MESOFÍTICA SUR	PLUVIESTACIONAL	ALTIPLÁNICO	HUMEDAL ALTIPLÁNICO DE LA PUNA MESOFÍTICA SUR
			CORDILLERANO	HUMEDAL CORDILLERANO DE LA PUNA MESOFÍTICA SUR
PUNA XEROFÍTICA	SAJAMA- DESAGUADERO	PLUVIESTACIONAL- XÉRICO	ALTIPLÁNICO	HUMEDAL ALTIPLÁNICO DEL SAJAMA- DESAGUADERO
			CORDILLERANO	HUMEDAL CORDILLERANO DEL SAJAMA- DESAGUADERO
	SALAR DE UYUNI	XÉRICO	ALTIPLÁNICO	HUMEDAL ALTIPLÁNICO DEL SALAR DE UYUNI
			CORDILLERANO	HUMEDAL CORDILLERANO DEL SALAR DE UYUNI
POTOSINO	PLUVIESTACIONAL- XÉRICO	CORDILLERANO	HUMEDAL CORDILLERANO DEL SECTOR POTOSINO	

Basada en la tabla B1-3 y la figura B1-2, la tabla B1-4 muestra los tipos de humedales que se presentan en las cuatro cuencas que conforman el sistema TDPS (Titicaca, Desaguadero, Poopó, Coipasa) y a continuación, un resumen del conocimiento sobre cada tipo de humedal.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

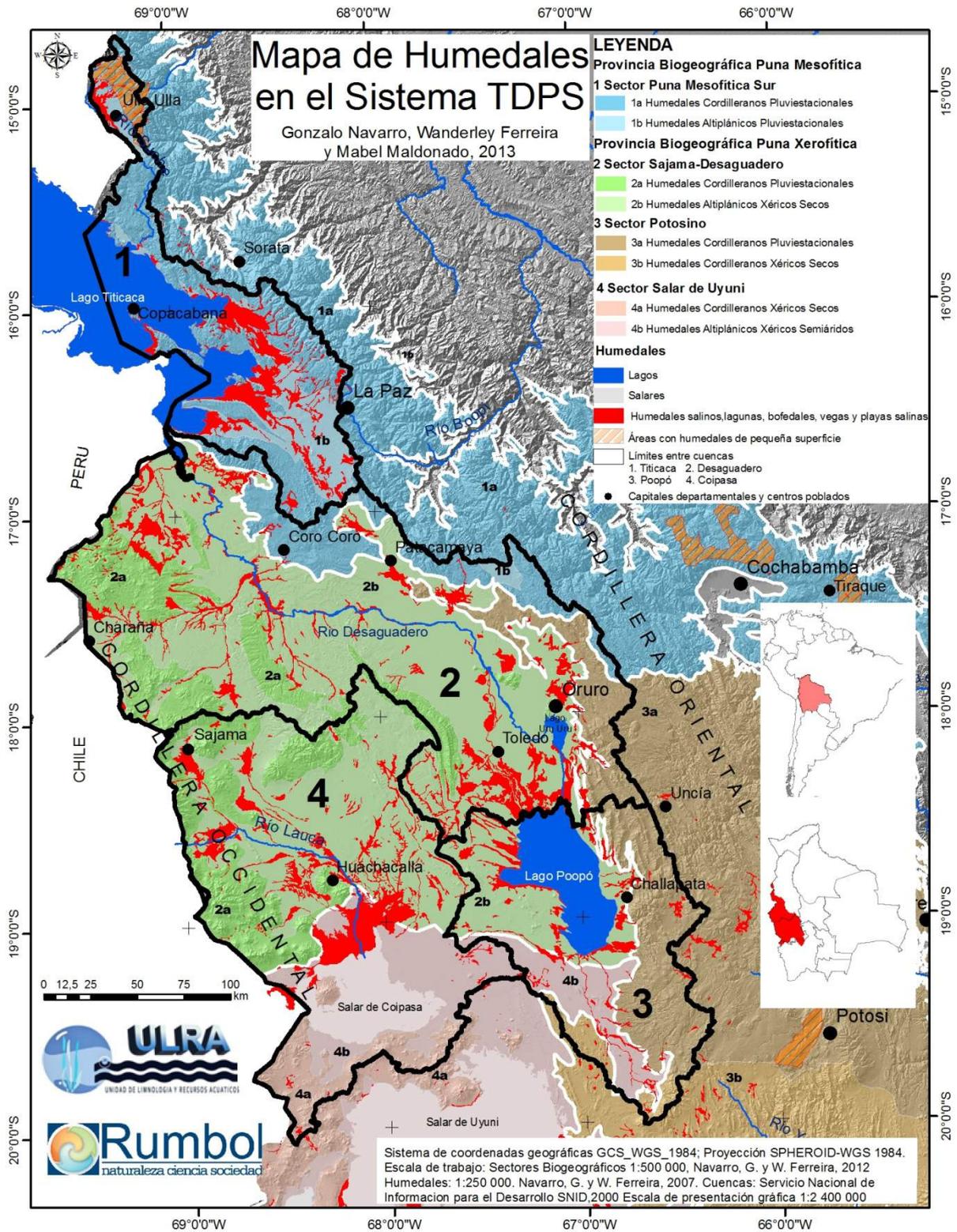


Figura B1-2. Mapa de Humedales en el Sistema TDPS elaborado en base al Mapa de Humedales de los Altos Andes de Bolivia (Navarro, Ferreira & Maldonado 2012).

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

B1.6.1. CUENCA TITICACA

Se ubica sobre la Provincia Biogeográfica de la Puna Mesofítica Sur, encontrándose representados dos tipos de humedales: cordilleranos y altiplánicos, ambos pluviestacionales, del Sector Biogeográfico del mismo nombre. Los humedales altiplánicos ocupan mayor superficie de la cuenca que los cordilleranos (Figura B1-2 y Tabla B1-4).

Tabla B1-4 – Tipos de humedales presentes en las cuencas del Sistema TDPS en base al Mapa de Humedales de los Altos Andes de Bolivia (Navarro, Ferreira y Maldonado 2012)

CUENCA	SECTOR BIOGEOGRÁFICO	TIPOS DE HUMEDALES
TITICACA	PUNA MESOFÍTICA SUR	HUMEDALES CORDILLERANOS PLUVIESTACIONALES
		HUMEDALES ALTIPLÁNICOS PLUVIESTACIONALES
DESAGUADERO	PUNA MESOFÍTICA SUR	HUMEDALES CORDILLERANOS PLUVIESTACIONALES
		HUMEDALES ALTIPLÁNICOS PLUVIESTACIONALES
	SAJAMA-DESAGUADERO	HUMEDALES CORDILLERANOS PLUVIESTACIONALES
		HUMEDALES ALTIPLÁNICOS XÉRICO-SECOS
	POTOSINO	HUMEDALES CORDILLERANOS PLUVIESTACIONALES
POOPÓ	SAJAMA-DESAGUADERO	HUMEDALES ALTIPLÁNICOS XÉRICO-SECOS
	POTOSINO	HUMEDALES CORDILLERANOS PLUVIESTACIONALES
		HUMEDALES CORDILLERANOS XÉRICO-SECOS
SALAR DE UYUNI	HUMEDALES ALTIPLÁNICOS XÉRICO-SEMIÁRIDOS	
COIPASA	SAJAMA-DESAGUADERO	HUMEDALES CORDILLERANOS PLUVIESTACIONALES
		HUMEDALES ALTIPLÁNICOS XÉRICO-SECOS
	SALAR DE UYUNI	HUMEDALES CORDILLERANOS XÉRICO-SECOS
		HUMEDALES ALTIPLÁNICOS XÉRICO-SEMIÁRIDOS

Humedales altiplánicos pluviestacionales de la Puna Mesofítica Sur en la Cuenca Titicaca

Corresponden casi en su totalidad al humedal del lago Titicaca y su zona palustre, importante Sitio Ramsar. El lago mismo ha sido objeto de estudios biológicos y ecológicos intensivos publicados en un extenso tratado (Dejoux & Ittis 1991), en tanto que su ambiente palustre es muy poco conocido. Otros humedales están representados por ríos de mediano tamaño que drenan hacia el lago, de los cuales el único que ha sido estudiado desde el punto de vista ecológico es el río Tiwanaku (Wasson & Marín 1988).

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

- **Ambiente palustre:** corresponde fundamentalmente a diferentes comunidades poco o nada estudiadas de pajonales higrofiticos dominados por *Festuca humilior*, que se anegan estacionalmente de forma somera en la época de lluvias (Figura B1-3) (Navarro & Maldonado 2002; Navarro & Ferreira 2007; Navarro 2011). Sin embargo, no existen datos publicados sobre la composición florística detallada de estos pajonales. En su mayor parte, los pajonales higrofiticos de las márgenes del Titicaca han sido y son intensamente utilizados para la ganadería, constituyendo un recurso forrajero muy importante para las poblaciones de la región. Por ello también, han sido profundamente influenciados por actividades humanas, incluyendo su reemplazo o sustitución en diversas áreas por cultivos de regadío.

Entre las comunidades palustres de aguas poco profundas del litoral del lago, hay que resaltar las grandes extensiones cubiertas por la comunidad casi monoespecífica de Totorá (*Schoenoplectus tatora*), mencionada por numerosos autores. Sin embargo, pese a su importancia ecológica y de uso, no se han realizado estudios detallados acerca de su ecología, biomasa y composición.

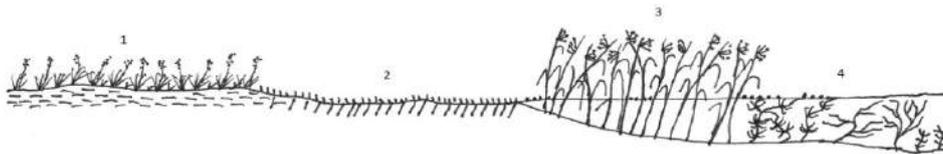


Figura B1-3. Modelo de la zonación de ecosistemas palustres y acuáticos en el Lago Titicaca (La Paz)
(Dibujo: G. Navarro, extraído de Maldonado et al. 2012)

1. Pajonales higrofiticos: comunidad de *Festuca humilior*.
 2. Bofedal estacional: comunidad de *Plantago tubulosa* y *Phylloscirpus deserticola*.
 3. Vegetación acuática emergida de las zonas costeras del lago (totoral): comunidad de *Schoenoplectus tatora*.
 4. Vegetación acuática sumergida y flotante de aguas mineralizadas: comunidades con *Miriophyllum quitensis*, *Stuckenia pectinata*, *Zannichellia palustris*, *Lemna minuta*, *Azolla filiculoides* y *Chara* spp.
- **Ambiente acuático:** el lago Titicaca es único entre los ambientes acuáticos de Bolivia, ya que el único lago profundo. Muestra un régimen térmico monomíctico caliente a polimíctico, sus aguas son hipermineralizadas y de pH alcalino (Navarro & Maldonado 2002).

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

Las comunidades de macrófitas del Lago Titicaca, están mejor conocidas que las palustres (Dejoux & Iltis 1991, Liberman *et al.* 1988, Navarro & Maldonado 2002) y corresponden en general a fitocenosis propias de aguas mineralizadas y en algunos sectores del lago a comunidades de aguas eutrofizadas. Macrófitas frecuentes o abundantes en estas comunidades, son: *Myriophyllum quitensis*, *Chara spp.*, *Stuckenia filiformis*, *S. pectinata* y *Zannichellia andina*. Son necesarios sin embargo, estudios sistematizados de estas comunidades para precisar su variación espacial en relación a la hidroquímica y eutrofización del agua, su zonación vertical con la profundidad, ciclos de biomasa, productividad y fenología, entre otros aspectos claves por su importancia para el recurso pesquero en el Titicaca.

Respecto al fitoplancton del lago Titicaca, Cadima *et al.* (2005) indican que fue estudiado por Frenguelli (1937), Iltis (1991a, 1991b, 1991c) y Lazzaro (1985), y resumen dichos estudios indicando que el fitoplancton es florísticamente pobre, con menos de 300 especies, entre las cuales clorofitas y cromofitas son las más diversas, en tanto que las clorofitas y cianofitas son las más abundantes.

Entre el zooplancton, se han estudiado los cladóceros del lago Titicaca (Rey 1991) y la distribución del zooplancton en la parte boliviana del lago (Pinto 1991). Se conocen 46 especies entre rotíferos (7), copépodos (7) y cladóceros (31), de estos últimos se tienen 8 especies endémicas, con una asociación uniforme entre *Bosmina huaronensis*-*Daphnia pulex*-*Ceriodaphnia quadrangula* y *C. dubia*. Aunque poco diversos los copépodos son dominantes entre los crustáceos zooplanctónicos (73%), siendo característicos los boequélicos *Boeckella titicacae* y *B. occidentalis*.

Los macroinvertebrados del lago Titicaca han sido extensamente estudiados (Dejoux & Iltis 1991), se reconocen 8 phyla y 30 familias, entre los que son muy diversos moluscos, insectos y macrocrustáceos. Resaltan los moluscos y ostrácodos por su endemismo y los crustáceos anfípodos por su alta abundancia (Dejoux 1991a, 1991b, Mourguiart 1991).

Respecto a la ictiofauna, el lago Titicaca es el único ambiente acuático del TDPS que presenta una diversidad importante con 24 especies del género *Orestias* (Lauzanne 1991) y dos especies del género *Trichomycterus* (Arraya *et al.* 2009).

Sobre el río Tiwanaku, Wasson & Marín (1988) estudiaron la fauna bentónica encontrando 12 taxa entre los cuales dominan en densidad y diversidad los insectos, particularmente los coleópteros élmidos.

Humedales cordilleranos pluviestacionales de la Puna Mesofítica sur en la Cuenca Titicaca

Ocupan pequeñas extensiones dentro la cuenca del lago Titicaca, sobre la Cordillera Real y las Serranías Interaltiplánicas al sur del lago. Los humedales presentes incluyen numerosas lagunas de origen glaciar, arroyos y ríos sobre las cordilleras con importantes zonas palustres, además de muy numerosas charcas presentes en los bofedales. Sobre las serranías debido a que no disponen de agua del deshielo de las cordilleras, los humedales son menos extensos, encontrándose principalmente pequeños ríos de montaña con zonas palustres menos importantes.

- **Ambiente palustre:** en la Cordillera de La Paz los humedales se desarrollan en aguas desde poco mineralizadas hasta mineralizadas (Maldonado *et al.* 2012, Navarro & Maldonado 2002; Navarro *et al.* 2011; Navarro 2011), al parecer en dependencia con la litología predominante de las cuencas. El ambiente palustre se caracteriza por pajonales higrofiticos de *Festuca humilior* y por numerosos bofedales inundados y estacionales, que en varias zonas alcanzan grandes extensiones, como en la región de Ulla Ulla (Figura B1-4). La composición florística fundamental y varias comunidades de estos pajonales y bofedales, se conocen relativamente bien (Navarro 2011, Seibert & Menhofer 1992 y 1993, Seibert 1993). Plantas notables de los bofedales de la Cordillera de La Paz, son por ejemplo: *Distichia filamentosa*, *Plantago rigida* e *Isoetes andicola*, que alcanzan en estas cordilleras su límite meridional de distribución en los Andes tropicales.



Figura B1-4. Modelo de la zonación de ecosistemas palustres y acuáticos en un humedal de aguas poco o nada mineralizadas (Alto valle del Zongo, La Paz) (Dibujo: G. Navarro, extraído de Maldonado *et al.* 2012)

1. Pajonal higrofitico: comunidad de *Festuca humilior*.
2. Bofedal estacional: comunidad de *Plantago tubulosa* y *Phylloscirpus deserticola*, con *Distichia filamentosa*.
3. Bofedal inundado: comunidad de *Distichia muscoides* y hacia los márgenes del agua con *Oxychloe andina* e *Isoetes andicola*.
4. Vegetación acuática de charcos y remansos de arroyos: comunidades con *Callitriche heteropoda*, *Isoetes andicola*, *Elatine triandra*, *Crassula venezuelensis*.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

- **Ambiente acuático:** las lagunas son el ambiente característico de estos humedales, muy numerosos y de origen glacial, aunque de áreas relativamente pequeñas son generalmente profundas y polimícticas, los ríos son en general cursos de nacimiento, de elevada pendiente y sustrato grueso (Navarro & Maldonado 2002). Las aguas en estos ambientes son desde nada mineralizadas hasta mineralizadas y pH ligeramente ácido a ligeramente alcalino (Navarro *et al.* 2011). Los humedales nada o poco mineralizados desarrollan sobre rocas cristalinas intrusivas ácidas (granitos) o areniscas, cuarcitas y esquistos paleozoicos en tanto que los humedales mineralizados se encuentran sobre pizarras o lutitas paleozoicas (Maldonado *et al.* 2012)

Se presentan varias comunidades de hidrófitos de aguas poco mineralizadas y de aguas mineralizadas, habiendo sido publicados datos preliminares de las mismas relativos a su composición florística y hábitat (Maldonado *et al.* 2012, Navarro & Maldonado 2002, Navarro *et al.* 2011, Navarro 2011, Seibert & Menhofer 1992 y 1993, Seibert 1993). En las aguas poco mineralizadas, son características (De La Barra 2003), especies como *Isoetes andicola*, *Isoetes lechleri*, *Ranunculus flagelliformis* y *Callitriche heteropoda*. En aguas mineralizadas las especies indicadoras (De La Barra 2003) frecuentes en la Cordillera Oriental de La Paz, son principalmente *Ranunculus uniflorus*, *Stuckenia filiformis*, *S. pectinata* y *Zannichellia andina*. A pesar de la existencia de estos datos, se necesitan todavía estudios de campo adicionales para precisar la composición, ecología y distribución de estas comunidades.

Las algas de los humedales de la Cordillera de La Paz, son poco conocidas. Cadima *et al.* (2005) mencionan trabajos de Couté & Iltis (1981), Pierre & Wirrmann (1986) y Servant-Vildary (1982), quienes estudiaron principalmente el fitobentos en lagunas glaciares, existiendo pocos datos sobre el fitoplancton y sobre otro tipo de ambientes como ríos y charcas en los bofedales. Los anteriores trabajos juntamente con los estudios de las autoras indican la presencia de 177 especies, de las cuales destacan especies propias de ambientes de baja mineralización y pH ligeramente ácido. Los grupos más diversos y abundantes son las cromofitas y clorofitas.

Respecto al zooplancton, se han realizado algunos trabajos en lagunas y bofedales (Aguilera 2011, Maldonado *et al.* 2012, Román & Del Castillo 1999, Segers *et al.* 1994). Se han registrado alrededor de 70 especies entre rotíferos, copépodos y cladóceros. Entre los primeros se mencionan especies cosmopolitas y estenotérmicas frías, además de un caso de endemismo con el rotífero *Lecane boliviana* sp. nov. El grupo dominante son los copépodos, siendo característico *Boeckella occidentalis*.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

Los macroinvertebrados son diversos dominando en diversidad los insectos, siendo característicos los anfípodos (Hyalellidae) y los caracoles de la familia Sphaeriidae con el género *Pisidium* (Maldonado *et al.* 2012).

B1.6.2. CUENCA DESAGUADERO

Es la cuenca de mayor extensión en el sistema TDPS, están representadas las dos Provincias Biogeográficas de la Puna (Mesofítica y Xerofítica), la primera con el Sector de la Puna Mesofítica Sur (con humedales cordilleranos y altiplánicos) y la segunda con dos sectores: Sajama-Desaguadero (con humedales cordilleranos y altiplánicos) y Potosino (con humedales cordilleranos) (Figura B1-2 y Tabla B1-4).

Humedales altiplánicos pluviestacionales de la Puna Mesofítica sur en la Cuenca Desaguadero

Constituyen el límite inferior del Sector de la Puna Mesofítica Sur ocupando pequeñas extensiones dentro la cuenca Desaguadero, con las mismas características descritas para la Cuenca Titicaca.

Humedales cordilleranos pluviestacionales de la Puna Mesofítica sur en la Cuenca Desaguadero

Ocupan superficies muy puntuales dentro de la Cuenca Desaguadero, con rasgos similares a los descritos para la Cuenca Titicaca.

Humedales altiplánicos xérico-secos del Sector Sajama-Desaguadero en la Cuenca Desaguadero

Se distribuyen en los amplios valles planos de los ríos Mauri y Desaguadero, así como en las cuencas fluvio-lacustres de los lagos Uru Uru y Poopó (playa norte), abarcando importantes superficies de bofedales asociados a ríos de mediano a gran tamaño, lagunas mayormente temporales y los lagos mencionados. Desarrollan sobre sustratos sedimentarios finos (arenas, limos y arcillas) afectados por aguas mineralizadas hasta salinas (Maldonado *et al.* 2012).

- **Ambiente palustre:** son características extensas áreas de salares dominados por *Sarcocornia pulvinata*, *Atriplex nitrophiloides* y *Anthobryum triandrum*; bofedales de vega salina caracterizados por *Plantago tubulosa*, *Triglochin concinna*, *Baccharis acaulis* y *Phylloscirpus deserticola*; y pajonales higrofiticos de *Deyeuxia curvula* (Navarro 1993, Navarro & Maldonado 2002, Navarro 2011, Navarro *et al.* 2011, Prieto *et al.* 2003, Prieto & Laura 2008) (Figura B1-5).
- **Ambiente acuático:** los sistemas acuáticos más importantes de esta zona son los ríos Mauri y Desaguadero, y el lago Uru Uru, existiendo además numerosas lagunas temporales. Los ríos son desconocidos desde el punto de vista ecológico. Del río

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

Desaguadero se puede decir que sus aguas son hipermineralizadas hasta salinas y el pH es ligeramente alcalino. Sobre las lagunas temporales de esta zona no se tienen antecedentes, solamente existen algunos datos sobre el lago Uru Uru, el cual posee aguas salinas y pH ligeramente alcalino (Navarro & Maldonado 2002).

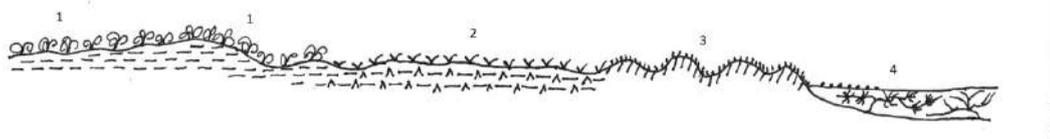


Figura B1-5. Modelo de la zonación de ecosistemas palustres y acuáticos en la llanura de inundación del río Mauri (Dibujo: G. Navarro, extraído de Maldonado et al. 2012)

1. Pajonal higrofito: comunidad de *Deyeuxia curvula*
2. Vega salina: comunidad de *Plantago tubulosa* y *Phylloscirpus deserticola* con *Baccharis acaulis* y *Triglochin concinna*.
3. Bofedal estacional: comunidad de *Plantago tubulosa* y *Phylloscirpus deserticola*.
4. Vegetación acuática sumergida y flotante de aguas mineralizadas: comunidades con *Miriophyllum quitensis*, *Stuckenia pectinata*, *Zannichellia palustris*, *Lemna minuta*, *Azolla filiculoides* y *Chara spp.*

Entre las biocenosis, las macrófitas son mejor conocidas, comunidades de aguas mineralizadas y eutrofizadas se presentan, caracterizadas por *Ranunculus uniflorus*, *Stuckenia filiformis*, *S. pectinata*, *Zannichellia andina*, *Lemna gibba*, *L. minuta* y *Azolla filiculoides*. Las comunidades de aguas salinas están caracterizadas por *Ruppia filiformis* y *Triglochin concinna* (Figura B1-5). Destacan extensas comunidades de helófitos dominadas por *Schoenoplectus tatora*, particularmente en el Lago Uru Uru y en varias zonas de la llanura de inundación del Río Desaguadero (De La Barra 2003, Liberman et al. 1991, Navarro 1993, Navarro & Maldonado 2002, Navarro 2011, Navarro et al. 2011, Prieto & Laura 2008).

Para el fitoplancton solo se conoce el trabajo de Mendoza et al. (2002) quienes citan 33 especies para el lago Uru Uru, siendo las crisofitas las más diversas y abundantes.

Sobre los macroinvertebrados del lago Uru Uru, Bocángel (1999) indica que los insectos son el grupo más diverso en tanto que los crustáceos ostrácodos son los más abundantes. En relación a los peces se ha reportado la presencia de *Orestias agassii*, *O. luteus* y *Trichomycterus* sp. en el lago Uru Uru (De la Barra et al. 2009, Rocha et al. 2002).

Humedales cordilleranos pluviestacionales del Sector Sajama-Desaguadero en la Cuenca Desaguadero

Están distribuidos en la Cordillera Occidental Norte que conforma la alta Cuenca del Río Mauri, desarrollan sobre sustratos geológicos volcánicos efusivos (lavas andesíticas y basálticas), de origen explosivo (ignimbritas) y también vulcano-sedimentarios (cenizas, lapilli y gravas). Los antecedentes sobre los humedales en esta zona son prácticamente inexistentes.

- **Ambiente palustre:** dado que desarrollan en condiciones idénticas a las del Sector Sajama-Desaguadero en la cuenca Coipasa, los bofedales serán descritos en dicha sección.
- **Ambiente acuático:** desconocido

Humedales cordilleranos pluviestacionales del Sector Potosino en la Cuenca Desaguadero

Son escasos incluyendo principalmente ríos de pequeño tamaño y sus bofedales que discurren sobre la vertiente occidental de la Cordillera Oriental Central afluyendo hacia el río Desaguadero y el lago Uru Uru. Son humedales muy poco conocidos, en especial los ambientes acuáticos.

- Ambiente palustre: dado que desarrollan en condiciones idénticas a las del Sector Potosino en la cuenca Poopó, los bofedales serán descritos en dicha sección.
- Ambiente acuático: desconocido.

B1.6.3. CUENCA POOPÓ

Comprende humedales de la Provincia Biogeográfica de la Puna Xerofítica, pertenecientes a tres sectores: Sajama-Desaguadero (humedales altiplánicos), Potosino (con humedales cordilleranos de dos bioclimas: pluviestacional y xérico-seco) y del Salar de Uyuni (humedales altiplánicos) (Figura B1-2 y Tabla B1-4).

Humedales altiplánicos xérico-secos del Sector Sajama-Desaguadero en la Cuenca Poopó

Se ubican sobre el Altiplano Central, ocupando la mayor superficie de la cuenca, el humedal del lago Poopó es el más importante de este tipo en toda la cuenca, existiendo además lagunas someras mayormente temporales. Desarrollan sobre sustratos sedimentarios finos (arenas, limos y arcillas) afectados por aguas mineralizadas hasta salinas (Maldonado *et al.* 2012).

- **Ambiente palustre:** es análogo al descrito para a los humedales altiplánicos xérico-secos de la Cuenca Desaguadero

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

- **Ambiente acuático:** comprenden el lago Poopó, sus ríos afluentes por el margen occidental y sur, y pequeñas lagunas mayormente temporales, el lago Poopó ha sido relativamente estudiado, en tanto que los otros ambientes cuentan con pocos antecedentes. El lago Poopó se distingue por ser de gran tamaño pero muy somero, debido a lo cual su cubeta está casi cubierta de vegetación palustre. Sus aguas son salinas y ligeramente alcalinas. Las lagunas y afluentes son en general de aguas hipermineralizadas hasta salinas y pH ligeramente alcalino (Navarro & Maldonado 2002, Rocha 2002)

Sobre el fitoplancton se pueden citar los trabajos de Iltis (1993), Iltis *et al.* (1990) y Mendoza *et al.* (2002). Para el lago Poopó los dos primeros trabajos indican la presencia de 28 especies siendo las más diversas las clorofitas, en cambio Mendoza *et al.* (2002) indican que se presentan 24 especies de las cuales la mayoría son crisofitas. En las lagunas fueron reportadas entre 20 y 30 especies siendo los grupos más diversos las cromofitas y clorofitas (Cadima *et al.* 2005), en los ríos se encuentra una variedad semejante pero con mayor representación de cromofitas (Mendoza *et al.* 2002, Navarro & Maldonado 2002).

Para el zooplancton, Acosta (2012) y Maldonado *et al.* (2012) indican la presencia de cerca de 40 especies entre rotíferos, copépodos y cladóceros. El grupo que domina son los copépodos o rotíferos, y son característicos de la comunidad especies relacionadas con ambientes salinos como *Boeckella poopóensis*, *Brachionus plicatilis*, *B. pterodinoides* y *Hexarthra fenica*. Para el lago Poopó en particular, Mendoza *et al.* (2002) citan 9 especies entre rotíferos, cladóceros y copépodos, siendo los copépodos dominantes numéricamente, por su parte Molina *et al.* (2012), añaden la presencia de *Boeckella meteoris*. En los ríos afluentes del lago Poopó la diversidad del zooplancton es menor que en el lago, particularmente en cladóceros (Mendoza *et al.* 2002)

Los macroinvertebrados presentan en todos los ambientes poca variedad de taxa, no se reportan más de una docena (en general a nivel de familias) tanto para el lago Poopó como para lagunas y ríos, siendo los insectos los más diversos (Mendoza *et al.* 2002). En términos de la abundancia, en el lago Poopó resaltan los moluscos (Iltis *et al.* 1990). Un grupo muy importante y característico en esta zona es el crustáceo anostraco *Artemia* sp. (camarones duende) en los ambientes salinos, junto con los caracoles de las familias Planorbidae e Hidrobiidae (Maldonado *et al.* 2012).

En relación a los peces, se ha reportado la presencia de *Orestias agassii*, *O. luteus*, *Trichomycterus* cf. *rivulatus* y *Trichomycterus* sp. en el lago Poopó (Arraya *et al.* 2009, De

la Barra *et al.* 2009, Rocha *et al.* 2002).

Humedales cordilleranos pluviestacionales del Sector Potosino en la Cuenca Poopó

Ocupan las vertientes occidentales de la Cordillera Oriental Meridional, sobre la cordillera de Azanaques principalmente, por lo que predominan sustratos geológicos volcánicos.

Los humedales no son numerosos ni extensos, incluyen principalmente ríos y sus zonas palustres, están todavía muy insuficientemente conocidos, existiendo únicamente datos preliminares de los mismos.

- **Ambiente palustre:** según los primeros antecedentes, existen bofedales en general poco extensos, asociados a topografías como cabeceras y fondos planos de valles cordilleranos. Con comunidades de bofedal inundado de aguas poco mineralizadas, dominados y caracterizados por *Distichia muscoides*; bofedales estacionales de *Phylloscirpus deserticola* y *Eleocharis gr. albibracteata*; así como pajonales higrofiticos de *Festuca humilior* (Navarro 2011; Navarro *et al.* 2011; Maldonado *et al.* 2012).
- **Ambiente acuático:** prácticamente desconocido al interior de la cuenca Poopó, se conoce que algunos ríos son de aguas poco o medianamente mineralizadas (Navarro & Maldonado 2002), con comunidades algales y bentónicas poco diversas (menos de 20 especies y 20 familias respectivamente) entre las algas, las diatomeas son altamente dominantes y entre los macroinvertebrados los insectos (Mendoza *et al.* 2002).

La vegetación acuática es totalmente desconocida.

Humedales cordilleranos xérico-secos del Sector Potosino en la Cuenca Poopó

Este tipo de humedales se ubican sobre la Cordillera Oriental Meridional y han sido caracterizados por Maldonado *et al.* (2012), sin embargo para la zona específica de la cuenca Poopó que es de muy pequeña extensión, no existen datos concretos sobre este tipo de humedales, por lo cual son desconocidos hasta el momento.

Humedales altiplánicos xérico-semiáridos del Sector Salar de Uyuni en la Cuenca Poopó

Ocupan una pequeña extensión dentro de la cuenca Poopó y son análogos a los presentes en la Cuenca Coipasa, donde se cuenta con más información por lo cual serán descritos en el siguiente acápite.

B1.6.4. CUENCA COIPASA

Están representados dos sectores de la Provincia Biogeográfica de la Puna Xerofítica: Sajama Desaguadero (con humedales cordilleranos y altiplánicos) y del Salar de Uyuni (con humedales

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

cordilleranos y altiplánicos (Figura B1-2 y Tabla B1-4).

Humedales cordilleranos pluviestacionales del Sector Sajama-Desaguadero en la Cuenca Coipasa

Se ubican sobre la Cordillera Occidental Norte y Central, bajo un clima pluviestacional y sobre sustratos geológicos volcánicos efusivos (lavas andesíticas y basálticas), de origen explosivo (ignimbritas) y también vulcano-sedimentarios (cenizas, lapilli y gravas). Ocupan una importante fracción de la cuenca.

- **Ambiente palustre:** incluye extensos bofedales inundados de aguas mineralizadas, dominados por *Oxychloe andina* y de aguas poco mineralizadas dominados por *Distichia muscoides*; bofedales estacionales de *Phylloscirpus deserticola*; pajonales higrofiticos dominados por *Deyeuxia curvula* (en aguas mineralizadas) o por *Festuca humilior* (aguas poco mineralizadas). Asimismo, en los piedemontes y valles cordilleranos, asociados a vertientes o surgencias vulcanogénicas de aguas hidrotermales muy mineralizadas a salinas, se desarrollan bofedales de vega salina caracterizados por *Plantago tubulosa*, *Triglochin concinna*, *Baccharis acaulis* y *Phylloscirpus deserticola*; con pequeñas áreas de salares caracterizados por *Sarcocornia pulvinata*, *Atriplex nitrophiloides* y *Anthobryum triandrum* (Beck et al. 2010, De La Barra 2003, Maldonado et al. 2012, Navarro 1999, Navarro & Maldonado 2002, Navarro 2011, Navarro et al. 2011, Prieto et al. 2003, Ruthsatz 1995) (Figura B1-6).

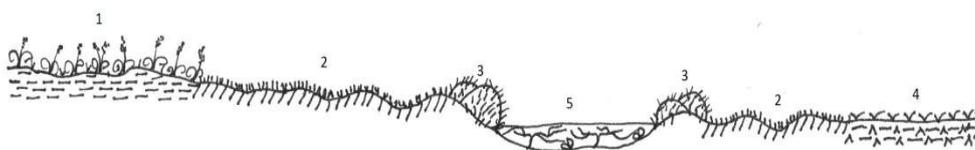


Figura B1-6. Modelo de la zonación de ecosistemas palustres y acuáticos en un humedal de aguas mineralizadas en el valle del río Sajama (Oruro). (G. Navarro, extraído de Maldonado et al. 2012)

1. Pajonal higrofitico: comunidad de *Deyeuxia curvula* ; 2. Bofedal estacional: comunidad de *Plantago tubulosa* y *Phylloscirpus deserticola*; 3. Bofedal inundado: comunidad de *Oxychloe andina*; 4. Vega salina: comunidad de *Plantago tubulosa* y *Phylloscirpus deserticola* con *Baccharis acaulis* y *Triglochin concinna*; 5. Vegetación acuática de charcos y remansos de arroyos: comunidades con *Stuckenia filiformis* y *Ranunculus uniflorus*.

- **Ambiente acuático:** comprende lagunas de diverso origen, ríos de pequeño y mediano tamaño, manantiales (muchos de ellos geotermales) y charcas permanentes y

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

estacionales al interior de los bofedales. Las aguas varían desde poco mineralizadas hasta salinas, con pH neutro ligeramente alcalino (Navarro & Maldonado 2002).

La vegetación acuática presenta comunidades caracterizadas por *Ranunculus uniflorus*, *Stuckenia filiformis* y *Zannichellia andina* en aguas mineralizadas o por *Ranunculus flagelliformis* y *Callitriche heteropoda* en aguas poco mineralizadas. En cambio, en las charcas de aguas salinas se encuentran comunidades de *Ruppia filiformis* y *Triglochin concinna* (De La Barra 2003, Maldonado *et al.* 2012, Navarro 1999, Navarro & Maldonado 2002, Navarro 2011, Navarro *et al.* 2011).

Sobre el fitoplancton hay pocos estudios, se conoce el de Acosta *et al.* (2003), Cadima *et al.* (2005), Cadima & López (2009) y Maldonado *et al.* (2012) que indican que se encuentran mas de 200 especies, con bacilariofitas y clorofitas como las más diversas y abundantes.

Para el zooplancton tampoco se encuentran muchas referencias, sólo se conocen los estudios realizados por Acosta (2003) y Maldonado *et al.* (2012). Se han listado alrededor de 40 especies entre rotíferos, cladóceros y copépodos. Son dominantes los copépodos y rotíferos, los cladóceros son poco abundantes pero bien representados, son características especies pigmentadas como las del género *Daphnia*.

Entre los macroinvertebrados son dominantes los insectos y los anfípodos Hyalellidae, siendo también importante crustáceos ostrácodos y moluscos planorbideos (Maldonado *et al.* 2012).

Existen muy pocos trabajos ecológicos sobre esta zona, se conocen los de Coronel *et al.* (2009), Goitia *et al.* (2007) y Moya *et al.* (2009) dedicados particularmente a pequeñas charcas dentro de los bofedales los dos primeros y de ríos el último.

Humedales altiplánicos xérico-secos del Sector Sajama-Desaguadero en la Cuenca Coipasa

Ocupan una importante proporción de la cuenca, presentan las mismas características que en la cuenca Poopó, con excepción de que los ambientes acuáticos en la cuenca Coipasa no incluyen lagos extensos como el Poopó, sino solamente lagunas someras muchas de ellas temporales. Sin embargo los rasgos ecológicos de los humedales son similares, por lo cual se puede referir a dicho acápite.

Humedales cordilleranos xérico-secos del Sector Salar de Uyuni en la Cuenca Coipasa

Se ubican sobre la Cordillera Occidental Central bajo un bioclima xérico seco y desarrollan por encima de los 4 100 m de altitud, sobre rocas volcánicas, principalmente andesitas, riolitas, dacitas y depósitos de cenizas, arenas y gravas volcánicas, ocupando una pequeña porción de la

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

cuenca. Las aguas son en general mineralizadas y salinas de pH ligeramente alcalino. Los humedales son muy poco conocidos.

- **Ambiente palustre:** son frecuentes los bofedales asociados a arroyos y charcas de aguas mineralizadas, con bofedales inundados que contactan hacia las zonas menos húmedas con bofedales estacionales y pajonales higrofiticos (Maldonado *et al.* 2012) (Figura B1-7).
- **Ambiente acuático:** casi desconocido para la cuenca Coipasa, no existiendo apenas datos publicados sobre la vegetación acuática cordillerana de este sector. Únicamente hay datos preliminares generales para la Cordillera de Llica (Figura B1-7) que indican comunidades de macrófitas de aguas mineralizadas localizadas en charcas de bofedales (Maldonado *et al.* 2012).

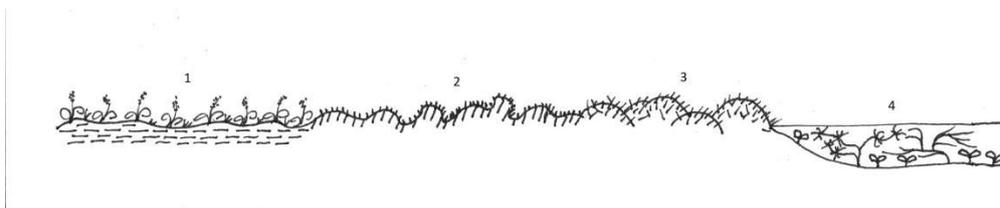


Figura B1-7. Modelo de la zonación de ecosistemas palustres y acuáticos en un humedal de aguas mineralizadas en la Cordillera de Llica (Potosí) (Dibujo: G. Navarro, extraído de Maldonado *et al.* 2012).

1. Pajonal higrofitico: comunidad de *Deyeuxia curvula*; 2. Bofedal estacional: comunidad de *Plantago tubulosa* y *Phylloscirpus deserticola*; 3. Bofedal inundado: comunidad de *Oxychloe andina* con *Phylloscirpus deserticola*; 4. Vegetación acuática sumergida de aguas mineralizadas: comunidades con *Miriophyllum quitensis*, *Stuckenia filiformis*, *Ranunculus uniflorus* y *Zannichellia andina*.

Humedales altiplánicos xérico-semiáridos del Sector Salar de Uyuni en la Cuenca Coipasa

Se distribuyen sobre el Altiplano Sur bajo un bioclima xérico semiárido. Ocupan una superficie no muy extensa en la cuenca y desarrollan sobre suelos aluviales detríticos (limos y arcillas) de las playas de los salares, que presentan depósitos de caliza, yeso y sal. Las aguas son de elevada mineralización, siendo salinas la mayoría, de pH ligeramente alcalino hasta alcalino (Maldonado *et al.* 2012). El humedal más importante es el Salar de Coipasa, encontrándose también lagunas someras, muchas de ellas temporales, hay muy pocos cursos de agua, siendo el único importante el río Lauca. Los humedales en esta zona no son muy conocidos.

- **Ambiente palustre:** caracterizado por la gran extensión de vegetación de salares asociados a la cubeta del Salar de Coipasa, y que se encuentran rodeados por pajonales higrofiticos. Las comunidades de salares anegados estacionalmente de forma somera, son similares a las existentes en el Altiplano xérico seco, estando dominadas y

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

caracterizadas (Navarro 1993, Navarro & Maldonado 2002, Navarro 2011) por *Sarcocornia pulvinata*, *Atriplex nitrophiloides* y *Anthobryum triandrum*. Los pajonales higrofíticos que contactan con los salares se hallan en general dominados por *Deyeuxia curvula*, asociada a *Festuca hypsophila* (Navarro 1993). En los márgenes de arroyos desarrollan vegas salinas, caracterizadas por *Plantago tubulosa*, *Triglochin concinna*, *Baccharis acaulis* y *Phylloscirpus deserticola*, así como pequeñas extensiones de bofedales estacionales mineralizados, dominados por *Phylloscirpus deserticola* y *Eleocharis gr. albibracteata* (Figura B1- 8).

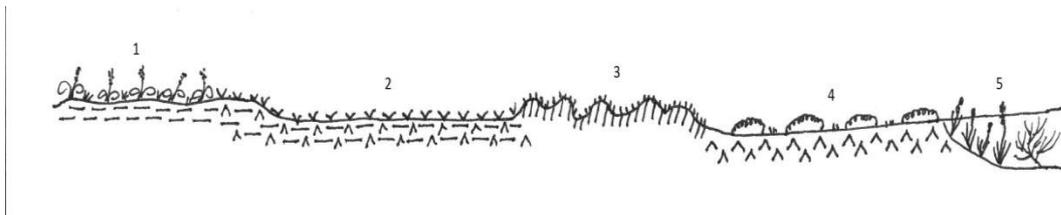


Figura B1-8. Modelo de la zonación de ecosistemas palustres y acuáticos en la playa del Salar de Coipasa (Oruro) (Dibujo: G. Navarro, extraído de Maldonado et al. 2012)

1. Pajonal higrofítico: comunidad de *Deyeuxia curvula*; 2. Vega salina en vallecitos planos de arroyos que desembocan en el salar: comunidad de *Plantago tubulosa* y *Phylloscirpus deserticola* con *Baccharis acaulis* y *Triglochin concinna*; 3. Bofedal estacional en márgenes de arroyos que desembocan en el salar: comunidad de *Plantago tubulosa* y *Phylloscirpus deserticola*, con *Eleocharis gr. Albibracteata*; 4. Vegetación salina de las playas del salar: comunidades de *Sarcocornia pulvinata*, *Anthobryum triandrum*, *Atriplex nitrophiloides* y *Distichlis humilis*; 5. Vegetación acuática sumergida de aguas someras salinas en charcas de las playas del salar: comunidades con *Triglochin concinna* y *Ruppia filifolia*.

- **Ambiente acuático:** además del Salar de Coipasa, se conocen muy pocos antecedentes para lagunas someras y endorreicas de aguas salinas (Navarro & Maldonado 2002).

La vegetación acuática (Figura B1-8), se restringe aparentemente a charcas de aguas salinas en las playas de los salares y está constituida por comunidades de macrófitas caracterizadas por *Ruppia filiformis* y *Triglochin concinna* (Navarro 1993; Navarro & Maldonado 2002; Navarro 2011; Maldonado et al. 2012).

Para las lagunas someras, Cadima et al. (2005) citan alrededor de 30 especies en el fitoplancton, de las que las cromofitas son las dominantes y mas diversas.

Para el zooplancton, en las mismas lagunas, Acosta (2012) indica que es muy pobre contándose unas 13 especies, siendo los rotíferos los más variados.

Entre los macroinvertebrados, son característicos los crustáceos anostracos del género *Artemia* y los caracoles de la familia Hidrobiidae (Maldonado et al. 2012).

B1.7. AMENAZAS SOBRE LOS HUMEDALES DEL SISTEMA TDPS

Como puede apreciarse en el Mapa de Humedales de los Altos Andes de Bolivia (Maldonado *et al.* 2012), los humedales de la Puna boliviana ocupan importantes extensiones sobre el Altiplano y la Cordillera Occidental, y gran parte de los mismos se encuentran en el sistema TDPS (Figura B1-2). Tanto por su extensión como por su importancia económica, social y cultural, los humedales del sistema TDPS deberían ser objeto de conservación prioritaria, no siendo este el caso en la actualidad. Si bien los lagos Titicaca y Poopó son sitios RAMSAR, no existen acciones concretas de gestión para la conservación de estos u otros humedales.

En el presente trabajo se realiza un primer aporte que podrá utilizarse como elemento de análisis a momento de planificar acciones de conservación en los humedales del sistema TDPS. Para ello se elaboró un mapa con el esquema metodológico resumido en la figura 9. La base cartográfica para el Mapa de Amenazas fue el Mapa de Cuencas y Subcuencas, generado a partir del ajuste del Mapa de Cuencas del SNID (2000), Subcuencas a nivel 4 y 5 (VCRH 2008) sobre el cual fueron intersectados los centros poblados, la población, las vías principales, secundarias y férreas. Con la sobreposición de la información espacial, se generó una base espacial de datos (geodatabase), en la cual se calcularon los índices de presión para cada una de las variables y el índice de presión integrado sobre el cual se elaboró el mapa de amenazas a nivel de las subcuencas del sistema TDPS.

El resultado final es el Mapa de Amenazas para los Humedales del Sistema TDPS que se presenta en la figura B1-9, a partir de ella se puede comentar lo siguiente:

- En la Cuenca Titicaca, la mayor proporción de su superficie se encuentra bajo amenaza alta a muy alta, lo cual incluye la mayor parte de la zona palustre, las cabeceras de los ríos en la Cordillera Real y el lago mismo, depósito final de la mayoría de actividades antrópicas en la cuenca. Las zonas con menor amenaza se encuentran en las Serranías Interaltiplánicas al sur del lago, y las zonas de cabeceras en la Cordillera de Apolobamba.
- En la Cuenca Desaguadero, una importante superficie está bajo amenaza muy alta al sur del río Desaguadero y sobre el Altiplano; al norte del río Desaguadero sobre el Altiplano y la Cordillera Oriental la amenaza es de grado medio, en tanto que las zonas con baja amenaza son las de la Cordillera Occidental en las cabeceras del río Mauri.
- Para la Cuenca Poopó, la mayor proporción de territorio está bajo amenaza muy alta, alrededor del lago mismo, tanto en el Altiplano como en la Cordillera Oriental. Amenaza baja a muy baja se ubica al sur del lago Poopó particularmente sobre el Altiplano.

- Por último, en la Cuenca Coipasa no se encuentra ninguna zona con amenaza alta o muy alta, solo hay una franja estrecha sobre el Altiplano al noreste de la cuenca con amenaza media, estando el resto de la cuenca bajo amenaza baja a muy baja.

En conjunto, en el sistema TDPS, una importante proporción está bajo amenaza de media a muy alta, relacionada evidentemente con las zonas de poblaciones urbanas grandes como La Paz y Oruro, además de zonas agrícolas-ganaderas y mineras, en especial sobre el Altiplano Norte y Central, y la Cordillera Oriental. Las zonas bajo menor amenaza y que podríamos suponer son las mejor conservadas hasta el momento, se encuentran en la Cordillera Occidental y el Altiplano adyacente a la misma.

B1.8. VACÍOS DE INFORMACIÓN Y RECOMENDACIONES

Sobre los vacíos de información se pueden realizar las siguientes puntualizaciones:

- En general, el conocimiento ecológico de los humedales en el sistema TDPS es incipiente, existen antecedentes puntuales y dispersos (por ejemplo para los ambientes acuáticos), o enfocados solo en alguno de los componentes del humedal (por ejemplo en el ambiente palustre).
- El componente palustre de los humedales parece tener un mejor grado de conocimiento, desde el punto de vista descriptivo biogeográfico y ecológico, sin embargo poco se sabe hasta ahora sobre la dinámica ecológica de la vegetación y su relación con los factores de presión antrópica.
- El componente acuático es en general poco conocido, si bien existe alguna información sobre la composición y distribución de especies acuáticas, los estudios ecológicos son casi inexistentes, no permitiendo conocer los factores que controlan los procesos ecológicos en los ambientes acuáticos.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

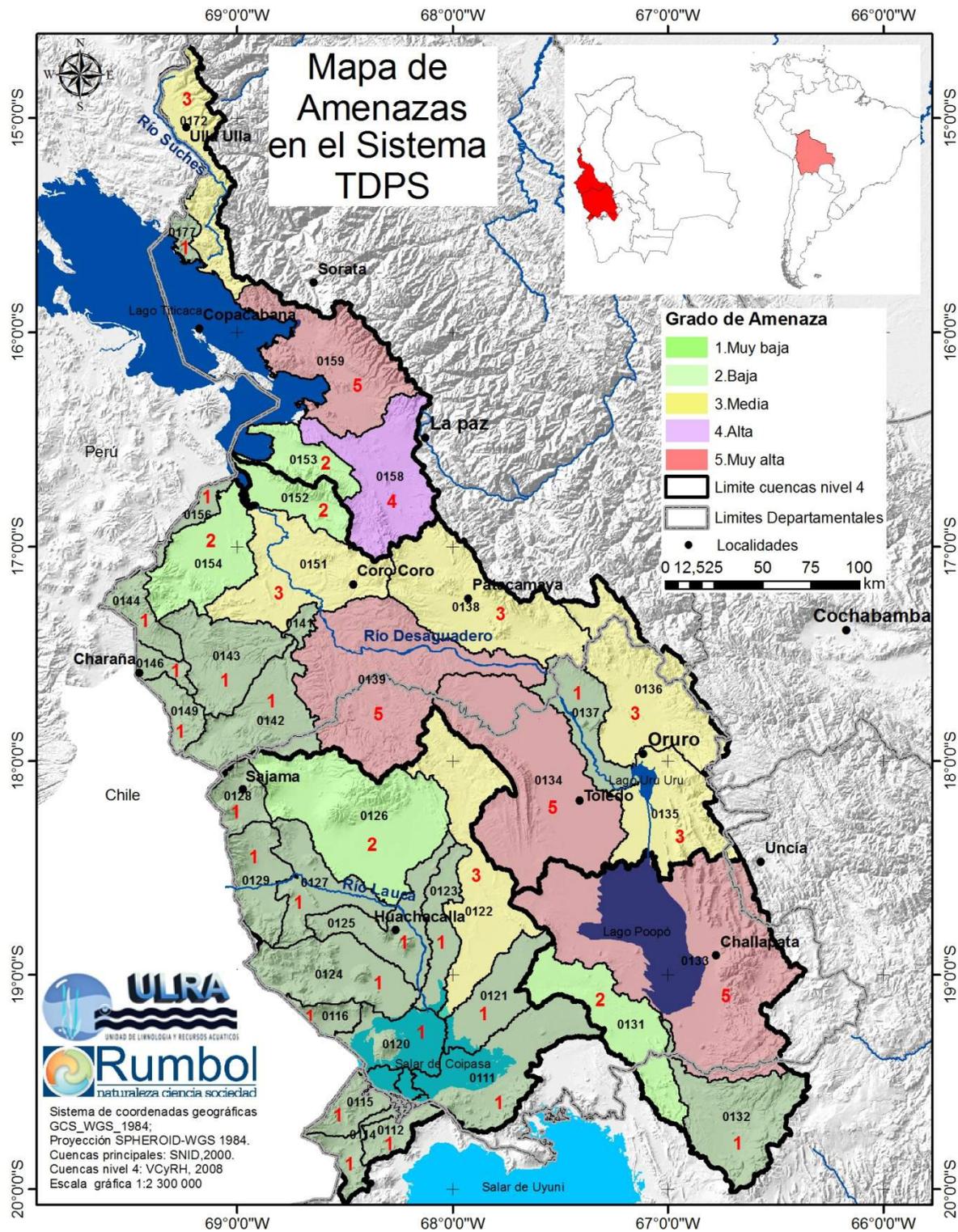


Figura B1-9. Mapa de Amenazas para los humedales del Sistema TDPS.

- Sobre la clasificación y regionalización de los humedales, los esfuerzos son escasos, e igualmente focalizados en el ambiente palustre debido a su importancia en la ganadería. Solo se cuenta con un sistema ecológico-biogeográfico, que a pesar de integrar el

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

humedal y abarcar toda la Puna boliviana, es solamente una propuesta que debe validarse con trabajo de campo extensivo.

- En resumen, hasta el momento se cuenta con un inventario básico de la biodiversidad en los humedales, siendo el ambiente palustre mejor conocido que el acuático. En este último debe realizarse un mayor esfuerzo sobre la resolución y definición taxonómica de varios grupos (por ejemplo macroinvertebrados). También debe anotarse que hay zonas dentro del sistema TDPS que no son conocidas. De esta forma, los vacíos de conocimiento sobre los humedales del sistema TDPS incluyen principalmente los aspectos ecológicos del ambiente palustre y acuático, y el conocimiento descriptivo de ciertas zonas dentro del Sistema TDPS. Esta información es imprescindible para generar herramientas de gestión y conservación, por ejemplo un modelo predictivo que permita evaluar y predecir los efectos producidos por presión antrópica o por fenómenos naturales (como el cambio climático).

A partir de las anteriores observaciones, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Para lograr un adecuado conocimiento y comprensión de los humedales que sea útil para generar acciones concretas de conservación y manejo de los recursos que representan, recomendamos como prioritario el desarrollo de investigaciones ecofuncionales en los siguientes aspectos clave:
 - Las dinámicas hidrológicas y geo-edáficas que controlan la diferenciación, distribución y evolución de los humedales. Principalmente las interacciones entre los suelos del humedal y los flujos hídricos superficiales y subterráneos (napas freáticas poco profundas). Al respecto, no se conocen estudios detallados que pongan de manifiesto estos procesos en relación a la estructura y composición de los humedales, existiendo únicamente modelos regionales hidrogeológicos muy generales e igualmente estudios generales sobre los suelos.
 - El estudio sistematizado de las dinámicas sucesionales en los diferentes tipos de humedales como respuesta a procesos antrópicos (ganadería, cultivos extensivos de quinua, minería, quemados de pastos) o naturales (fluctuaciones climáticas).
- Es imprescindible completar la información descriptiva sobre la diversidad palustre y acuática, y las características estructurales de las biocenosis, tomando en cuenta el potencial de micro-endemismos y endemismos que es característico de los Andes, en zonas como los tramos centrales de las cordilleras Occidental y Oriental y el ambiente palustre del lago Titicaca.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

- Desarrollar una red virtual y centralizada de información sobre los humedales del Sistema TDPS, de forma que sea accesible a todo tipo de usuarios (investigadores, gestores, educadores, etc.).
- Realizar una evaluación del estado de conservación de los humedales del sistema TDPS, ya que como se evidenció en este trabajo, la mayor parte del área TDPS está bajo amenaza media a muy alta.
- Paralelamente a un estudio ecológico, es imprescindible realizar una valoración de los servicios ecosistémicos que prestan los humedales, a fin de evaluar las posibles pérdidas de beneficios que solo son proporcionados por la existencia de estos ecosistemas (hoy amenazados) y que son la base para el desarrollo social y económico local.

B1.9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acosta F., Cadima M. & Maldonado M. 2003. Patrones espaciales de la comunidad planctónica lacustre en un gradiente biofísico y bioclimático en Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 13: 31-53.
- Acosta F. 2012. Variabilidad del plancton lacustre en un gradiente geofísico y bioclimático de Bolivia. Tesis para obtener el título de Magíster en Ciencias Ambientales, UMSS. Cochabamba, Bolivia. 79 p.
- Arraya M., Maldonado M., Carvajal F.M. & Fernández L. 2009. Contribución al conocimiento de los peces del género *M. Trichomycterus* (Siluriformes: Trichomycteridae) en los Andes de Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 26: 45-52.
- Aguilera X. 2011. Zooplankton communities along conductivity and UV radiation gradients in the high Andes lakes of Bolivia: a geographical and local study. Informe final Proyecto IFS-UMSS. 20p.
- Beck S. G., Domic A., García C., Meneses R. I., Yager K. & Halloy S. 2010. El Parque Nacional Sajama y sus plantas, Departamento de Oruro, Bolivia. Herbario Nacional de Bolivia. La Paz. 250 p.
- Bocángel D. 1999. Efecto de la contaminación de las aguas del lago Uru Uru sobre las comunidades de macroinvertebrados acuáticos. Tesis de Licenciatura en Biología, UMSA. La Paz, Bolivia. 133 p.
- Cadima M., Fernández E. & López L. 2005. Algas de Bolivia, con énfasis en el fitoplancton. Importancia, ecología, aplicaciones y distribución de géneros. Ed. Centro de Ecología Simón I. Patiño. Cochabamba, Bolivia. 378 p.
- Cadima, M. & López L. 2009. Las algas en los bofedales altoandinos de Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 26: 53-62.
- Coronel J. S., de la Barra N. & Aguilera X. 2009. Bofedales altoandinos de Bolivia: Vegetación acuática y factores ambientales. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 26: 23-34.
- Couté A. & Iltis A. 1988. Étude en microscopie électronique a balayage de quelques Desmidiacées (Chlorophyta, Zygothryxaceae) des lacs andins boliviens. *Cryptogamie, Algologie* (1): 13-26.
- Dejoux C. & Iltis A. (Eds.). 1991. El lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM-HISBOL. La Paz, Bolivia.
- Dejoux C. 1991. Los anfípodos. 353-362. In: Dejoux, C. & Iltis A. (eds.). El lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM- HISBOL. La Paz, Bolivia.
- Dejoux C. 1991. Los moluscos. 321-343. In: Dejoux C. & Iltis A. (eds.). El lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM- HISBOL. La Paz, Bolivia.
- De la Barra N. 2003. Clasificación ecológica de la vegetación acuática lacustre en Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 13: 65-93.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

- De la Barra E., Maldonado M., Carvajal F. M., & Coronel J. S. 2009. Los peces del género *Orestias* (Cyprinodontiformes, Cyprinodontidae) en la puna meridional de Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 26: 15-21.
- Frenguelli J. 1937. Diatomeas del Lago Titicaca. *Boletín del Museo de Historia Natural "Javier Prado"*: 14-25. Argentina.
- Goitia E., Maldonado M., Acosta F., de la Barra N., Cadima M., Coronel J. & Salvatierra A. 2007. Tipificación de humedales antoandinos de Bolivia: biocenosis acuática de los bofedales. P: 1125-1129. En: Feyen J., Aguirre L. & Moraes M. (Eds.). *Memorias del Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales Vol II*. Cochabamba, Bolivia.
- Horne A. J. & Goldman Ch. R. 1994. *Limnology*. 2nd Ed. Mac Graw-Hill Internacional Editions, Biological Science Series. 575 p.
- Ibisch P. L., Beck S. B., Berckmann B. & Carretero A. 2003. Ecoregiones y ecosistemas. P: 47-88. En: Ibisch P. L. & Mérida G. (Eds.). *Biodiversidad: la riqueza de Bolivia*. Ed. FAN, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- Iltis A. 1991a. Algues du Lac Titicaca Bolivien. *Cryptogamie, Algologie* 12 (3): 213-230.
- Iltis A. 1991b. Estudio florístico general. P: 193-197. In: Dejoux C. & Iltis A. (Eds.). *El lago Titicaca: Síntesis del conocimiento actual*. ORSTOM-HISBOL. La Paz, Bolivia.
- Iltis A. 1991c. Aspecto cuantitativo y poblaciones. 199-210. In: Dejoux C. & Iltis A. (eds.). *El lago Titicaca: síntesis del conocimientos limnológico actual*. ORSTOM- HISBOL. La Paz, Bolivia.
- Iltis A.; Dejoux C. & Wasson J. G. 1990. Datos hidrobiológicos referentes al lago Poopó (Bolivia). Informe N° 21. UMSA-ORSTOM. La Paz, Bolivia. 19 p.
- Iltis A. 1993. Recent limnological changes in a saline lake of the Bolivian Altiplano, Lake Poopo. *Int. J. Salt Lake Res.* 2 (1): 17-28.
- Lara R. & Lenis C. 1996. Caracterización ambiental de las vegas altoandinas en los Lípez Potosí (Bolivia). *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 1 (1): 61-69.
- Lauzanne L. 1991. Especies nativas: los *Orestias*. 409-423. In: Dejoux, C. y A. Iltis (eds.). *El lago Titicaca: síntesis del conocimientos limnológico actual*. ORSTOM- HISBOL. La Paz, Bolivia.
- Lazzaro X. 1985. Poblaciones, biomásas y producciones fitoplanctónicas del Lago Titicaca. *Ecología en Bolivia* 7: 23-63.
- Liberman M., Pedrotti F. & Venanzoni R. 1988. Le associazoni della clase Lemnatea del Lago Titicaca (Bolivia). *Hidrobiol.* 2 (2-3): 377-388.
- Liberman M., Pedrotti F. & Venanzoni R. 1991. La vegetación flotante de la clase Lemnatea del Lago Uru Uru, Depto. de Oruro (Bolivia). *Ecología en Bolivia* 17: 47-51.
- Maldonado M., Navarro G., Acosta F., Aguilera X. De la Barra N., Cadima M., Coronel J., Fernández E., Ferreira W. & Goitia E. 2012. Humedales y cambio climático en los Altos Andes de Bolivia. *Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos, Universidad Mayor de San Simón*. Cochabamba. 40 p. + 1 mapa.
- Mendoza C., Gutiérrez M., Pinto J. & Villarte F. 2002. *Limnología*. P: 75-91. In: Rocha O. (Ed.). *Diagnóstico de los recursos naturales y culturales de los lagos Poopó y Uru Uru, Oruro-Bolivia*. Convención RAMSAR, WCS/Bolivia, La Paz, Bolivia.
- Molina J. A., Navarro G., De La Barra N. & Lumbreras A. 2007. Andean aquatic vegetation in central Bolivia. *Phytocoenologia* 37 (3-4): 753-768.
- Molina C. I., Ibañez C. & Gibon F. M. 2012. Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopó, Oruro, Bolivia): Posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecología en Bolivia* 47 (2): 99-118.
- Moya N., Gibon F. M., Oberdorff T., Rosales C. & Dominguez E. 2009. Comparación de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos intermitentes y permanentes del Altiplano boliviano: Implicaciones para el futuro cambio climático. *Ecología Aplicada* 8 (2):105-114.
- Mourguiart P. 1991. Los ostrácodos. 345-352. In: Dejoux, C. y A. Iltis (eds.). *El lago Titicaca: síntesis del conocimientos limnológico actual*. ORSTOM- HISBOL. La Paz, Bolivia.
- Navarro G. 1993. Vegetación de Bolivia: el Altiplano meridional. *Rivasgodaya* 7: 69-98.
- Navarro G. 1999. Aproximación a la tipificación biogeográfico-ecológica de los sistemas acuáticos y palustres

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

- de Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 6: 95-110.
- Navarro G. 2011. Clasificación de la Vegetación de Bolivia. Editorial Centro de Ecología Simón I. Patiño. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 670 p.
- Navarro G. & Maldonado M. 2002. Geografía Ecológica de Bolivia. Vegetación y Ambientes Acuáticos. Editorial Centro de Ecología Simón I. Patiño. Cochabamba. 719 p.
- Navarro G. & Ferreira W. 2007. Mapa de Vegetación de Bolivia, escala 1: 250 000. Edición CD-ROM. The Nature Conservancy (TNC). ISBN 978-99954-0-168-9.
- Navarro G., De la Barra N., Goitia E. & Maldonado M. 2011. Propuesta metodológica para la clasificación de los humedales altoandinos de Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 29: 1-22.
- Odum E. P. & Barrett G.W. 2006. Fundamentos de ecología. 5ª ed. Thomson Learning, México. 598 p.
- Pierre J. F. & Wirrmann D. 1986. Diatomées et sédiments holocènes du lac Khara Kkota (Bolivie). *Géodynamique* 1(2): 135-145.
- Pinto J. 1991. Distribución del zooplancton en la parte boliviana del lago. P: 277-283. En: Dejoux C. & Iltis A. (Eds). *El Lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual*. ORSTOM-HISBOL. La Paz, Bolivia.
- Prieto G., Alzerreca H., Laura J., Luna D. & Laguna S. 2002. Características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema T.D.P.S. P: 13-38. En: Rocha O. & Sáez C. (Eds.) *Uso pastoril en humedales altoandinos*. Dirección General de Biodiversidad. La Paz, Bolivia.
- Prieto G. & Laura J. 2008. Vegetación y cultivos agrícolas. P: 83-132. En: Rocha O. & Aguilar S. (Eds.). *Bases Técnicas para el Plan de Manejo del Sitio Ramsar Lagos Poopó y Uru Uru*. Oruro-Bolivia.
- Rey J. 1991. Los cladóceros. P: 265-276. En: Dejoux C. & Iltis A. (Eds). *El Lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual*. ORSTOM-HISBOL. La Paz, Bolivia.
- Rivas-Martínez S. 1996-2010. Sistema de Clasificación Bioclimática Mundial. Centro de Investigaciones Fitosociológicas. Madrid. www.ucm.es/info/cif/book/bioc/global_bioclimatics-2008_00.htm
- Román E. Y. & Del Castillo M. 1999. Estructura vertical de la taxocenosis de microcrustáceos planctónicos en la laguna Mynas Kkota (La Paz-Bolivia). *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* : 145-153.
- Rocha O. 2002. Diagnóstico de los recursos naturales y culturales de los lagos Poopó y UruUru (Oruro, Bolivia). Convención RAMSAR, WCS/Bolivia, La Paz, Bolivia. 240 p.
- Rocha O., Quiroga C. & Martínez O. 2002. Fauna. En: Rocha O. (Ed). *Diagnóstico de los recursos naturales y culturales de los lagos Poopó y Uru Uru (Oruro, Bolivia)*. Convención RAMSAR, WCS/Bolivia, La Paz, Bolivia. 240 p.
- Ruthsatz B. 1995. Vegetation und Ökologie tropischer Hochgebirgsmoore in den Anden Nord-Chiles. *Phytocoenologia* 25 (2): 185-234.
- Scott D. A. & Carbonel M. (Compiladores). 1986. Inventario de Humedales de la Región Neotropical. IWRB Slimbridge & UICN Cambridge, Reino Unido. 702 p.
- Secretaría de la Convención de Ramsar. 2013. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971) 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- Segers H., Meneses L. & Del Castillo M. 1994. Rotífera (Monogononta) from Lake Kothia, a high-altitude lake in the Bolivian Andes. *Arch. Hydrobiologia* 132 (2): 227-236.
- Seibert P. 1993. La vegetación de la región de los Kallawayas y del altiplano de Ulla-Ulla en los Andes bolivianos. *Ecología en Bolivia* 20: 1 – 84.
- Seibert P. & Menhofer X. 1992/1993. Die Vegetation des Wohngebietes der Kallawayas und des Hochlandes von Ulla-Ulla in den bolivianischen Anden. *Phytocoenologia* 20 (2, 3): 145 – 276 y 289 – 438.
- Servant-Vildary S. 1982. Altitudinal zonation of mountainous diatom flora in Bolivia: application to the study of the Quaternary. *Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 25 (1-2): 179-210.
- Valdivia J. & Massy N. 1996. Mapeo y caracterización de los campos nativos de pastoreo del cantón San José de Llanga. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 1 (1): 39-51.

B-1 Clasificación y regionalización de los humedales del Sistema TDPS

- Wasson J. G. & Marín R. 1988. Tipología y potencialidades biológicas de los ríos de altura en la región de La Paz (Bolivia): metodología y primeros resultados. 97-121. Memoria, Sociedad de Ciencias Naturales La Salles. Tomo XLVIII: 97-122.
- Wasson J. G., Barrera S., Barrere B., Binet D., Collomb D., Gonzáles I., Gourdin F., Guyot J. L. & Rocbabado G. 2002. Hydro-ecoregions of the Bolivian Amazon: a geographical framework for the functioning of river ecosystems. P. 69-91. En: Mc Clain M. E. (ed.). The Ecohydrology of South American Rivers and Wetlands. IAHS Special Publication No. 6.



B-2

BIODIVERSIDAD ÍCTICA EN EL LAGO TITICACA

FISH BIODIVERSITY IN LAKE TITICACA

Carla Ibáñez Luna – UMSA-IE - ibanezluna@yahoo.com

Bernard Hugueny IRD – hugueny@mnhn.fr

Yareli Esquer Garrigos MNHN

Claudia Zepita – UMSA IE

Ramiro Gutiérrez UMSA IE

RESUMEN

Se realizó una evaluación del conocimiento acerca de la ictio-fauna mediante una compilación de los trabajos de revistas científicas, libros, tesis, información de actividades internacionales y reportes de instituciones acreditadas.

Los principales grupos de peces nativos corresponden a los géneros *Orestias*, y *Trichomycterus*. La información está presentada por orden cronológico para la descripción de las especies del género *Orestias* que es el grupo más estudiado. Entre las especies más estudiadas están *O. agassii*, *O. ispi*, *O. luteus*, *O. albus*, la extinta *O. cuvieri* y la especie en peligro de extinción *O. pentlandii*. El grupo menos estudiado es el de los *Trichomycterus*. En cuanto a las especies que fueron introducidas como alternativa para el desarrollo pesquero, se presentan los pocos estudios referidos al efecto o posible impacto sobre las especies nativas.

La mayor parte de los trabajos sobre ictiología del sistema TDPS se enfocan sobre la descripción taxonómica de las especies, sin embargo existen todavía incertidumbres a este nivel. Es urgente una revisión del género *Orestias* para poder separar morfológicamente las especies y realizar estudios que permitan explicar su alta variabilidad fenotípica considerando los procesos de especiación, ecológicos, sus ciclos biológicos y estrategias alimentarias, necesarios para un plan estratégico de conservación.

PALABRAS CLAVE: ORESTIAS, TRICHOMYCTERUS, LAGO TITICACA, BIODIVERSIDAD, ESPECIES INTRODUCIDAS, MORFOLOGÍA, RÉGIMEN ALIMENTICIO

SUMMARY

This fish biodiversity chapter has been performed using a compilation of the work of scientific journals, books, theses, international activity information and reports from accredited institutions.

The main native fish groups are the genus *Orestias* and *Trichomycterus*. But the major part of the contributions referred to the description of the genus *Orestias*, -this information was presented in chronological order. Among the most studied species are also *O. agassii*, *O. ispi*, *O. luteus*, *O. albus*, the former *O. cuvieri* and *O. pentlandii* critically threatened. *Trichomycterus* are the least studied group. There is also only few studies that focused on the introduced species, which were implemented as an alternative for fisheries development, and information related to their impact on native species is scarce. However available data indicated that abundance or density of both introduced and native species have decreased in the last decades.

Therefore, as *Orestias* constitute the major native fisheries resource, a strategic management plan for the conservation of these species and especially those that present vulnerable populations will require the revision of the genus to explain the high phenotypic variability and consider speciation processes, ecological, their life cycles and feeding strategies.

KEY WORDS: ORESTIAS, TRICHOMYCTERUS, LAKE TITICACA, BIODIVERSITY, INTRODUCED SPECIES, MORPHOLOGY, DIET.

B2.1. INTRODUCCIÓN

Los conocimientos acerca de la biodiversidad íctica se han adquirido en base a una revisión bibliográfica, recopilando la información disponible, en revistas científicas, libros, tesis, información de actividades internacionales y reportes de instituciones acreditadas y prensa escrita. La mayor información disponible es referente principalmente al género *Orestias*. Este género se encuentra distribuido en los sistemas acuáticos de los Andes Centrales y es el único representante en Sudamérica de los Cyprinodontides, es el grupo representativo del sistema TDP, pero con mayor distribución en el Lago Titicaca (Lauzanne 1981). Los otros grupos que forman parte de la biodiversidad íctica y que serán considerados son del género *Trichomycterus* y varias especies introducidas de la trucha y el pejerrey.

En este capítulo se detallara de forma cronológica los registros sobre el número de especies descritas para el Lago Titicaca, incluyendo las especies introducidas, se mencionara los trabajos relevantes que aportaron al conocimiento de la biología de las especies y haremos énfasis en la variabilidad

morfológica del género *Orestias* a través de estudios que intentaron resolver las incertidumbres taxonómicas. En base a esta investigación se analizara la información existente de forma general y se identificara los vacíos de información, para finalmente proponer lineamientos que permitan un plan de conservación considerando que el Lago Titicaca es un sitio RAMSAR y que la mayoría de sus especies nativas se encuentran categorizadas (UICN) como vulnerables en el libro rojo de vertebrados del Ministerio de Medio Ambiente.

B2.2. BIODIVERSIDAD

B2.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA FAUNA ICTICA DEL LAGO TITICACA

Genero *Trichomycterus*

En el Lago Titicaca parte de la fauna nativa esta conformada por peces del genero *Trichomycterus*, dos posibles especies han sido reportadas *T. dispar* (mauri) y *T. rivulatus* (suches) (Tschudi 1845, Cuvier & Valenciennes 1846). Según de Sostoa (2010) no hay estudios que caractericen adecuadamente la variación morfológica y que permita una adecuada asignación de los ejemplares colectados, así mismo estas dos especies han sufrido constantes cambios taxonómicos a consecuencia de que las características diagnósticas son contradictorias opuestas o solapantes. El estudio de Crespo (2005), que trabajo con la morfología y características merísticas en individuos de diferentes localidades del Lago Titicaca confirmo la existencia de *T. rivulatus* y ningún individuo de *T. dispar*, pero parece haber otra especie diferente a *T. dispar*. Finalmente de Sostoa (2010) indica que se deben aun realizar estudios morfológicos enfocados en la caracterización de la variación poblacional, en vista de que los valores de la divergencia genética es alto (7%) para diferenciar especies.

Especies introducidas

A partir de la década de 1939 fueron introducidas varias especies de truchas como ser: la trucha común (*Salmo trutta*), trucha lacustre (*Salvelinus namaycush*), la trucha de fontana (*Salvelinus fontinalis*), la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*). En 1946 fue introducido el pejerrey en el Lago Poopó a la época reconocido como *Basilichthys bonariensis* (Valenciennes 1835), actualmente sigue empleándose *Odontesthes bonariensis* (Dejoux 1991), fue introducido por un club de pesca (Loubens & Osorio 1991). El pejerrey hacia los 1955-56, ha logrando colonizar con éxito el Lago Titicaca luego de haber remontado el río Desaguadero (Lauzanne 1981). Estas especies foráneas fueron introducidas con fines de mejorar la pesca comercial, sin embargo han tenido un efecto en las

B-2 Biodiversidad íctica en el Lago Titicaca

poblaciones nativas, se reportó la desaparición de *O. cuvieri* y *O. pentlandii* luego de la introducción de la trucha en el primer caso y del pejerrey para la segunda especie (Loubens & Osorio 1991, de Sostoa 2010). Las causas en la disminución de sus poblaciones pueden ser debidos a la competencia o por depredación, o por enfermedades como las mencionadas por Wurtsbaugh & Tapia (1988) que indican que a la introducción de salmónidos y aterínidos siguió una epizootia del parásito protozoo *Ichthyophthirius multifiliis*, que, según las estimaciones, en diciembre de 1981 causó la muerte de 18 millones de *Orestias* spp. El 93 por ciento de los peces muertos que se recogieron eran ejemplares adultos de *O. agassii*, que es una especie importante desde el punto de vista comercial que abunda en la zona litoral. Sin embargo actualmente también las densidades de estas especies se han visto reducidas, por lo que se establecieron reglamentos de ordenamiento pesquero (Decreto supremo N. 023 – 2008 PRODUCE) (Ver capítulo C1).

Género *Orestias*

La diversidad íctica del Lago Titicaca esta conformada principalmente por especies del género *Orestias*, es el Lago Titicaca que concentra la mayor diversidad de este grupo considerado endémico del Altiplano andino. La primera descripción corresponde a Valenciennes (1839). Como se puede observar en la tabla B2-1, varios han sido los trabajos de sistemática y revisiones realizadas en este grupo y alrededor de 69 “especies” fueron reportadas, registradas y/o descritas. Podemos observar que esta información se genero desde Valenciennes (1839) hasta de Sostoa (2010). Por ejemplo, con un total de 45 reportes, *O. agassii* que ha sido reportada desde 1846 hasta 2010, con variaciones en su escritura *O. agassisii* u *O. agassizi* pero que se refieren a la misma especie. Fue Tchernavin (1944) quien caracterizo numerosas subespecies de *Orestias agassii* (*O. pequini*, *O. tschudii*, etc.), pero que fueron revisadas por Lauzanne (1991) y reconocidas como variedades fenotípicas de *O. agassii*. Pero de otro lado Lauzanne (1981) describió 3 nuevas especies para el Lago menor: *Orestias ispi*, *Orestias forgeti* y *Orestias tchernavini*. Sin embargo hasta el reporte de Sostoa (2010) solo se reportaron las dos primeras especies y según explica el mismo Lauzanne (1981) la tercera es muy afín a *O. gilsoni*, *O. mooni* y *O. minimus*, por lo que puede ser sujeto a confusión y no ser nuevamente reportada. Otras nuevas especies fueron descritas por Parenti (1984) y organizadas dentro de cuatro complejos **cuvieri** (*O. cuvieri*, *O. pentlandii*, *O. ispi* y *O. forgeti*), **mulleri** (*O. gracilis*, *O. mulleri*, *O. crawfordi*, *O. tutini* y *O. incae*), **gilsoni** (*O. gilsoni*, *O. minimus*, *O. tchernavini*, *O. taquiri*, *O. mooni*, *O. minutus*, *O. tomcooni*, *O. imarpe*, *O. robustus* y *O. tutini*) y **agassii**, siendo este ultimo complejo el que presenta la mayoría de las especies (*O. agassii*, *O. puni*, *O. richersoni*, *O. rotundipinis*, *O. frontosus*, *O. jussiei*, *O. ctenolepis*, *O. albus*, *O. farfani*, *O. Olivaceus*, *O. luteus* y otros fuera del sistema TDPS). La revisión realizada por Lauzanne (1991) no reconoció a la sub especie de *O. jussiei puni*, porque

correspondería *O. jussiei* y lo mismo *O. minutus* que se relaciona con *O. minimus* (Tabla B2-1). Las especies de *O. rotundipinis* y *O. farfani*, se deben relacionar con *O. luteus* (Loubens 1989). Es importante mencionar que las descripciones de Parenti (1984) corresponden a una reorganización del género *Orestias* a partir de las colecciones realizadas por Tom Coon en 1979 (Lauzanne 1991), muchas de las cuales se hicieron sobre 1 a 5 individuos. Por el contrario las contribuciones y revisiones de Lauzanne (1981, 1984 y 1991) corresponden a un importante periodo de muestreos entre 1978 a 1981 realizados por la UMSA – ORSTOM (ahora IRD).

Podemos concluir que son pocas las especies comunes entre los diferentes autores y que han sido reportadas desde 1846 hasta 2010, por ejemplo *O. agassii*, *O. luteus*, *O. albus*, *O. jussiei* y *O. luteus* y *O. olivaceus*, *O. ispi*. Muchas de las otras especies han sido reportadas o descritas una vez o un par de veces, como ser: *O. gracilis*, *O. humboldti*, *O. farfani*, *O. bradii*, *O. ortonii*, *O. frontosus*, *O. multiporis*, *O. richersoni*, *O. robustus*, *O. rotundipinis*, etc (Tabla B2-1). Por otro lado también esta información confirma la extinción de *O. cuvieri* que se encontraba reportada desde 1839 y su último reporte data de la década de los 40 y que *O. pentlandii* es una especie en estado crítico (MMA y A 2009) (Tabla B2-1). Sin embargo como parte de las políticas de aplicación a los recursos pesqueros, el gobierno peruano promovió la intensificación de los programas de repoblamiento del lago con especies nativas así como en otros sistemas acuáticos pertenecientes a la cuenca del Titicaca a fin de incrementar los recursos pesqueros. Otros lagos como se lo hizo en la Laguna Saracocha y Alonso. Según informaciones del PELT-Puno, entre 1993 y en 1994 se sembraron 1'972.000 alevines entre suche, ispi, mauri, karache y boga. No obstante, estos volúmenes de repoblamiento son insuficientes frente al tamaño del lago y a la presión de pesca litoral existente (UNEP y PNUMA 1996). Estos datos reflejan lo que Lauzanne (1984) explicó como un género con una alta variabilidad interespecífica, creando hasta el día de hoy incertidumbres taxonómicas, que aun quedan pendientes a resolver.

B2.2.2. VARIABILIDAD MORFOLOGICA DEL GENERO ORESTIAS

El género *Orestias* presenta una alta diversidad morfológica (intra e interespecífica) con atributos que ejemplifican la capacidad adaptativa a ambientes extremos y/o a las características del Lago Titicaca que en sus dos componentes Lago mayor y menor ofrecen una gran variedad de hábitat, cada parte del Lago presenta características propias (profundidad, mezclas y variaciones en la vegetación de la zona litoral). Esta alta diversidad ha posiblemente causado incertidumbres taxonómicas provocando errores en descripciones e identificaciones.

B-2 Biodiversidad íctica en el Lago Titicaca

Recientemente varios estudios filogenéticos (Lüssen *et al.* 2003, Sostoa *et al.* 2010, Esquer Garrigos *et al.* 2013) empleando marcadores del ADN mitocondrial (región control y el citocromo *b*) y del ADN nuclear (gen de la rodopsina), han puesto fuertemente en duda la validez taxonómica de la mayoría de las especies y complejos que fueron definidos en base a criterios morfológicos y merísticos en la última revisión taxonómica del género realizada por Parenti (1984). Por ejemplo, el estudio filogenético realizado por de Sostoa *et al.* (2010) y que incluyó 24 de las 29 especies descritas para el Lago Titicaca y algunas lagunas y ríos en los alrededores del lago, mostró que la mayoría de dichas especies no son monofiléticas, posiblemente sin validez taxonómica.

Dichos estudios han mostrado que el complejo *agassii* debería excluir a las especies del grupo *luteus* (i.e. *O. luteus*, *O. rotundipinnis*, *O. farfani*, *O. albus*, *O. olivaceus*), conformando a su vez dichas especies a su vez un complejo distinto (complejo *luteus*) y *O. jussiei* para ser válido. Así mismo, los complejos *mulleri* y *gilsoni* podrían no ser válidos (Sostoa *et al.* 2010, Esquer Garrigos *et al.* 2013). En este sentido, únicamente el complejo *cuvieri* tal cual definido por Parenti (1984) podría ser válido (Esquer Garrigos *et al.* 2013).

Finalmente, los estudios genéticos han puesto en evidencia que una combinación de factores tales como: i) la práctica taxonómica (e.g. descripción de especies a partir de unos pocos individuos como en el caso de *O. minutus* o de especímenes mal preservados como en el caso de *O. tutuni*, o que el nombre de la misma especie como *O. olivaceus* descrito por Northcote (2000) no es el mismo que la descrita por Lauzanne (1982)), ii) barreras permeables entre las especies posiblemente debido a procesos recientes de especiación (Lüssen *et al.* 2003, Esquer Garrigos *et al.* 2013), iii) hibridación (Tchernavin 1944, Villwock & Sienknecht 1995) y/o iv) plasticidad ecológica (Villwock & Sienknecht 1995, Villwock & Sienknecht 1996), podrían estar asociados con la problemática en la descripción e identificación de las especies de este género y remarcan la urgente necesidad en realizar una revisión sistemática bajo una perspectiva integral y que incluya a su vez estudios genéticos, morfológicos y de rasgos de vida (e.g. estrategias alimentarias, ciclos biológicos) y que permitan definir criterios más sólidos para el reconocimiento de las especies. Así como ampliar el aun escaso conocimiento de la evolución, los procesos de especiación y las relaciones filogenéticas entre las especies del género *Orestias*.

Tabla B2-1. Registro cronológico de la descripción y/o reporte de especies del género *Orestias*.

Especies	Nombre común	Sinonimo de	Referencias	Observaciones
<i>O. agassii</i>		<i>O. agassii</i>	40	
<i>O. agassii</i>	Karache, karachi (forma litoral), corvinilla, carachi negro	<i>O. silustani</i> , <i>O. empyraeus</i>	2, 4, 18, 20, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 37, 39, 41, 42, 43, 44, 45	descripción original (Cuvier & Valenciennes 1846)
<i>O. agassii elegans</i>			13, 14, 18, 23, 28, 30	subespecie
<i>O. agassii grequii</i>			17, 18	estadios juveniles, coloración de agassii
<i>O. agassii inornata</i>			17, 18	estadios juveniles, coloración de agassii
<i>O. agassii owenii</i>		<i>O. agassii</i>	2, 30	
<i>O. agassii pequeni</i>		<i>O. frontosus</i>	30	descripción original (Tchernavin 1944)
<i>O. agassii senechali</i>			17, 18	estadios juveniles, coloración de agassii
<i>O. agassii típico</i>			2, 17, 18, 30	estadios juveniles, coloración de agassii
<i>O. agassii tschudii</i>	bove, carache,	<i>O. frontosus</i> , <i>O. tschudii</i>	3, 30	infraespecie
<i>O. agassii var</i>			2	
<i>O. agassisii</i>			2	
<i>O. agassizi</i>		<i>O. agassii</i>	8, 13, 17, 19, 22, 24, 25	
<i>O. agassizi var. crequii</i>		<i>O. agassizii</i> , <i>O. agassii</i>	17	descripción original (Pellegriin 1904)
<i>O. agassizi var. inornata</i>		<i>O. agassii</i> , <i>O. agassizii</i>	17	descripción original (Pellegriin 1904)
<i>O. agassizi var. senechali</i>		<i>O. agassii</i> , <i>O. agassizii</i>	17	descripción original (Pellegriin 1904)
<i>O. agassizi var. typica</i>		<i>O. agassii</i> , <i>O. agassizii</i>	17	descripción original (Pellegriin 1904)
<i>O. albus</i>	punku, karache blanco, kaño		1, 2, 4, 8, 13, 18, 19, 21, 23, 25, 28, 30, 38, 41, 42, 43, 45	descripción original (Cuvier & Valenciennes 1846)
<i>O. bairdi</i>		<i>O. pentlandii</i>	11, 12	
<i>O. bairdi</i>		<i>O. pentlandii</i>	7, 22	
<i>O. crawfordii</i>			30, 41, 42, 45	descripción original del Lago Titicaca (Tchernavin 1944)
<i>O. ctenolepis</i>	Carachi		42, 45	descripción original (Parenti 1984)
<i>O. cuvieri</i>	umanto		1, 2, 4, 6, 8, 10, 13, 18, 19, 22, 23, 27, 28, 30, 34, 35, 36, 37, 41, 42	descripción original del Lago Titicaca (Cuvier & Valenciennes 1846), predador
<i>O. cuvieri</i>		<i>O. cuvieri</i>	11, 12	
<i>O. cypho</i>		<i>O. luteus</i>	13, 22	
<i>O. farfani</i>	Carachi		42, 45	descripción original (Parenti 1984)
<i>O. forgeti</i>			39, 41, 42, 45	descripción original del Lago Titicaca
<i>O. frontosus</i>	Carachi	<i>O. agassii</i> , <i>O. agassii tschudii</i> , <i>O. tschudii</i>	2, 3, 7, 11, 42, 45	descripción original (Cope 1876)
<i>O. gilsoni</i>	carache, ispi		30, 41, 42, 45	descripción original (Tchernavin 1944)
<i>O. gracilis</i>			42, 45	descripción original (Parenti 1984)
<i>O. humboldti</i>		<i>O. cuvieri</i> , <i>O. mulleri</i>	1, 2, 4, 6, 13, 18, 28, 29	
<i>O. humboldti</i>		<i>O. cuvieri</i> , <i>O. pentlandii</i>	1, 2, 38	descripción original del Lago Titicaca (Cuvier & Valenciennes 1846)
<i>O. imarpe</i>			42, 45	descripción original (Parenti 1984)
<i>O. incaae</i>			6, 13, 23, 30, 42, 45	descripción original del lago Titicaca (Garman 1895)
<i>O. ispi</i>	ispi		39, 41, 42, 45	descripción original del Lago Titicaca
<i>O. jussiei</i>	ispis	<i>O. agassii</i>	2, 3, 6, 18, 23, 28, 30, 41, 42, 43	descripción original (Cuvier & Valenciennes 1846)
<i>O. jussiei puni</i>		<i>O. puni</i>	2, 30	descripción original (Tchernavin 1944)
<i>O. jussieui</i>		<i>O. jussiei</i>	3, 4, 13, 18	
<i>O. jussioei</i>			7	
<i>O. luteus</i>	khellunchu, carache amarillo, punkhu, punju		1, 2, 4, 6, 13, 18, 19, 21, 23, 25, 27, 28, 30, 33, 34, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 45	descripción original del Lago Titicaca (Cuvier & Valenciennes 1846), fondos
<i>O. minimus</i>			30, 41, 42, 45	descripción original (Tchernavin 1944)
<i>O. minutus</i>	carachi	<i>O. minimus</i>	30, 42	descripción original (Tchernavin 1944)
<i>O. mooni</i>			30, 41, 42	descripción original (Tchernavin 1944)
<i>O. mulleri</i>	gringo, carachi		2, 41, 42, 45	descripción original del Lago Titicaca (Cuvier & Valenciennes 1846)
<i>O. mülleri</i>	caroche	<i>O. agassii</i> , <i>O. mulleri</i>	2, 4, 5, 6, 8, 13, 23, 27, 28, 30, 37	Cuvieri & Valenciennes 1846 (4 especies cercanas a <i>O. mülleri</i>), profunda
<i>O. neveni</i>		<i>O. albus</i>	21	
<i>O. neveu</i>		<i>O. albus</i>	27	
<i>O. neveu</i>		<i>O. albus</i>	17, 18, 23	descripción original (Pellegriin 1904)
<i>O. olivaceus</i>	punku, carachi enano (gringo), carachi morado	<i>O. silustani</i>	6, 13, 23, 28, 30, 38, 41, 42	descripción original (Garman 1895)
<i>O. ortinii</i>		<i>O. agassii</i>	7	
<i>O. ortoni</i>		<i>O. agassii</i> , <i>O. agassii tschudii</i> , <i>O. tschudii</i>	2, 7, 8, 11, 12	
<i>O. ortonii</i>		<i>O. agassizii</i>	7	
<i>O. owenii</i>		<i>O. jussiei</i>	16	
<i>O. pentlandii</i>	boga	<i>O. cuvieri</i>	2, 3, 8, 12, 15, 18, 19, 22, 27, 41, 42	
<i>O. pentlandii</i>	boga, boguilla, kesi		1, 2, 4, 6, 10, 13, 22, 23, 27, 28, 30, 34, 35, 36, 37, 45	descripción original del Lago Titicaca (Cuvier & Valenciennes 1846, Kossing & Villwock 1964), pelágico
<i>O. puni</i>			30, 42, 45	
<i>O. richersoni</i>	carachi		42, 45	descripción original (Parenti 1984)
<i>O. robustus</i>			42, 45	descripción original (Parenti 1984)
<i>O. rotundipinnis</i>	Carachi	<i>O. luteus</i>	42, 45	descripción original (Parenti 1984)
<i>O. taquiri</i>	carachi		30, 42, 45	descripción original (Tchernavin 1944)
<i>O. tchernavini</i>			39, 41, 42	descripción original (Lauzanne 1981)
<i>O. tomcooni</i>			42, 45	descripción original (Parenti 1984)
<i>O. tschudi</i>		<i>O. tschudii</i>	4	
<i>O. tschudii</i>		<i>O. agassii</i>	3, 18, 28, 42	descripción original (Castelnau 1855)
<i>O. tutini</i>			30, 42	descripción original del lago Titicaca (Tchernavin 1944)
<i>O. uruni</i>	carachi		30, 42, 45	descripción original del lago Titicaca (Tchernavin 1944)
<i>O. Wilson</i>	carachi		30	
<i>O. cuvieri</i> 1 <i>O. pentlandii</i>			30, 42	pendiente en Parenti 1984
<i>O. olivaceus</i> 1 <i>O. agassii</i>			30	

B-2 Biodiversidad íctica en el Lago Titicaca

Lista de las referencias citas en la Tabla 1.

1 Valenciennes 1839	13 Garman 1895	24 Eigenmann 1927	35 Villwock 1964
2 Valenciennes en Cuvier & Valenciennes 1846	14 Boulenger 1902	25 Rendahl 1937	36 Kosswing & Villwock 1964
3 Castelnau 1855	15 Steindachner 1902	26 Fowler 1940	37 Villwock 1966
4 Bleeker 1860	16 Rowntree 1903	27 Zuñiga 1941	38 Terrazas 1970
5 Günther 1861	17 Pellegrin 1904	28 Allen 1942	39 Lauzanne 1981
6 Günther 1866	18 Pellegrin 1906	29 Eigenmann & Allen 1942	40 Parenti 1981
7 Cope 1876	19 Starks 1906	30 Tchernavin 1944	41 Lauzanne 1982
8 Garman 1876	20 Neveu 1909	31 Mann 1954	42 Parenti 1984
9 Cope 1877	21 Eigenmann 1910	32 De Buen 1958	43 Maldonado 2005
10 Eigenmann & Eigenmann 1892	22 Fowler 1916	33 Lueken 1962	44 Guzmán & Sielfed 2009
11 Eigenmann 1893	23 Everman & Radcliffe 1917	34 Villwock 1962	45 de Sostoa et al. 2010

B2.2.3. BIOLOGÍA DE DIFERENTES ESPECIES

En cuanto a la biología de las especies pertenecientes al género *Orestias*, hay información para 33 especies (Tabla B2-2). De las cuales son *O. agassii*, *O. luteus*, *O. pentlandii*, *O. ispi* los que han sido los mas estudiados en varios aspectos, como su distribución espacial, el régimen alimentario, la relación sexo ratio, épocas de reproducción, fecundidad, desove, dieta y parasitismo. La mayoría de esta información corresponde a estudios realizados por Lauzanne & Loubens (1982), Loubens & Sarmiento (1985), Lauzanne (1991), son trabajos realizados dentro de programas de investigación que han permitido la recolección de una buena cantidad de muestras, que hacen que esta información sea la mas confiable, además de que después de estos trabajos, son alrededor de 20 años que no se han realizado estudios tan completos.

Como en los ultimas décadas se ha registrado un descenso en las densidades de varias especies del género *Orestias* (MMA y A 2009), muchos de los estudios como los de reproducción artificial y cultivos corresponden a reportes o ensayos realizados como parte de la formación de académica en de la Universidad Mayor de San Andrés, pero que no son de acceso fácil y quedan como datos dispersos (Tabla B2-2). Sin embargo pueden ser utilizados como base dentro de los procesos de planificación de la conservación de las especies nativas. Así tenemos los trabajos referidos a la reproducción artificial de *O. pentlandii* y de *O. ispi* (Arias 1996, Castañón *et al.* 2002), incubación de ovas in situ *O. agassii*, *O. luteus*, *O. olivaceus* (Castañón 1994, CIDAP 2002, Tarqui 2002, Blaz 2003, Buitrón 2005, Terrazas 2005, Loayza 2009, Flores 2010), de *O. albus* (Polo 2005) Tabla B2-2). Estudios aislados pero que igual contribuyen al conocimiento de las especies nativas, el del desarrollo embrionario de *Calcina* (2001), estudio de los parásitos (Lauzanne 1991 y Choque 2005). También algunos son referidos al género *Trichomycterus* como la validación técnica de incubación (Aparicio 1993 Poma 2005) y reproducción artificial (Espinoza 1999) (Tabla B2-2).

En cuanto a la morfología (Tabla B2-2) se menciona a los diferentes autores que trabajaron con las características morfológicas y merísticas para la descripción o validación de las especies, Cuvier &

Valenciennes 1846, Tchernavin (1944), Lauzanne (1982), Parenti (1984) entre los principales. Los otros autores (Maldonado, 2009, De la Barra 2009, de Sostoa 2010, Scott 2010, Herbas, 2011, etc.) utilizaron las medidas morfométricas sugeridas por estos autores para identificar a las especies presentes en otros cuerpos de agua como: lagunas de la cordillera, en los Lagos Poopó y Uru Uru o para sus trabajos relacionados con filogenia y distribución. Sin embargo estos trabajos como el de Herbas (2011) y Zepita (2012) muestran que la morfología y las características merísticas no permiten identificar de manera certera a las especies del lago y que están restringidas a este ecosistema, siendo aun mas difícil la identificación en los otros ecosistemas.

Tabla B2-2. Reporte de los estudios referidos a las características biológicas y ecológicas de las especies nativas e introducidas en el Lago Titicaca

Especie	Habitat	Morfología	Regimen alimentario	Rasgos sexuales	Edad	Genética	Cultivo / reproducción artificial / uso	Estado de conservacion	Comportamiento / habitat	Riqueza / Abundancia	Parasitosis
<i>O. agassii</i>	litoral	1, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 14, 20, 53, 54, 68, 69, 70, 71, 73, 77, 78, 79, 81, 82	7, 9, 10, 11, 15, 17, 20, 34, 35, 41, 44, 53, 54, 68, 70, 71, 77, 78, 79, 82	9, 15, 20, 35, 36, 38, 39, 43, 44, 82	15, 37, 39	73, 74, 81	22, 26, 31, 36, 40, 41, 44, 46, 47, 55, 75	66, 71, 73, 76	3, 17, 71	6, 9, 15, 16, 34, 35, 44, 66, 69, 73, 78	20, 60
<i>O. albus</i>		1, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 14, 53, 70, 71, 77	9, 10, 19, 20, 34, 53, 70, 71, 77	9, 19		74	56	27, 71	3, 27, 71	9, 16, 34	
<i>O. crawfordi</i>		6, 9, 10, 14, 20, 73, 77	9, 10, 20, 77	9		73, 74		71, 73	71	9, 73	
<i>O. ctenolepis</i>		14				74					
<i>O. cuvieri</i>	pelagico	1, 4, 5, 6, 11, 14, 71	11, 71					29, 71	3, 71	38, 66	
<i>O. farfani</i>	pelagico	14				74					
<i>O. farfani</i>	profundal	14									
<i>O. forgeii</i>		8, 9, 10, 14, 20, 77	8, 9, 10, 19, 20, 77	9, 19		74		71	71	9	19
<i>O. frontosus</i>		14				74					
<i>O. gilsoni</i>		6, 9, 10, 14, 20, 73, 77	9, 10, 20, 77	9		73, 74		71, 73	71	9, 66, 73	
<i>O. gracilis</i>		14				74		71	71		
<i>O. imarpe</i>		14, 73				73, 74		71, 73	71	73	
<i>O. incae</i>		4, 5, 6, 14				74		71	71		
<i>O. ispi</i>	pelagico 30-50m	8, 9, 10, 13, 14, 20, 73, 77	8, 9, 10, 13, 18, 19, 20, 34, 41, 44, 77, 83	9, 18, 19, 36, 43, 44		73, 74	26, 41, 42, 44, 49, 75	73	13, 23	8, 9, 16, 18, 23, 34, 38, 44, 65, 66, 73	19, 20, 34
<i>O. jussiei</i>		1, 4, 5, 6, 9, 10, 14, 20, 53, 70, 77	9, 10, 20, 53, 70, 77	9						9	
<i>O. luteus</i>	pelagico bentonico	1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 20, 27, 44, 53, 69, 70, 71, 73, 77, 81, 82	9, 10, 11, 19, 20, 34, 35, 41, 44, 48, 53, 70, 71, 77, 82	9, 19, 35, 39, 43, 44, 82	39	73, 74, 81	22, 26, 30, 40, 41, 44, 55, 72	27, 61, 71, 73	27, 71	9, 16, 34, 35, 38, 44, 69, 73	60
<i>O. minimus</i>		6, 9, 10, 14, 20, 77	9, 10, 20, 77	9		74		71	71	9	
<i>O. minutus</i>		6, 14						71	71		
<i>O. mooni</i>		6, 9, 10, 14, 20, 77	9, 10, 20, 73, 77	9		73		71	71	9	
<i>O. mulleri</i>		1, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 14, 20, 77	9, 10, 11, 18, 20, 34, 77	9, 18		74		71	3, 71	9, 18, 34, 38, 65, 66	
<i>O. multiporis</i>		14				74					
<i>O. olivaceus</i>		4, 5, 6, 9, 10, 14, 20, 77	9, 10, 19, 20, 34, 77	9, 19, 36, 43			36, 49, 55, 57, 67			9, 16, 34	
<i>O. pentlandii</i>		1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 14, 20, 71, 73, 77	9, 10, 11, 19, 20, 34, 41, 44, 71, 77	9, 19, 43, 44		73, 74, 75	28, 41, 44	29, 71, 73	3, 71	9, 16, 34, 38, 44, 66, 73	
<i>O. puni</i>		14				74					
<i>O. richersoni</i>		14				74					
<i>O. robustus</i>		14, 73				73, 74		71, 73	71	73	
<i>O. rotundipinnis</i>	pelagico bentonico	14				74					
<i>O. taquiri</i>		6, 14, 73				74		71	71		
<i>O. tchernavini</i>		9, 10, 14, 20, 77	9, 10, 20, 77	9		73		71	71	9	
<i>O. tomcooni</i>		14				74		71	71		
<i>O. tschudii</i>		2, 4, 5, 14						71	71		
<i>O. tutini</i>		6, 14						71	71		
<i>O. uruni</i>		6, 14				74		71	71		
<i>Trichomycterus rivulatus</i>	litoral	52	33	38			22, 25, 40, 58			16, 34	
<i>Trichomycterus dispar</i>	litoral	52		36, 38			22, 25, 26, 32, 40			34	
<i>Odontesthes bonariensis</i>	pelagico	9, 54	9, 35, 54	9, 18, 24, 35,			22, 59		49, 62	18, 34, 35, 62, 80	
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	pelagico				17		22, 45, 50, 51		62	61, 62, 63, 80	63
<i>Salvelinus namaycush</i>										80	
<i>Salvelinus fontinalis</i>										80	
<i>Salmo trutta</i>										80	
<i>Salmo gairdneri</i>		7	7, 19	19, 21						16	19

B-2 Biodiversidad íctica en el Lago Titicaca

Lista de referencias citadas en la Tabla 2.

- | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------------|
| 1 Cuvier & Valenciennes 1846 | 21 Loubens 1991 | 42 Castañon et al 2002 | 63 Revollo et al. 2006 |
| 2 Castelnau 1855 | 22 Ohashi 1991 | 43 CIDAB 2002 | 64 Revollo et al. 2006 |
| 3 Garman 1876 | 23 Richerson 1991 | 44 Paca et al. 2003 | 65 Gammons et al. 2006 |
| 4 Evermann Radcliffe 1909 | 24 Loubens & Osorio 1991 | 45 Alcon 2003 | 66 Guevara 2007 |
| 5 Evermann Radcliffe 1917 | 25 Aparicio 1993 | 46 Daza 2003 | 67 Mendoza 2008 |
| 6 Tchernavin 1944 | 26 Castañon 1994 | 47 Blaz 2003 | 68 Molina et al 2008 |
| 7 Lauzanne & Franc 1979 | 27 Villwock & Sienknecht 1995 | 48 Puña 2004 | 69 De la barra et al. 2009 |
| 8 Lauzanne 1981 | 28 Arias 1996 | 49 Mamani 2004 | 70 Maldonado et al. 2009 |
| 9 Lauzanne & Loubens 1982 | 29 Ergueta & de Morales 1996 | 50 Ortuño 2004 | 71 MMyA 2009 |
| 10 Lauzanne 1982 | 30 Cardozo 1997 | 51 Silvestre 2004 | 72 Loayza 2009 |
| 11 Vilwock 1983 | 31 Linares 1999 | 52 Crespo 2005 | 73 Scott 2010 |
| 12 Villwock & Sienknecht 1983 | 32 Espinoza 1999 | 53 Maldonado 2005 | 74 de Sostoa et al. 2010 |
| 13 Leblond 1983 | 33 Quispe 2000 | 54 UTO et al. 2005 | 75 Flores 2010 |
| 14 Parenti 1984; | 34 Northcote 2000 | 55 Buitron 2005 | 76 Ortega et al.2010 |
| 15 Loubens & Sarmiento 1985 | 35 Osorio & Sarmiento 2001 | 56 Polo 2005 | 77 Lauzanne 2011 |
| 16 Franc et al. 1985 | 36 Calcina 2001 | 57 Terrazas 2005 | 78 Herbas 2011; |
| 17 Hurlbert et al. 1986 | 37 Pacosillo 2001 | 58 Poma 2005 | 79 Molina et al. 2012 |
| 18 Vaux et al. 1988 | 38 ALT - PNUD, 2001 | 59 Cori 2005 | 80 Aragon 2012 |
| 19 Loubens 1989 | 39 Morales 2002 | 60 Choque 2005 | 81 Esquer et al. 2013 |
| 20 Lauzanne 1991 | 40 Tarqui 2002 | 61 Mariano et al. 2006 | 82 Zepita, 2013 |
| | 41 Vilca 2002 | 62 Segura 2006 | 83 Gutierrez, 2013 |

En cuanto al régimen alimentario, no hay estudios exhaustivos (Tabla B2-3), la mayoría de los autores presentan proporciones entre ítems como invertebrados, zooplancton, peces, algas, y plancton. Uno de los estudios que ha contribuido al conocimiento del régimen alimentario de manera importante, es el estudio de Loubens (1989) que presenta a las especies agrupándolas en relación a su régimen alimenticio y su distribución espacial en las zonas pelágicas, litoral y profunda. Reporta el tipo de organismos que es consumido dentro de cada ítem, e. g. *O. pentlandii*, *O. ispi* y *O. forgeti*, se alimentan de micro crustáceos como cladóceros y Copépodos y pertenecen al grupo de especies pelágicas zooplantófagas. Dentro del grupo de las especies perimacrófitas se encuentran *O. luteus*, *O. olivaceus* y *O. jussiei* y son especies que se alimentan de vegetales y animales, viven cerca de las macrófitas, *O. luteus* y *O. olivaceus* tienen preferencia por los moluscos. Leblond (1983) y Vaux *et al.* (1988), analizaron las proporciones del contenido estomacal de *O. ispi* con preferencias de alrededor de 60% de *Daphnia pulex*, y el resto entre Calanoides, Cyclopides. El estudio de Gutiérrez (2013), de *O. ispi* provenientes de dos localidades Carabuco en el Lago mayor y Tiquina en el lago menor, presentó proporciones similares a las encontradas por Leblond (1983) y Vaux *et al.* (1988), con 61% de *Daphnia pulex* seguido de Calanoides y Cyclopides y en menor incidencia Harpacticoides y *Lepadella*, que no se encontraban reportados. Este estudio de Gutiérrez (2013) registro diferencias en la morfología de los individuos entre las localidades del Lago mayor y el Lago menor en el diámetro del ojo, posición del ojo, largo y alto del pedúnculo y largo y ancho de las cabezas, es uno de los primeros estudios que relaciono estas variaciones morfológicas con el régimen alimentario y el uso de hábitat, al parecer los individuos con diámetros de ojo mayores, cabezas largas y finas y pedúnculos largos y finos corresponden a especímenes del Lago mayor, condicionas a zonas

pelágicas amplias con profundidades mayor a los 40 m, lo contrario en las características morfológicas de los individuos de Tiquina, condicionados a menores profundidades y presencia del cinturón vegetal hasta los 20 m.

En el caso de *O. agassii* aunque es cierto que es considerado carnívoro ajustable u omnívoro (Herbas 2011). Dependiendo de la escala a la que se trabaje y de las características de los ecosistemas acuáticos en los que se los encuentre, *O. agassii* puede ocupar diferente nivel trófico, como muestra el estudio de Molina *et al* (2008 y 2012), Herbas (2011) y Zepita (2013), e.g. para los lagos Titicaca, Poopo y Uru Uru es invertívoro pero dependiendo del lago la composición de especies de invertebrados no son los mismos, en el caso del Lago Uru Uru son mas bien invertebrados que colonizan las zonas litorales y el en

Tabla B2-3. Reporte de los estudios referidos al régimen alimentario de las especies del género *Orestias*.

Especie	Régimen alimentario	Referencias
<i>O. agassii</i>	Carnívoro, ajustable: zooplancton e invertebrados acuáticos	Herbas 2011; Hurlbert <i>et al.</i> 1986; Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Franc 1979; Lauzanne & Loubens 1982; Loubens & Sarmiento 1985; Maldonado 2005; Maldonado <i>et al.</i> 2009; MMyA 2009; Molina <i>et al.</i> 2008, 2012; Northcote 2000; Osorio & Sarmiento 2001; Paca <i>et al.</i> 2003; UTO <i>et al.</i> 2005; Vilca 2002; Vilwock 1983
<i>O. albus</i>	Crustáceos y gastrópodos	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982; Loubens 1989; Maldonado 2005; Maldonado <i>et al.</i> 2009; MMyA 2009; Northcote 2000
<i>O. crawfordi</i>	Bivalvos, gastrópodos y moluscos	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982
<i>O. ctenolepis</i>	Plancton y algas	Parenti 1984
<i>O. cuvieri</i>	Peces, pequeñas orestias	MMyA 2009; Vilwock 1983
<i>O. farfani</i>	Plancton y algas	Parenti 1984
<i>O. forgeti</i>	Zooplancton	Lauzanne 1981, 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982; Loubens 1989
<i>O. frontosus</i>	Plancton y algas	Parenti 1984
<i>O. gilsoni</i>	Plancton y algas	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982
<i>O. ispi</i>	Zooplancton	Lauzanne 1981, 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982; Leblond 1983; Loubens 1989; Northcote 2000; Paca <i>et al.</i> 2003; Vaux <i>et al.</i> 1988; Vilca 2002
<i>O. jussiei</i>	Cladóceros, Coleópteros y Hemípteros	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982; Maldonado 2005; Maldonado <i>et al.</i> 2009
<i>O. luteus</i>	Crustáceos y gastrópodos, bivalvos	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982; Loubens 1989; Maldonado 2005; Maldonado <i>et al.</i> 2009; MMyA 2009; Northcote 2000; Osorio & Sarmiento 2001; Paca <i>et al.</i> 2003; Puña 2004; Vilca 2002; Vilwock 1983
<i>O. minimus</i>	Plancton y algas	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982

B-2 Biodiversidad íctica en el Lago Titicaca

<i>O. mooni</i>	Algas y pequeños Cladóceros	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982; Scott 2010;
<i>O. mulleri</i>	Cladóceros pequeños; zooplancton y algas	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982; Northcote 2000; Vaux <i>et al.</i> 1988; Vilwock 1983
<i>O. olivaceus</i>	Ostrácodos, gastrópodos y moluscos	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982; Loubens 1989; Northcote 2000
<i>O. pentlandii</i>	Invertebrados acuáticos y zooplancton	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982; Loubens 1989; MMyA 2009; Northcote 2000; Paca <i>et al.</i> 2003; Vilca 2002; Vilwock 1983
<i>O. richersoni</i>	Plancton y algas	Parenti 1984
<i>O. rotundipinnis</i>	Planctívoro y larvas de invertebrados	Parenti 1984
<i>O. tchernavini</i>	Zooplancton	Lauzanne 1982, 1991, 2011; Lauzanne & Loubens 1982
<i>O. taquiri</i>	Plancton y algas	Parenti 1984
<i>O. uruni</i>	Plancton y algas	Parenti 1984

caso del Poopo invertebrados bentónicos aunque pueden también se ha visto cambios en su dieta durante u ciclo hidrológico. En las lagunas de altura en algunas son exclusivamente zooplanctívoro, en otras lagunas se registro macroinvertebrados pero mas asociados a la vegetación, así como vegetación.

B2.3. ASPECTOS A SER CONSIDERADOS PARA LA CONSERVACIÓN DE LA FAUNA ÍCTICA

El Lago Titicaca (lado boliviano) ha sido declarado sitio RAMSAR el 26 de agosto de 1988 por la diversidad que este alberga, en vista de que el genero *Orestias* es el único representante de los Cyprinodontides en el mundo. Este humedal de importancia internacional, sin embargo se esta viendo afectado por los impactos ambientales como ser, por los desechos que se envían desde El Alto, Viacha y Laja, del lado boliviano, por la sobre explotación de sus recursos, agricultura extensiva, la contaminación, sobrepastoreo y el cambio climático que lo amenazan. Su fauna natural se reduce y según la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), y el libro rojo de vertebrados (2011) todas las especies del género *Orestias* (que se pueden identificar claramente) se encuentran en estado vulnerable (VU). Las políticas aún no son suficientes o si existen no esta bien definido la responsabilidad de quien las hará cumplir para revertir la situación de una de las reservas más importantes del planeta.

Un gran número de personas dependen directa o indirectamente de la pesca del lago y aproximadamente dos tercios de las capturas totales del lago Titicaca corresponden al género *Orestias* (de Sostoa *et al.* 2010). Sin embargo los pescadores no están interesados en saber que

especie explotan mas y que otras menos, acompañado a esto las incertidumbres taxonómicas y no delimitación clara de los caracteres diagnósticos en *Orestias* no hacen mas que profundizar el desconocimiento del estado actual de dichas especies. Por esta razón es difícil poder plantear adecuados planes de gestión de los recursos pesqueros, así como tampoco aplicar planes adecuados de conservación de la íctio fauna tanto del Lago Titicaca como de los sistemas acuáticos pertenecientes a esta cuenca y sus alrededores.

Estos resultados muestran claramente la urgente necesidad de ampliar y complementar por un lado los estudios genéticos. Por otro lado estos estudios que pongan en cuestión las delimitaciones diagnósticas morfológicas adecuadas, en vista a que las actuales existente no permiten identificar a los individuos de las diferentes especies. Por lo tanto también se requiere urgentemente una revisión del género para poder separar las especies morfológicamente, así como estudios que permitan explicar esta alta variabilidad fenotípica dentro de una lógica que considere los procesos de especiación, ecológicos, sus ciclos biológicos y estrategias alimentarias.

B2.4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alcon G. R. 2003. Determinación de la carga animal optima de trucha arco iris (*Oncorhynchus mikiss*) en jaulas flotantes para el lago Titicaca. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Allen W.R. 1942. Eigenmann C.H. & Allen W. R. Fishes of western South America. Kentucky, USA.
- ALT; PNUD. 2001. Estudio para establecer nuevos linderos de la reserva nacional del Titicaca y elaborar el plan maestro: Informe final, propuestas de nuevos linderos de la reserva nacional del Titicaca. Puno. 135 p.
- Aparicio J. A. 1993. Validación de técnicas de incubación controlada para el mauri (*Trichomycterus* sp.) en el lago Titicaca. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Arias J. A. 1996. Reproducción artificial de la boga (*Orestias pentlandii*) y su importancia en el mercado. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Blaz S. B. 2003. Evaluación de la incubación de ovas de carachi negro (*Orestias agassii*) a cuatro densidades. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Bleeker P. 1860. Enumeratorio spectrum piscium hucusque in Archipelago Indico observatorum, etc. Act. Soc. Sci. Indo-Neerl. 6 pp. l xxxvi, 1-276.
- Boulenger G.A. 1902 Description of a new Cyprinodontid fish (*Orestias tiripatae*) from Eastern Peru. Ann. Mag. Nat. Hist. (7) 10: 153-154.
- Buitron C. P. 2005. Utilización de diferentes tipos de kakabans para incubación in situ de ovas de carachi (*Orestias agassii*), punku (*Orestias luteus*) y carachi enano (*Orestias olivaceus*) en el lago menor del Titicaca Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Calcina C. 2001. Recuperación y reproducción artificial de especies ícticas nativas del lago Titicaca. Desarrollo embrionario y diferenciación sexual de las especies ícticas nativas del lago Titicaca. Reporte del Ministerio de agricultura, ganadería y desarrollo rural. 29 p.

B-2 Biodiversidad íctica en el Lago Titicaca

- Cardozo P. W. 1997. Sustitución de la harina de pescado con punku (*Orestias luteus*) vísceras de cerdo y trucha, en la dieta de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) en la fase juvenil. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. UMSA.
- Castañón V. A. 1994. Evaluación de técnicas de desove e incubación artificial para *Orestias agassii* y *Orestias luteus*. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Castañón V. A., De la Quintana & Limachi. 2002. Reproducción artificial de ispi (*Orestias ispi*). 26 p.
- Castelnaud F. 1855. Famille des Cyprinoides, Genre *Orestias*. In: Animaux nouveaux ou rares recueillis pendant l'expédition dans les parties centrales de l'Amérique du sud. Paris. 51-52 p.
- Choque J. 2005. Identificación de los principales parásitos de cuatro especies ícticas nativas del lago Titicaca. Tesis para optar al título de Licenciado en Agronomía. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. 87 p.
- CIDAP. 2002. Conservación de la Biodiversidad en la cuenca del lago Titicaca, Desaguadero, Poopo, salar de Coipasa (TDPS): Reproducción artificial de *Orestias agassii* y *Orestias luteus*. Proyecto Bol /98/G31, Manual, Área, crianza y manejo de especies ícticas nativas. 23 p.
- Cope E. D. 1876. Note on the ichthyology of lake Titicaca. J. Acad. Nat. Sci. Philad, 8: 185-187.
- Cope E. D. 1877. Synopsis of the cold – blooded vertebrata procured by Prof. James Orton during his exploration of Peru. Proc. Amer. Phil. Soc. 17: 33-49.
- Cori E. H. 2005. Evaluación del uso de anzuelos sobre la pesca del pejerrey (*Odontesthes bonariensis*) en el lago menor del Titicaca, comunidad Sonacachi provincia Omasuyos. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Crespo A. M. 2005. Características morfométricas en la taxonomía de dos especies del género *Trichomycterus* (mauri y suche) presentes en la fauna ictiológica del lago Titicaca. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Cuvier G. L. & Valenciennes A. 1846. *Orestias*. Histoire naturelle des poissons. XXII: 221-244.
- Daza L. A. 2003. Evaluación del efecto de tres tipos de alimento en la nutrición de los alevines de carachi (*Orestias agassii*) en condiciones de cautiverio. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- De Buen F. 1958. Ictiología. La familia Ictaluridae nueva para la fauna aclimatada de Chile y algunas consideraciones sobre los Siluroidei indígenas. Inv. Zool. Chilenas; 146-158.
- De la Barra E.; Maldonado E.; Carvajal F. & Coronel J. 2009. The killifish *Orestias* in the Bolivian Puna. Rev. Bol. Ecol. y Cons. Amb. 26: 1-7.
- Dejoux, C. & Iltis, A. 1991. El lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM. 584 pp.
- De Sostoa A., Doadrio I., Ornelas C., Caiola N., Pedraza C., Flores F., Monroy M. & Maceda A. 2010. Estudio genético de las especies ícticas nativas del lago Titicaca. Caracterización y estructura poblacional. Informe final. 173 p.
- Eigenmann C. 1893. Catalogue of freshwater fishes of Central America and Southern Mexico. Proc. U.S. Nat. Mus. 16: 53-60.
- Eigenmann C. H. 1894. Catalogue of freshwater fishes of Central America and Southern Mexico. Proc. U.S. Natl. Mus. 16 (925): 53-60.
- Eigenmann C. H. 1910. Catalogue of the freshwater fishes of tropical and south temperate America. Reports Princeton Univ. Exped. Patagonia, 1896-1899. 3 (4): 375-511.
- Eigenmann C. H. 1927. The freshwater fishes of Chile. Mem. Natl. Acad. Sci. 22(2): 80 p. 16pls.
- Eigenmann C. & Allen W. 1942. Fishes of Western South América. 275-300 p.
- Eigenmann C. H. & Eigenmann R. S. 1892. A catalogue of the freshwater fishes of South America. Proc. U. S. Natl. Mus. 14 (842): 1-81.
- Ergueta P. & de Morales C. 1996. Libro rojo de los vertebrados de Bolivia. CDC. 347 p.

- Espinoza P.G. 1999. Reproducción artificial del mauri (*Trichomycterus dispar*) por el método seco, bajo tres niveles de temperatura y oxígeno. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Esquer Garrigos Y., Hugueny B., Koerner K., Ibañez C., Bonillo C., Pruvost P., Causse R., Cruaud C. & Gaubert P. 2013. Non-invasive ancient DNA protocol for fluid-preserved specimens and phylogenetic systematics of the genus *Orestias* (Teleostei: Cyprinodontidae). *Zootaxa*, 3640, 373-394.
- Esquer Garrigos Y., Hugueny B., Ibañez C., Koerner K., Zepita C., Lambourdiere J., Coloux A. & Gaubert P. Hybridization within an adaptive radiation framework: evolutionary and conservation implications for two species of Andean pupfishes (*Orestias* spp., Teleostei, Cyprinodontidae). Submitted. 42 p.
- Everman B.W. & Radcliffe L. 1909. Notes on a Cyprinodont (*Orestias agassizii*) from central Peru. *Biological Society of Washington*. 22: 165-170.
- Everman B.W. & Radcliffe L. 1917. The fish of the west coast of Peru and the Titicaca basin. *Bulletin of the American Museum of Natural History*. 95: 1-166.
- Flores O. Y. 2010. Reproducción artificial de especies nativas *Orestias*. Folleto informativo. 15 p.
- Fowler H.W. 1916. Notes on fishes of the Orders Haplomi and Microcyprini. *Proc. Acad. Nat. Sci. Philad.* 68: 415-439.
- Fowler H.W. 1940. Zoological results of the second bolivian expedition for the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1936-1937. Part I, the fishes. *Proc. Acad. Nat. Sci. Philad.* 92: 43-103.
- Fowler H.W. 1940-1943. Zoological results of the second Bolivian expedition for the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1936-1937. Part 1 y 2 Fishes. *Proc. Acad. Nat. sci. Philadelphia*, vol 92, pp 43-103 Additional new fishes *Naturel Naturae (Phyladelphia)* n° 120. 1-7.
- Franc J., Lauzanne L. & Zuna F. 1985. Algunos datos sobre las pesquerías de la parte oriental del lago Titicaca menor. *Ecología en Bolivia* 7: 1-21.
- Gammons C.H., Slotton D.G., Gerbrandt B., Weight W., Young C. A. McNearny R.L. Cámac E., Calderón R. & Tapia H. 2006. Mercury concentrations of fish, river water and sediment in the río Ramis lake Titicaca watershed, Peru. *Science of the Total Environment* 368: 637-648.
- Garman S.W. 1876. Exploration of lake Titicaca, by Alexander Agassiz and S.W. Garman. *Bull. Mus. Comp. Zool. Harvard. College*. 19: 273-278.
- Garman S.W. 1895. The Cyprinodonts. *Mem. Mus. Comp. Zool. Harv. Coll.* 19, 1:179 p. pl. I-XII.
- Guevara A. 2007. Espejismos desarrollistas y autonomía comunal: el impacto de los proyectos de desarrollo en el lago Titicaca (1930-2006). Pontificia Universidad Católica del Perú, Cuaderno de trabajo de la carrera de Derecho. 57 p.
- Günther A. 1861. On a collection of fishes sent by capt. Dow from the Pacific Coasts of Central America. *Proc. Zool. Soc. London*, 1861: 370 p.
- Günther A. 1866. A catalogue of the fishes in the British Museum, London. 6: 368 p.
- Gutiérrez R. 2013. Análisis del contenido estomacal de ispi (*Orestias ispi*). Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Guzmán J.A. & Sielfeld W. 2009. Dieta de *Orestias agassii* (Cuvier & Valenciennes, 1846) (Teleostei, Cyprinodontidae) del salar del Huasco, norte de Chile. *Gayana* 73 (1): 28-32.
- Herbas K.R. 2011. Variabilidad morfológica y régimen alimenticio de *Orestias agassii* (Pisces-Cyprinodontidae) en sistemas acuáticos de altura, La Paz-Bolivia. Tesis para optar el título de Licenciatura en Ciencias Biológicas, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Puras y Naturales. 94 p.
- Hurlbert S.H., Loayza W. & Moreno T. 1986. Fish flamingo plankton interactions in the Peruvian Andes. *Limnology and Oceanography* 31 (3): 457-467.
- Kosswig C. & Villwock W. 1964. Das problem der intralakustrischen Speziation im Titicaca und im Lanaosee. *Verh. d. Dtsch. Zool.* 96-104 p.

B-2 Biodiversidad íctica en el Lago Titicaca

- Lauzanne L. 1981. Description de trois *Orestias* nouveaux du lac Titicaca, *O. ispi* n. sp., *O. forgeti* n. sp. et *O. tchernavini* n. sp. (Pisces, Cyprinodontidae). *Cybium* 5 (3): 71-91.
- Lauzanne L. 1982. Les *Orestias* (Pisces, Cyprinodontidae) du Petit lac Titicaca. *Hydrobiologia* 15(1): 39 - 70.
- Lauzanne L. & Franc J. 1979. Las truchas de los lagos del valle de Hichu-Kkhota. Informe N° 2, Convenio UMSA – ORSTOM Hidrobiología. 22 p.
- Lauzanne L. & Loubens G. 1982. Estudios ictiológicos del Convenio UMSA-ORSTOM en el lago Titicaca. Reporte. Paris. 35 p.
- Lauzanne L. 1991. Especies nativas: los *Orestias*. In: Dejoux, C. & Iltis, A., (eds). El lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual. 409-423 p.
- Lauzanne L. 2011. Clave de los *Orestias* del lago Titicaca. Revisión no publicada de la clave realizada en el 1982. Cochabamba. 23 p.
- Leblond R. 1983. Quelques aspects de l'alimentation et de la selection des proies chez *Orestias ispi* Lauzanne (Pisces, Cyprinodontidae) du Lac Titicaca. La Paz: UMSA-ORSTOM, 28 p.
- Linares, J.A. 1999. Diseño de un acuario bio-ecológico para la crianza del pez *Orestias agassii*. *Bio-Ecológica*: 10 p.
- Loayza A. 2009. Comparación de la incubación de ovas de punku (*Orestias luteus*) en condiciones de laboratorio in situ. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Loubens G. 1989. Observations on the fishes of the lake Titicaca Bolivian part IV. *Orestias* spp., *Salmo gairdneri* and management problems. *Rev. Hydrobiol. trop.* 22 (2): 157-177.
- Loubens G. 1991. Especies introducidas: *Salmo gairdneri* (trucha arco iris). In Dejoux C. & Iltis A. (1991) El lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual. 425- 430 p.
- Loubens G. & Osorio F. 1991. Especies introducidas: *Basilichthys bonariensis* (pejerrey). En Dejoux C. & Iltis A. 1991. El lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual. 431-446 p.
- Loubens G. & Sarmiento J. 1985. Observations sur les poissons de la partie bolivienne du lac Titicaca II. *Orestias agassii*, Valenciennes 1846. (Pisces, Cyprinodontidae). *Rev. Hydrobiol. trop.* 18 (2): 159-171.
- Lueken V.W. 1962. Chromosomenzahl bei *Orestias* (Pisces, Cyprinodontidae). *Mitt. hamb. zool. Mus. Inst.* 60: 195-198.
- Lüssen A., Falk T. & Villwock W. 2003. Phylogenetic patterns in populations of Chilean species of the genus *Orestias* (Teleostei: Cyprinodontidae): results of mitochondrial DNA analysis. *Molecular Biology and Evolution*, 29, 151-160.
- Maldonado E. 2005. Diferenciación morfológica y ecológica de algunas especies del género *Orestias* Valenciennes, 1839 del lago Titicaca: Cas d'étude de radiación adaptativa. Tesis para optar el título de Master. Université Claude Bernard, Lyon. 30 p.
- Maldonado E., Hubert N., Sagnes P. & De Mérona B. 2009. Morphology diet relationships in four killifishes (Teleostei, Cyprinodontidae, *Orestias*) from Lake Titicaca. *Journal of Fish Biology* 74: 502-520.
- Mamani F.U. 2004. Utilización de la lombriz californiana (*Eisenia foetida*) ipsi (*O. ispi*) y carachi enano (*O. olivaceus*), como carnadas para la pesca de pejerrey (*Odontesthes bonariensis*) con dos tamaños de anzuelos en la región de Soncachi. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. UMSA.
- Mann G. 1954. Vida de los peces en aguas Chilenas. Instituto de Investigaciones Veterinarias. Universidad de Chile, Santiago. 343 p.
- Mariano M., Huaman P., Montaya H., Mayta E., Tapia L., Jimenez A. & Cordova K. 2006. Uso de microhabitat de *Orestias agassii* en alopatria y simpatria con la especie invasora *Oncorhynchus mykiss* en lagunas Altoandinas. 12 p.
- Mendoza F. A. 2008. Evaluación de proceso económico de caviar con ovas de carachi enano (*Orestias olivaceus*). Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. UMSA.

- MMAyA. 2009. Libro rojo de la fauna silvestre de vertebrados de Bolivia. 572 p.
- Molina C., Ibañez C. & Pinto J. 2008. Análisis preliminar de los recursos hidrobiológicos en relación a metales pesados en poblaciones de invertebrados y peces del lago Poopó. In: Rocha O. & Aguilar S., (eds). Bases técnicas para el plan de manejo del sitio Ramsar Lagos Poopó y Uru Uru. Oruro - Bolivia: MDRA y MA, pp. 187-202.
- Molina C., Ibañez C. & Gibon F. M. 2012. Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopo, Oruro, Bolivia): posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecología en Bolivia* 47 (2): 99-118.
- Morales S. 2002. Resultado de estudios biológicos sobre las especies icticas nativas más importantes del lago Titicaca realizados en el CIDAB. En Manejo de recursos pesqueros en el lago Titicaca por CIDAB, MAGDER; La Paz.
- Neveu M. 1909. Los lagos de los Altiplanos de la América del Sur. Dirección de Estadística y Estudios geográficos. La Paz, Bolivia. 120 p.
- Northcote T.G. 2000. Ecological interactions among an Orestiid (Pisces, Cyprinodontidae) species flock in the littoral zone of lake Titicaca. *Advances in Ecological Research* 31: 399-420.
- Ohashi M. 1991. Estudio ecológico de las especies ícticas nativas. *JICA*. 14 p.
- Ortega H., Hidalgo M., Correa E., Espino J., Chocano L., Trevejo G., Meza V., Cortijo A.M. & Quispe R. 2010. Lista anotada de los peces de aguas continentales del Perú: estado actual del conocimiento, distribución, usos y aspectos de conservación. Ministerio del Ambiente del Perú. 50 p.
- Ortuño L.H. 2004. Introducción de trucha arco iris (*Oncorhynchus mikiss*) en la q'otaña de la comunidad de Achaya provincia del departamento de La Paz. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. UMSA.
- Osorio F. & Sarmiento J. 2001. Informe preliminar de la reactualización de la información de ictiofauna del lago Titicaca. En: Aguirre, C., Miranda, C. & Verhasselt, Y. (eds). Contribución al conocimiento del sistema del lago Titicaca. 305-319 p.
- Paca F., Paca R., Limachi S.A., Alfaro R., Paca B., Chura R., Vilca J.L., Chávez M. & Chambilla R. 2003. Proyecto: Conservación de la biodiversidad en la cuenca del lago Titicaca, Desaguadero, Poopo, Salar de Coipasa (TDPS). Informe final Programa de crianza de peces en hábitats de totora. Puno: PNUD. 375 p.
- Pacosillo J.L. 2001. Estimación de la edad del carachi (*Orestias agassii*), mediante análisis de escamas, otolitos y vértebras. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía UMSA.
- Parenti L. 1981. A phylogenetic and biogeographic analysis of Cyprinodontiform fishes (Teleostei, Atherinomorpha). *American Museum of Natural History* 168: 232.
- Parenti L. 1984. A taxonomic revision of the Andean killifish genus *Orestias* (Cyprinodontiformes, Ciprinodontidae). *Bulletin of the American Museum of Natural History* 178: 214 pp.
- Pellegrin J. 1904. Zoologie. Sur les pharyngiens inférieurs chez les Poissons du genre *Orestias*. *Académie des Sciences*. 682-692.
- Pellegrin J. 1906. Les poissons des lacs des hauts Plateaux. In Lemaire M. (1906) Neveu. 25 p.
- PNUD, ALT. 2002. Proyecto de conservación de la biodiversidad en la cuenca del lago Titicaca, Desaguadero, Poopo, salar de Coipasa (TDPS): desarrollar la capacidad de programas de pesca artesanal en Bolivia. CIDAB. 172 p.
- Polo M.E. 2005. Reproducción artificial e incubación artesanal in situ del qañu (*Orestias albus*) para fines de reproducción. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómico. Facultad de Agronomía. UMSA.
- Poma N. 2005. Reproducción artificial e incubación artesanal in situ del mauri (*Trichimycterus dispar*) en la bahía de Suriqui isla Paco, lago Menor del Titicaca. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. UMSA.

B-2 Biodiversidad íctica en el Lago Titicaca

- PRODUCE. 2008. Decreto supremo N. 023. Reglamento de ordenamiento pesquero y acuícola para la cuenca del Lago Titicaca ROPA.
- Puña L. 2004. Evaluación del hábito alimenticio del punku (*Orestias luteus*) en la parte boliviana del lago Titicaca. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómico. Facultad de Agronomía. UMSA.
- Quispe M. 2000. Evaluación del régimen alimenticio del mauri (*Trichomycterus rivulatus*) en el lago Titicaca. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. UMSA.
- Rendahl H. 1937. Einige fische aus Ecuador und Bolivia. Arkiv för Zoologi. 29 (11): 6-11.
- Revollo M.F., Liberman M. & Lescano A. 2006. Lake Titicaca. Experience and lessons learned brief. 377-388
- Richerson P.J. 1991. Humans as a component of the lake Titicaca ecosystem: a model system for the study of environmental deterioration. Proceedings of cary conference. 27 p.
- Rowntree W.S. 1903. On some points in the visceral anatomy of th Characinidae, with an enquiry in to the relations of the ductus pneumaticus in the Physostomi generally. Trans. Linn. Soc. London. Ser. 2. 2: 9 47-81, pls 3, 4.
- Segura M. 2006. Avances de las investigaciones técnico - científicas de la pesquería en el lago Titicaca. IMARPE.
- Silvestre E. 2004. Inclusión de tres niveles de enzima allzyme vegpro en la dieta para trucha arco iris (*Oncorhynchus mikiss*) en la etapa juvenil. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. UMSA.
- Scott S.A. 2010. Sistemática y filogenia de *Orestias* del complejo *agassizii* (Teleostei: Cyprinodontidae) de la Puna: Tesis para optar al título de Doctor en Ciencias. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. 98 p.
- Starks E.C. 1906. On a collection of fishes made by P.O. Somons in Ecuador and Peru. Proc. U. S. Natl. Mus. 30: 761-800 pp. Pls. 65-66.
- Steindachner F. 1902. Herpetologische und ichthyologische ergebnisse einer Reise nach Sudamerika, etc. Denksch. Akad. Wiss. Wien. 72: 89-148.
- Tarqui F. 2002. Técnicas de reproducción artificial de las especies ícticas del lago Titicaca. En Manejo de recursos pesqueros en el lago Titicaca, CIDAB, MAGDER. 5 p.
- Terrazas W.U. 1970. Lista de peces bolivianos. Acad. Nan. Cienc. Bol. La Paz, 66 p.
- Terrazas E.E.A. 2005. Evaluación de artesas para la incubación artesanal in situ del carahi enano (*Orestias olivaceus*) en la isla Suriqui lago menor del Titicaca. Tesis para optar al título de licenciatura en Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. UMSA.
- Tchernavin V.V. 1944. A revision of the subfamily Orestiinae. Department of Zoology, Briish Museum, Natural History. 114 p.
- UNEP – PNUMA. 1996. Diagnóstico Ambiental del Sistema Titicaca – Desaguadero – Poopo – Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia – Peru. 223 p.
- UTO, MINCO, FUNDECO & KOMEX. 2005-2007. Evaluación ambiental del lago Poopo y sus ríos tributarios. 199 p.
- Valenciennes A. 1839. Poissons d’Amerique Rapport sur quelques poissons d’Amerique raportes par M. Pentland du lac Titicaca et des autres points eleves des Andes. L’Institut, ann. 7, 276: 118.
- Vaux P., Wurtsbaugh W., Treviño H., Mariño L., Bustamante E., Torres J., Richerson P. & Alfaro R. 1988. Ecology of the pelagic fishes of lake Titicaca, Peru - Bolivia. Biotropica 20 (3): 220-229.
- Vilca J.L., Castillo Y.P., Jara L. & Coila Y.C. 2002. Desarrollar la capacidad de programas de pesca artesanal en el ambito peruano del sistema TDPS. 280 p.
- Villwock W. 1962. Die gattung *Orestias* (Pisces, Microcyprini) und die Frage der intralakustrischen speziation in Titicaca-Seengebiet. Sonderdruck aus Andlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft in Wien. 611-623 p.
- Villwock W. 1964. Vermeintliche Artbastarde in der Gattung *Orestias* (Pisces, Cyprinodontidae). Mitt. Hamburg.

- Zool. Mus. Inst. (Kosswing-Fertschrift). 285-291 p.
- Villwock W. 1966. Zur Biologie der Orestiinae (Pisces, Cyprinodontidae). Unter besonderer Berücksichtigung von Darminhaltstuntersuchungen. Ein Beitrag zum Problem der speciation in der Gattung *Orestias*. Abh. Verh. Naturwiss. Var Hamburg (NF) 10: 153-166.
- Villwock W. 1983. El género *Orestias* y su evolución en el Altiplano del Perú y Bolivia. Informe final IX: 59-66.
- Villwock W. & Sienknecht U. 1993. Die Zahnkarpfen der Gattung *Orestias* (Valenciennes, 1839) (Teleostei, Cyprinodontidae) aus dem Altiplano von Bolivien, Chile und Perú. Mitt. hamb. zool. Mus. Inst. 90: 321-362.
- Villwock W. & Sienknecht U. 1995. Intraspezifische Variabilität im Genus *Orestias* Valenciennes, 1839 (Teleostei: Cyprinodontidae) und zum Problem der Artidentität. Mitteilungen aus dem Hamburgischen Zoologischen Museum und Institut, 92, 381-398.
- Villwock W. & Sienknecht U. 1996. Contribución al conocimiento e historia de los peces Chilenos, los Cyprinodontidos del género *Orestias* Val.1839 (Teleostei, Cyprinodontidae) del Altiplano Chileno. Medio Ambiente 13 (1): 119-126.
- Wurtsbaugh W.A. & Tapia R.A. 1988. Mass mortality of fishes in Lake Titicaca (Peru-Bolivia) associated with the protozoan parasite *Ichthyophthirius multifiliis*. Trans. Amer. Fish. Soc., 117: 213-217.
- Zepita C. 2013. Dieta y rasgos sexuales de las poblaciones del complejo *agassii* (género *Orestias*, Pisces-Cyprinodontidae) en los lagos: Titicaca, Uru Uru y Poopo. Tesis para optar al título de Licenciatura. Facultad de Ciencias Puras y Naturales. UMSA. 64 p.
- Zuñiga E. 1941. Régimen alimenticio y longitud de tubo digestivo en los peces del género *Orestias*. Mus. Hist. Nat. "Javier Prado" Lima. 16: 79-86 p.



B-3

FUNCIONAMIENTO LIMNOLÓGICO Y FOTOBIOLOGIA DEL LAGO TITICACA

LIMNOLOGICAL FUNCTIONING AND PHOTOBIOLOGY OF LAKE TITICACA

Xavier Lazzaro – UMR BOREA IRD 207/CNRS 7208/MNHN/ UPMC – Laboratorio de Calidad Ambiental, Instituto de Ecología, UMSA, La Paz, Bolivia - xavier.lazzaro@ird.fr

César Gamarra Peralta – IMARPE, Coordinador del Laboratorio Continental de Puno, Perú - cgamarra@imarpe.gob.pe

RESUMEN:

El objetivo de este capítulo es analizar los avances más significativos del estado actual del conocimiento limnológico sobre el Lago Titicaca, mediante la información científica disponible. Para alcanzar este objetivo, se consideraron los aspectos siguientes: (a) Revisión bibliografía cronológica de la literatura publicada en revistas científicas internacionales, completada por la predominante literatura gris proveniente de informes y síntesis institucionales, presentaciones en simposios y talleres, así como de tesis universitarias, para intentar de identificar tendencias temporales para ciertas variables importantes de calidad de agua; (b) Análisis de los pocos estudios existentes sobre fotobiología, o sea la importante contribución de la radiación ultravioleta y visible en la estructuración y el funcionamiento ecológico de las comunidades de plancton, como la atenuación de la fotosíntesis del fitoplancton, la alteración del DNA, las migraciones verticales y los modos de pigmentación del zooplancton; (c) Evaluación de los vacíos de información y de la comparabilidad entre datos; (d) Recomendaciones sobre la intercalibración de los métodos y de los equipos, las innovaciones tecnológicas que permiten afinar el nivel de observación y monitoreo de los fenómenos ; y (e) Perspectivas de investigación y gestión integrada gracias a las colaboraciones entre instituciones y la implementación del Observatorio Ambiental Binacional del Lago Titicaca, liderado por la ALT (Autoridad Autónoma Binacional del Lago Titicaca - TDPS), con apoyo de las instituciones involucradas, tales como IMARPE (Instituto del Mar del Perú), PELT (Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca), UNA-

PUNO (Universidad Nacional del Altiplano), UMSA (Universidad Mayor de San Andrés) e IRD (Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo).

PALABRAS CLAVE: NITRÓGENO, FÓSFORO, RAZÓN ESTEQUIOMÉTRICA N:P, TURBIDEZ, CLOROFILA-A, PRODUCCIÓN PRIMARIA, RADIACIÓN ULTRAVIOLETA, RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA

SUMMARY:

The aim of this chapter is to analyze the most significant advances in the current knowledge of the limnology of Lake Titicaca, based on the available scientific information. To achieve this goal, we considered the following steps: (a) A chronological review of the literature published in international scientific journals, supplemented by a predominantly gray literature arising from institutional reports and summaries, presentations at symposia and workshops, as well as academic theses, to try to identify trends over time for certain major water quality variables; (b) an analysis of the few existing studies on photobiology, that is the important contribution of ultraviolet and visible radiation on the ecological structure and functioning of plankton communities, as attenuation of phytoplankton photosynthesis, DNA alteration, vertical migration, modes of zooplankton pigmentation; (c) An assessment of information gaps and data comparability; (d) Some recommendations about inter-calibration of methods and equipment, technological innovations that allow tuning the level of observation and monitoring of the phenomena; and (e) new research and management perspectives from collaborations between institutions and the implementation of the Binational Environmental Observatory of Lake Titicaca, led by ALT (Binational Autonomous Authority of Lake Titicaca - TDPS), with the support of the institutions involved, such as IMARPE (Sea Institute of Peru), PELT (Special Binational Project of Lake Titicaca), UNA-PUNO (Altiplano National University, Puno), UMSA (Major University of San Andrés) and IRD (French Research Institute for Development).

KEYWORDS: NITROGEN, PHOSPHORUS, N:P STOICHIOMETRIC RATIO, TURBIDITY, CHLOROPHYLL-A, PRIMARY PRODUCTION, ULTRAVIOLET RADIATION, PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION

B3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo trataremos exclusivamente del funcionamiento limnológico de la columna de agua de las zonas litorales y pelágicas del Lago Titicaca. La zona litoral recibe suficiente luz para el crecimiento de las macrófitas enraizadas. Más allá se extiende la zona pelágica (≥ 7 m de profundidad en el Lago Titicaca), o sea la zona de aguas abiertas donde la luz no penetra hasta el fondo del lago que corresponde a la zona bentónica (cuyo funcionamiento está excluido en el presente capítulo). A partir de la literatura disponible, discutiremos sobre todo del estado trófico, la biomasa (clorofila) y producción primaria del fitoplancton. Intentamos identificar sus variaciones durante las últimas décadas, en respuesta a los cambios globales (sin poder separar las contribuciones respectivas del calentamiento global y de la presión antropogénica). Por falta de información adecuada, contrariamente a lo previsto, no se ha podido analizar las interacciones con el zooplancton, los macroinvertebrados, peces, y macrófitas acuáticas. Los

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

resultados son aislados espacio-temporalmente, y principalmente publicados en informes institucionales (literatura gris), siendo pocos artículos de revistas internacionales. Sin embargo, buscaremos las tendencias de evolución de las características más importantes durante las tres últimas décadas. Además, presentaremos la situación de ciertas áreas contaminadas y/o eutrofizadas, así como unas tentativas de restaurarlas. De hecho, no existen estudios de monitoreo a largo plazo de ningún área en particular del Lago Titicaca, a pesar de la importancia de este ecosistema tan único.

El Lago Titicaca es el mayor lago de agua dulce de América del Sur con una reserva de más de novecientos mil millones de metros cúbicos, así como el más alto (3.810 m s.n.m.) de los grandes lagos del Mundo. Con unos 3 millones de años, es uno de los veinte lagos más antiguos en la Tierra. Como se lo conoce actualmente se formó hace unos 9.000 años, después de una larga historia geológica, como resultado de una sucesión de lagos altiplánicos, y también a causa de cambios climáticos bruscos durante el curso de los últimos 25.000 años, después del último máximo glacial (Baker *et al.* 2001) y del calentamiento durante la última transición interglacial (Seltzer *et al.* 2002): del Lago Mataro (55.000 años AP), el Lago Cabana (50.000 años), el Lago Ballivián (40.000 años), el Lago Michin (30.000 a 20.000 años), hasta el Lago Tauca (14.000 a 10.00 años) (Argollo & Mourguiart 2000).

Cubre 8.300 km² y de Noroeste a Suroeste se extiende sobre 190 km. El estrecho de Tiquina separa al Norte al Lago Mayor profundo (media 180 m, máxima 280 m) y al Sur al Lago Menor somero (media 9 m, máxima 40 m) o Huinaymarca. Está ubicado en una amplia cuenca (58.000 km²) que comprende la mayor parte del Altiplano entre las Cordilleras Oriental y Occidental de los Andes Norte que culminan a más de 6.400 m en la Cordillera Real. Veinticinco ríos alimentan el Lago Titicaca, siendo el río Ramis, al Noroeste, el mayor (con 2/5 del drenaje) de la Cuenca. El río Desaguadero (un pequeño río) sirve de exutorio al extremo sur, evacuando solamente un 5 % del exceso de agua del Lago, en cuanto a los 95% restantes se pierden por evaporación a consecuencia de la intensa radiación solar y de los fuertes vientos que soplan en el Altiplano seco.

A pesar de sus características únicas, se conoce todavía muy poco el funcionamiento ecológico y la biogeoquímica del Lago Titicaca, así como de su contribución importante al microclima local de la región, responsable del desarrollo de especies animales y vegetales endémicas, y de condiciones ideales para la agricultura y actividad pecuaria. Estas llevaron el florecimiento en sus orillas de varias notables civilizaciones andinas prehispánicas (Pukara, Tiwanaku, Colla Lupaka e Inca), hasta el presente (Binford *et al.* 1996, Contreras 2010, Miller *et al.* 2010). Actualmente, más de 5 millones de habitantes, la mayoría en Bolivia, dependen directamente o

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

indirectamente de los recursos del Lago Titicaca.

El maravilloso Lago Titicaca y sus poblaciones ribereñas, esencialmente en mayor estado de pobreza (84% en Perú y 98% en Bolivia), están expuestos a riesgos frente a los cambios globales en marcha, con bastante incertidumbre en relación a las previsiones de los modelos globales que no se aplican directamente, por el relieve extremo de los Andes (Andrade 2008, Urrutia 2008, Urrutia & Vuille 2009, Bush *et al.*, 2010, Herzog *et al.* 2011). Esta situación justifica la necesidad de sintetizar el conocimiento actual, apuntar los vacíos, y coordinar los esfuerzos hacia un programa de monitoreo integral a largo plazo, direccionado a evitar la contaminación/polución, restaurar las áreas degradadas, y mejorar la utilización racional y sostenible de los recursos hídricos y acuáticos. El verdadero desafío es preservar el funcionamiento ecológico del ecosistema en su conjunto, respetando la vida cultural y productiva de las sociedades que lo habitan, promocionando también el valor turístico de innumerables sitios de impactante belleza y arqueológicos, frente a la presión antropogénica y al desarrollo industrial. Así, en base al progreso socioeconómico que pueden proveer las ruinas arqueológicas del Tiwanaku y los monumentos ceremoniales en Copacabana, las ruinas arqueológicas en la Isla del Sol y de la Luna y los activos intangibles tales como música, festivales, idiomas, costumbres y tradiciones de aymaras y quechuas, el Banco Mundial propuso un Proyecto de Desarrollo Sostenible Local del Lago Titicaca, para el período 2008-2013 (Banco Mundial 2007).

B3.2. CONTEXTO

La dificultad para redactar este Capítulo, así como varios de los otros, proviene de la escasez de literatura científica validada en revistas especializadas de difusión nacional e internacional, de la limitación espacial y temporal de los estudios siendo en su mayoría puntuales (pocas investigaciones integrales), de la predominancia de informes institucionales (“literatura gris”) de calidad muy variada (por ausencia de comité editorial). Sin embargo, las tesis de licenciatura y maestría, revisadas por un comité científico, ofrecen una información validada, pero son frecuentemente de difícil acceso. La mayoría de los documentos no se encuentran en formato digital (pdf) lo que dificulta su divulgación. Se carece de portales Internet actualizados dedicados a proporcionar la información técnico-científica sobre el Lago Titicaca y la cuenca TDPS. Por lo tanto, puede ser problemático comparar los datos originales. No siempre los protocolos de muestreo y de análisis siguen normas internacionales, o son basados en procedimientos estándares. Justamente, la evolución de las técnicas y de los equipos requiere de una inter-calibración para poder comparar efectivamente los resultados históricos con los

actuales. No tomar en cuenta estos sesgos puede llevar a conclusiones y previsiones erróneas, por tanto a decisiones inadecuadas.

Se vuelve difícil no solamente obtener una lista de literatura gris, sino localizar los documentos físicos correspondientes, más frecuentemente depositados en las bibliotecas y/o oficinas de las instituciones que los editaron. Muy pocos de estos documentos son escaneados en medio digital (formato pdf), por tanto no están disponibles en páginas Web. A pesar de los esfuerzos individuales e institucionales, no existen centros de documentación, tanto en Perú como en Bolivia, que dispongan del material bibliográfico exhaustivo sobre el Lago Titicaca y la cuenca del TDPS - ni siquiera las bibliotecas de la ALT, UMSA e IRD en La Paz, y UNA en Puno - que tengan la capacidad de localizar, fotocopiar, escanear y difundir el último ejemplar de una publicación agotada. Capitalizar la información disponible y los conocimientos acumulados es un mayor desafío para poder enfrentarse, bien preparado, a los cambios futuros ya en marcha.

Determinar el estado trófico de un lago al menos requiere caracterizar: (a) La estructura físico-química (régimen de estratificación vs. mezcla) y planctónica de la columna de agua de la zona pelágica, así como su dinámica estacional, (b) Las concentraciones en nutrientes (sobre todo NO_3 , NH_4 , PO_4), la razón estequiométrica nitrógeno:fósforo (molar) que determina el tipo y nivel de limitación nutritiva, las composiciones (taxonómica y por grupos funcionales), biomásas (clorofila para el fitoplancton), productividades (cuando fuera posible) de las comunidades fito- y zooplanctónicas, sus interacciones tróficas (depredación, herbivoría), (c) La importancia de la zona litoral, de la vegetación acuática (macrófitas) flotante, sumergida y/o emergente, sus interacciones (procesos de competición, antagonismo) con el fitoplancton de la zona pelágica, y (d) El régimen de atenuación de la luz solar (ultravioleta y fotosintéticamente activa) en la columna de agua y las variables que lo controlan (carbono orgánico disuelto, clorofila, substancias coloidales, partículas en suspensión, etc.). La combinación de características extremas del Lago Titicaca – por ser tropical, de gran altura, y en parte muy profundo – hace más difícil caracterizar su estado trófico. De hecho, el Lago Titicaca no encuadra en las clasificaciones desarrolladas para lagos típicamente de clima templado o tropical. Por ejemplo: (a) Sus concentraciones en nutrientes son bajas no por ser un lago pobre si no por la eficiencia de utilización, (b) La transparencia de sus aguas es bien alta, (c) Su estacionalidad es débil comparada a las variaciones interanuales u ocasionadas por eventos meteorológicos súbitos, (d) La intensa y profunda penetración de la luz ultravioleta limita más la producción primaria del fitoplancton que la disponibilidad en nutrientes por si, y controla el patrón de distribución nictemeral (durante 24 hrs.) vertical del zooplancton, (e) La radiación solar incidente es intensa todo el año manteniendo una productividad poco variable, (f) La estratificación térmica vertical

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

es débil (≤ 3 °C en varios metros) en zonas profundas, mientras que las zonas someras (≤ 10 m de profundidad) permanecen homogéneas, etc. Por las razones expuestas, por su extensión geográfica, y por ser único en su tipología, no es fácil caracterizar el estado trófico del Lago Titicaca. La discrepancia entre los resultados de los estudios lo comprueba. A pesar de estas limitaciones, intentaremos identificar patrones y tendencias.

B3.3. LAGO TITICACA

El libro editado por Dejoux & Ittis (1992) es una compilación de los trabajos limnológicos realizados durante el último siglo, incluyendo los realizados en los años 1970-1980 conjuntamente por los investigadores de ORSTOM (sigla previa del IRD) y de la UMSA (La Paz) en ambos lados del Lago. Esta síntesis es aún la más completa (desde geomorfología, clima, hidrología, plancton, bentos, ictiofauna, contaminación, socio-economía, etc.) y sirve de referencia para la comparación con los datos actuales. Recientemente, los trabajos publicados en el I y II Simposio Internacional del Lago Titicaca (2011 y 2013, respectivamente), organizados en Puno, han presentado una actualización sobre los estudios en curso.

B3.3.1. LAGO MAYOR

Los primeros trabajos científicos sobre el Lago Titicaca fueron los trabajos naturalistas de Alcide d'Orbigny (Royal Geogr. Soc., London, 1837), Agassiz (1876a,b), Agassiz & Garman (1876) y Neveu-Lemaire (1906). Los primeros datos hidrológicos, hidroquímicos y ecológicos fueron colectados durante 6 meses (abril a septiembre de 1937) en las aguas abiertas del Lago Mayor y del Lago Menor, por los miembros de la expedición Percy Sladen liderada por H. Cary Gilson (1939, 1940, 1955; siendo observaciones, colecciones, 20 informes principalmente de estudios taxonómicos). En esta ocasión, se realizaron las primeras determinaciones sistemáticas del zooplancton: por De Bauchamp (1939) para rotíferos y Harding (1955a,b) para copépodos y cladóceros, completados por Uéno (1967).

B3.3.1.1. PERÍODO 1973

De enero a diciembre de 1973, Richerson *et al.* (1977) realizaron el primer estudio del funcionamiento limnológico del Lago Titicaca. A intervalos de aproximadamente dos semanas (21 campañas), los autores realizaron perfiles de muestreos verticales en 7 estaciones profundas (100-200 m) en la parte Norte del Lago Mayor, cerca del pueblo de Capachica, Perú, en el mismo área de estudio de la expedición Percy Sladen Trust. Por la ubicación tropical del Lago, la estacionalidad es débil, entonces los perfiles termales mostraban una estratificación débil pero persistente en el período seco, con poca diferencia entre temperaturas epilimnéticas

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

(máx. 15,7 °C) y hipolimnéticas (11,1 °C). De febrero a mayo el Lago se estratificó con un epilimnio de 40 m de espesor que se profundizó a 70 m en junio. En plena temporada seca (julio), el Lago se volvió isotermal a 11,1-11,2 °C, mezclándose hasta por lo menos 100 m de profundidad. La profundidad de mezcla variable podía ser prevista empíricamente por la temperatura del aire y la velocidad del viento (0,89 m s⁻¹ en marzo a 1,30 m s⁻¹ en agosto; raramente 10-14 m s⁻¹ en la tarde o noche). Según Richerson *et al.* (1977), el Lago Titicaca sería oligotrófico monomítico con mezcla incompleta durante ciertos años, como en 1973 (*sensu* Hutchinson & Löffler 1956).

Las mediciones químicas fueron realizadas en la estación I (Fig. B3-1, Tabs. B3-1,2). Incluyeron OD (oxígeno disuelto, por método de Winkler), alcalinidad, pH, sílice, fosfatos (media 15-35 µg PO₄ L⁻¹, 0-30 m, >30 m), nitrato (108-121 µg NO₃ L⁻¹), calcio (66 mg L⁻¹), magnesio (34 mg L⁻¹), cloruro (260 mg L⁻¹) y sulfato (282 mg L⁻¹), basándose en los métodos APHA (1971). Las concentraciones de fosfato y nitrato se encontraron al límite de detección del método. Siendo así, la razón estequiométrica N:P no pasó de 6:1 a 12:1 (en molar) (Fig. B3-8, Tab. B3-5), es decir inferior a la razón de Redfield 16:1, lo que indica una limitación en nitrógeno, una situación común en lagos tropicales. La fuerte evaporación (~2 m año⁻¹) combinada con la baja pérdida por el Desaguadero, genera que la concentración en sólidos disueltos sea muy sensible a las fluctuaciones climáticas. El pH del epilimnio se registró alrededor de 8,6 durante la mayor parte del año, bajando hasta 8,5 en el período isotermal, en cuanto que el pH del hipolimnio se quedó ≤ 8,4 (8,5 en período isotermal). A 140 m, la concentración de OD (2,4-4,8 mg L⁻¹) llegó a la mitad de la de superficie. En agosto la mezcla vertical bajó a > 100 m de profundidad. Como los muestreos se realizaron al medio día, una supersaturación ocurrió frecuentemente en superficie (100% saturación 6,6 mg L⁻¹ a 13,5 °C) debido a la actividad fotosintética. Las más bajas concentraciones ocurrieron en noviembre a todas las profundidades. La más baja concentración (2,4 mg L⁻¹) se encontró a 150 m, en relación con la descomposición de la materia orgánica. Sin embargo, la saturación puede ocurrir a 150 m durante la isoterma (Wayne Wurstbaugh, com. pers.).

La transparencia en febrero fluctuaba de 4,5-4,8 m (profundidad de desaparición del disco de Secchi), hasta un máximo de 10,5 m en agosto. La lluvia y la biomasa del fitoplancton (variables independientes) explicaban ≥ 75 % de la extinción de la radiación solar incidente (radiómetro casero más sensible en el verde). El fitoplancton fue colectado con botella de Van Dorn en la zona eufótica, filtrado en filtros Millipore (porosidad 0,45 µm) enumerado en 50-100 campos aleatorios en un microscopio invertido (conteo mínimo de 250-300 células). La biomasa promedio de 3,0 g C m⁻² era dominada por Clorofíceas y Cianobacterias, sin diferenciación

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

vertical de las poblaciones. La diatomea *Stephanodiscus astrada* fue dominante durante la estación seca. En promedio diario, la producción primaria neta llegaba a $1,45 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, con fluctuación estacional entre $0,75$ y $2,75 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. El zooplancton era dominado por el copépodo calanoida *Boeckella titicacae*, sin sucesión estacional, con biomasa en torno de $0,89 \text{ g C m}^{-2}$.

B3.3.1.2. PERÍODO 1973-1976

Básicamente, durante 1973-1976, Richerson *et al.* (1986) monitorearon una estación profunda (W; ver Fig. B3-1, Tab. B3-1) en la parte norte del Lago Mayor. Ellos publicaron estos datos unos diez años más tarde junto con los datos de un monitoreo mensual realizado durante dos años (1981-1982) en dos estaciones profundas, una cerca de la costa (W) y otra más adentro (Z). Este trabajo fue el fruto de una colaboración entre la Universidad de California y el IMARPE.

B3.3.1.3. PERÍODO 1981-1983

Richerson *et al.* (1986) realizaron un análisis de varianza y autocorrelación para identificar la existencia de patrones estacionales e interanuales de variación en variables físicas, químicas y biológicas, juntando sus datos de 1973 (Richerson *et al.* 1977; estación W en la Fig. B3-1) hasta agosto de 1976 con frecuencia de muestro de 15 días, y nuevos datos mensuales colectados entre diciembre 1980 a diciembre 1982 en la estación Z (Fig. B3-2).

Los lagos tropicales profundos demuestran un patrón monomíctico de estratificación termal, con una isotermita, o una casi isotermita en el caso de los lagos meromícticos profundos del Rift Africano durante la época más fría y seca (Talling 1966, Kittel & Richerson 1978). Sin embargo, el grado de estacionalidad es menos marcado en los lagos tropicales que en lagos templados. En compensación, otros tipos de efectos temporales afectan los lagos tropicales. Por ejemplo, los fenómenos meteorológicos pueden afectar la profundidad de estratificación, la producción primaria y la secuencia de sucesión de las comunidades fitoplanctónicas. También, la débil estacionalidad del balance de calor puede aumentar la sensibilidad a los cambios meteorológicos intra- y interanuales, causando variaciones irregulares en vez de ciclos anuales regulares. Para probar la generalidad de estas hipótesis, Richerson *et al.* (1986) compararon unas series temporales del Lago Titicaca con las de otros lagos tropicales y templados de baja altura.

Los autores encontraron que esta parte norte del Lago Titicaca se comporta físicamente en

muchos aspectos como un lago tropical estratificado de baja altura, a pesar de ser ubicado a gran altura y de las bajas temperaturas. Sin embargo, las diferencias entre temperaturas epiliméticas e hipolimnéticas no pasan de 3 °C y el patrón de mezcla es monomítico. Por otro lado, la baja presión parcial de OD debido a la altura que frena el proceso de re-oxigenación durante la isoterma, favoreciendo el desarrollo de unos déficits de oxígeno y de altas tasas de desnitrificación (Vincent *et al.* 1985). La producción primaria anual media llega a 1,13 g C m⁻² día⁻¹, y la concentración en clorofila-*a* entorno de 1,5 µg L⁻¹, valores semejantes a las de 1973. La amplitud reducida de variación de la insolación en el Lago Titicaca podría ser la mayor causa de la baja variación estacional en producción primaria. De forma similar en los periodos de baja radiación solar, la luz es mucho más intensa que durante un invierno templado, así que a pesar que el patrón de insolación es relativamente estacional, la producción primaria no lo es. Como se ha observado anteriormente la producción del fitoplancton era limitada por el nitrógeno (Vincent *et al.* 1984, Carney 1985, Wurtsbaugh *et al.* 1985). Los periodos de fijación del nitrógeno ocurrieron cuando la estratificación era más fuerte. Frecuentemente, ellos generaban una alta producción primaria; por ejemplo, en diciembre 1973 cuando las cianobacterias con heterocísticas fueron muy abundantes, y en 1982 cuando las tasas de fijación de nitrógeno eran altas. Así, eventos de alta o baja producción persistentes durante 1-4 meses pueden contribuir a patrones que parecen groseramente estacionales durante cualquier secuencia de 12 meses, pero no se repiten de un año al otro. Melack (1979) incluyó el Lago Titicaca en su tipo A de lagos con fluctuaciones estacionales, mientras que Richerson *et al.* (1986) sugieren que el termino 'casi-estacional' es más apropiado. Para que pueda identificarse patrones estacionales, los análisis espectrales necesitan largas series de muestras regularmente espaciadas, muy escasas en estudios limnológicos e inexistentes para el Lago Titicaca. Richerson *et al.* (1986) consideraron válida la hipótesis de Richerson *et al.* (1977) según la cual el Lago Titicaca y otros lagos tropicales estratificados mostrarían más variación interanual pero menos estacionalidad. Sin embargo, no hay evidencia de que el régimen de estratificación del Lago Titicaca sea tan diferente de un año al otro como lo previsto por Kittel & Richerson (1978).

Es sorprendente que el efecto del régimen de estratificación estacional sobre varios procesos limnológicos sea moderado. Sin embargo es consistente con la conclusión de Brylinsky & Mann (1973) según la cual la insolación tiene un mayor efecto que la concentración en nutrientes para explicar las variaciones latitudinales en producción primaria. Entonces, en la actualidad, sería muy importante profundizar el estudio de la estacionalidad y variación interanual en el Lago Titicaca, siendo que de forma similar para lagos templados existen muy pocas series temporales detalladas.

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Durante 1973 y 1981, el fitoplancton del Lago Mayor era dominado por clorofíceas, cianobacterias y diatomeas. Parece haber una similitud florística entre años y entre subcuencas, pero con una gran variación en abundancias relativas de los taxones. La cianobacteria *Anabaena spiroides*, dominaba durante la estación más estratificada, mientras que las cianobacterias permanecían poco abundantes en las áreas poco antropizadas, como en Huatajata y Chúa, Lago Menor. El patrón de sucesión estacional se parece de cierta forma a la versión tropical del patrón clásico observado por Lewis (1978). Generalmente, el orden de aparición de los taxones en el Lago Mayor es la dominancia de las diatomeas durante el período de mezcla más profunda, seguido por las clorofíceas, las cianobacterias y finalmente los dinoflagelados. Un patrón similar fue observado por Talling (1966) en el Lago Victoria (el lago más grande de África, reservorio principal del Nilo, entre Tanzania y Uganda) pero este patrón difiere de los patrones de los Lagos Lanao (Filipinas) y Valencia (el mayor lago de Venezuela) por tener solamente una secuencia mayor de sucesión, en vez de varias. El balance de calor del Lago Titicaca varía más entre años que un lago templado típico, pero menos que el Lago Valencia. Como el volumen del hipolimnion es muy grande, el Lago Mayor sufre raramente cambios bruscos en la profundidad de mezcla. Los descensos menores de termoclina afectan una fracción menor del hipolimnion. Entonces las concentraciones de nutrientes de la zona eufótica varían poco (Vincent *et al.* 1984, Wurtsbaugh *et al.* 1985). Solamente la circulación profunda durante la estación seca es capaz de iniciar una nueva secuencia de sucesión en el Lago Mayor. A pesar de las similitudes en la composición específica, este patrón de sucesión estacional (monomíctico) es muy distinto del patrón en el Lago Menor (polimíctico).

En este período se realizaron varios trabajos sobre la excreción de nitrógeno por el zooplancton (Pawley 1982), la variación cuantitativa del zooplancton en la zona pelágica del Lago Mayor (Moreno 1983), y su pastoreo selectivo por talla de organismos (Haney & Trout 1985).

B3.3.1.4. PERÍODO 1984-1985

La experiencia y los conocimientos adquiridos en el Lago Menor por Lazzaro (1981), en el ámbito del convenio UMSA-ORSTOM (1979), se aplicaron para realizar un estudio del Lago Mayor y elaborar un Atlas de distribución geográfica y estacional de los parámetros físico-químicos, en el ámbito del convenio UMSA-IMARPE (Quintanilla *et al.* 1987). Se establecieron 20 estaciones de muestreo (Fig. B3-1, Tabs. B3-1,3) para los parámetros físico-químicos (pH, alcalinidad total, CO₂, temperatura, transparencia, OD y conductividad), y 10 estaciones para los nutrientes (fósforo, nitrógeno y sílice disuelto). Según la profundidad de cada estación se tomaron muestras de agua a 1, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, y 200 m. Se efectuaron 4 campañas estacionales a lo largo de un ciclo anual en: (1) Temporada seca o Invierno* (agosto 1984), (2)

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Transición o Primavera* (diciembre 1984), (3) Temporada de Lluvias o Verano* (marzo 1985), y (4) Transición o Otoño* (mayo 1985) (según la nomenclatura templada).

Temperatura: A lo largo del año, la zona Norte del estudio fue la más fría por los aportes del río Suchez. Se diferenciaban 4 estaciones: Invierno seco (jun.-ago.), época de mezcla de aguas, con ocasionales estratificaciones térmicas superficiales inestables; Primavera o Transición (set.-nov.), con estratificación térmica estable entre 0-50 m; Verano lluvioso (dic.-mar.), con termoclina estable entre 50-70 m de mayor gradiente ($0,15\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$), debido a la ausencia de vientos fuertes y al calentamiento superficial; y Otoño o Transición (abr.-may.), con termoclina entre 65-90 m de gradiente más débil ($0,06\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$); clasificando el Lago Mayor como monomítico caliente de Primer Orden.

Oxígeno disuelto (OD): La costa Norte tuvo mayores concentraciones de OD durante todo el año por ser de bajas profundidades y tener buena oxigenación por turbulencia (llegada del río Suchez al Lago). Las variaciones estacionales se produjeron en la capa de los 100 m.

pH: Durante todo el año se distinguieron 3 capas: (a) 0-50 m con valores elevados debido a la fotosíntesis; (b) 50-100 o 150 m intermediaria; (c) ≥ 150 m con valores bajos por óxido-reducción, mineralización, sedimentación, descomposición orgánica, etc.

Dióxido de carbono (CO₂): La concentración fluctuó entre $5,0\text{ mg L}^{-1}$ en Verano y $1,8\text{ mg L}^{-1}$ en Invierno seco, con un aumento gradual de la superficie al fondo (hasta $7,0\text{ mg L}^{-1}$ en Verano), y menores valores en la desembocadura del río Suchez.

Nitratos: Mayor concentración en toda la columna de la zona pelágica frente a la Isla del Sol en Otoño ($80\text{ }\mu\text{g L}^{-1}$), menor en Primavera. No parecía haber influencia de la termoclina en su distribución vertical.

Fosfatos: Se mantuvieron una zona rica ubicada al Oeste y parte del Centro, una zona intermedia en la parte Central y Norte, una zona pobre al Sur-Este. Se identificaron dos capas: una superior (≤ 40 m) la más pobre con disminución regular, una inferior ≥ 50 m con aumento regular y máximos valores al fondo.

Relaciones entre factores físico-químicos y fitoplancton: La máxima abundancia de fitoplancton ($12,5 \times 10^5\text{ cel. L}^{-1}$ en Invierno seco con transparencia de 10 m) se encontró a 5-10 m, siendo el nivel óptimo para la fotosíntesis. A ≥ 10 m, la abundancia del fitoplancton se redujo por falta de luz, por lo que aumentaron las concentraciones de nutrientes no consumidos. La zona eufótica fue máxima en Primavera y Verano con 27 m, disminuyendo en Otoño a 23 m y 12 m en Invierno seco. Por su biomasa relativamente baja de fitoplancton, sus concentraciones

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

$\geq 5 \mu\text{g L}^{-1}$ en fosfatos, $\leq 250 \mu\text{g L}^{-1}$ en nitratos, y su delicado equilibrio en aportes y pérdidas (hídricas y hidroquímicas), el Lago Mayor fue clasificado como oligotrófico a ligeramente mesotrófico.

B3.3.1.5. EVOLUCIÓN ENTRE 1985 Y ACTUAL

A pesar de los numerosos estudios sobre el fito- y zooplancton del Lago, no se puede identificar tendencias de evolución espacio-temporal en la composición y abundancia de las comunidades porque los trabajos son esencialmente puntuales y no existen monitoreos espacio-temporales. Para el fitoplancton, después del estudio taxonómico de Iltis (1984), Liberman & Miranda (1986,1987) estudiaron la variación estacional en ambos el Lago Menor (Huatajata, Chúa, Tiquina) y el Lago Mayor (Tiquina, Isla de la Luna, Bahía Santiago de Huata, Isla del Sol, Bahía del río Suchez, Bahía de Tanahuaca) entre agosto 1984 y mayo 1985, a partir de muestras colectadas con botellas hidrográficas desde la superficie hasta 50 m, con intervalos de 5 m. La composición (62 taxa, contra 115 taxa inventariados por Tutin (1940)) reveló una predominancia de Chlorophyta (55%), de Cyanophyta (19%) y Baciliariophyta (19%) con menor proporción de Pyrrophyta (5%) y Chrysophyta (2%).

Entre 1981 y 1988, Repelin et al. (1987, 1988) y Pinto (1992) determinaron la abundancia espacio-temporal del zooplancton (copépodos y cladóceros) en la parte Boliviana del Lago Mayor y Lago Menor, así como las migraciones nictemerales de algunos grupos. Las densidades medias variaban entre 24.000 y $>100.000 \text{ org. m}^{-3}$ (temporada lluviosa; al Norte de la península de Tarraco, entre el estrecho de Tiquina y la Isla del Sol). Entre otros factores, estas densidades eran probablemente influenciadas por la depredación de poblaciones de peces zooplanctófagos, como *Orestias ispi* (Leblond 1982), *O. forgeti* y *O. pentlandii*, así como individuos jóvenes de pejerrey (*Basilichthys bonariensis*) y trucha arco iris (*Salmo gairdneri* en ese entonces, y actualmente *Onchorynchus mikiss*) (Loubens 1989) (ver Capítulo B2). Pawley & Richerson (1992) muestrearon el zooplancton del Lago Mayor cada 15 días en 1981 y 1982, durante la noche a lo largo de transectos entre Comina y Capachica. La falta de estrecha correlación con las principales variables físicas (como los ciclos de estratificación) condujo a los autores a concluir que, como para el fitoplancton, las complejas interacciones son más importantes para determinar las estructuras de las comunidades zooplanctónicas. A partir de muestreos estratificados, Pinto (1993) determinó que los copépodos realizan migraciones verticales, concentrándose a 5-7 m a medio día y dispersándose en toda la columna de agua durante la noche.

El informe PROINTEC/TYPSA (2004) reporta los datos de 4 cruceros realizados en 27 estaciones

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

en todo el Lago Titicaca para caracterizar el estado trófico: (a) sector peruano, 27-30 Mayo 2003; sector boliviano, 23-25 junio 2003; (b) incluyendo la contaminación de los sedimentos, 19-25 agosto 2003; (c) 23-30 octubre 2003; (d) 26 enero a 2 febrero 2004. También se realizaron 2 campañas circunlacustres con embarcación ligera para determinar las zonas de contaminación litoral y de las desembocaduras de los principales afluentes: (1) campaña del 14-23 julio 2003; (2) campaña del 25 noviembre a 5 diciembre 2003. Faltó la localización geográfica de las estaciones. Sin embargo, la Unidad Operativa Boliviana (UOB) y el Proyecto Especial del Lago Titicaca (PELT) elaboraron una cartografía temática. No se presentaron los protocolos de análisis físico-químicos del agua. La unidad de concentración en clorofila-*a* es incorrecta (mg L^{-1} en vez de $\mu\text{g L}^{-1}$). El cálculo de limitación en nutrientes a partir de la razón estequiométrica nitrógeno:fósforo de Redfield 16:1 está errada (para las concentraciones se usó mg L^{-1} en vez de $\mu\text{mol L}^{-1}$). Entonces, omitimos los resultados de este informe.

El proyecto PELT (2007) utilizó el barco de investigación científica BIC-PELT equipado de radar, ecosonda, GPS estacionario, radio comunicadores, sondas multiparamétricas (temperatura, profundidad, conductividad, pH, OD), espectrofotómetro UV-PAR, kits para determinación de alcalinidad y dureza, botellas tipo Van Dorn, disco de Secchi, winch eléctrico, estación meteorológica automática. Los análisis utilizaron los métodos estándares de EPA, APHA, AWWA y WEF. Se realizaron 4 campañas (28 mayo – 25 junio 2003; 20-23 agosto 2003; 25-30 octubre; 28 enero – 1 febrero 2004), muestreando 24 estaciones (profundidades hasta 210 m) en todo el Lago Titicaca (18 en el Lago Mayor y 6 en el Lago Menor). También se colectaron muestras de fito- y zooplancton.

Durante los cruceros anuales (excepto 2009) de evaluación de biomasa íctica a bordo del barco BIC IMARPE VIII, el programa IMARPE (2006-2012) también realizó mediciones limnológicas del Lago Titicaca (Fig. B3-3, Tab. B3-4). A nivel superficial, la temperatura del Lago durante este periodo osciló entre 10,9 °C (julio 2007) y 17,3 °C (diciembre 2012); el OD entre 4,21 mg L^{-1} (abril 2010) y 8,85 mg L^{-1} (diciembre 2007); la conductividad eléctrica entre 1.200 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (abril 2007) y 1.994 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (diciembre 2012); nitritos entre 0,003 (abril 2010) y 0,032 mg L^{-1} (julio 2011); nitratos entre 0,021 mg L^{-1} (diciembre 2012) y 4,00 mg L^{-1} (abril 2007); fosfatos entre 0,05 y 1,00 mg L^{-1} ; mientras que la clorofila-*a* en los cruceros de los años 2011 y 2012 se encontró entre 0,05 y 1,00 $\mu\text{g L}^{-1}$. El pH indica aguas con tendencia alcalina (7,86 – 8,99). Los resultados de las principales actividades son publicados en forma resumida en el Anuario Científico del IMARPE:

http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id_seccion=I0138130000000000000000

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

A nivel vertical, la temperatura mostró marcadas variaciones a lo largo del año (Fig. B3-4). Se observa una estratificación térmica en los meses de verano. En invierno seco (agosto), se observa el enfriamiento de la columna de agua, produciéndose una mezcla, y a partir de septiembre se inicia el calentamiento de la superficie del agua. El oxígeno disuelto disminuye conforme se incrementa la profundidad. En julio del 2011 (periodo de isotermita), se encontraron concentraciones de oxígeno entre $7,0 \text{ mg L}^{-1}$ en la superficie y $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ por debajo de los 200 m de profundidad. El pH, básico, también mostró una disminución gradual conforme aumenta la profundidad. En las prospecciones realizadas en el 2011, la variación de pH registrada entre la superficie y el fondo estuvo entre 8,81 y 7,44, respectivamente.

B3.4. ZONAS LITORALES DEL LAGO TITICACA Y TRUCHICULTURA

El Ministerio de la Producción del Perú otorgo concesiones para el cultivo intensivo de trucha en jaulas flotantes destinadas principalmente para pequeños productores (piscicultura artesanal). Ellas son mayoritariamente localizadas en la orilla del Lago Mayor, a lo largo del eje carretero Juliaca – Puno – Desaguadero, y también en el litoral norte en Huancané, Moho y Conima. Con el propósito de ampliar la actividad truchícola y evaluar su viabilidad económica y ecológica, el IMARPE realizo prospecciones para evaluar la aptitud de las características morfobatimétricas, hidrodinámicas y físico-químicas de las zonas litorales (IMARPE-FONCHIP 2008). Los estudios realizados muestran marcadas diferencias.

B3.4.1. ENSENADA CONIMA

La Tabla B3-6 muestra valores medios de los parámetros fisicoquímicos encontrados en la zona de Conima (ver Fig. B3-1) durante las prospecciones de los años 2008 (diciembre), 2009 (julio y agosto), 2010 (mayo y agosto) y 2011 (julio y agosto), donde se destacó la estabilidad de la temperatura durante los periodos de evaluación, pero con marcadas variaciones interanuales. Se observó una alta estabilidad del pH con tendencia alcalina, una columna de agua con buena oxigenación, altos valores de CO_2 , una buena reserva alcalina y aguas duras. Respecto a las trazas de metales todos los valores se encontraron por debajo de los límites establecidos por la Unión Europea para el cultivo de trucha ($\text{Cd } 4 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$, $\text{Pb } 30 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ y $\text{Cu } 100 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$) (ver mayores detalles en hidroquímica en el Capítulo A3).

B3.4.2. BAHÍA DE MOHO (LAKASANY)

Los valores medios de los parámetros fisicoquímicos del agua registrados en la Bahía de Moho (ver Fig. B3-1) se presentan en la Tabla B3-7, donde se aprecia que las mayores variaciones de temperatura se dan por cambios estacionales. El pH mostró una gran estabilidad con tendencia

alcalina. El OD registro valores por encima de los 5,0 mg L⁻¹. Los valores de CO₂ fueron altos. La masa de agua tenía una buena reserva alcalina, con rangos de dureza altos. Los niveles traza de metales pesados se encontraron por debajo de los límites establecidos por la Unión Europea para el cultivo de trucha.

B3.4.3. ESTUARIO DEL RÍO RAMIS

Durante el periodo 2009-2011 en el estuario del río Ramis (ver Fig. B3-1), el rango de variación de la temperatura mostró una tendencia relacionada con las condiciones climatológicas que se presentan en la región (Tab. B3-8). El OD en el agua reflejó una constancia en los valores medios alrededor de los 5,7 mg L⁻¹. El pH registró valores elevados con tendencia alcalina. Los valores de CO₂ se encontraron por encima de los valores considerados normales para aguas naturales (entre 4 y 8 mg L⁻¹), a excepción de marzo 2010. La alcalinidad aseguro una buena reserva de bases para evitar grandes variaciones en el pH. Los valores de dureza indicaron que las aguas eran “duras” y “muy duras”. Los valores medios de nitritos en marzo 2010 y fosfatos en mayo 2009 superaron el nivel recomendado para evitar procesos acelerados de eutrofización, mientras que la clorofila-*a* denotó un ambiente con características oligotróficas.

B3.4.4. MUELLE BARCO – CHUCUITO

La Tabla B3-9 muestra los valores mínimos, máximos y medios de los parámetros fisicoquímicos que caracterizan la zona de Chucuito (ver Fig. B3-1). Se aprecia que las mayores variaciones de la temperatura se dieron por cambios estacionales durante el año. El OD presentó valores medios constantes superiores a los 5,0 mg L⁻¹ en la mayoría de los casos. El pH alto con tendencia alcalina tuvo un valor medio cercano a 9,0. Los valores de CO₂ fueron elevados (máximos > 10 mg L⁻¹). La masa de agua tenía una buena reserva alcalina y grado de dureza entre “dura” y “muy dura”. Los nitratos, nitritos y fosfatos se encontraron dentro del rango permisible para evitar procesos de eutrofización acelerada, a excepción del fosfato que en el 2009 registró un valor más alto de 1,1 mg L⁻¹. Los valores medios de la clorofila-*a* evidenciaron la oligotrofia de la masa de agua, en mayoría ≤ 2,0 µg L⁻¹. Sin embargo, un claro incremento en el 2011 cambió las condiciones hacia un estado de eutrofia.

B3.4.5. MUELLE JULI

La Tabla B3-10 muestra los valores mínimos, máximos y medios de los parámetros fisicoquímicos que caracterizan el Muelle de Juli (ver Fig. B3-1). Al igual que las zonas anteriores, las mayores variaciones de la temperatura fueron estrechamente influenciadas por las condiciones climatológicas. El OD presentó valores medios constantes alrededor de 6,0 mg L⁻¹

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

¹ en la mayoría de los casos. El pH alto tuvo tendencia alcalina y un valor medio próximo a 9,0. Los valores de CO₂ eran elevados pero cercanos a los valores normales que se encuentran en aguas libres. La masa de agua tenía una buena reserva alcalina y grado de dureza considerada como “dura”. Los nitratos, nitritos y fosfatos se encontraron dentro del rango permisible para evitar procesos de eutrofización acelerados, a excepción del fosfato que en el 2009 registro su valor más alto (0,98 mg L⁻¹). Los valores medios de la clorofila-*a* evidenciaron la oligotrofia de la masa de agua, notándose un cambio hacia la eutrofia para el 2011.

B3.4.6. ENSENADA DE YUNGUYO

La Tabla B3-11 muestra los valores medios de los parámetros fisicoquímicos registrados en la ensenada de Yunguyo (ver Fig. B3-1), donde no se aprecian grandes fluctuaciones de temperatura en la columna de agua. El pH registró valores estables con tendencia alcalina. La columna de agua presento altos valores de oxígeno, por encima de los 5,0 mg L⁻¹. Los valores de CO₂ eran altos. La masa de agua registró una buena reserva alcalina y un grado de dureza muy alta. Los niveles traza y metales pesados se encontraron por debajo de los límites establecidos por la Unión Europea para el cultivo de trucha.

B3.4.7. BAHÍA INTERIOR DE PUNO

Esta zona del Lago Mayor (ver Fig. B3-5) registro una escasa transparencia, una gran variación de la concentración de OD encontrándose en condiciones de sobresaturación. Los valores de pH fueron elevados con tendencia alcalina que alcanzo valores medios superiores de 10, altos valores de turbidez, sales totales disueltas expresadas en los valores de conductividad y sólidos totales suspendidos. Los valores de clorofila-*a* evidenciaron un medio acuático híper-eutrófico (Tabs. B3-12,13).

B3.4.8. PENÍNSULA DE CAPACHICA

Esta zona (ver Fig. B3-1) registró altos valores de transparencia y bajos valores de turbidez. En la superficie, la temperatura del agua registró ligeras variaciones. El pH presentó valores estables con tendencia alcalina. El OD se encontró en valores recomendados para el soporte de la vida acuática (> 5,0 mg L⁻¹). Los nutrientes se encontraron en el rango óptimo para evitar procesos de eutrofización acelerados. Los valores bajos de clorofila-*a* denotaron una masa de agua en condición de oligotrofia. Sin embargo los altos valores de DBO₅ evidenciaron la perturbación del ambiente lacustre por ingreso de carga contaminante (Tab. B3-14).

B3.4.9. SÍNTESIS (OTROS PARAMETROS DE CALIDAD DE AGUA)

Los estudios realizados por IMARPE sobre calidad acuática se resumen en la Tabla B3-13. Ella muestra los valores medios de parámetros fisicoquímicos que miden el grado de contaminación en puntos seleccionados. Se observa grandes variaciones de pH, con valores mínimos en Ananea y máximos en Desaguadero y la Bahía Interior de Puno. Los sólidos totales suspendidos (SST) en Ananea, Suchez, Torococha, Bahía Interior de Puno y Yunguyo superaron los valores recomendados para la conservación del ambiente acuático, según los estándares nacionales de calidad para el agua. En todas las estaciones de muestreo los valores de aceites y grasas, sulfuros e hidrocarburos de petróleo (HATD) superaron los estipulados por los ECA (Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, aprobado por el Decreto Supremo 002-2008-MIMAN, http://www.minam.gob.pe/dmdocuments/ds_002_2008_eca_agua.pdf). La DBO₅ en las zonas de Torococha, Desaguadero y la desembocadura del río Llave registró altas concentraciones superiores al límite recomendado en los ECA. Los análisis evidenciaron que las concentraciones de metales pesados superan los valores recomendados por los ECA para la conservación del ambiente acuático: el plomo (en todos los puntos de muestreo), el arsénico (Chifron, Pomata, San Pedro de Hayllata y la desembocadura del río Suchez) y el mercurio (río Coata).

B3.5. LAGO MENOR

El Lago Menor representa 16,6 % de la superficie total del Lago Titicaca. Se diferencia del Lago Mayor por su profundidad media de 9 m y máxima de 42 m (Fosa de Chúa) (Boulangé & Aquize 1981) (Fig. B3-6).

B3.5.1. PERÍODO 1979-1980

En el ámbito del convenio entre UMSA y ORSTOM (actual IRD), Lazzaro (1980, 1981, 1985) realizó el primer estudio de la evolución estacional de la comunidad fitoplanctónica, su biomasa y producción primaria (método del ¹⁴C, incubaciones de 4 hrs. alrededor del mediodía, en varias profundidades a Chúa, 42 m, y Sukuta, 6 m). Las relacionó con las condiciones físico-químicas, en 8 estaciones representativas del Lago Menor (Fig. B3-7), entre febrero 1979 y mayo 1980, con una frecuencia de 16 días acompañando el paso del satélite Landsat 1. Lastimosamente, no se colectó zooplancton simultáneamente. Esta región del Lago fue caracterizada como polimíctica, excepto la zona más profunda de Chúa de tipo monomíctica como el Lago Mayor. Sus características eran semejantes a la de un lago tropical de baja altura, a pesar de su baja temperatura (8-14 °C). La transparencia (disco de Secchi) fue alta todo el año con hasta 7 m, y

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

coeficiente de extinción de la luz fotosintéticamente activa (K_d PAR) de 0,22-1,10 m^{-1} (quantámetro Li-COR) (Tab. B3-15). La biomasa del fitoplancton (0,4-1,2 $g\ m^{-2}$; conteos por el método Uthermöhl) estaba dominada por Clorofíceas (60-90 %), siendo las cianobacterias escasas. La riqueza específica fue baja (~ 20 especies), pero la diversidad relativamente alta (2,0-3,7 bits $cel.^{-1}$). Rara vez, las concentraciones de clorofila-*a* sobrepasaran 5 $mg\ m^{-2}$ (filtración con filtros GF/C y extracción con acetona), con mínimos $\leq 0,5\ \mu g\ L^{-1}$ en invierno seco (jul.-sep.) y máximos $\geq 2\ \mu g\ L^{-1}$ en verano en el conjunto del Lago Menor (Tab. B3-16). La biomasa promedio de carbono era 150 $mg\ C\ m^{-3}$ (calculada a partir del pH y de la alcalinidad), con un máximo en mayo (5 $g\ C\ m^{-2}$) correspondiendo con el máximo de producción primaria diaria (1,0 $g\ C\ m^{-2}\ d^{-1}$). Se consideró que los nutrientes (limitación del nitrógeno) no eran el factor limitante de la producción primaria, sino la inhibición sub-superficial de la radiación solar (RUV y PAR). El máximo de producción primaria, P_{opt} , se encontró entre 3-5 m, a veces 8 m de profundidad. La zona eufótica (profundidad recibiendo 1 % de la irradiancia PAR superficial) llegó a 17 m en Chúa. En esta zona, una producción primaria cercana de 1 $mg\ C\ m^{-3}\ h^{-1}$ era frecuente en invierno a más de 20 m de profundidad. La producción por unidad de biomasa (razón P:B) varió de 0,1-0,5 d^{-1} , con una eficiencia fotosintética débil (0,05-0,20 %). La producción primaria anual alcanzó 50 $g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$, clasificando el Lago Menor como oligotrófico, mientras Chúa era meso-eutrófico (200 $g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$), representando la transición con el Lago Mayor de tendencia más bien eutrófica (500 $g\ C\ m^{-2}\ a^{-1}$). El Lago Menor se distingue esencialmente del Lago Mayor, por su importante desarrollo de macrófitas acuáticas y de perifiton que representan la mayoría de la producción vegetal acuática.

Según Richerson *et al.* (1986), el perifiton y las macrófitas son muy importantes debido a que el Lago Menor es somero y transparente. Ambos pueden jugar un papel en el mantenimiento de bajas y relativamente constantes concentraciones de nutrientes, restringiendo así el rango de la sucesión temporal. La escasa importancia de cianobacterias fijadoras de nitrógeno en Lago Menor es desconcertante ya que las razones N:P disueltas son muy bajas, a menudo $\leq 1:1$ (molar) (ver Lazzaro 1981; Fig. B3-8, Tab. B3-17), o sea revelando una importante limitación en nitrógeno. En contraste, en el Lago Mayor, la fijación de nitrógeno puede ser demostrada a veces como limitada por el fosfato y el hierro (Wurtsbaugh *et al.* 1985).

B3.5.2. EVOLUCIÓN ENTRE 1980 Y 2011-2013

En la ocasión del Iº Simposio Internacional del Lago Titicaca (Puno, 19-21 de octubre 2011), para comparar el estado limnológico actual del Lago Menor con la situación tres décadas atrás, Lazzaro & Point (2011) realizaron en junio 2011 una campaña de caracterización limnológica y

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

biogeoquímica en las mismas 8 estaciones del estudio de Lazzaro (1981). En relación a junio 1979, las mayores diferencias encontradas (Tabs. B3-18,19) fueron: el nivel de la superficie del agua bajo de $2,0 \pm 0,4$ m (promedio \pm ES); la zona eufótica aumentó de $0,5 \pm 1,8$ m; la transparencia de Secchi aumento de $1,1 \pm 0,9$ m; la conductividad aumento a $1.643 \pm 98 \mu\text{Si cm}^{-2}$ (+ 400); el pH aumento de 8,55-8,65 a $9,6 \pm 0,06$; de $2,34 \pm 0,43 \mu\text{g L}^{-1}$; la clorofila-*a* bajó de $1,0 \pm 0,6 \mu\text{g L}^{-1}$ (-37 %; sin embargo no se puede comparar directamente el método inicial de la extracción por acetona con el actual de fluorescencia *in vivo* con una FluoroProbe bbe); la contribución de las Clorófitas a la biomasa fitoplanctónica bajó en 20-80% (pero no se puede comparar directamente las diferencias de proporciones iniciales en biovolúmenes y actuales en fluorescencia); la presencia de Cianobacterias es nueva y llega a 5-40% de la fluorescencia, lo que a pesar de representar concentraciones $< 1 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$ no deja de representar un signo de eutrofización acompañado la limitación en nitrógeno. Esto sugiere que las áreas pelágicas del Lago Menor no se hubieran eutrofizado durante las últimas tres décadas. En 1979-1980 (Lazzaro 1981), las biomásas de clorofila eran bajas ($\leq 5 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$) y dominaban Chlorophyta (60-90%). Actualmente (ver el proyecto "Titicaca sensores" abajo), las mediciones por fluorometría *in vivo* en Huatajata y Chúa muestran mayores biomásas ($10-30 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$) donde dominan Bacillariophyta (diatomeas) y Cryptophyta, lo que tienen que confirmar los conteos de microscopia (Rocha & Lazzaro, en curso). Este remplazo de Chlorophyta por Bacillariophyta refleja el cambio clásico de un estado oligotrófico a mesotrófico (Reynolds 1980).

En el Lago Menor, Repelin *et al.* (1988) realizaron el primer estudio sobre distribución y migraciones nictimerales (período de 24 hrs.) del zooplancton. La mayor abundancia de organismos fue encontrada en las zonas profundas (correspondiente a las regiones de Santa Rosa y Taraco) y la menor en la zona somera (Puerto Pérez). La época de lluvias presentó la mayor proliferación de organismos, en relación a la época seca. Las migraciones se analizaron a nivel de grupos (copépodos adultos, copepoditos y nauplii; cladóceros) y para 2 especie de rotíferos (*Keratella quadrata* y *Filinia longiseta*). Los autores observaron un descenso de las poblaciones a mediodía y una dispersión de los organismos en toda la columna durante el día.

En Huatajata (10 m), Mendoza (2004) estudió la migración vertical de los cladóceros (*Daphnia pulex*, *Ceriodaphnia* sp., *Bosmina huaronensis* y *Simocephalus vetulus*) en relación a los factores físico-químicos. Ambos presentaron migración directa o nocturna también denominada normal. Esta tendencia es más clara y definida para *Daphnia pulex*, presentando una concentración mayor en superficie durante la noche, y una dispersión en estratos intermedios durante el día.

En diciembre 2012, Point *et al.* (2013) instalaron una plataforma de sondas automáticas de

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

última generación inmersas en una zona polimíctica ≤ 5 m de profundidad frente a Huatajata en el Lago Menor. Este proyecto "Titicaca Censores" está implementado en el ámbito de una colaboración entre las unidades GET (D. Point) y BOREA (X. Lazzaro) del IRD, el IPGP (A. Groleau), y el LCA/UMSA (D. Achá). En contradicción con los resultados de Lazzaro & Point (2011), durante los 6 primeros meses, las series temporales obtenidas a 1,5 m y 4,5 m de profundidad a Huatajata, así como los perfiles verticales realizados a cada 15 días en Huatajata y Chúa (> 40 m), revelan características de condiciones mesotróficas y sugieren una mayor productividad planctónica que en el pasado. Así, los promedios (\pm SE) en concentración de clorofila obtenidos con una sonda FluoroProbe bbe (fluorescencia *in vivo*) son $4,29 \pm 0,28 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$ (min. = 0,48 y máx. = 10,94 $\mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$) en Huatajata, y $6,98 \pm 0,21 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$ (min. = 0,10 y máx. = 13,69 $\mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$) en Chúa. Estas biomásas fitoplanctónicas son en media 4-7 veces (máximo hasta > 10 veces) mayores a las de 1979-1980 ($\leq 1 \mu\text{g Cl-}a \text{ L}^{-1}$) obtenidas con el método clásico de extracción con acetona. Estas discrepancias entre los resultados de los dos estudios y el posible sesgo relacionado con la diferencia de metodología requieren proseguir hasta por los menos completar dos ciclos anuales e intercalibrar los dos métodos.

B3.6. CONTAMINACIÓN Y EUTROFIZACIÓN EN LAS BAHÍAS

El 6 de octubre del 2006, los Cancilleres del Perú y Bolivia emitieron el Memorándum Binacional por el cual dispone que la ALT efectúe un estudio y presente una propuesta para atender la contaminación de las bahías de Puno en el Perú y Cohana en Bolivia (ALT 2011).

B3.6.1. BAHÍA DE PUNO (LAGO MAYOR, PERÚ)

Hasta el fin de la década de los setenta no se había prestado mucha atención a la limnología de la Bahía de Puno, a pesar de su extensión (552 km^2). Paradójicamente, la Bahía interior de Puno (16 km^2) también carecía de estudios a pesar de sustentar una población de 90.000 habitantes que afectaban la calidad de las aguas. En la ocasión de un estudio de la FAO encargado de evaluar soluciones contra el fracaso de la pesquería de trucha arco iris en el Lago, se destacó la necesidad de estudiar y combatir la contaminación y la eutrofización revelada por la proliferación de macrófitas flotantes (*Lemna* sp.).

Como lo presentaron Northcote *et al.* (1991), esta situación incentivó a la UNA (Universidad Nacional del Altiplano en Puno) en emprender estudios sobre eutrofización (Northcote 1979, 1981). Entonces, la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI) apoyó financieramente el Westwater Research Centre de la Universidad de British Columbia (UBC), que estaba colaborando con la UNA, en montar en 1981 en la UNA (ubicada en la orilla de la

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

bahía interior) un centro de capacitación en el manejo de la calidad del agua y los recursos acuáticos. El objetivo fue dejar un centro autónomo capaz de solicitar la ayuda de organismos nacionales e internacionales. Los trabajos se concentraron en las zonas contaminadas de la Bahía de Puno por el drenaje de las aguas urbanas residuales (conteniendo basuras, etc.), debido a la casi ausencia de recolección y tratamiento. En consecuencia, más del 98% del fondo de la bahía interior de Puno es casi anóxico con niveles de oxígeno disuelto bajos, que determina la extinción de los organismos bentónicos. Así, el libro de Northcote *et al.* (1991) fue una contribución importante para fomentar la capacitación profesional, la investigación y el manejo de los recursos acuáticos en el Altiplano peruano. En base a las experiencias adquiridas, los autores (Pacoricona *et al.* 1991) sugirieron varias alternativas para suplir las deficiencias de la red de alcantarillado de la ciudad de Puno, en particular: (a) Desarrollar un programa amplio de saneamiento para la recolección y tratamiento *in situ* de los residuos de origen humano, con apoyo de organismos locales; (b) Proveer instalaciones sanitarias públicas en lugares de reunión (mercado, zonas comerciales); (c) Reparar y renovar las alcantarillas con método de bajo costo de tratamiento de aguas residuales; y (d) Combinar lagunas de aguas residuales con macrófitas acuáticas como solución alternativa barata, en base a investigaciones, evaluación de un modelo, y desarrollo de un proyecto piloto que también podrá ser adaptado a otros centros de población del Altiplano. Parte de estas recomendaciones fueron implementadas.

Más recientemente, considerando la relación costo beneficio, la ALT (2011) seleccionó varias otras medidas para la restauración: oxigenación hipolimnética en un área de 400 ha, mejoramiento de la eficiencia de la planta de tratamiento de Espinar (reducción de DBO en 31%, NT en 56% y PT en 69%), operación y mantenimiento, capacitación y sensibilización (elaboración de documental, spot publicitarios, difusión periodística, talleres participativos), cosecha mecánica de lenteja de agua (*Lemna.sp.*).

Desde la instalación de aireadores en 2007 y las campañas de cosecha de lenteja, hasta 2011 la bahía interior se había recuperado y no estaba cubierta por lentejas de agua, con los beneficios de mejorar la transparencia, el paisaje, reactivar las actividades en puerto de Puno y bahía Interior (navegación, transporte turístico, impacto visual). El mejoramiento de las características físico-químicas del agua llevó a una recuperación biológica, con aparente incremento en las poblaciones de perifiton, fito- y zooplancton, macrófitas, zoobentos y peces, lo que llevo al reinicio de las actividades de pesca artesanal. Paralelamente, se observó una sensible disminución de las macrófitas sumergidas, como las especies de *Chara*, *Elodea*, *Myriophyllum*, *Potamogetom*, *Cladophora*, *Hydrocotyle*, y las emergentes *Schoenolectus totora*. Por su parte el Municipio de Puno implementó el mejoramiento de las aguas de la pequeña laguna confinada

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

al interior del Malecón (Laguna de Kyacs), mediante la aplicación de bacterias ecoeficientes.

Sin embargo, estas medidas son paliativas. El sistema biológico natural en las orillas de la Bahía de Puno no es capaz, por sí solo, de absorber los nutrientes llevados por los efluentes urbanos, lo que podría nuevamente generar la proliferación de *Lemna*. Solo se detendrá el deterioro de la situación ambiental en la Bahía de Puno cuando se logre el tratamiento total de los efluentes urbanos.

Este progresivo deterioro de la calidad ambiental de la bahía interior de Puno, ha estado fuertemente asociado al evento de mortandad de peces suscitada en marzo de 2013. Un estudio realizado por IMARPE durante el evento, estimó una mortandad de peces de 2.3 TM y 119.440 individuos, siendo las especies carachi gris y amarillo, las más afectadas, en tallas juveniles y adultos. Los análisis demostraron una transparencia elevada para la Bahía Interior de Puno (máx. 5,4 m) en comparación con registros del año 2008 (prom. 1,21 m) y primavera del 2010 (prom. 0,97 m); la temperatura del agua elevada (18,3 y 18,9 °C); valores de pH bajos (7,71–7,89), menores a los registros de la estación fija Muelle Puno de IMARPE (MP) de los años 2011 (prom. 9,8) y 2012 (prom. 8,82), que se correlacionan con los altos valores de CO₂ encontrados (hasta 20 mg L⁻¹). El oxígeno disuelto se encontró extremadamente disminuido (0,0 –1,26 mg L⁻¹). Esta disminución de oxígeno disuelto está fuertemente relacionada con las bajas concentraciones de clorofila-*a* encontradas (1,54–5,01 µg L⁻¹, y promedio 2,53 µg L⁻¹), abundancias y diversidad de fitoplancton muy reducidas, presencia de aceites y grasas en la superficie del agua e importantes densidades de lenteja de agua. A su vez, se observó un pulso importante en las poblaciones del Cladóceros *Daphnia* sp., observándose densos grupos de color rojizo-marrón en la superficie del agua. Los nutrientes, principalmente el nitrógeno, se encontraron en altas concentraciones en sus formas de nitrógeno amoniacal y nitritos, que resultan tóxicos para peces de agua dulce.

El estudio histopatológico en ejemplares de peces colectados en estado moribundo reveló lesiones en branquias tales como: hiperplasia interlamelar, desorganización estructural de las lamelas y fusión de las mismas se encuentran asociadas a hipoxia y cambios en la temperatura del agua, lo cual coincide con los valores de oxígeno y nitrógeno amoniacal encontrados en la columna de agua. La observación de telangiectasia en branquias se encuentra asociada a las lesiones que pudiera estar provocando el parásito *Trichodina* sp. en las lamelas. Sin embargo existen otras causas que ocasionan dicha patología, como la presencia de residuos metabólicos o contaminantes químicos en el agua, comprometiéndose la función respiratoria por menoscabo de la misma.

B3.6.2. BAHÍA DE COHANA (LAGO MENOR, BOLIVIA)

Al origen, la bahía de Cohana era una zona agrícola y de ganadería, con numerosos sitios de alta importancia arqueológica (terrazas incaicas, chulpas) y turística, un activo para el desarrollo económico. Los flamencos, el carachi y el pejerrey, batracios y varias especies de aves han desaparecido de esta región. Donde hace 20 años vivían prósperas comunidades, hoy sólo quedan pequeñas casas de adobe abandonadas. La contaminación y eutrofización de la Bahía de Cohana – que alcanza las islas de Paratí, Kalahuta, Suriqui, y se extiende a las bahías de Taraco y Puerto Pérez – está documentada por un diagnóstico de LIDEMA, dos informes de proyectos, y un proyecto todavía en proceso:

El estudio ambiental de contaminación realizado por la Prefectura del Departamento de La Paz, PDLP/DRNMA/UL-E-070/03 (PSID 2004) tuvo 7 objetivos ambiciosos: (a) Indicar las fuentes de descarga de aguas residuales y de contaminación natural, (b) Elaborar una línea base ambiental, (c) Formular una zonificación de fuentes de contaminación, (d) Realizar un monitoreo de calidad de agua, (e) Proponer medidas de mitigación mediante diseño de obras, en la Bahía y los afluentes (f) Definir acciones locales para promover la conservación de la diversidad biológica de los recursos naturales, y (g) Diseñar un sistema de educación ambiental para diferentes niveles de la sociedad civil. Al final, en base a datos provenientes de estudios anteriores, se propuso que para el cumplimiento de estos objetivos, las actividades propuestas serían ejecutadas en fechas posteriores a la entrega del informe. Por lo cual se quedo solamente como una propuesta.

Ribera (2008) (<http://solaris.bvsp.org.bo/textocompleto/ma0000001a.pdf>), coordinador de investigación y monitoreo de LIDEMA, presentó recientemente una reseña histórica de los acontecimientos. Este ilustra la dejadez de la gestión ambiental en los diversos aparatos del Estado como al origen de la magnitud de la contaminación urbano industrial, por la falta de coordinación entre las diversas instancias públicas como el Ministerio de Agua, de Planificación Territorial y Medio Ambiente, el MDRAMA, la Prefectura, y la ALT, sumado a la dispersión de esfuerzos de numerosas instituciones trabajando con escasa o ninguna coordinación, multiplicándose las iniciativas aisladas e inconexas. La sensibilización es muy reciente, por la prensa (El Diario 01/02/2001), debido al cambio de color del agua a más turbia por desborde de los ríos Pallina y Katari, acompañado por una alta mortandad de peces, ranas y aves en la zona lacustre (Puerto Perez, Aygachi y Taraco), sin citar la Bahía de Cohana. Ni el “informe Freeman” (1980; Bolivia: State of Environment and Natural Resources/USAID), ni el Perfil Ambiental de

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Bolivia (1986), ni el Plan de Acción Ambiental de Bolivia (1992), tampoco el IIQ/UMSA, el PELT o LIDEMA (Quiroz 1992) mencionaron específicamente este problema. El primer análisis que identificó los agentes de impacto fue el estudio de J. Quintanilla (IIQ/UMSA) en Aguirre *et al.* (2001) haciendo referencia a la contaminación bacteriológica proveniente de Puno, El Alto y Viacha, debido a los desechos domésticos (basura y aguas servidas) y defectos en las redes de alcantarillado, por falta de planificación e implementación de un programa de saneamiento ambiental y el incumplimiento de la reglamentación, sobre el vertido de desechos líquidos y sólidos en los cuerpos de agua. El primer estudio específico fue la tesis de Chiqui (2001) cuyos resultados resaltan el pH alcalino (8-9,6), los DBO y DQO superando muchas veces el límite permitido según las normas de la Ley del Medio Ambiente, las altas concentraciones de amoníaco, fósforo, coliformes totales y fecales, pero la baja concentración de metales pesados (arsénico, cromo, cadmio), aunque no menciona la contaminación metalúrgica y minera de la zona de Viacha.

En 2004, la Propuesta estratégica del Plan Maestro de Biodiversidad del Sistema TDPS (Ribera 2005) de la ALT incorporaba como acción estratégica prioritaria la reducción de los niveles de contaminación doméstica e industrial en el Lago Titicaca, priorizando específicamente la Bahía de Cohana. El 5 de agosto 2004, se declaró las cuencas de los ríos Quelcata, Tujsahuirá, Pallina y Katari, como Zona de Desastre Ambiental y de Emergencia Hídrica, situación que paso desapercibida. En marzo 2006, se desencadenó el conflicto social por la movilización en El Alto de los pescadores del Lago Menor, exigiendo al gobierno dar solución al tema de la contaminación en Cohana. El movimiento social culminó con la salida en enero 2007 de la empresa "Aguas del Illimani" por incumplimiento de varios puntos de su contrato, como la remoción de fósforo, nitrógeno total y nitrógeno amoniacal por parte de la planta de tratamiento de aguas de Puchukollo. Por adelante, el control de emisiones de El Alto quedo bajo responsabilidad del Estado. Hasta el presente, el problema de la Bahía de Cohana carece de un tratamiento oficial, responsable, y no existen todavía proyecciones hacia una solución estructural en el corto plazo. Sólo se han dado respuestas paliativas y momentáneas, como la limpieza de la lenteja de agua (*Lemna gibba*) por la gente ribereña, y con apoyo de una pala mecánica de la ALT, siguiendo el modelo implementado en la Bahía de Puno.

El proyecto PROLAGO–USAID (2010-2013), ya finalizado, tuvo como objetivo práctico el manejar la contaminación en el eje hidrográfico El Alto – Lago Titicaca, en tres etapas: (a) limpiar el río Pallina en Viacha sensibilizando a los comunarios, (b) elaborar abono y biogas con desechos orgánicos, y (c) eliminar los altos niveles de contaminación al ingreso a la Bahía. También, se realizaron 7 campañas de muestreo de parámetros limnológicos (OD, Temp., pH,

DBO, DQO, Fosfato total, Nitrógeno total, bacterias, coliformes, Cromo, Clorofila) en 8 estaciones de la Bahía de Cohana. Lastimosamente, estos datos no son confiables por los protocolos empleados.

El proyecto IDH 2013-2014 “Enfoque socio-ambiental de la eutrofización, los causantes y los potenciales de biorremediación en el continuo entre el Lago Titicaca y la Ciudad de El Alto” (Achá *et al.* 2013) implica investigadores de la UMSA (UCA, UL, IIGEO, IFB) y del IRD. En la Bahía de Cohana, tiene como objetivos: (a) Estimar la magnitud de las áreas en proceso o riesgo de ser eutrofizadas, (b) Identificar marcadores de eutrofización y enriquecimiento orgánico (por ej., fraccionamiento isotópico de nitrógeno, estructura de comunidad fitoplanctónica y concentración relativa de clorofila-*a* entre grupos funcionales) que permitan detectar la eutrofización en estado incipiente y/o permitan identificar enriquecimiento orgánico antes de que el ambiente se torne eutrófico, (c) Evaluar la actividad microbiana para estudiar alternativas de bioremedicación en los afluentes más contaminados, y (d) Divulgar los resultados para las alcaldías de El Alto, Viacha, la ALT, y las comunidades pesqueras de la zona. Se toma muestras a lo largo de transectos partiendo de una zona con eutrofización verificada y se va alejando hasta llegar a una zona oligotrófica (Fig. B3-9). Se realizará la tercera campaña en septiembre 2013.

B3.6.3. BAHÍA DE COPACABANA

Aunque la calidad de agua litoral se ve bastante impactada por los vertidos de aguas residuales de la ciudad, no hemos podido encontrar información técnico-científica sobre la evolución y el estado actual de la contaminación en la Bahía de Copacabana.

B3.7. FOTOBIOLOGIA: EFECTOS DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN EL PLANCTON

La radiación ultravioleta (RUV) genera un impacto negativo en el plancton (Villafañe & Helbling 2003). Su incidencia en la superficie terrestre depende de la latitud y la altitud, así como de la nubosidad y del albedo (Zaratti 2003). También redefinen su incidencia las concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD) (Sommaruga 2001, Rautio & Korhola 2002, Aguilera & Coronel 2009, Aguilera *et al.* 2013) y de clorofila (Laurion *et al.* 2000), así como de materia particulada (Bracchini *et al.* 2005), como además la mezcla vertical de la columna de agua (Ferrero *et al.* 2006, Villafañe *et al.* 2007, Helbling *et al.* 2013).

La exposición a la RUV (ver síntesis en Sommaruga 2001) produce una inhibición fotosintética

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

del fitoplancton (Villafañe *et al.* 1999, Helbling *et al.* 2001b), la alteración del DNA del zooplancton (MacFadyen *et al.* 2004) y la modificación de la estructura de las comunidades (Cabrera *et al.* 1997, Marinone *et al.* 2006). Los organismos tienen mecanismos de defensa para evitar, tolerar o reparar el daño causado. Ellos usan compuestos fotoprotectores (CPPs: e.g., carotenoides, aminoácidos tipo micosporinas (MAAs) y melanina; Helbling *et al.* 2002, Laurion *et al.* 2002, Rautio & Korhola 2002, Tartarotti *et al.* 2004, Tartarotti & Sommaruga 2006, Sommaruga 2010), exhiben migración vertical (Ritcher *et al.* 2007, Hylander & Hansson 2010) y horizontal (Zengling *et al.* 2010, 2013), así como realizan reparación enzimática del DNA (Sinha & Hadër 2002, MacFadyen *et al.* 2004).

A pesar de la intensa radiación solar (UV y PAR) en el Lago Titicaca, y de la necesidad de prever la evolución de la calidad de agua y recursos acuáticos frente al cambio global, se realizaron muy pocos estudios sobre sus efectos en el plancton y el funcionamiento trófico.

B3.7.1. PERÍODO 1997-1999

En una serie de estudios realizados en 1997-1999, en la zona de la Fosa de Chúa, Villafañe *et al.* (1999, 2003) y Helbling *et al.* (2001a,b, 2002) demostraron que, en la zona eufótica, las radiaciones UV-A (315-400 nm) y UV-B (280-315 nm) inhibían significativamente la fotosíntesis del fitoplancton en 60 % y 20%, respectivamente, con una pérdida de carbono del 14% y 3,4%. Tomando en cuenta la alta radiación recibida, la molécula de ADN fue poco dañada. El zooplancton (sobre todo el copépodo *Boeckella titicacae*) se reveló resistente a la RUV (en términos de mortalidad), siendo capaz de acumular pigmentos fotoprotectores. Esta alta resistencia de los organismos (comparado con aquella de regiones templadas y polares) no sorprende visto los altos niveles de RUV en el Lago Titicaca.

B3.7.2. PERÍODO 2013

En la región de Chúa, entre diciembre de 2012 y febrero de 2013 (estación lluviosa), Lazzaro (2013; ver una síntesis en Villafañe *et al.* 2013) realizó perfiles verticales de atenuación espectral de RUV-B (305 y 313 nm), RUV-A (entre 320 y 395 nm) y PAR (400-700 nm). Se observaron grandes diferencias en la transparencia respecto a los estudios anteriores (Tab. B3-20). Los valores actuales de Z1% (profundidad a la cual llega 1% de la radiación superficial) para UV-B, UV-A y PAR, son 3, 6 y 12 m, respectivamente, mientras que en septiembre 1997 (fin de la época seca) eran 6, 12 y 21 m, respectivamente. Esto sugiere que los procesos de eutrofización ya están en marcha, por lo menos en este área del Lago Menor, aunque aparentemente sea poco afectada por la presión antropogénica.

B3.7.3. PERSPECTIVAS FUTURAS CON EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA PRESIÓN ANTROPOGÉNICA

En un contexto de cambio global, se prevén cambios físicos y químicos significativos en los ambientes lacustres. Se considera que las mayores temperaturas aumentarán la estratificación del epilimnión, así las células estarán expuestas a mayores niveles de radiación. Paralelamente, con la intensificación del uso de las tierras, la variación en la intensidad de las precipitaciones y los vientos etc., se incrementará a nivel global el aporte de materia orgánica disuelta (DOM) a los cuerpos de agua. Esto provocará una menor penetración de la radiación solar. Combinado con cambios en los patrones de vientos, resultará en un nuevo equilibrio y una mezcla vertical en la capa superficial. Entonces, el fitoplancton será expuesto no sólo a un campo lumínico distinto, sino también a una condición distinta de nutrientes (Villafañe *et al.* 2013). En consecuencia, se necesita estudiar la magnitud de ambos cambios para prever sus consecuencias sobre el funcionamiento ecológico del Lago.

B3.8. RECOMENDACIONES

B3.8.1. VACÍOS DE INFORMACIÓN Y SESGOS

La presente síntesis permite identificar una serie de vacíos de información y de sesgos:

- Aunque esté demostrado que la variabilidad interanual sea de mayor magnitud a la variación estacional en este ecosistema tropical de alta montaña, no existen estudios históricos de referencia con monitoreo durante varios años consecutivos a la escala del Lago Titicaca entero. Entonces, **no es posible evaluar la amplitud de los cambios en las características limnológicas** más importantes, en relación a la actualidad. También faltan comparaciones entre áreas eutrofizadas y áreas poco impactadas a lo largo de las décadas para poder evaluar la contribución relativa de los efectos de los cambios climáticos (calentamiento global) y antrópicos.
- En vista de las **discrepancias en los resultados entre varios estudios caracterizando el estado trófico** del Lago (entre oligotrófico y hiper-eutrófico), sería esencial diferenciar entre zonas litorales y pelágicas, someras y profundas, con y sin macrófitas (flotantes, sumergidas y/o emergentes), con y sin fuentes de contaminación puntuales o difusas. O sea, es indispensable interpretar los resultados en función de una tipología morfo-edáfica que, todavía, precisa implementar a la escala del Lago entero. Sería crucial acordarse en una(s) medida(s) estándar(es) de estado trófico ampliamente utilizadas, basadas en la profundidad de Secchi (o el coeficiente Kd de atenuación de la radiación solar PAR), las concentraciones de nitrógeno total, fósforo total, sólidos en suspensión, clorofila-*a*, y la abundancia de macrófitas sumergidas

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

(que son fuertemente correlacionados con las diferentes clases de estado trófico) – como por ejemplo, la clasificación de OECD (1982) adaptada para lagos tropicales (tomando en cuenta su frecuente limitación en nitrógeno y mayores niveles de productividad), discutida en Ryding & Rast (1989).

- Los **métodos y protocolos son frecuentemente incompatibles** entre estudios y las instituciones no colaboran para estandarizarlos y juntar esfuerzos, permitiendo lograr conclusiones confiables y de mayor porte. En particular, para eliminar los sesgos que resultan de diferencias entre protocolos analíticos (e.g., Cl-a: extracción con acetona u otros solventes vs. fluorescencia; DO: método de Winkler vs. captores de tipo Clark o optodos; RUV: radiómetros de banda ancha vs. captores espectrales; producción primaria del fitoplancton: incubaciones con ¹⁴C, método al oxígeno con Winkler vs. micro-optodos).

- **No se tienen mediciones actuales de producción primaria del fitoplancton** para poder comparar con las condiciones 3 décadas atrás, y estimar la contribución relativa de los cambios climáticos y antropogénicos, comparando áreas poco y muy impactadas por actividades humanas.

- **No se tienen estudios recientes para evaluar el nivel de limitación de nutrientes** (nitrógeno, fósforo, o co-limitación), en función del nivel de eutrofización, para poder detectar posibles condiciones favorables al desarrollo indeseable de cianobacterias y poder controlarlo.

- No se conoce **en qué medida la atenuación de la radiación solar (RUV y PAR) ha cambiado** durante las últimas décadas, para poder estimar las evoluciones futuras posibles en función de la presión antropogénica (por ejemplo, las Bahías de Cohana, Copacabana y Puno), con una eventual sinergia del calentamiento global.

- Existe una serie de sustancias contaminantes (de origen minero, industrial y urbano) que vienen ingresando al Lago Titicaca en concentraciones indeseables para la salud del ecosistema, principalmente en la bahía interior de Puno y la bahía de Cohana. **No se conoce el efecto de mezcla de estos contaminantes** en las aguas del Titicaca y sus consecuencias sobre la biota acuática, la red trófica, el funcionamiento del propio ecosistema y la salud humana (ver los Capítulos C2 y C3 sobre contaminación por metales pesados) .

- La información actual sobre el conocimiento del Lago Titicaca y particularmente de su zona litoral, resulta ser escasa aún para realizar una **zonificación ecológica del Lago**. La misma que debería basarse principalmente en el funcionamiento del ecosistema, características morfobatimétricas, usos tradicionales, riesgos ambientales por ingresos de efluentes urbanos e industriales. Esto permitirá hacer un uso adecuado y sostenible de este ecosistema, asegurando

de esta forma su conservación y los servicios ambientales que provee.

B3.8.2. PROPUESTAS PRIORITARIAS

En función de estos conocimientos dispersos y de los vacíos de información se puede proponer:

- **Remplazar la “cultura del informe” por la “cultura de la publicación en revista científica nacional o (mejor) internacional”** que garantiza la calidad y confiabilidad de los resultados, así como de las conclusiones, y que garantiza una amplia difusión de los conocimientos a la comunidad internacional. De hecho, la mayoría de las informaciones sobre el Lago Titicaca están publicadas en informes técnico-científicos, que además están desprovistos de un comité científico editorial que debería estar constituido por especialistas nacionales e internacionales, independientes de los autores y editores.
- **Analizar la estacionalidad vs. la variación interanual**, la magnitud de la estratificación. Compararla con la estacionalidad de los lagos templados, para los cuales las series temporales detalladas también son escasas.
- **Monitorear a largo plazo algunas estaciones representativas** en el Lago Mayor y en el Lago Menor que hayan sido estudiadas desde el mayor tiempo posible (ver los mapas de las figuras 1-5).
- **Realizar estudios experimentales sobre los impactos del calentamiento global y de la eutrofización**, sobre la dinámica y diversidad funcional de las comunidades planctónicas tomando en cuenta los efectos fotobiológicos de las radiaciones UV y PAR y las respuestas adaptativas de los organismos.
- **Implementar algunas plataformas *in situ* de sondas inmersas multiparamétricas automáticas operando en continuo en alta frecuencia de adquisición** (de algunos min. a decenas de min.; basándose en el modelo del proyecto “Titicaca Censores” o usando boyas equipadas de perfiladores) en algunas zonas representativas críticas (someras vs. profundas, poco impactadas vs. eutrofizadas y/o contaminadas) a fin de detectar y predecir posibles cambios indeseables y eventualmente mitigarlos.
- **Realizar estudios sobre los efectos ecotoxicológicos de los efluentes que ingresan a la bahía interior de Puno y bahía de Cohana**, tanto en el plancton como en peces; considerando el efecto de mezcla de los contaminantes, su transformación en formas orgánicas por las bacterias (en particular, el metilmercurio), su transferencia y a veces biomagnificación en la red trófica (ver el Capítulo C3), así como sus consecuencias en la salud humana.

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- **Realizar la zonificación ecológica del Lago Titicaca**, para mapear las áreas de usos ecosistémicos adecuados, con el concurso de instituciones tanto de Perú y Bolivia. Por ejemplo, actualizar los mapas litorales batimétricos, de zonación de sedimentos, de macrófitas acuáticas, de distribución espacial de piscifactorías en aulas flotantes, de fuentes contaminación y de zonas ribereñas de actividades agropastorales, turísticas, etc. La información generada debe servir de base para la implementación de instrumentos de gestión para el desarrollo de actividades económicas que se desarrollan en el Lago Titicaca, como el turismo y la acuicultura.
- **Reactivar las campañas plurianuales multidisciplinares** (por lo menos dos veces al año) a la escala del Lago Titicaca entero (binacional, en el modelo de las campañas del PELT y del IMARPE), con la participación de especialistas del IRD y de la UMSA, entre otras instituciones científicas. O sea juntar esfuerzos, equipos y experiencias. Combinar estudios ecológicos, limnológicos y biogeoquímicos (e.g., contaminación por metales pesados, en particular el ciclo trófico del mercurio y metil-mercurio), a los cruceros de biomasa íctica.
- Implementar estas plataformas y las campañas en el **ámbito del Observatorio Ambiental Binacional del Lago Titicaca**, coordinado por la ALT, propuesto durante el II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS (Puno en 2013) y aprobado unánimemente por las instituciones participantes.
- También en el ámbito del Observatorio Ambiental Binacional del Lago Titicaca, **centralizar en el Centro de Documentación de la ALT en La Paz la literatura técnico-científica** (informes, libros, y publicaciones en revistas nacionales e internacionales, en formato papel y pdf) producida históricamente hasta lo actual por cada institución y equipo de investigadores. Centralizar en una base de datos (a) la información básica de las instituciones, (b) de sus técnicos y investigadores, así como de manera referenciada geográficamente (c) los programas de colectas, campañas, monitoreos (realizados, en curso, y futuros), y (d) los datos multiparamétricos geo-referenciados generados. Facilitar esta información diferencialmente a los profesionales, los gestores, los políticos y al público en general mediante un **portal de Internet**. Para mayor divulgación y por seguridad, implementar espejos de este portal en otras instituciones, como la UMSA y el IRD en Bolivia, y la UNA y el IMARPE en Perú. Promover la publicación de los resultados científicos de proyectos y programas (e) de preferencia en artículos de revistas nacionales e internacionales para una mayor divulgación de calidad a la comunidad científica, y (f) en segundo lugar, a través de informes técnico-científicos evaluados por un comité binacional y/o internacional de especialistas, destinados principalmente a la toma de decisión.

- **Constituir una base de datos geo-referenciados del Lago Titicaca** podría servir para elaborar un **índice de estado trófico específico para los lagos tropicales de altura** (actualmente inexistente), así como un **mapa dinámico de evolución espacio-temporal del estado trófico**. De hecho, (a) los límites entre estados oligo-, meso-, y eutróficos no corresponden entre lagos templados y tropicales de baja altura; en el Lago Titicaca (b) el papel de la inhibición fotosintética es más importante que de la limitación por los nutrientes, (c) la transparencia es siempre mayor a la prevista por el estado trófico correspondiente (proveniente de índices elaborados a partir de ecosistemas de baja altura), y (d) por la intensa radiación solar debido a la altura y la ubicación tropical, las macrófitas sumergidas juegan un papel importante todo el año (competición con el fitoplancton para la luz y los nutrientes) en las zonas someras, pero su abundancia no se toma en cuenta en el cálculo del estado trófico.

Según el índice de estado trófico abierto de la OECD (1982) para lagos templados de baja altura, los rangos de valores para el estado oligotrófico vs. el estado mesotrófico son los siguientes: fósforo total (PT) 3,0-17,7 $\mu\text{g L}^{-1}$ vs. 10,9-95,6 $\mu\text{g L}^{-1}$; nitrógeno total (NT) 307-1.630 $\mu\text{g L}^{-1}$ vs. 361-1.387 $\mu\text{g L}^{-1}$; clorofila-*a* 0,3-4,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ (con valor pico de 1,3-10,6 $\mu\text{g/L}$) vs. 3-11 $\mu\text{g L}^{-1}$; transparencia de Secchi 5,4-28,3 m vs. 1,5-8,1 m. Así, el Lago Menor tendría un estado mesotrófico por su concentración en clorofila-*a*, pero un estado oligotrófico por sus concentraciones en nutrientes y su transparencia de Secchi. Según esta misma clasificación, los rangos de transición entre el estado mesotrófico y eutrófico en un lago tropical vs. templado de baja altura son los siguientes: fósforo total 50-60 $\mu\text{g L}^{-1}$ vs. 30 $\mu\text{g L}^{-1}$; nitrógeno total 20-100 $\mu\text{g L}^{-1}$ vs. 50-100 $\mu\text{g L}^{-1}$; clorofila-*a* 10-15 $\mu\text{g L}^{-1}$ vs. 10-15 $\mu\text{g L}^{-1}$; media de producción primaria del fitoplancton 2-3 $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ vs. 1 $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Entonces, el Lago Menor se encontraría entre los estados meso- y eutróficos para la clorofila-*a*, con un nivel de producción primaria de lago templado mesotrófico. Claramente, se necesita una clasificación específica para lagos tropicales de gran altura, como el caso del Lago Titicaca. Adicionalmente, se necesitaría redefinir los rangos de parámetros adecuados a las diferentes clases de uso (por ej., agua propia al consumo humano, el consumo animal, la irrigación, las actividades de recreación, etc.)

- Programar las campañas de los barcos del PELT y del IMARPE, y también, por mayor eficiencia y seguridad, de otro barco adecuadamente equipado para **realizar cruceros científicos conjuntos**, combinando especialistas y equipos. Sería **fundamental procurar una financiación para construir o recuperar un barco científico de tipo oceanográfico**, bien equipado, seguro para las condiciones del Lago Mayor, de mayor porte (eslora > 15 m, con capacidad para 8-10 personas) y rápido para poder realizar en Perú y Bolivia trabajos más finos con mayor comodidad y seguridad. Para los estudios en el Lago Menor, se puede notar que la UMSA no

dispone más de un barco propio en estado de funcionamiento.

- Desde el punto de vista práctico, se necesita **urgentemente controlar la polución, contaminación y eutrofización de varias zonas litorales** del Lago Titicaca impactadas por las actividades humanas, principalmente los ríos contaminados por las actividades mineras, como el río Suchez, y las Bahías de Puno (en proceso de recuperación), de Copacabana, y sobre todo la bahía de Cohana víctima de contaminación múltipla. Para restaurar la Bahía de Cohana y evitar una mayor contaminación del Lago Menor particularmente vulnerable por ser somero, se necesita limitar el crecimiento descontrolado de la ciudad de El Alto (1,2 millones de habitantes) hacia las orillas del Lago, controlar las fuentes contaminantes en la cuenca del río Katari que desemboca en la bahía de Cohana, ampliar la capacidad o duplicar la planta de tratamiento de aguas de Puchukollo (EPSAS) para retener más eficientemente los desechos sólidos, tóxicos, residuos industriales, patológicos (vertidos de hospitales) provenientes de El Alto, Viacha y Laja, y las colas de minas (Milluni), y/o implementar nuevas plantas de tratamiento de menor porte a lo largo del eje de contaminación Pallina-Katari-Cohana, en poblaciones como Viacha, Laja, Pucarani, Batallas y Puerto Pérez. Como complemento y para controlar mejor la eutrofización, se podría implementar unas plantas de tratamiento de tipo ecológico (por ej., humedales a base de macrófitas), de bajo costo, eficientes para procesar el exceso de materia orgánica y nutrientes, así como retener (bioacumular) contaminantes.

B3.9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Achá D., Point D. & Lazzaro X. 2013, Enfoque socio-ambiental de la eutrofización, los causantes y los potenciales de biorremediación en el continuo entre el Lago Titicaca y la Ciudad de El Alto, Programa IDH, Coord. D. Achá (LCA/UMSA).
- Agassiz A. 1876a. Hydrographic sketch of Lake Titicaca. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, 11 (May, 1875 - May, 1876), 283-292.
- Agassiz A. 1876b. Explorations of Lake Titicaca. Bulletin of the Museum of Comparative Zoology (Cambridge), 3, 279–286.
- Agassiz A. & Garman S.W. 1876. Hydrographic sketch of Lake Titicaca. Cambridge, Mass. The Museum, 292 p.
- Aguilera X. & Coronel J. 2009. Radiación ultravioleta en lagunas altoandinas de Bolivia: atenuación por COD y su efecto sobre los organismos acuáticos. Rev. Bol. Ecol. y Cons. Amb., 26, 01-08.
- Aguilera X., Lazzaro X. & Coronel J.S. 2013. Tropical high-altitude Andean lakes located above

- the tree line attenuate UV-A radiation more strongly than typical temperate alpine lakes. Photochemical & Photobiological Sciences, DOI: 10.1039/c3pp25285j
- Aguirre B.C., Miranda C.L. & Verhasself Y. (eds.) 2001. Contribución Al conocimiento del Sistema del Lago Titicaca. KNOW ARSOM, ANCA, ICIB, BID, EMB.BELG. La Paz, Bolivia. 449 p.
- ALT, 2011. Resultados de la implementación de la cosecha mecánica de *Lemna* y aireación de las aguas de la bahía de Puno. ALT, Informe técnico, 13 p.
- ALT, IRD, UMSA, 2013. II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS ...una responsabilidad compartida. Escuela de Post Grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 7-9 de Marzo 2013, www.simposiotiticaca.org y www.bolivia.ird.fr/toda-la-actualidad/coloquios/ii-simposio-internacional-del-lago-titicaca-tdps
- Andrade M. 2008. Mitos y verdades acerca del cambio climático en Bolivia. Revista Boliviana de Física 14, 42–49.
- APHA (American Public Health Association) 1971. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 13th edition, American Public Health Association, 1015 Fifteenth Street N.W., Washington, D.C. 20005.
- Argollo J. & Mourguiart P. 2000. Late Quaternary climate history of the Bolivian Altiplano. Quaternary International, 72, 37-51.
- Baker P.A., Seltzer G.O., Fritz S.C., Dunbar R.B., Grove M.J., Tapia P.M., Cross S.L., Rowe H.D. & Broda J.P. 2001. The history of South American tropical precipitation for the past 25,000 years. Science, 291, 640-643.
- Banco Mundial, 2007. Vías para alcanzar el desarrollo sostenible del Lago Titicaca. Departamento de Desarrollo Sostenible del Banco Mundial, Unidad de Gerencia de País para Bolivia, Ecuador, Perú y Venezuela. Región de Latinoamérica y del Caribe.
- Beauchamp P. De, 1939. Rotifers and Turbellaries. En: Report Nº5 of the Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca, Gilson H. (Ed.). Trans Linn. Soc., London, Ser. 3, 51-79.
- Binford M.W., Kolata A.L., Brenner M., Janusek J.W., Seddon M.T., Abbott M. & Curtis J.H. 1997. Climate Variation and the Rise and Fall of an Andean Civilization. Quaternary Research 47, 235-248.
- Boulangé B. & Aquize E. 1981. Morphologie, hydrographie et climatologie du Lac Titicaca et de son bassin versant. Rev. Hydrobiol. Trop., 14(4), 269-287.
- Bracchini L., Cózar A., Dattilo A.M., Picchi M.P., Arena C., Mazzuoli S. & Loïselle S.A. 2005. Modelling the components of the vertical attenuation of ultraviolet radiation in a wetland lake ecosystem. Ecological Modelling, 186, 43–54.
- Brylinsky M. & Mann K.H. 1973. Analysis of factors governing productivity in lakes and reservoirs. Limnol. & Oceanogr., 18(1), 1-14.
- Bush M.B., Hanselman J.A. & Gosling W.D. Nonlinear climate change and Andean feedbacks: an imminent turning point? Global Change Biology 16, 3223–3232, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02203.x
- Cabrera S., Lopez M. & Tartarotti B. 1997. Phytoplankton and zooplankton response to ultraviolet radiation in a high-altitude Andean lake: short- versus long-term effects. Journal of Plankton Research, 19, 1565-1582.
- Carney H.J. 1985. Productivity, population growth, and physiological responses to nutrient enrichments by phytoplankton of Lake Titicaca, Peru-Bolivia, Ver. int. Ver. Limnol., 22, 1253-1257.
- Chiqui F.R.F. 2001. Evaluación del río Pallina, en relación a su calidad de aguas en la zona urbana de Viacha. Tesis de Postgrado, UMSA-IE, 109 p.

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- Contreras D.A. 2010. Landscape and Environment: Insights from the Prehispanic Central Andes. *J. Archaeol. Res.*, 18, 241–288.
- Dejoux C. & Iltis A. 1992. *Lake Titicaca – A Synthesis of Limnological Knowledge*. Kluwer Academic Publishers, 573 p.
- D'orbigny, A. 1837. *Voyages dans l'Amerique Méridionale en 1824-1833*. Pitois-Levrault et Cie., Paris, France. *Partie du Lac Titicaca et du Grand Plateau des Andes (Bolivie et Pérou)*. Publié dans *Royal Geogr. Soc.*, London, 1837.
- Ferrero E., Eöry M., Ferreyra G., Schloss I., Zagarese H., Vernet M. & Momo F. 2006. Vertical mixing and ecological effects of ultraviolet radiation in planktonic communities. *Photochemistry and Photobiology*, 82, 898–902.
- Gilson H.C. 1939. Description of the expedition. Report N° 1. The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937, *Trans. Linn. Soc. London, Ser. 3, 1 (1)*, 1-20.
- Gilson H.C. 1939-1940-1955. The Percy Sladen Expedition to Lake Titicaca, *Trans. Linn. Soc. London, 1*, 357 p.
- Haney J.F. & Trout M.A. 1985. Size selective grazing by zooplankton in Lake Titicaca. *Arch. Hydrobiol. Beith.*, 21, 147-160.
- Harding J.P. 1955a. Crustacea: Copepoda. Report N°15 of the Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn. Soc. London, Ser. 3, 1(3)*, 219-247.
- Harding J.P. 1955b. Crustacea: Cladocera. Report N°19 of the Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn. Soc. London, Ser. 3, 1(3)*, 329-354.
- Helbling E.W., Carrillo P., Medina-Sánchez J.M., Durán C., Herrera G., Villar-Argaiz M. & Villafañe V.E. 2013. Interactive effects of vertical mixing, nutrients and ultraviolet radiation: in situ photosynthetic responses of phytoplankton from high mountain lakes in Southern Europe.
- Helbling E.W., Villafañe V.E. & Barbieri E. 2001a. Sensitivity of winter phytoplankton communities from Andean lakes to artificial ultraviolet-B radiation, *Revista Chilena de Historia Natural*, 74:, 273-282.
- Helbling E.W., Villafañe, V.E., Buma, A.G.J., Andrade & M., Zaratti, F. 2001b. DNA damage and photosynthetic inhibition induced by solar ultraviolet radiation in tropical phytoplankton (Lake Titicaca, Bolivia), *Eur. J. Phycol.*, 36, 157-166.
- Helbling E.W., Zaratti F., Sala L.O., Palenque E.R., Menchi C.F. & Villafañe V.E. 2002. Mycosporine-like amino acids protect the copepod *Boeckella titicacae* (Harding) against high levels of solar UVR, *Journal of Plankton Research*, 24, 225-234.
- Herzog S.K., Martínez R., Jørgensen P.M. & Tiessen H. (eds.) 2011. *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 348 pp., ISBN: 978-85-99875-05-6
- Hutchinson G.E. & Löffler H. 1956. The thermal stratification of lakes. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 42, 84-86.
- Hylander S. & Hansson L.-A. 2010. Vertical migration mitigates UV effect on zooplankton community composition. *Journal of Plankton Research*, 32, 971-980.
- Iltis A. 1984. Algues du lac Titicaca et des lacs de la vallée d'Hichu Kkota (Bolivie). *Cryptogamie, Algologie*, 5 (2-3), 85-108.
- IMARPE-FONCHIP 2008. *Prospección exploratoria de zonas litorales del Lago Titicaca para estimación de su potencial de producción por cultivo truchicola - Diciembre 2008*, 30 p.
- Kittel T. & Richerson P.J. 1978. The heat budget of a large tropical lake, Lake Titicaca (Peru-

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- Bolivia), Verh. internat. Verein. Limnol., 20, 1203-1209.
- Laurion I., Ventura M., Catalan J., Psenner R. & Sommaruga R. 2000. Attenuation of ultraviolet radiation in mountain lakes: Factors controlling the among- and within-lake variability. *Limnol. Oceanogr.*, 45, 1274–1288.
- Laurion I., Lami A. & Sommaruga R. 2002. Distribution of mycosporine-like amino acids and photoprotective carotenoids among freshwater phytoplankton assemblages. *Aquat. Microb. Ecol.*, 26, 283–294.
- Lazzaro X. 1980. Etude du phytoplancton de la station de Chua (Lago Pequeño): physicochimie, production primaire, peuplements, ORSTOM, 50 p.
- Lazzaro X. 1981. Biomasses, peuplements phytoplanctoniques et production primaire du Lac Titicaca, *Revue d'Hydrobiologie tropicale*, 14, 349-380.
- Lazzaro X. 1985. Poblaciones, biomasa y producciones fitoplanctónicas del Lago Titicaca, *Ecología en Bolivia NP 7*, octubre 1985, 23-63.
- Lazzaro X. & Point D. 2011. Evolución del estado limnológico del Lago Titicaca comparando variables claves del Lago Menor en 1979 y 2011. En I^o Simposio Internacional del Lago Titicaca: Desafíos para una gestión basada en el ecosistema, Organizado y auspiciado por el Ministerio de la Producción de Perú (PRODUCE) y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), 19-21 de octubre 2011, Puno, Perú.
- Leblond R. 1982. Quelques aspects de l'alimentation et de la sélection des proles chez *Orestias ispi* Lauzanne (Pisces, Cyprinodontidae) du Lac Titicaca. ORSTOM, La Paz, 29 p. Mulitgr.
- Lewis W.M.J. 1978. Analysis of succession in a tropical phytoplankton community and a new measure of succession rate, *Am. Nat.*, 112, 401-414.
- Lieberman M. & Miranda C. 1986. Variación estacional del fitoplancton en el Lago Titicaca. En: Descripción del Lago Titicaca y su cuenca, 2^a Publicación del Proyecto "Evaluación de los Recursos Pesqueros del Lago Titicaca", Convenio de Asistencia Técnica CAF/IMARPE/UMSA, OLDEPESCA, Lima, Perú.
- Lieberman M. & Miranda C. 1987. Contribución al conocimiento del fitoplancton del Lago Titicaca. En: Proyecto "Evaluación de los Recursos Pesqueros del Lago Titicaca", Convenio de Asistencia Técnica CAF/IMARPE/UMSA, OLDEPESCA, Lima, Perú, 82 p.
- Loubens G. 1989. Observations sur les poissons de la partie bolivienne du Lac Titicaca. 3. *Basilichthys bonariensis* (Valencienne, 1835) (Pisces, Atherinidae). *Rev. Hydrobiol. Trop.* 21(2), 153-177.
- MacFadyen E.J., Williamson C.E., Grad G., Lowery M., Jeffrey W.H. & Mitchel D.L. 2004. Molecular response to climate change: temperature dependence of UV-induced DNA damage and repair in the freshwater crustacean *Daphnia pulex*. *Global Change Biology*, 10, 408–416.
- Marinone Ma. C., Menu Marque S., Añón Suárez D., Diéguez Ma. C., Pérez P., De Los Ríos P., Soto D. & Zagarese H.E. 2006. UV Radiation as a Potential Driving Force for Zooplankton Community Structure in Patagonian Lakes. *Photochem. Photobiol.*, 82(4), 962-971.
- Melack J.M. 1979. Temporal variability of phytoplankton in tropical lakes. *Oecologia (Berl.)*, 44, 1-7.
- Mendoza M.C. 2004. Migración vertical de cladóceros (*Daphnia pulex*, *Ceriodaphnia* sp., *Bosmina huaronensis* y *Simocephalus vetulus*) en relación a factores físico-químicos en el Lago Menor, Lago Titicaca (Bolivia), p 81 p.
- Miller M.J., Capriles J.M. & Hastorf C.A. 2010. The fish of Lake Titicaca: implications for archaeology and changing ecology through stable isotope analysis. *Journal of Archaeological Science*, 37, 317–327.

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- Moreno E.G. 1983. Estudio cuantitativo del zooplancton de la zona pelágica del Lago Titicaca (Lago Grande). Tesis de Grado, Univ. Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú, 87 p.
- Neveu-Lemaire M. 1903. Le Titicaca et le Poopó. Contribution à une étude des hauts boliviens, La Géographie, IX, 49.
- Neveu-Lemaire M. 1906. Les lacs des hauts plateaux de l'Amérique du Sud. Mission scientifique G. De Gréqui Monfort et E. Sénéchal de la Grange. Paris, Imprimerie Nationale. Librairie H. Le Soudier, 194 p.
- Northcote T.G. 1979. Investigation and recommendations on the hydrobiological resources of the Lake Titicaca system, Peru. Report to the Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO/PER/76/022, 156 p.
- Northcote T.G. 1981. Parte 2. Métodos y recomendaciones para el muestreo de peces y de datos limnológicos en la zona litoral del Lago Titicaca. PNUD/FAO/-PER/76/022, Informe Inst. Mar Perú No. 83, 30 p.
- Northcote T.G., Morales, P., Levy, D.A. & Greaven, M.S. 1991. Contaminación en el Lago Titicaca, Peru: Capacitación, investigación y manejo, Westwater Research Centre, University of British Columbia, Vancouver, Canada & Instituto de Aguas Alto Andinas, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, ISBN: 0-929146-38-4, 278 p.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) 1982. Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control. Final Report. OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland waters (Eutrophic Control). Environment Directorate, OECD, Paris, 154 p.
- Pacoricona F.V., Kistriz R.U. & Berolatti R. 1981. Capítulo 17 – Manejo de las aguas residuales en Puno: Problemas y soluciones alternativas. En: Northcote T.G. *et al.* 1991. Contaminación en el Lago Titicaca, Peru: Capacitación, investigación y manejo, University of British Columbia, Vancouver & Universidad Nacional del Altiplano, 278 p.
- Pawley A. 1982. Ecología del zooplancton en la Bahía de Puno Exterior, Univ. California Davis, UNTA/UBC/CIDA, Puno.
- Pawley A. & Richerson P.J. 1992. Variación temporal y espacial del zooplancton en el Lago Mayor. En: Dejoux C. & Iltis A. (eds.) 1992. Lake Titicaca – A Synthesis of Limnological Knowledge. Kluwer Academic Publishers, 285-292.
- PELT 2007. Monitoreo hidroquímico del Lago Titicaca (2003-2007), Instituto Nacional de Desarrollo - INADE, Ministerio de Agricultura, República de Perú, 329 p.
- Pinto J. 1992. Distribución del zooplancton en la parte boliviana del Lago. En: Dejoux C. & Iltis A. (eds.) 1992. Lake Titicaca – A Synthesis of Limnological Knowledge. Kluwer Academic Publishers, 277-283.
- Pinto J. 1993. Estudio cuantitativo de los copepodos en el Lago Titicaca (Lago Pequeño) en relación a su biología y ecología con especial atención en *Metacyclops leptopus* Kiefer, In Carrera de Biología, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, UMSA, La Paz, 116 p.
- Point D., Lazzaro X. & Groleau A. 2013. Titicaca Sensors: A joint IRD-IPGP research initiative - *In situ* biogeochemical and ecological sensing of Lake Titicaca, IRD GET-BOREA, IPGP, February 2013, 17 p.
- PROINTEC/TYPSA 2004. Diagnóstico del nivel de contaminación de los recursos hídricos del Lago Titicaca, Bolivia, República de Bolivia, Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, Vice-Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Clasificación de Tierras y Cuencas, 281 p.
- PROLAGO 2012. Diagnóstico de la contaminación ambiental industrial en la ciudad de El Alto y Estrategia para mejorar la calidad ambiental de la cuenca El Alto Bahía de Cohana,

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- PROLAGO, USAID, CPT, 84 p.
- PSID s.r.l. (2004) Estudio ambiental de contaminación Bahía Cohana, Lago Titicaca. Primer informe. Prefectural del Departamento de La Paz, Dirección de Recursos Naturales y Medio Ambiente, PDLP/DRNMA/UL-E-070/03, versión actualizada al 1 de noviembre de 2004, 139 p.
- Quintanilla J., Calliconde M. & Crespo P. 1987. La química del Lago Titicaca y su relación con el plancton, OLDEPESCA, Documento de Pesca nº 004; proyecto "Evaluación de los Recursos Pesqueros del Lago Titicaca", ejecutado por el IMARPE y la UMSA, con el apoyo financiero de la Corporación Andina de Fomento (CAF), y los auspicios del Comité de Acción de Productos del Mar y de Agua del SELA y de la organización Latinoamericana de Desarrollo Pesquero (OLDEPESCA). Edición coordinada por la Dirección Ejecutiva de OLDEPESCA, con la colaboración del Dr. Christian Berger C., 321 pp.
- Quiroz C.A.P. 1992. El Lago Titicaca. Análisis Peruano-Boliviano de las relaciones entre el ambiente y el desarrollo social. SECAB. Conv. Andrés Bello-FKA, 206 p.
- Rautio M. & Korhola A. 2002. UV-Induced Pigmentation in Subarctic Daphnia. *Limnol. Oceanogr.*, 47(1), 295-299.
- Repelín R., Vargas M.L. & Pinto J. 1987. Distribución geográfica y estacional de la abundancia del zooplancton en el Lago Grande del Lago Titicaca y su cuenca. Parte II, OLDEPESCA, Documento de Pesca 005, Lima, Perú, 293-325.
- Repelín R., Pinto J. & Vargas M.L. 1988. Distribución y migraciones nictemerales del zooplancton en el sector boliviano del Lago Titicaca (Lago Pequeño). UMSA-ORSTOM, La Paz, Informe 11, 31 p. Multigr.
- Reynolds C.S. 1980. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems. - *Holarct. Ecol.*, 3, 141-159.
- Ribera A.M.O. 2005. Plan Estratégico de Conservación de la Biodiversidad del Sistema Hídrico Lago Titicaca-Río Desaguadero-Lago Poopó. Salar de Coipasa (TDPS). ALT/PNUD. La Paz, Bolivia. 98 p.
- Ribera A.M.O. 2008. La hiper-contaminación de la Bahía de Cohana. Observatorio ambiental de LIDEMA, 93 p.
- Richerson P.J., Widmer C. & Kittel T. 1977. The limnology of Lake Titicaca (Peru-Bolivia), a large, high altitude tropical lake, University of California, Institute of Ecology, Davis, USA, 43 p.
- Richerson P.J., Neale P.J., Wurtsbaugh W., Alfaro T.R. & Vincent W. 1986. Patterns of temporal variation in Lake Titicaca. A high altitude tropical lake. I. Background, physical and chemical processes, and primary production, *Hydrobiologia*, 138, 205-220
- Richter P., Helbling W., Streb C. & Häder D.-P. 2007. PAR and UV effects on vertical migration and photosynthesis in *Euglena gracilis*. *Photochemistry and Photobiology*, 83, 818-823.
- Ryding S.-O. & Rast W. 1989. The control of eutrophication of lakes and reservoirs. Vol. 1. Man and the biosphere series. UNESCO, Paris and Parthenon Publishing, Park Ridge, N.J., 314 p.
- Seltzer G.O., Rodbell D.T., Baker P.A., Fritz S.C., Tapia P.M., Rowe H.D. & Dunbar R.B. 2002. Early Warming of tropical South America at the last glacial-interglacial transition. *Science*, 296, 1685-1686.
- I Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS. 2011. "El Estado del Lago Titicaca: Desafíos para una Gestión basada en el Ecosistema". Auspiciado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo, Ministerio de la Producción de Perú, 19 al 21 de octubre del 2011, Puno, Perú: <http://simposiotiticaca.org/Memorias-del-I-Simposio-Internacional-del-Lago-Titicaca.pdf>
- II Simposio Internacional del Lago Titicaca – TDPS. 2013. "... una responsabilidad compartida".

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

- Comité Editorial: Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT), Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), IMARPE. Escuela de Post-Grado, Universidad Nacional del Altiplano, 7-9 de marzo de 2013, Puno, Perú: www.simposiotiticaca.org
- Sinha R.P. & Häder D-P. 2002. UV-induced DNA damage and repair: a review. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 1, 225–236.
- Sommaruga R. 2001. The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lakes. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 62, 35–42.
- Sommaruga R. 2010. Preferential accumulation of carotenoids rather than of mycosporine-like amino acids in copepods from high altitude Himalayan lakes. *Hydrobiologia*, 648, 143–156.
- Talling J.F. 1966. Photosynthetic behaviour in stratified and unstratified lake populations of a planktonic diatom. *Journal of Ecology* 54(1): 99-&, DOI: 10.2307/2257661
- Tartarotti B., Baffico G., Temporetti P. & Zagarese H.E. 2004. Mycosporine-like amino acids in planktonic organisms living under different UV exposure conditions in Patagonian lakes. *Journal of Plankton Research*, 26 (7), 753-762.
- Tartarotti B. & Sommaruga R. 2006. Seasonal and ontogenetic changes of mycosporine-like amino acids in planktonic organisms from an alpine lake. *Limnol. Oceanogr.*, 51(3), 1530–1541.
- Tutin T. 1940. The Algae. Report Nº11 of the Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn.Soc., London, Ser. 3, 1(2)*, 191-202.
- Uéno M. 1967. Zooplankton of Lake Titicaca on the Bolivian side, *Hydrobiologia*, 291, 547-568.
- Urrutia R.B. 2008. Assessment of the 21st Century change projections in tropical South America and the tropical Andes. Master Thesis University of Massachusetts Amherst, Graduate Program in Geography Climate Change, 158 p.
- Urrutia R.B. & Vuille M. 2009. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st Century. *Journal of Geophysical Research*, 114, D02108, doi:10.1029/2008JD011021
- Villafañe V.E., Andrade M., Lairana V., Zaratti F. & Helbling E.W. 1999. Inhibition of phytoplankton photosynthesis by solar ultraviolet radiation: Studies in Lake Titicaca, Bolivia, *Freshwater Biology*, 42, 215-224.
- Villafañe V.E., Gao K., Li P., Li G. & Helbling E.W. 2007. Vertical mixing within the epilimnion modulates UVR-induced photoinhibition in tropical freshwater phytoplankton from southern China. *Freshwater Biology*, 52, 1260–1270.
- Villafañe V.E. & Helbling E. W. 2003. Radiación ultravioleta en el Lago Titicaca, Bolivia: efectos y adaptación de los organismos planctónicos. En: Zaratti, F., Forno, R. (eds.) 2003a. La Radiación Ultravioleta en Bolivia. Organización panamericana de la salud (OPS/OMS) Laboratorio de Física de la Atmósfera (IIF - UMSA), 37–54.
- Villafañe V.E., Helbling E.W. & Lazzaro X. 2013. Efectos de la radiación ultravioleta en el plancton del Lago Titicaca: Una base de datos necesaria para inferir el impacto del cambio global en lagos de altura, En II Simposio Internacional del Lago Titicaca - TDPS ... una responsabilidad compartida, Escuela de Post Grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Vincent W., Wurtsbaugh W., Vincent C.L. & Richerson P.J. 1984. Seasonal dynamics of nutrient limitation in a tropical high-altitude lake (Lake Titicaca, Peru-Bolivia): application of physiological bioassays, *Limnol. Oceanogr.*, 29, 540-552.
- Vincent W.F., Vincent C.L., Downes M.T. & Richerson P.J. 1985. Nitrate cycling in Lake Titicaca (Peru-Bolivia): the effects of high altitude and tropicality, *Freshwat. Biol.*, 15, 31-42.

- Wurtsbaugh W.A., Vincent W.F., Alfaro C.R., Vincent C.L. & Richerson P.J. 1985. Nutrient limitation of algal growth and nitrogen fixation in a tropical alpine lake, Lake Titicaca (Peru-Bolivia), *Freshwat. Biol.*, 15, 185-195.
- Zaratti F. 2003. La radiación ultravioleta solar. En: Zaratti F. & Forno R. (eds.): *La Radiación Ultravioleta en Bolivia*. Organización panamericana de la salud (OPS/OMS) Laboratorio de Física de la Atmósfera (IIF - UMSA), 37–54.
- Zengling M.A., L.I. Wei L.I. & Kunshan G.A.O. 2010. Horizontal migration of *Acartia pacifica* Steuer (copepoda) in response to UV-radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 101, 233–237.
- Zengling M.A., Wei L., Angly S. & Kunshan G. 2013. Behavioral responses of zooplankton to solar radiation changes: in situ evidence. *Hydrobiologia*, 711, 155–163.

Agradecimientos

Agradecemos a Carmen Mendoza (IHH/UMSA) por la digitalización de las posiciones geográficas de las estaciones de muestreo en Google Earth©, a Stefany Rocha Lupa (LCA/UMSA) por la digitalización de los datos en las Tablas, y a Carlos Molina (UL/UMSA) por la realización en R de los gráficos de la Figura B3-8. Asimismo, estamos agradecidos con Stefany Rocha, Carlos Molina y Darío Achá por sus valiosas sugerencias en el manuscrito.

Figuras

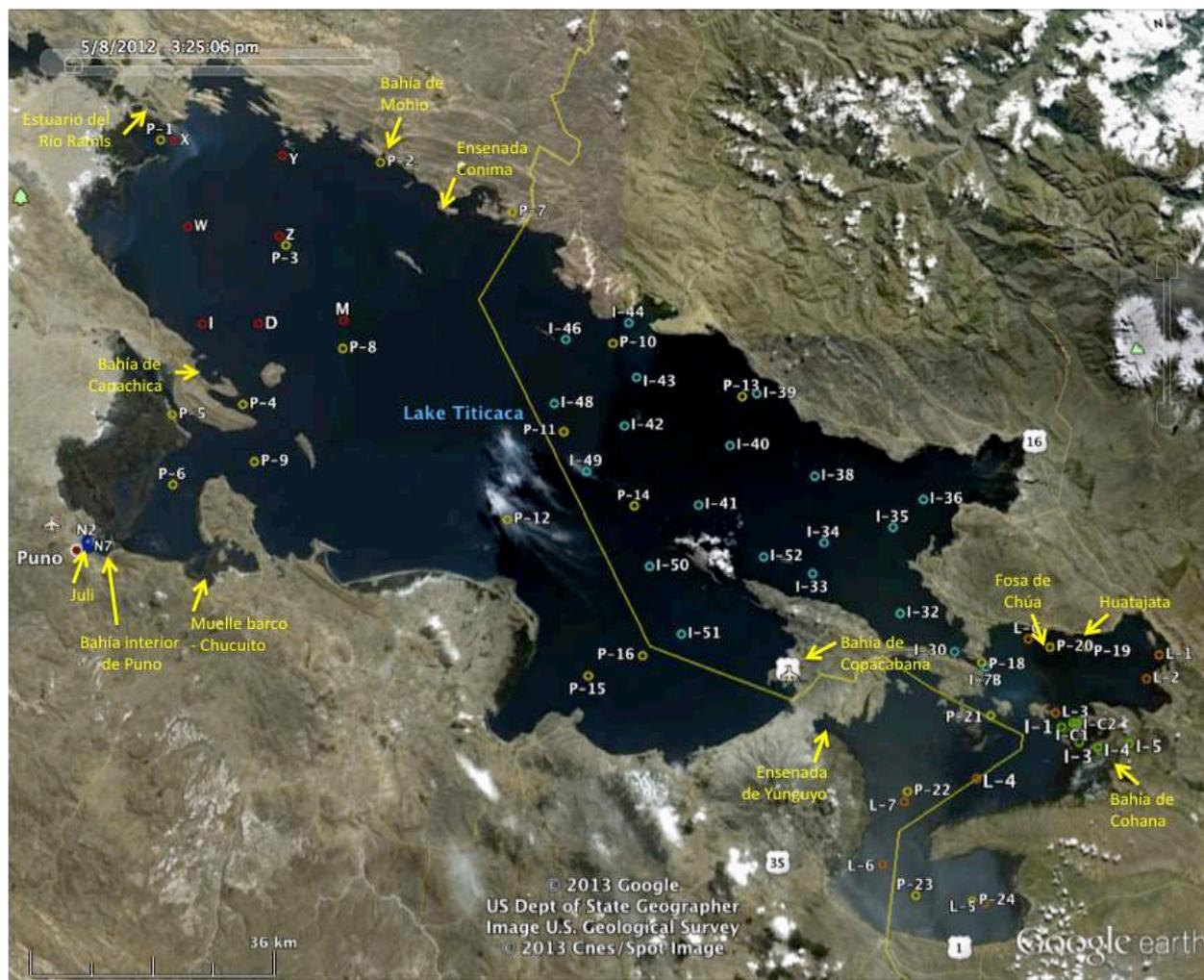


Fig. B3-1 - Mapa de ubicación geográfica de las estaciones de muestreo de los principales estudios limnológicos en el Lago Titicaca: Richerson et al. (1977): 7 estaciones de enero a diciembre 1973 (I, D, M, W, X, Y, Z; en rojo); Lazzaro (1981): 8 estaciones en 1979-80 (L-C, L-1 a L-7; en naranja); Quintanilla et al. (IMARPE, 1987): 19 estaciones en 1984-1985 (I-7B, I-30 a I-52; en celeste); Northcote et al. (1991): 2 estaciones en la Bahía interior de Puno (N2, N7; en azul); PELT (2007): 24 estaciones, 18 en el Lago Mayor y 6 en el Lago Menor (P-1 a P-24; en amarillo); Achá et al. (IDH, 2013): 7 estaciones en la Bahía de Cohana (I-C1, I-C2, I-1 a I-5; en verde). (mapa Google Earth ©)

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

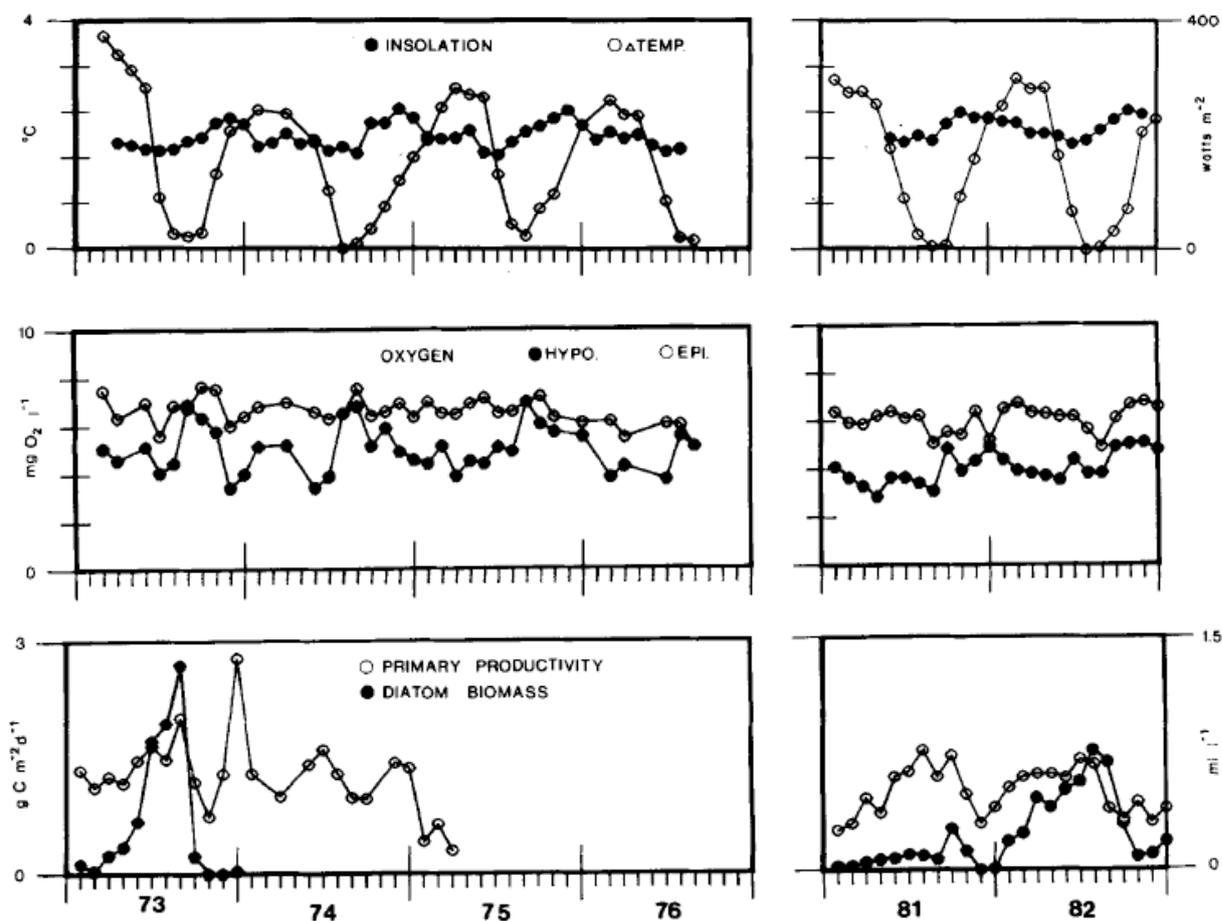


Fig. B3-2 - Series de datos mensuales medios para la parte Norte del Lago Mayor del Lago Titicaca para los períodos 1973-1976 y 1981-1982: (A) Insolación (Watt m^{-2}) y diferencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) entre las profundidades de 10 m y 150 m (zona hipolimnética profunda); (B) Concentraciones en oxígeno ($\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$) en las zonas epilimnética y hipolimnética; (C) Producción primaria ($\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, método del ^{14}C) del fitoplancton y biovolumen de diatomeas (mL L^{-1}) (sensu Richerson et al. 1986).

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

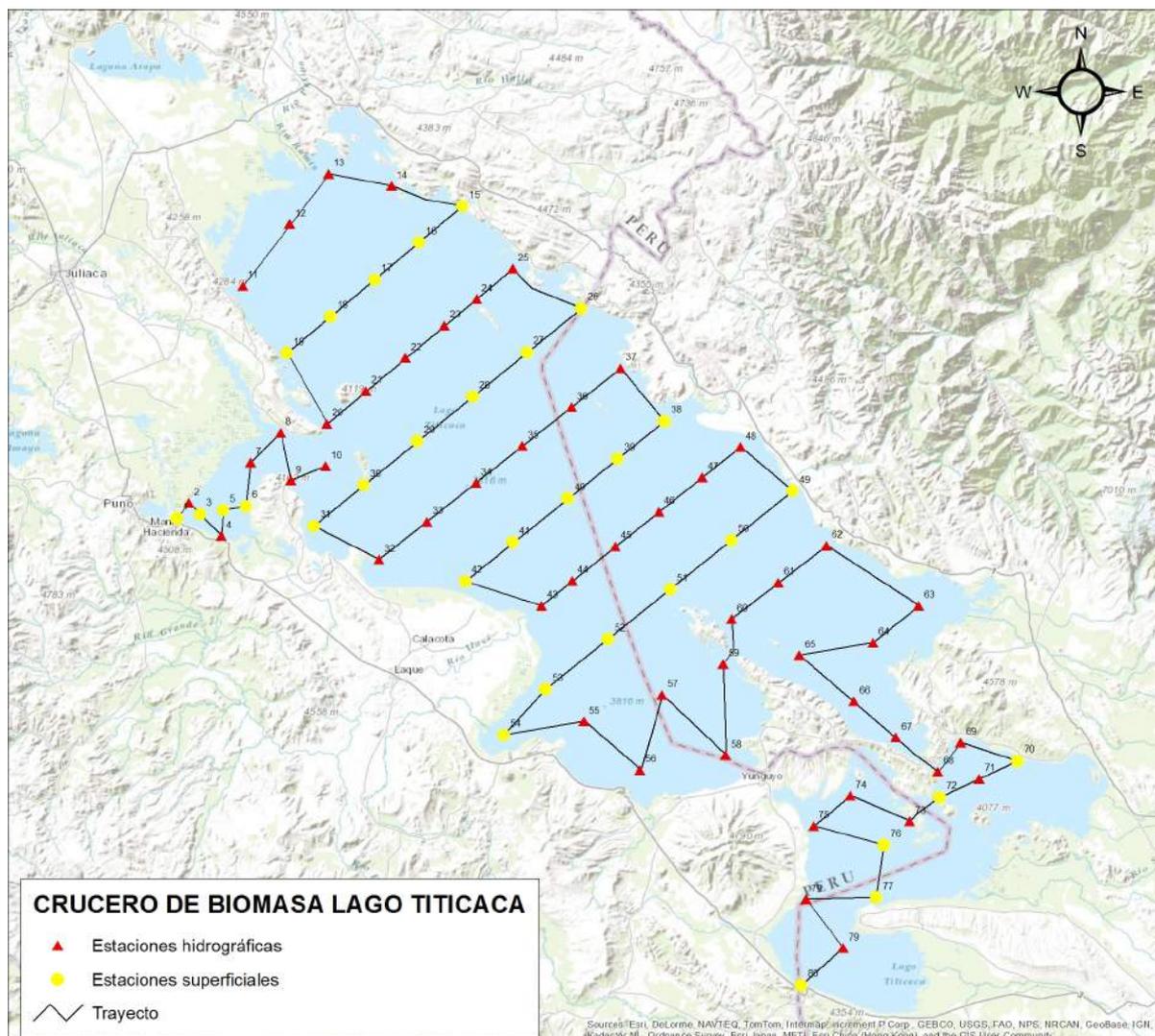


Fig. B3-3 – Trayecto y estaciones de muestreo en los cruces de biomasa realizados por el IMARPE en el Lago Titicaca (Lago Mayor y Lago Menor) (fuente IMARPE).

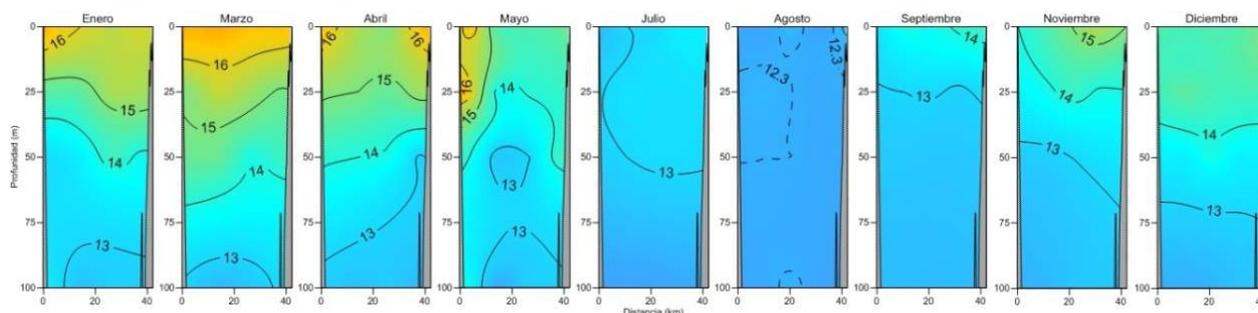


Fig. B3-4 - Variación estacional de la distribución vertical de temperatura (°C), en el perfil Escallani – Moho, durante el 2010. Variabilidad limnológica en líneas fijas en el Lago Titicaca (IMARPE 2010).

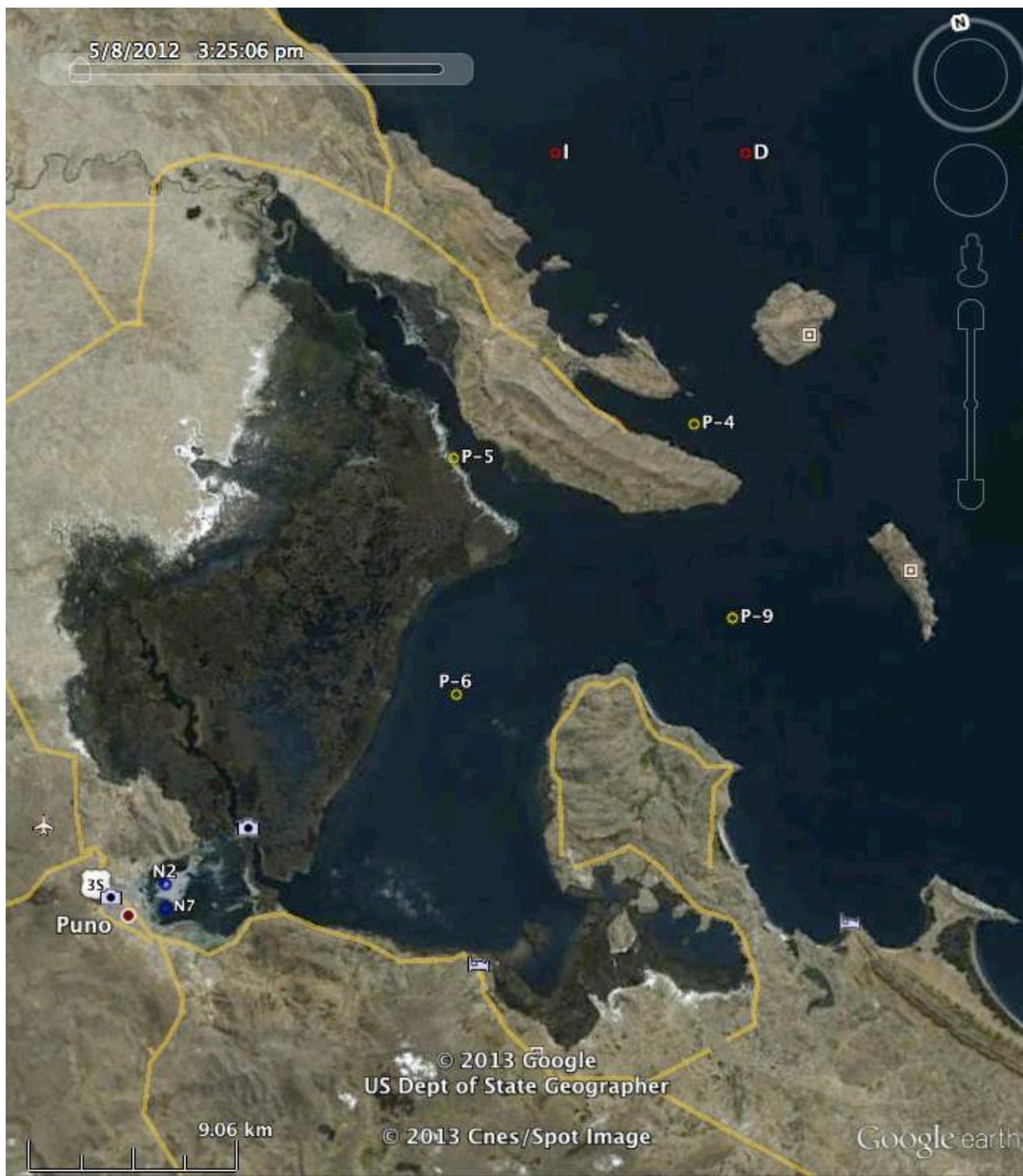


Fig. B3-5 – Mapa de ubicación geográfica de las estaciones de muestreo en la Bahía de Puno. Bahía Interior: Northcote et al. (1991), estaciones N2 y N7; y Bahía Exterior: PELT (2007), estaciones P-4 a P-6, P-9.) (mapa Google Earth ©).

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

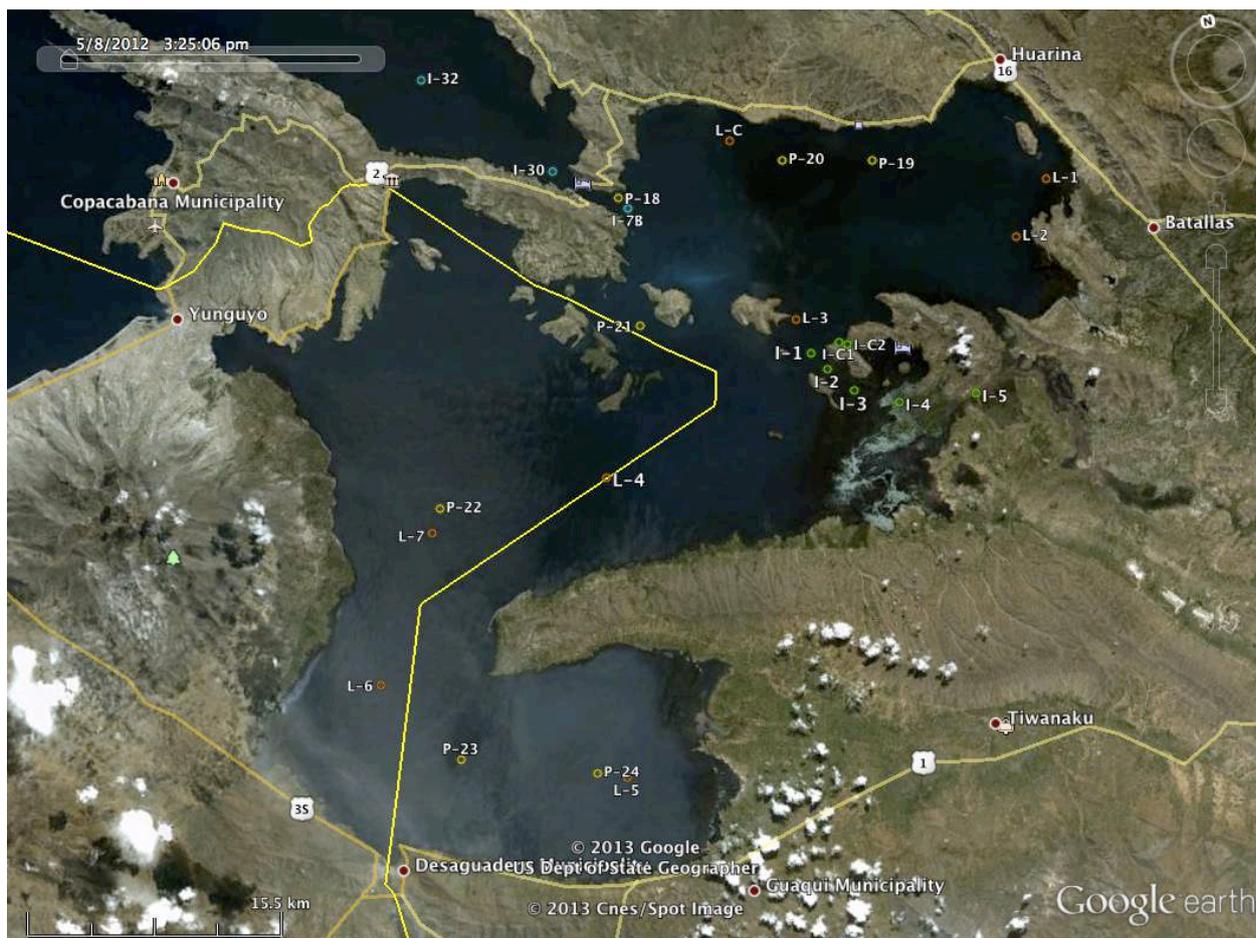


Fig. B3-6 - Mapa de ubicación geográfica de las estaciones de muestreo en el Lago Menor: Quintanilla et al. (IMARPE, 1987), estación I-7B; Lazzaro (1981), estaciones L-C, L-1 a I-7; PELT (2007), estaciones P-18 a P-24; Achá et al. (IDH, 2013), estaciones I-C1, I-C2, I-1 A I-5.) (mapa Google Earth ©).

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

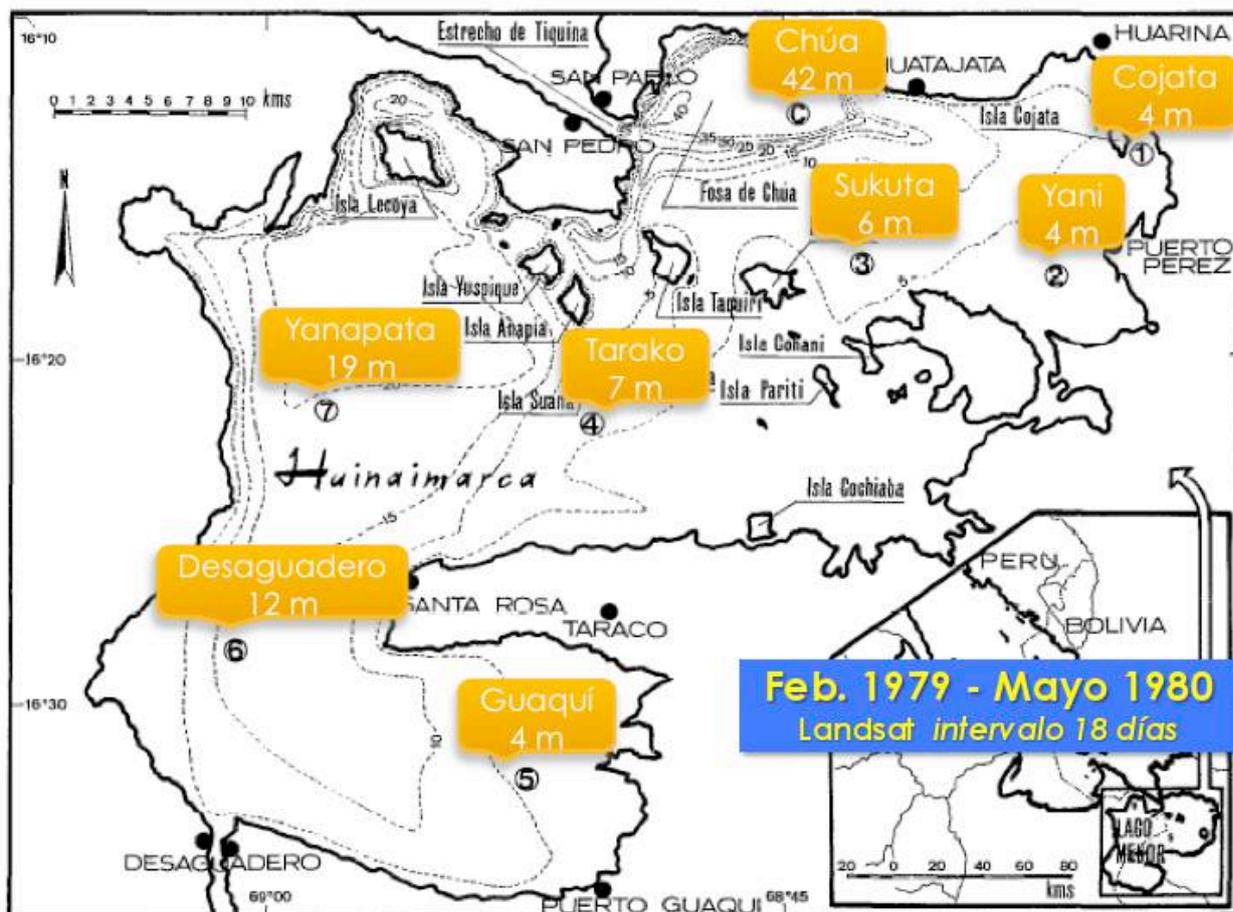


Fig. B3-7 – Mapa de ubicación de las 8 estaciones de muestreo en el Lago Menor estudiadas a cada 18 días (paso del satélite Landsat 1) de febrero 1979 a mayo 1980 (n = 23) (Lazzaro 1981).

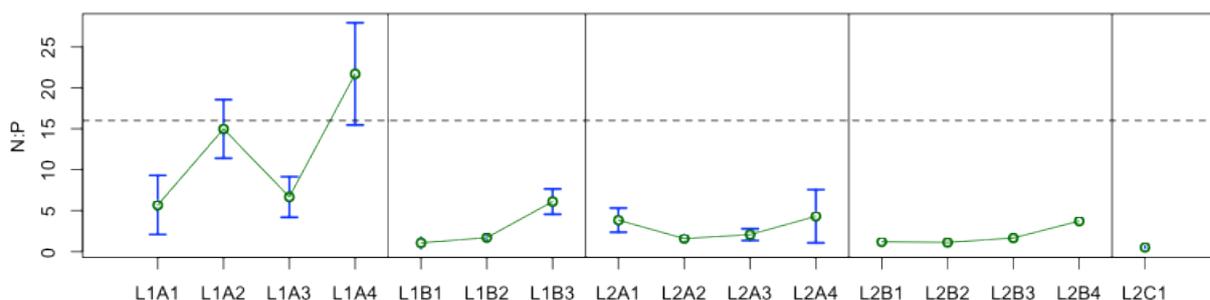


Fig. B3-8 – Evolución de la razón estequiométrica N:P (molar) media a lo largo de los diferentes estudios. **Lago Mayor:** Richerson et al. (1977) en 1973, L1A1 = 26/01-27/03, L1A2 = 11/04-15/07, L1A3 = 30/07-28/09, L1A4 = 14/10-30/11; Quintanilla et al. (1987): L1B1 = ago.-1984, L1B2 = dic.-1984, L1B3 = mar.-1985. **Lago Menor:** Lazzaro (1981): L2A1 = Otoño, L2A2 = Invierno seco, L2A3 = Primavera, L2A4 = Verano; Quintanilla et al. (1987): L2B1 = ago.-1984, L2B2 = dic.-1984, L2B3 = mar.-1985, L2B4 = may.-1985; Lazzaro & Point (2011): L2C1 = jun.-2011. Los valores N:P < 16 indican una limitación por el nitrógeno (N:P > 16 para una limitación por el fósforo). Se puede notar que comparado con el período 1973 (Richerson et al. 1977) en el Lago Mayor, la limitación por el nitrógeno ha aumentado considerablemente en el tiempo (o sea disminución del valor de N:P), favorable al desarrollo de las cianobacterias.

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

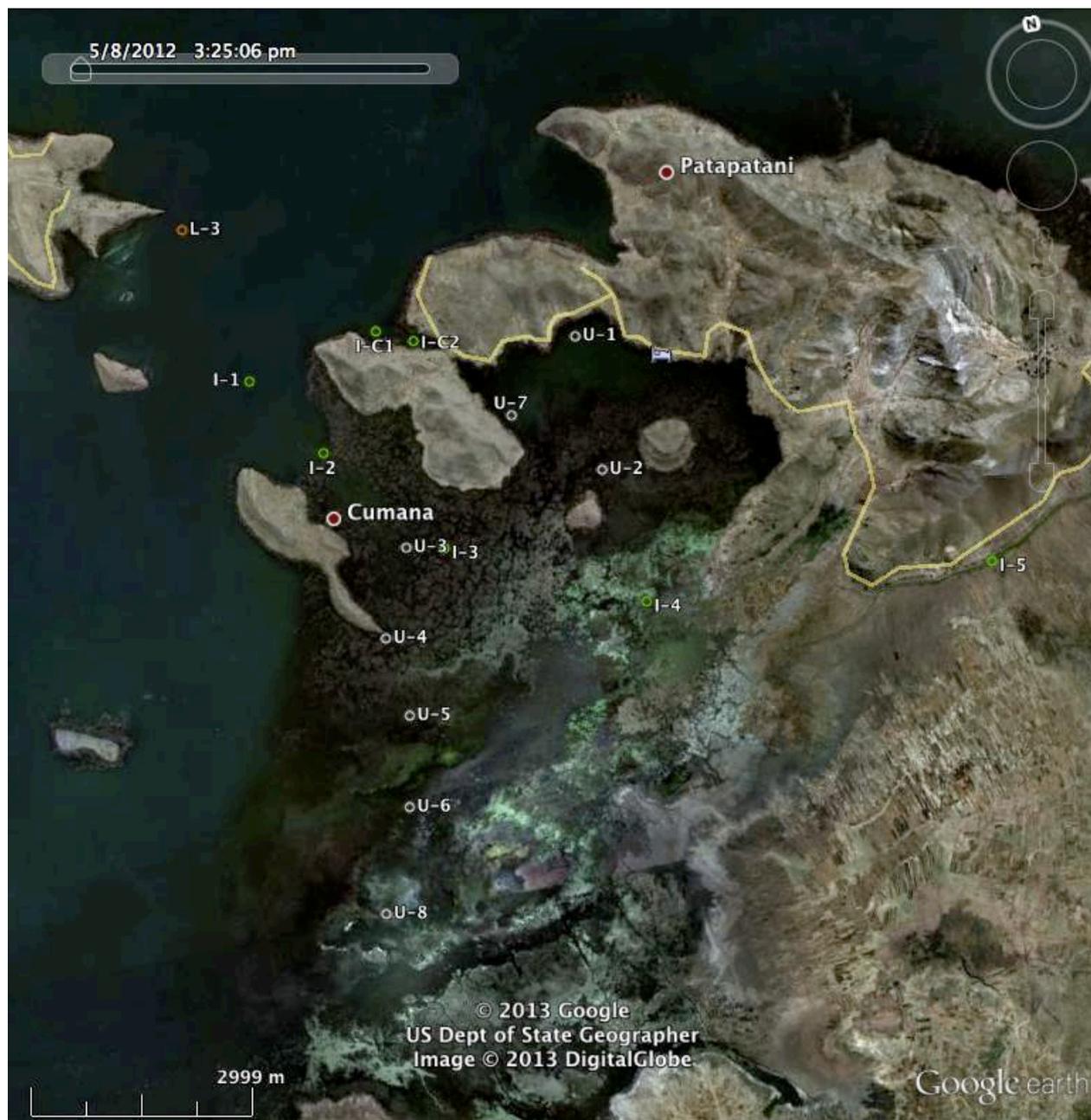


Fig. B3-9 - Mapa de ubicación geográfica de las estaciones en la Bahía de Cohana: Achá et al. (IDH, 2013), estaciones I-C1, I-C2, I-1 A I-5; PROLAGO (USAID, 2013), estaciones U-1 a U-8.) (mapa Google Earth ©).

Tablas

Tabla B3-1 – Ubicación georeferenciada de las estaciones de muestreo, profundidad, referencia y criterio, de los estudios limnológicos de Richerson et al. (1977), Lazzaro (1981), Quintanilla et al. (1987), Northcote et al. (1991), PELT (2007), y Achá et al. (2013). (según mapa Google Earth ©; ver Fig. B3-1).

Estudio	Estaciones	Latitud	Longitud	Prof. (m)	Referencia y criterio
Richerson et al. (1977)	D	15°35'43.64"S	69°42'55.35"O		
	I	15°34'50.68"S	69°47'29.66"O		
	M	15°36'48.37"S	69°35'58.95"O		
	P-3	15°30'0.00"S	69°39'25.00"O		
	W	15°25'43.88"S	69°47'32.09"O		
	X	15°20'2.12"S	69°46'48.21"O		
	Y	15°22'55.04"S	69°38'14.36"O		
Lazzaro (1981)	L-1	16°15'43.25"S	68°35'18.43"O	4	Cojata
	L-2	16°17'24.90"S	68°36'42.53"O	4	Yani
	L-3	16°18'41.45"S	68°44'42.00"O	6	Sukuta
	L-4	16°22'36.81"S	68°52'10.52"O	7	Tarako
	L-5	16°32'31.47"S	68°53'31.09"O	4	Guaqui
	L-6	16°27'53.92"S	69°1'12.01"O	12	Desaguadero
	L-7	16°23'16.98"S	68°58'25.83"O	19	Yanapata
	L-C	16°12'26.55"S	68°45'43.70"O	40	Chúa
Quintanilla et al. (IMARPE 1987)	I-30	16°12'17.69"S	68°51'53.95"O	100	
	I-32	16°8'26.92"S	68°55'42.85"O	180	
	I-33	16°3'57.94"S	69°2'10.66"O	180	
	I-34	16°1'43.21"S	69°0'44.90"O	190	
	I-35	16°1'35.06"S	68°54'54.46"O	180	
	I-36	15°59'52.47"S	68°51'59.46"O	70	
	I-38	15°56'22.42"S	69°0'26.77"O	190	
	I-39	15°49'0.82"S	69°3'46.74"O	90	
	I-40	15°52'40.04"S	69°6'47.19"O	220	
	I-41	15°56'49.26"S	69°10'17.69"O	230	
	I-42	15°49'29.02"S	69°14'59.32"O	230	
	I-43	15°45'52.22"S	69°13'13.90"O	60	
	I-44	15°41'29.08"S	69°12'58.01"O	6	
	I-46	15°41'47.74"S	69°18'19.90"O	170	
	I-48	15°46'37.90"S	69°20'18.30"O	235	
	I-49	15°52'27.75"S	69°18'48.36"O	250	
	I-50	16°0'52.01"S	69°15'15.10"O	200	

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-1 – (Con't)

Estudio	Estaciones	Latitud	Longitud	Prof. (m)	Referencia y criterio
	I-51	16°6'40.07"S	69°13'47.10"O	170	
	I-52	16°1'54.05"S	69°5'52.38"O	200	
	I-7B	16°13'59.27"S	68°49'36.85"O	37	
Northcote et al. (1991)	N2	15°50'3.75"S	70°0'22.66"O	2	Bahía interior de Puno
	N7	15°50'37.01"S	70°0'29.84"O	7	Bahía interior de Puno
PELT (2007)	P-1	15°19'45.00"S	69°47'50.00"O	53	Desembocadura río Ramis. río afectado por actividad minera y urbana
	P-2	15°25'0.00"S	69°30'25.00"O	243	Frente a Moho.
	P-3	15°30'0.00"S	69°39'25.00"O	231	Sensible a impacto por actividad urbana
	P-4	15°41'49.16"S	69°45'30.00"O	184	Entre Pusi y Moho.
	P-5	15°41'30.00"S	69°51'25.00"O	30	Blanco ambiental zona norte
	P-6	15°47'0.00"S	69°52'30.00"O	29	Frente a Isañnata y Pusi. Control de impacto
	P-7	15°31'0.00"S	69°20'35.00"O	267	Desembocadura río Coata.
	P-8	15°39'0.50"S	69°36'30.00"O	188	río afectado por actividad minera y urbana
	P-9	15°46'30.00"S	69°45'30.00"O	65	Bahía exterior de Puno
	P-10	15°42'50.53"S	69°14'35.00"O	12	Entre Conima e Isla Soto.
	P-11	15°49'0.00"S	69°19'60.00"O	240	Sensible a impacto por actividad turística
	P-12	15°55'0.00"S	69°26'0.00"O	158	Entre Islas Soto y Taquile.
	P-13	15°49'0.00"S	69°4'60.00"O	76	Blanco ambiental
	P-14	15°55'53.00"S	69°15'29.87"O	299	Entre Churo y Taquile.
	P-15	16°8'30.00"S	69°21'60.00"O	80	Control de impacto
	P-16	16°7'45.07"S	69°17'16.47"O	70	Desembocadura río Suchez.
	P-18	16°13'35.00"S	68°49'52.00"O	40	Río afectado por actividad minera
	P-19	16°14'0.50"S	68°41'3.50"O	15	Entre puntos 10 y 12.
	P-20	16°13'25.00"S	68°44'5.00"O	40	Blanco ambiental zona central
	P-21	16°17'52.96"S	68°49'60.00"O	7	Desembocadura río Llave
	P-22	16°22'32.33"S	68°58'0.00"O	15	Río afectado por actividad urbano-agrícola
	P-23	16°30'51.26"S	68°59'0.00"O	9	Frente a Carabuco.
	P-24	16°32'11.10"S	68°54'29.35"O	5	Zona de total impactada por minería
Achá et al. (IDH, 2013)	I-1	16°19'53.13"S	68°44'25.46"O	2,9	Frente Isa del Sol.
	I-2	16°20'30.67"S	68°43'58.65"O	2,4	Sensible al impacto por actividad turística
	I-3	16°21'22.45"S	68°43'12.99"O	2,5	Costas de Juli y Pomata.
	I-4	16°22'3.06"S	68°41'47.00"O	1,7	Impacto por actividad pesquera
	I-5	16°22'15.36"S	68°39'8.39"O	1	Frente a Santiago de Huata.
	I-C1	16°19'42.36"S	68°43'24.12"O	2,1	Control costero de calidad de agua
	I-C2	16°19'49.81"S	68°43'8.07"O	1,7	Estrecho de Tiquina

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-2 - Síntesis de los rangos de las principales características limnológicas en el Lago Mayor del Lago Titicaca: profundidad de desaparición del Disco de Secchi (m), coeficiente de extinción de la luz solar (Kd, en m^{-1} ; radiómetro PAR casero), concentración de la clorofila-a ($\mu g L^{-1}$) y producción primaria diaria del fitoplancton por unidad de superficie del agua ($g C m^{-2} d^{-1}$), en las estaciones I y D en 1973 (Richerson et al. 1977).

Fechas	Prof, Secchi (m)	Kd (m^{-1})	Clorofila-a ($\mu g L^{-1}$)	Prod, Prim. ($g C m^{-2} d^{-1}$)
26/01/73	-	-		
02/08/73	4.5	-		
24/02/73	4.8	0.17		
11/03/73	4.5	0.13		
27/03/73	5.8	0.13		
04/11/73	6.5	0.10		
05/03/73	7.4	0.07		
18/05/73	7.0	0.07		
02/06/73	8.3	0.07		
22/06/73	8.5	0.07		
15/07/73	8.8	0.06		
30/07/73	10.0	0.07		
15/08/73	10.5	0.08		
04/09/73	10.5	0.05		
28/09/73	8.8	0.05		
14/10/73	9.3	0.05		
30/10/73	9.3	0.04		
16/11/73	7.5	0.04		
30/11/73	6.2	0.06		
14/12/73	6.0	0.06		
28/12/73	6.0	0.07		
Promedio	7.5	0.08		
± ES	0.56	0.01		

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-3 – Concentraciones en nitrato, fosfato(en $\mu\text{mol L}^{-1}$) y razón N:P (molar) en la parte boliviana del Lago Mayor, a lo largo de un transecto al Este de la Isla de la Luna, en una estación al Oeste de la Isla del Sol, y al Norte del Estrecho de Tiquina, en 1984 y 1985 (Quintanilla et al. 1987).

Fecha	Estación	NO ₃ ($\mu\text{g L}^{-1}$)	PO ₄ ($\mu\text{g L}^{-1}$)	NO ₃ ($\mu\text{M L}^{-1}$)	PO ₄ ($\mu\text{M L}^{-1}$)	N:P (molar)
Ago.-1984	Este I. Luna	25	45	0.36	0.44	0.83
		35	33	0.51	0.32	1.58
		10	25	0.14	0.24	0.60
	Oeste I. Sol	25	30	0.36	0.29	1.24
		Tiquina	20	25	0.29	0.24
Dic.- 1984	Este I. Luna	25	23	0.36	0.22	1.62
		30	25	0.43	0.24	1.79
		15	15	0.22	0.15	1.49
	Oeste I. Sol	28	22	0.41	0.21	1.90
		Tiquina	15	20	0.22	0.19
mar.- 1985	Este I. Luna	40	12	0.58	0.12	4.98
		50	12	0.72	0.12	6.22
		60	12	0.87	0.12	7.46
	Oeste I. Sol	25	12	0.36	0.12	3.11
		Tiquina	10	9	0.14	0.09
may.- 1985	Este I. Luna	60	10	0.87	0.10	8.96
		70	15	1.01	0.15	6.97
		80	18	1.16	0.17	6.63
	Oeste I. Sol	30	10	0.43	0.10	4.48
		Tiquina	20	8	0.29	0.08
Promedio		32.52	19.33	0.47	0.19	3.25
± ES		4.43	2.05	0.06	0.02	0.57

Tabla B3-4 - Parámetros fisicoquímicos registrados en la superficie del Lago Titicaca, durante los cruceros de estimación de la biomasa íctica (IMARPE 2006-2012). Abreviaciones: Transp. = Transparencia (profundidad de desaparición del Disco de Secchi); Conduct. = conductividad; SST = sólidos suspendidos totales.

Crucero	Rango	Transp. (m)	Temp. (°C)	pH	OD (mg L^{-1})	CO ₂ (mg L^{-1})	Conduct. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
Abr-May 2006	Mín	4.0	13.2	8.24	5.01		1.470
	Máx	11.0	15.3	8.76	7.61		1.700
Mar-Abr 2007	Mín		11.8		6.00		1.200
	Máx		15.7		7.90		1.770
Dic 2007	Mín		13.2	8.20	7.00		1.460
	Máx		16.4	8.88	8.85		1.710
Dic 2008	Mín	5.0	12.8	8.12	4.40		
	Máx	9.0	16.4	8.99	6.95		
Abr 2010	Mín	6.0	13.6	7.94	4.21	4.0	1.500
	Máx	9.0	17.3	8.90	7.86	10.0	1.930
Jul 2011	Mín	6.0	10.9	7.86	4.76	6.0	1.407
	Máx	14.0	14.2	8.29	8.29	14.0	1.582
Dic 2012	Mín	5.0	12.1	8.16	4.74	2.0	1.610
	Máx	14.0	17.3	8.86	8.79	8.0	1.994

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-4 – (con't)

Crucero	Rango	Alcalinidad total (mg L ⁻¹)	Dureza total (mg L ⁻¹)	NO ₃ (mM L ⁻¹)	PO ₄ (mM L ⁻¹)	N:P (razón molar)	SST (mg L ⁻¹)	Clorofila-a (µg L ⁻¹)
Abr-May 2006	Mín		238.1	0	0			
	Máx		351.5	0.013	0.001	21.894		
Mar-Abr 2007	Mín			0.019	0	-		
	Máx			0.058	0.007	7.961		
Dic 2007	Mín			0	0			
	Máx			0	0			
Dic 2008	Mín			0.003	0.002	1.075		
	Máx			0.007	0.01	0.746		
Abr 2010	Mín	100	307.8	0.017	0.001	14.928	5.5	
	Máx	160	410.4	0.029	0.002	11.942	26.8	
Jul 2011	Mín		272.6	0	0	7.464	1.3	1.00
	Máx		393.3	0.008	0.006	1.393	31.3	3.87
Dic 2012	Mín	120	307.8	0	0	1.567	3.8	0.15
	Máx	80	376.2	0.001	0.003	0.310	21.3	2.21

Tabla B3-5 – Concentraciones en nitrato, fosfato (en µmol L⁻¹) y razón estequiometrica N:P (molar) en las estaciones I y D, Norte del Lago Mayor, en 1973 (Richerson et al. 1977). Las razones N:P ≤ 16 son características de ambientes limitados en nitrógeno, y N:P > 16 de ambientes limitados en fósforo. Para los cálculos: masas atómicas N = 15, O = 18, P = 31; pesos atómicos NO₃ = 69, PO₄ = 103. Abreviación: ± SE = ± error estándar.

Fechas	NO ₃ (mM L ⁻¹)		PO ₄ (mM L ⁻¹)		N:P (molar)	
	Somero (I)	Profundo (D)	Somero (I)	Profundo (D)	Somero (I)	Profundo (D)
26/01/73	0.87	0.87	0.22	0.63	3.89	1.38
08/02/73	0.72	1.30	0.16	0.41	4.66	3.20
24/02/73	1.01	1.16	0.16	0.32	6.53	3.62
11/03/73	0.58	1.01	0.19	0.48	2.99	2.13
27/03/73	1.30	1.74	0.13	0.48	10.33	3.66
11/04/73	1.59	2.75	0.12	0.28	13.68	9.78
03/05/73	1.59	3.33	0.12	0.45	13.68	7.46
18/05/73	1.88	2.17	0.12	0.41	16.17	5.33
02/06/73	1.59	1.88	0.16	0.45	10.26	4.22
22/06/73	3.19	-	0.16	-	20.53	-
15/07/73	3.48	3.48	0.22	0.19	15.58	17.91
30/07/73	-	-	0.16	0.32	-	-

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-5 – (con't)

Fechas	NO ₃ (mM L ⁻¹)		PO ₄ (mM L ⁻¹)		N:P (molar)	
	Somero (I)	Profundo (D)	Somero (I)	Profundo (D)	Somero (I)	Profundo (D)
15/08/73	1.88	1.74	-	-	-	-
04/09/73	1.45	1.59	0.22	0.41	6.49	3.91
28/09/73	1.59	1.45	0.22	0.35	7.14	4.15
14/10/73	0.72	0.58	0.16	0.22	4.66	2.60
30/10/73	1.30	1.16	0.16	0.32	8.40	3.62
16/11/73	1.74	1.88	0.07	0.16	25.59	12.13
30/11/73	1.59	1.74	0.10	0.16	16.42	11.20
14/12/73	1.59	2.03	0.07	0.19	23.46	10.45
28/12/73	1.45	1.45	0.07	0.28	21.33	5.15
Promedio	1.56	1.75	0.15	0.34	12.20	6.22
± ES	0.16	0.18	0.01	0.03	1.61	1.03

Tabla B3-6 - Valores medios de parámetros fisicoquímicos registrados en la zona de Conima (IMARPE 2008-2011).

Parametros	2008	2009	2010	2011	Promedio	
Temp. (°C)	Superficie	15.0	12.8	14.5	12.7	13.8
	20 m	14.5	12.5	13.8	12.6	13.4
	Fondo	14.3	12.5	13.5	12.5	13.2
pH	Superficie	8.6	8.6	8.6	8.3	8.5
	20 m	8.5	8.5	8.6	8.3	8.5
	Fondo	8.5	8.5	8.5	8.3	8.4
OD (mg L ⁻¹)	Superficie	7.9	6.5	6.1	5.1	6.4
	20 m	6.9	5.0	5.2	5.8	5.7
	Fondo	5.9	5.1	4.5	5.0	5.1
CO ₂ (mg L ⁻¹)	20.0	7.6	6.5	14.0	12.0	
Alcalinidad total (mg L ⁻¹)	144.4	146.7	122.8		138.0	
Dureza total (mg L ⁻¹)	412.5	388.6	350.6	350.6	375.6	
Cobre (µg L ⁻¹)	10.9		13.2		12.1	
Cadmio (µg L ⁻¹)	<0.53		<0.53			
Plomo (µg L ⁻¹)	1.7		4.1		2.9	
Hierro (µg L ⁻¹)	<0.36		<0.36			

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-7 - Valores medios de parámetros fisicoquímicos registrados en la zona de bahía de Moho (IMARPE 2008-2011).

Parámetros		2008	2009	2010	2011	Promedio
Temp. (°C)	Superficie	15.1	12.9	14.3	12.7	13.8
	20 m	14.3	12.8	13.8		13.6
	Fondo	14.5	12.5	13.9	12.5	13.4
pH	Superficie	8.6	8.7	8.9	8.4	8.6
	20 m	8.6	8.6	9.0		8.7
	Fondo	8.5	8.6	8.9	8.4	8.6
OD (mg L-1)	Superficie	7.2	6.8	6.2	8.9	7.3
	20 m	6.4	5.4	5.0		5.6
	Fondo	5.3	6.0	5.5	5.7	5.7
CO ₂ (mg L-1)		8.0	8.0	6.2	10.2	8.1
Alcalinidad total (mg L-1)		137.5	137.5	123.6		132.9
Dureza total (mg L-1)		395.4	373.0	352.9	327.6	362.2
Cobre (µg L-1)		12.1		9.3		10.7
Cadmio (µg L-1)		<0.53		<0.53		

Tabla B3-8 - Valores medios de parámetros fisicoquímicos registrados en la zona de Ramis (IMARPE 2009-2011).

Periodo	Rango	Temp. (°C)	DO (mg L ⁻¹)	pH	CO ₂ (mg L ⁻¹)	Alcalinidad total (mg L ⁻¹)	Dureza total (mg L ⁻¹)
Mayo 2009	Mínimo	12.8	4.15	9.00	2.0	120	291
	Máximo	14.5	4.53	9.30	16.0	160	325
	Promedio	14.0	4.58	9.10	6.5	140	307
Marzo 2010	Mínimo	15.9	3.45	8.62	4.0	120	205
	Máximo	19.0	7.01	9.60	8.0	140	393
	Promedio	17.1	5.80	9.11	5.5	129	288
Nov. 2010	Mínimo	14.6	4.53	8.25	6.0	120	325
	Máximo	17.3	8.07	8.72	12.0	160	428
	Promedio	15.3	5.78	8.40	8.2	145	383
Ago. 2011	Mínimo	10.2	6.53	8.24	6.0	91	274
	Máximo	12.6	8.09	8.92	12.0	120	376
	Promedio	12.3	6.84	8.42	8.2	108	305

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-8 – (Con't)

Periodo	Rango	Conduct. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Cl (mg L^{-1})	NO_3 (mM L^{-1})	PO_4 (mM L^{-1})	N:P (razon molar)	Clorofila- α ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Mayo 2009	Mínimo	660	120	0.013	0.005	2.893	0.40
	Máximo	1319	320	0.023	0.019	1.253	0.90
	Promedio	1259	265	0.018	0.009	2.030	0.70
Marzo 2010	Mínimo	466	80	0.000	0.000	0.130	0.13
	Máximo	1523	300	0.000	0.001	0.229	1.16
	Promedio	1137	212	0.000	0.001	0.171	0.50
Nov. 2010	Mínimo	1075	160	0.000	0.000	1.714	0.52
	Máximo	1609	340	0.001	0.001	2.261	1.11
	Promedio	1566	313	0.001	0.000	1.850	0.85
Ago. 2011	Mínimo	814	192	0.001	0.000	2.039	0.50
	Máximo	1463	221	0.002	0.001	2.276	3.20
	Promedio	1431	205	0.001	0.001	2.252	1.44

Tabla B3-9 - Valores medios de parámetros fisicoquímicos registrados en la zona de Muelle Barco – Chucuito (IMARPE 2009-2011).

Periodo	Rango	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	DO (mg L^{-1})	pH	CO_2 (mg L^{-1})	Alcalinidad total (mg L^{-1})	Dureza total (mg L^{-1})
Mayo 2009	Mínimo	14.1	4.3	9.20	4.0	120	291
	Máximo	15.4	5.4	9.60	14.0	160	445
	Promedio	14.9	4.7	9.30	8.3	136	336
Marzo 2010	Mínimo	16.7	3.4	8.90	9.0	120	308
	Máximo	18.7	8.6	9.84	21.0	160	376
	Promedio	17.6	6.8	9.33	13.4	140	345
Nov. 2010	Mínimo	14.6	3.8	8.37	6.0	120	342
	Máximo	16.3	9.0	8.66	10.0	160	410
	Promedio	15.5	6.5	8.46	7.8	139	373
Ago. 2011	Mínimo	11.9	6.3	8.53	6.0	100	
	Máximo	13.8	9.6	8.87	12.0	150	
	Promedio	12.6	7.4	8.70	8.3	115	

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-9 – (Con't)

Periodo	Rango	Conduct. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Cl (mg L^{-1})	NO_3 (mM L^{-1})	PO_4 (mM L^{-1})	N:P (razón molar)	Clorofila- α ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Mayo 2009	Mínimo	1319	160	0.006	0.002	2.756	1.80
	Máximo	1330	320	0.023	0.011	2.161	4.30
	Promedio	1322	286	0.028	0.006	4.914	2.60
Marzo 2010	Mínimo	1477	260	0.000	0.000	1.692	0.59
	Máximo	1508	340	0.003	0.001	4.873	2.58
	Promedio	1491	294	0.001	0.000	2.020	1.40
Nov. 2010	Mínimo	1602	280	0.000	0.000	1.037	1.11
	Máximo	1629	380	0.003	0.001	2.970	2.22
	Promedio	1620	338	0.001	0.001	1.645	1.54
Ago. 2011	Mínimo	1562	233	0.000	0.000	0.788	5.48
	Máximo	1576	292	0.002	0.001	2.801	16.64
	Promedio	1568	258	0.001	0.000	1.648	9.30

Tabla B3-10 - Valores medios de parámetros fisicoquímicos registrados en la zona de Muelle Juli (IMARPE 2009-2011).

Periodo	Rango	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	DO (mg L^{-1})	pH	CO_2 (mg L^{-1})	Alcalinidad total (mg L^{-1})	Dureza total (mg L^{-1})
Mayo 2009	Mínimo	14.2	4.29	9.2	2.0	100	239
	Máximo	15.4	5.58	9.6	8.0	180	359
	Promedio	14.4	4.72	9.3	4.5	132	312
Marzo 2010	Mínimo	16.2	4.83	9.01	4.0	120	342
	Máximo	18.8	8.14	9.87	8.0	160	428
	Promedio	17.6	7.33	9.31	6.3	144	373
Nov. 2010	Mínimo	14.6	4.32	8.42	4.0	120	342
	Máximo	15.9	6.32	8.84	10.0	160	410
	Promedio	15.1	5.42	8.54	6.8	140	377
Ago. 2011	Mínimo	12.1	5.65	8.2	5.0	100	
	Máximo	13.3	8.48	8.91	12.0	140	
	Promedio	12.8	6.98	8.47	8.9	121	

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-10 – (Con't)

Periodo	Rango	Conduct. ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Cl (mg L^{-1})	NO_3 (mM L^{-1})	PO_4 (mM L^{-1})	N:P (razón molar)	Clorofila- <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Mayo 2009	Mínimo	1317	220	0.008	0.005	1.601	0.40
	Máximo	1326	360	0.020	0.010	2.103	1.00
	Promedio	1321	279	0.013	0.007	1.824	0.60
Marzo 2010	Mínimo	1496	160	0.000	0.000	0.686	0.28
	Máximo	1504	320	0.005	0.001	7.130	0.85
	Promedio	1500	254	0.001	0.001	2.156	0.56
Nov. 2010	Mínimo	1556	260	0.000	0.000	1.603	0.52
	Máximo	1609	320	0.001	0.001	1.045	1.04
	Promedio	1600	285	0.001	0.001	1.090	0.85
Ago. 2011	Mínimo	1461	250	0.000	0.000	1.437	5.38
	Máximo	1483	325	0.001	0.001	2.086	22.12
	Promedio	1469	280	0.001	0.001	1.407	9.58

Tabla B3-11 - Valores medios de parámetros fisicoquímicos registrados en la ensenada Yunguyo (IMARPE 2008-2011).

Parametros		2008	2009	2010	2011	Promedio
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Superficie	16.6	13.1	14.8	12.9	14.4
	20 m	15.0	12.7	14.0	12.8	13.6
	Fondo	14.7	12.6	13.7	12.8	13.5
pH	Superficie	8.7	8.6	8.8		8.7
	20 m	8.5	8.6	8.6		8.5
	Fondo	8.3	8.5	8.1		8.3
OD (mg L^{-1})	Superficie	7.5	6.8	6.7	6.9	7.0
	20 m	5.6	6.7	5.3	6.4	6.0
	Fondo	5.0	6.3	5.0	6.1	5.6
CO_2 (mg L^{-1})		10.6	8.3	6.7	4.4	7.5
Alcalinidad total (mg L^{-1})		147.5	140.0	111.5		133.0
Dureza total (mg L^{-1})		391.2	361.2	351.6	365.4	367.5
Cobre ($\mu\text{g L}^{-1}$)		11.3		7.6		9.4
Cadmio ($\mu\text{g L}^{-1}$)		<0.53		<0.53		
Plomo ($\mu\text{g L}^{-1}$)		2.8		4.0		3.4
Hierro ($\mu\text{g L}^{-1}$)		<0.36		<0.36		

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-12 - Valores medios de parámetros fisicoquímicos registrados en la bahía interior de Puno (IMARPE 2007-2011).

Año	Transp. (m)	Temp. H2O (°C)	DO (mg L ⁻¹)	pH	CO2 (mg L ⁻¹)	Turbidez (NTU)	Conduct. (µS cm ⁻¹)
2007	-	12.8	13.4	8.80	2.00	8.8	
2008	1.7	14.6	7.1	8.95	5.63	9.0	1578
2010	1.0	16.2	10.2	10.19		8.3	1903
2011	-	13.5	5.1	9.40			1777

Tabla B3-12 – (Con't)

Año	SST (mg L ⁻¹)	PO ₄ (mg L ⁻¹)	SiO ₃ (mg L ⁻¹)	NO ₃ (mM L ⁻¹)	PO ₄ (mM L ⁻¹)	N:P (razón molar)	Clorofila- <i>a</i> (µg L ⁻¹)
2007	15.0						
2008	14.3						
2010	31.6	0.385	1.305	0.000	0.004	0.112	29.5
2011	1.7	0.375	0.713	0.000	0.004	0.135	26.8

Tabla B3-13 – Valores de los parámetros de calidad del agua de la Bahía interior de Puno – 11 de Marzo de 2013 (IMARPE 2013).

Parámetros	Estaciones										Pro medio	±ES	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Profundidad (m)	5.4	5.5	4.3	6.2	2.2	3.9	2.6	3.0	3.0	2.3			
Transparencia (m)	5.4	3.0	3.5	3.0	2.0	2.0	2.6	2.3	2.5	2.3			
Temperatura (°C)	Superficie	18.3	18.5	18.7	18.9	18.4	18.6	18.5	18.5	18.4	18.7	18.6	0.05
	Fondo	18.1	18.6	18.4	18.6		18.2					18.4	0.08
pH	Superficie	7.84	7.81	7.82	7.76	7.72	7.77	7.81	7.73	7.71	7.76	7.8	0.01
	Fondo	7.80	7.89	7.80	7.76		7.76					7.8	0.02
Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	Superficie	0.92	0.92	1.25	0.86	1.18	1.14	1.26	0.80	0.00	0.82	0.92	0.11
	Fondo	0.37	0.88	0.17	0.31		0.11					0.37	0.11
Anhídrido carbónico (mg L ⁻¹)	Superficie	18.0	18.0	16.0	18.0	16.0	20.0	18.0	16.0	20.0	16.0	17.6	0.45
	Fondo	20.0	20.0	20.0	20.0		20.0					20.0	0.00

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-13 – (Con't)

Parámetros		Estaciones										Pro me- dio	±ES
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Alcalini- dad total (mg L ⁻¹)	Superficie	160	160	160						180	160	164	3.27
	Fondo	160	160	160								160	0.00
Dureza total (mg L ⁻¹)	Superficie	325	308	308						308	308	311	2.79
	Fondo	308	308	308								308	0.00
Conducti- vidad (µS cm ⁻¹)	Superficie	1843	1698	1675	1693	1687	1666	1667	1660	1652	1661	1690	15.9
	Fondo	1698	1572	1690	1644		1649					1651	18.2
Sólidos susp. totales (mg L ⁻¹)	Superficie	5.00	5.00	8.67	3.00	6.33	4.33	5.67	4.33	5.00	8.33	5.57	0.51
	Fondo	6.00	8.67	5.33	5.00		6.67					6.33	0.53
Clorofila a (µg L ⁻¹)	Superficie	3.23	2.13	3.32	1.62	1.62	2.72	1.54	1.62	2.64	1.62	2.21	0.20
	Fondo	2.72	2.21	5.01	2.13		3.90					3.19	0.45
Fosfatos [PO ₄] (mg L ⁻¹)	Superficie	1.52	1.56	1.46	1.59	1.58	1.54	1.48	1.54	1.49	1.50	1.53	0.01
	Fondo	1.57	1.61	1.37	1.57		1.55					1.54	0.03
Silicatos [SiO ₂] (mg L ⁻¹)	Superficie	0.13	0.11	0.10	0.08	0.09	0.09	0.12	0.09	0.17	0.08	0.11	0.01
	Fondo	0.14	0.08	0.16	0.10		0.10					0.12	0.01
Nitritos [NO ₂] (mg L ⁻¹)	Superficie	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.04	0.06	0.06	0.00
	Fondo	0.05	0.06	0.03	0.03		0.02					0.04	0.01
Nitratos [NO ₃] (mg L ⁻¹)	Superficie	0.29 5	0.17 9	0.15 0	0.10 3	0.12 2	0.10 4	0.10 9	0.09 5	0.05 4	0.89	0.21 0	0.07
	Fondo	0.21	0.17	0.08	0.06		0.05					0.11	0.03
Nitróg. amon. [NH ₃] (mg L ⁻¹)	Superficie	1.63	1.58	1.59	1.71	1.63	1.69	1.45	1.62	1.98	1.72	1.66	0.04
	Fondo	1.66	1.63	2.18	1.85		1.90					1.84	0.08
Nitrógeno total (mg L ⁻¹)	Superficie	2.82	2.89	2.74	2.90	2.96	2.83	2.76	2.61	2.96	2.84	2.83	0.03
	Fondo	2.71	2.92	2.76	2.93		2.86					2.84	0.04
Fósforo total (mg L ⁻¹)	Superficie	2.10	2.20	2.40	2.60	2.50	2.30	2.30	2.40	2.80	2.6	2.42	0.06
	Fondo	2.10	2.10	2.50	2.20		2.20					2.22	0.06
DQO (mg L ⁻¹)	Superficie	28.2	27.2	28.1	27.0	27.1	27.0	26.8	28.0	30.0	28	27.7	0.27
	Fondo	29.1	27.8	28.6	27.9		27.3					28.1	0.26

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-14 – Valores medios de parámetros fisicoquímicos registrados en la península de Capachica (IMARPE 2009-2011).

Año	Rango	Transp. (m)	Turbidez (NTU)	Temp. (°C)	pH	OD (mg L ⁻¹)
Julio 2009	Mínimo	5.5	0.5	12.4	8.23	5.97
	Máximo	10.0	2.1	13.7	8.99	6.93
	Promedio	8.0	1.2	12.9	8.67	6.44
Abril 2011	Mínimo	3.0		14.3	8.64	4.23
	Máximo	13.0		16.0	8.98	8.36
	Promedio	8.9		15.1	8.86	6.73

Tabla B3-14 – (Con't)

Año	Rango	Conduct. (µS cm ⁻¹)	Nitrato (mM L ⁻¹)	Fosfato (mM L ⁻¹)	N:P (razón molar)	DBOs (mg L ⁻¹)	Clorofila-a (µg L ⁻¹)
Julio 2009	Mínimo	1290	0.011	0.005	2.119	7.1	
	Máximo	1334	0.019	0.028	0.662	8.4	
	Promedio	1319	0.015	0.014	1.020	7.8	
Abril 2011	Mínimo	1352	0.000	0.000	10.449	13.5	0.07
	Máximo	1768	0.000	0.000	10.748	15.0	1.77
	Promedio	1392	0.000	0.000	9.330	14.3	0.85

Tabla B3-15 - Síntesis de los rangos de las principales características limnológicas en el Lago Menor del Lago Titicaca: profundidad de desaparición del disco de Secchi (m), coeficiente de atenuación de la luz fotosintéticamente activa (Kd PAR, m⁻¹, radiómetro Li-COR), profundidad de la zona eufótica (Zeu, donde llega 1% de la luz PAR de superficie, m), concentración en clorofila-a (µg L⁻¹) en ocho estaciones del Lago Menor en 1979-1980 (Lazzaro 1981). *Período febrero – junio 1980. Otoño = abril – junio 1979; Invierno seco = julio – septiembre 1979; Primavera = octubre – diciembre 1979; Verano lluvioso = enero – marzo 1980.

Estaciones	Código	Prof. Secchi (min.-máx., m)	Kd PAR* (min.-máx., m ⁻¹)	Zeu* (m)	Clorofila-a (µg L ⁻¹)			
					Otoño	Invierno	Primavera	Verano
C-Chúa	L-C	4.0-7.0	0.22-0.26		2.5	1.2	2.0	3.0
1-Cojata	L-1	2.0-4.0 (fondo)	0.53-0.96		2.0	0.7	0.7	1.8
2-Yani	L-2	1.5-4.0 (fondo)	1.10-1.32	1.32 (feb.)	5.0	5.5	0.3	4.2
3-Sukuta	L-3	4.0-6.0 (fondo)	0.28-0.33		1.0	2.8	0.3	2.2
4-Tarako	L-4	2.0-7.0 (fondo)	0.26-0.51		1.2	3.2	0.1	2.8
5-Guaquí	L-5	2.0-4.0 (fondo)	0.40-0.48		2.2	4.0	3.0	0.3
6-Desaguadero	L-6	3.0-5.0	0.40-0.46		2.0	3.8	0.6	4.0
7-Yanapata	L-7	2.5-5.0	0.23-0.27	0.23 (feb.)	2.7	1.3	2.0	3.0

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-16 - Síntesis de los rangos de las principales características limnológicas en el Lago Menor del Lago Titicaca: profundidad de la zona eufótica (Zeu, m), concentración en clorofila-*a* por unidad de superficie ($\mu\text{g m}^{-2}$), máximo de producción primaria del fitoplancton (método del ^{14}C , $\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$) y profundidad donde se ubica (m), en las estaciones de Chúa (40 m) y Sukuta (6 m) del Lago Menor, en 1979-1980 (Lazzaro 1981).

Fechas	Chúa				Fechas	Sukuta			
	Zeu (m)	Clorofila- <i>a</i> ($\mu\text{g m}^{-2}$)	Prod. Prim. Max. ($\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$)	Prof. (m)		Zeu (m)	Clorofila- <i>a</i> ($\mu\text{g m}^{-2}$)	Prod. Prim. Max. ($\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$)	Prof. (m)
04/02/79	4.5		2.5	5					
22/02/79	5.0		5.5	3					
12/03/79	4.5		7.0	3					
30/03/79	5.0		4.5	3					
17/04/79	5.0	50	5.0	3					
05/05/79	4.5	60	5.0	6		4.0			
23/05/79	4.5	55	5.0	7	24/05/79	5.0	8		
10/06/79	4.5	85	7.0	3		4.5	10		
28/06/79	5.0	80	4.5	3		4.0	9		
17/07/79	5.0	60	5.0	3		4.4	8		
03/08/79	6.0	10	3.0	3		5.0	1		
22/08/79	7.0	12	2.0	3		6.0	1		
09/09/79	7.0	42	4.0	3		5.8	3		
26/09/79	4.5	30	4.0	8	27/09/79	5.0	2	1.5	1
17/10/79	5.0	28	6.0	3	18/10/79	6.0	2	2.0	3
20/11/79	4.2	50	8.0	8	21/11/79	5.5	8	3.0	5
18/12/79	4.0	48	7.0	3	19/12/79	4.5	9	3.0	3
09/01/80	4.2	80	7.0	3	10/01/80	3.8	10	4.0	1
04/02/80	4.0	55	9.0	10	05/02/80	4.0	7		
25/02/80	3.8	53	7.0	10	24/02/80	5.0	6	3.5	5
13/03/80	3.5	60	5.0	5	13/03/80	4.7	10	5.0	1
08/04/80	3.8	42	8.0	5	09/04/80	4.5	6	4.5	5
06/05/80	4.5		9.5	5	06/05/80			6.5	1
Promedio	4.7	50.0	5.7			4.8	6.3	3.7	
± ES	0.2	4.9	0.4			0.2	0.8	0.5	

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-17 – Concentraciones en nitrato, fosfato(en $\mu\text{mol L}^{-1}$) y razón N:P (molar) en 8 estaciones del Lago Menor, como medias de cuatro estaciones (Otoño = abril – junio 1979; Invierno seco = julio – septiembre 1979; Primavera = octubre – diciembre 1979; Verano lluvioso = enero – marzo 1980) (Lazzaro 1981.)

Estaciones	Códigos	NO_3 (mM L^{-1})				PO_4 (mM L^{-1})			
		Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Verano
Chúa	L-C	0.05	0.04	0.02	0.13	0.02	0.05	0.02	0.01
Cojata	L-1	0.07	0.04	0.04	0.12	0.02	0.03	0.01	0.02
Yani	L-2	0.06	0.07	0.02	0.12	0.01	0.04	0.03	0.05
Sukuta	L-3	0.06	0.04	0.07	0.12	0.01	0.04	0.03	0.05
Tarako	L-4	0.04	0.04	0.13	0.12	0	0.04	0.06	0.04
Guaquí	L-5	0.06	0.07	0.06	0.12	0.02	0.03	0.02	0.05
Desaguadero	L-6	0.07	0.04	0.12	0.09	0.04	0.03	0.04	0.04
Yanapata	L-7	0.07	0.09	0.04	0.13	0.02	0.04	0.03	0.05
	Promedio	0.06	0.06	0.06	0.12	0.02	0.04	0.03	0.04
	± ES	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0.01

Tabla B3-17 – (Con't)

Estaciones	Códigos	N:P (razón molar)			
		Otoño	Invierno	Primavera	Verano
Chúa	L-C	2.61	0.9	1.12	13.43
Cojata	L-1	3.73	1.49	2.49	5.97
Yani	L-2	5.97	1.87	0.75	2.39
Sukuta	L-3	5.97	1.12	2.49	2.39
Tarako	L-4	-	1.12	2.24	2.99
Guaquí	L-5	2.99	2.49	2.99	2.39
Desaguadero	L-6	1.87	1.49	2.99	2.24
Yanapata	L-7	3.73	2.24	1.49	2.69
	Promedio	3.84	1.59	2.07	4.31
	± ES	0.6	0.2	0.3	1.37

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-18 – Concentraciones en nitrato, fosfato(en $\mu\text{mol L}^{-1}$) y razón N:P (molar) en ocho estaciones del Lago Menor en junio de 2011 (Lazzaro & Point 2011).

Estaciones	Prof. (m)	Fecha	NO ₃ ($\mu\text{M L}^{-1}$)	PO ₄ ($\mu\text{M L}^{-1}$)	N:P (molar)
L-1	0	23/06/11	0.05	0.12	0.41
L-2	0	21/06/11	0.05	0.11	0.44
L-3	0	21/06/11	0.05	0.09	0.53
L-4	0	21/06/11	0.05	0.13	0.38
L-4	3	21/06/11	0.05	0.12	0.42
L-4	5	21/06/11	0.05	0.11	0.47
L-5	0	22/06/11	0.05	0.14	0.36
L-6	3	22/06/11	0.05	0.12	0.42
L-7	5	22/06/11	0.05	0.09	0.54
L-6	0	22/06/11	0.05	0.10	0.53
L-6	1	22/06/11	0.05	0.09	0.55
L-6	3	22/06/11	0.05	0.08	0.63
L-6	5	22/06/11	0.05	0.07	0.71
L-6	11	22/06/11	0.05	0.06	0.83
L-7	0	22/06/11	0.05	0.07	0.69
L-7	3	22/06/11	0.05	0.07	0.70
L-7	5	22/06/11	0.05	0.06	0.86
L-7	10	22/06/11	0.05	0.07	0.74
L-7	15	22/06/11	0.05	0.05	0.93
L-C	0	23/06/11	0.05	0.09	0.55
L-C	1	23/06/11	0.05	0.12	0.41
L-C	3	23/06/11	0.05	0.15	0.34
L-C	5	23/06/11	0.05	0.08	0.62
L-C	10	23/06/11	0.05	0.13	0.39
L-C	15	23/06/11	0.05	0.16	0.32
L-C	20	23/06/11	0.05	0.14	0.36
L-C	30	23/06/11	0.05	0.16	0.32
L-C	38	23/06/11	0.05	0.42	0.12
Promedio			0.05	0.11	0.52
± ES			0.00	0.01	0.33

B-3 Funcionamiento limnológico y fotobiología del Lago Titicaca

Tabla B3-19 – Síntesis de los rangos de las principales características limnológicas en el Lago Menor del Lago Titicaca: Coeficiente de atenuación de la radiación fotosintéticamente activa (K_d PAR, m^{-1}), profundidad eufótica (Zeu, m), Turbidez (unidad NTU), profundidad de desaparición del Disco de Secchi (m), concentración de clorofila-a (μg Cl-a L^{-1}) en ocho estaciones del Lago Menor en junio de 2011 (Lazzaro & Point 2011).

Estaciones	Códigos	K_d PAR (m^{-1})	Zeu (m)	Turbidez (NTU)	Prof. Secchi (m)	Clorofila-a (μg Cl-a L^{-1})
1-Cojata	L-1	1.65	2.8	6.89	fondo	1.37
2-Yani	L-2	0.85	5.4	0.33	fondo	0.62
3-Sukuta	L-3	0.37	12.6	0.33	fondo	0.57
4-Tarako	L-4	0.25	18.5	0.81	5.2	0.80
5-Guaqui	L-5	0.44	10.5	0.77	fondo	0.66
6-Desaguadero	L-6	0.30	15.2	0.56	4.5	1.40
7-Yanapata	L-7	0.44	10.6	0.63	8.0	4.38
8-Chúa	L-C	0.19	23.6	0.4	9.5	1.00
	Promedio	0.6	12.4	1.3	6.8	1.4
	± ES	0.2	2.4	0.8	0.8	0.4

Tabla B3-20 – Comparación de los coeficientes de atenuación (K_d) y profundidades del 1% de radiación del nivel de superficie (zona eufórica Zeu para PAR, y Z1% para RUV) para las radiaciones UV-B, UV-A y PAR, en el Lago Titicaca (estaciones de Chúa y Huatajata, así como el promedio para el Lago Menor) a partir de los estudios disponibles.

Sources	UV-B	UV-A	PAR
Lazzaro (1981, 1982)			400-700 nm
feb.-mayo 1980			Promedio Lago Menor Kd min-max = 0.22-1.32 m^{-1}
*utilizando la formula de Beer-Lambert	no disponible	No disponible	Chúa Kd min-max = 0.21-0.26 m^{-1} Kd mean = 0.25 m^{-1} Zeu min-max = 15.6-21.0 m Zeu mean = 17.7 m
Villafañe <i>et al.</i> (1999)	280-320 nm	320-400 nm	400-700 nm
sep. 1997	Chúa Kd promedio = 0.66 m^{-1} Z1% = 7.0 m	Chúa Kd promedio = 0.24 m^{-1} Z1% = 19 m	Chúa Kd mean = 0.22 m^{-1} Zeu mean = 20.0 m
Lazzaro (2013)	305, 313 nm	320, 340, 380, 395 nm	412, 400-700 nm
dic. 2012-feb. 2013	Chúa Kd min-max = 1.60-2.00 m^{-1} Z1% min-max = 2.4-2.9 m	Chúa Kd min-max = 0.59-1.44 m^{-1} Z1% = 3.1-6.6 m	Chúa Kd min-max = 0.47-0.48 m^{-1} Zeu min-max = 7.3-11.9 m
*utilizando la formula de Beer-Lambert	Huatajata Kd min-max = 2.03-2.48 m^{-1} Z1% min-max = 2.0-2.4 m	Huatajata Kd min-max = 0.71-1.83 m^{-1} Z1% \geq 2.6 m	Huatajata Kd min-max = 0.40-0.60 m^{-1} Zeu min-max > 4.7 m

Parte C

CONTAMINACIÓN Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

C-1

USO ACTUAL DE RECURSOS ACUÁTICOS Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

EN EL SISTEMA TDP

219

Favianny Lino Pimentel, UMSA-Centro de Postgrado en Ecología y Conservación

Instituto de Ecología, La Paz, Bolivia

Verónica Padilla Callejas, UMSA-Centro de Postgrado en Ecología y Conservación

Instituto de Ecología, La Paz, Bolivia

C-2

CONTAMINACIÓN EN METALES PESADOS EN EL SISTEMA TDP

251

Jorge Quintanilla, UMSA – CEEDI - La Paz, Bolivia

Carlos Peláez Daza, CEEDI - UMSA - La Paz, Bolivia

C-3

CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CADENA TRÓFICA DE LOS LAGOS TITICACA, URU-URU Y POOPÓ

265

Carlos I. Molina, UMSA-IE, La Paz, Bolivia

David Point, IRD-GET & UMSA-UCA, La Paz, Bolivia

C-4

BIOMONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUAS EN EL SISTEMA TDPS

281

Edgar Goitia, UMSS-ULRA, Cochabamba, Bolivia.

Nabor Moya, UNIBOL QUECHUA "Casimiro Huanca", Chimoré, Cochabamba, Bolivia

Thierry Oberdorff, IRD-BOREA y UMSS-ULRA, Cochabamba, Bolivia

C-5

CAUDAL AMBIENTAL: PERSPECTIVAS DE EVALUACIÓN EN EL SISTEMA TDPS

289

Marc Pouilly, IRD-BOREA, Paris, Francia

Carla Ibañez, UMSA-IE. La Paz, Bolivia

Claudia Zepita, UMSA-IE, La Paz, Bolivia

Gastón Aguilera, CONICET-Fundación Miguel Lillo, Tucumán, Argentina

Mario Aguirre, UICN Oficina Regional para Sudamérica, Quito, Ecuador



C-1

USO ACTUAL DE RECURSOS ACUÁTICOS Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL SISTEMA TDP

ACTUAL USE OF AQUATIC RESOURCES AND ECOSYSTEM SERVICES IN THE TDP SYSTEM

Faviany Lino Pimentel, UMSA-Centro de Postgrado en Ecología y Conservación – Instituto de Ecología;
favylino@yahoo.com

Verónica Padilla Callejas, UMSA-Centro de Postgrado en Ecología y Conservación – Instituto de Ecología

RESUMEN

A través de la recopilación y revisión de numerosas referencias bibliográficas, se realizó una síntesis sobre los estudios realizados del uso de los recursos acuáticos (fauna y flora) y los servicios ecosistémicos. Las referencias incluyen diversas fuentes, como publicaciones en revistas internacionales y nacionales, libros, investigaciones académicas, tesis de grado, informes de agencias de cooperación y de entidades gubernamentales, y boletines de difusión general, entre los principales.

Las síntesis contiene una estructura de descripción cronológica sobre los trabajos realizados en recursos pesqueros, actividades piscícolas, el uso de macrófitas y anfibios (*Telmatobius culeus*); definiciones de conceptos de servicios ecosistémicos identificación de otros tipos de servicios contextualizados para el TDPS y las posibles causas que inciden en su deterioro.

En base a la revisión, se evidencia la contribución científica, técnica-operativa generada para el Sistema TDPS, sobre todo para el lago Titicaca. No obstante, aún existen vacíos de información en diversos aspectos y se dedica un acápite para analizar, señalar y hacer conocer estas carencias.

Finalmente, se propone una investigación aplicada de base para realizar un monitoreo de las actividades pesqueras en el sistema TDPS que sirva como un instrumento base para generar información estadística y de uso de los recursos, reduciendo de alguna manera los vacíos de información sobre el tema principalmente para el sector boliviano; y por otro lado, se propone identificar y caracterizar los servicios ecosistémicos que brinda el lago, y realizar un análisis socioambiental de la percepción local sobre los mismos, lo cual permitirá redefinir

conceptos y conocer percepciones de uso de los servicios, identificando un nuevo enfoque para su aprovechamiento.

PALABRAS CLAVE: PESCA, RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS, FUNCIONES ECOSISTÉMICAS, DETERIORO AMBIENTAL.

SUMMARY

Through the collection and review of numerous references, was a synthesis of studies of the use of aquatic resource (flora and fauna) and ecosystem services was performed, from recollection of bibliographic references from various sources, such as international journals publications, books, academic research, thesis, newsletters, reports of international cooperation and government entities, etc.

The document structure includes a chronological description of the references on fish resources, fish farming, use of macrophytes and amphibians (*Telmatobius culeus*); it defines ecosystem services concepts; identifies other contextualized services for TDPS and possible causes that affect its deterioration.

According to the review of the existing literature, clear scientific, operative and technical contributions were generated for the TDPS system, especially for the Lake Titicaca. However, information gaps still exist about various aspects. That's why the document includes a paragraph to identify, analyze and make known these shortcomings.

Finally, we propose a methodology for fishing activities monitoring in the TDPS system, as a basic tool for generating information and reduce information gaps, especially for the Bolivian sector, and on the other we propose a methodology for identify and characterize the ecosystem services provided by the lake, and socio-environmental analysis of local perceptions about them, which will redefine perceptions learn concepts and use of services, identifying a new approach to its use.

KEY WORDS: FISHERIES, HYDROBIOLOGICAL RESOURCES, ECOSYSTEM FUNCTIONS, ENVIRONMENTAL DEGRADATION

C1.1. INTRODUCCIÓN

Los recursos acuáticos se representan por recursos hidrobiológicos e hidrológicos. Para fines presentes, se consideran como hidrobiológicos aquellas especies de peces, anfibios y macrófitas que desarrollan todo o parte de su ciclo vital en el medio acuático, y que cuyo uso y aprovechamiento por parte de las comunidades circunlacustres forma parte de la cultura y economía que caracteriza al sistema TDPS. Por su parte, por servicios ecosistémicos se entiende a los beneficios que recibe la sociedad a partir del funcionamiento de un ecosistema, los más reconocidos son los de provisión, regulación, culturales y de soporte (WRI 2005, Aguirre 2011).

En base a estos conceptos el objetivo del trabajo es revisar la literatura existente sobre ambos

temas, identificar los vacíos de información y proponer una metodología base para realizar un monitoreo de los recursos pesqueros y una investigación para identificar y caracterizar los servicios ecosistémicos que brinda el lago, a partir de la percepción local. Para ello, se ha recopilado información de diversas fuentes: publicaciones en revistas internacionales, libros publicados, investigaciones académicas, tesis de grado, informes de agencias de cooperación y de entidades gubernamentales y boletines de difusión general. A pesar de la extensa bibliografía, se evidencia que existe una cantidad aún mayor que es de acceso limitado a los usuarios.

Debido a la mayor cantidad de referencias sobre el componente pesquero la información se describe de forma cronológica y sintética, indicando el autor, la investigación realizada y en algunos casos las instituciones científicas responsables. Es necesario mencionar que para hacer una cronología desde los primeros estudios realizados se ha recurrido a una publicación especial sobre las referencias bibliográficas realizadas hasta 1985 (IMARPE-UMSA 1985). En los casos en que la literatura recopilada fue menor, como en los componentes sobre el uso y aprovechamiento de macrófitas y anfibios y sobre los servicios ecosistémicos se presenta una descripción más amplia y analítica.

C1.2. EL USO DE LOS RECURSOS PESQUEROS

Como recurso pesquero se definen a todas las especies de peces, tanto nativas como exóticas, que potencialmente se extraen a través de la pesca. La información recopilada sobre la pesca en el lago Titicaca es más extensa en comparación a la del lago Poopó.

C1.2.1. LA PESCA EN EL LAGO TITICACA - ESTUDIOS REALIZADOS

Documentos arqueológicos atestiguan que la importancia de la pesca en lago Titicaca se remonta a la fase inicial de la Cultura Chiripa entre 1 300 – 1 200 aC. (Orlove *et al.* 1991). A partir de este periodo, se evidencia actividad pesquera durante la civilización Tihuanacota e Inca, el imperio español y en el transcurso de los últimos siglos (Le Vieil 1987).

Los estudios científicos en el lago, se iniciaron con los reportes de D'Orbigny en 1826; desde esta época se ejecutaron diversas expediciones, que sirvieron para elaborar los primeros mapas del lago, realizar colecciones científicas (Pentland 1827-1837) y describir a los peces nativos del género *Orestias* (Valenciennes 1839; Cuvier & Valenciennes 1846; Castelnau & Wenddel 1843-1847, Garman 1895). Se elaboraron estudios batimétricos e hidrológicos (Agassiz 1876-1877). Gracias a Créqui-Monfort & Sénéchal de la Grange (1903) y de Percy Sladen (1935-1940), se publicaron trabajos sobre de la fauna acuática (Gilson 1939-1964, Eigenmann & Allen 1942, Tchernavin 1944). Los primeros trabajos sobre pesca, describían su característica artesanal y métodos rústicos, se indicaban las

prácticas tradicionales de procesamiento y conservación (James 1930, Poulter 1935), y las primeras proyecciones sobre la pesca en el futuro (Del Solar 1944).

Entre los años 50 al 70, son pocos los estudios, se reportan los primeros informes sobre el estado de la pesca y su desarrollo en Bolivia (Talf 1954, Terrazas 1966, 1968, 1969), datos sobre la pesca de trucha en Perú (Pena & Córdova 1957, Gavidia & Zapata 1968, Herrera 1969), normas para la pesca en Bolivia (Sanchez 1967) y los primeros acercamientos al sector socio-económico pesquero del Perú (Everet 1967,1968).

En la década del 70, nuevamente se describen las artes de pesca y sus variaciones (Farfan 1974, Kesteven 1974, Hugo 1975, Bustamante & Treviño 1977, Quiróz *et al.*1979), se generan las bases para estadísticas pesqueras en el Perú (Farfán 1974) apoyadas por el Ministerio de Pesquería del Perú (1978). Estimaciones pesqueras a través del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) (Bustamante & Treviño 1975) y el Convenio Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) y la Cooperación francesa (ex-ORSTOM) (Franc *et al.* 1979). Investigaciones académicas sobre aspectos socioeconómicos de la pesca local (Pacori 1976). Se continuaron elaborando diagnósticos de la pesca boliviana (Bejarano & Iporre 1973). Trabajos sobre el potencial y manejo de la trucha (Everet 1973, Shelton & Davies 1974, Landa 1979), y bajo la coordinación de la Dirección Regional de Producción de Puno-DIREPRO (1979) se elaboraron planes de desarrollo para la pesca en el Perú con una visión de promoción y explotación (Zuna & Berger 1978, Zuna *et al.* 1978).

Entre 1980 y 1991, se marca un periodo de gran actividad técnica y científica. Por una parte, bajo el convenio UMSA-ORSTOM, la Organización Latinoamericana de Desarrollo Pesquero (OLDEPESCA), la Corporación Andina de Fomento (CAF) y el IMARPE generaron información sobre la ictiofauna (Lauzanne 1982, Parenti 1984, Loubens & Sarmiento 1985, Sarmiento *et al.* 1987, Loubens & Osorio 1991). Se sentaron las bases para la determinación de la biomasa íctica a través de métodos electroacústicos (Johannesson 1980). Sobre la pesca se describieron las prácticas pesqueras, su importancia social y económica, evaluaciones de capturas y el potencial ictiológico del lago (Callizaya 1980, Northcote 1980, Treviño1980, 1981, 1982, Coutts & Zuna1981, IMARPE 1981, Alfaro 1982, Bustamante 1982a, 1982b, Treviño 1984, Baudoin 1986, Vellard 1991, Orlove *et al.*1991, Treviño *et al.*1991). Otras publicaciones sobre las características sociales, organizativas y uso del espacio, fueron elaborados por Orlove (1986) y Le Vieil & Orlove (1990). Varias de estas investigaciones se recogen en una síntesis del conocimiento limnológico editado por Dejoux & Iltis (1991).

Por otra parte, el Ministerio de la Marina juntamente con la DIREPE llevaba a cabo acciones de ordenamiento pesquero realizando el censo de pescadores y embarcaciones peruanas (Ministerio de la Marina 1980, 1981,1982, DIREPE 1981). Entre 1981 y 1983, el Ministerio de Pesquería del Perú

impulsaba los planes de explotación pesquera y con la colaboración de DIREPRO-Puno se publicaron anuarios y boletines estadísticos (1971-1980).

En Bolivia entre 1987 y 1991, el ex Centro de Desarrollo Pesquero (CDP) en colaboración con la British Overseas Development Administration (CDP-Misión Británica 1991), y bajo el proyecto “ADEPESCA” desarrollaron un *Sistema de Colecta de Estadísticas Pesqueras* basado en encuestas de consumo y comercialización del recurso pesquero en los principales mercados de La Paz, El Alto y Oruro (Couts 1982, 1983, CDP 1992, 1993, 1994, ADEPESCA 1998). Debido a la disolución del CDP, se creó un vacío crítico que hasta la fecha no pudo ser subsanado, por lo cual no existen estadísticas oficiales desde 1995 a la fecha (MACA 2005, FAO 2010).

A partir de 1991, hay una desarticulación de las unidades de investigación y solo se registran iniciativas aisladas cuyos resultados son de acceso restringido. Entre 1995 y 1996 bajo el convenio UMSA-RAMSAR se realizó la actualización de la información íctica del sector boliviano generando información comparativa a la obtenida en 1981 bajo UMSA-ORSTOM (Osorio & Sarmiento 2001). Otras publicaciones son las de Orlove & Schmidt (1995), sobre el comportamiento social de los pescadores de la región peruana y una actualización sobre las técnicas de pesca (Blázquez & Santiago 1999).

Con la creación del Programa Especial del Lago Titicaca (PELT), la Unidad Operativa de la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT) y el IMARPE, entre 1993 y 1997 se desarrollaron nuevos proyectos que incluían a diversos actores sociales dando un enfoque diferente a los estudios convencionales, identificando problemas ambientales y sociales (TPDS 1996, ALT 2005). Por otra parte, en 1995 con la colaboración de la OEA y PNUMA elaboró un estudio de Diagnóstico Ambiental cuyos resultados se utilizaron para formular el Plan de Gestión Ambiental del TDPS (ALT 1999). Todo ello sirvió de base para que en 1998, se firmara un acuerdo entre las Cancillerías de Bolivia y Perú, la (ALT) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para ejecutar del Proyecto “Conservación de la Biodiversidad del TDPS”, incluyendo evaluaciones de la biomasa pesquera (BIC-PELT 2001, ALT 2005).

Entre el 2000 a la fecha, en Bolivia, se ha generado muy poco: investigaciones académicas, sobre evaluaciones socioeconómicas de las pesquerías en localidades puntuales (Laura 2004), evaluaciones del método de pesca con anzuelo (Mamani 2004, Cori 2005) y bases estratégicas para el aprovechamiento sostenible del recurso pesquero basadas en un análisis integrado de las actividades pesqueras y una evaluación de la extracciones a nivel local (Lino 2008). Informes institucionales y material de difusión sobre los recursos pesqueros del lago, elaborados por el Centro de Investigación y Desarrollo Acuícola Boliviano (CIDAB 2002, 2007a, 2007b, 2008, Morales 2002), y un capítulo *in*

extenso sobre la pesca publicado en el libro Geotiticaca PNUMA (2010) basado en revisiones bibliográficas.

Entre el 2009 y 2011, bajo el marco de cooperación FAO, el Ministerio de Desarrollo Agropecuario y Tierras (MDRyT), impulsó el Proyecto “Mejoramiento de la Legislación para la Pesca y Acuicultura en Bolivia”, elaborando un diagnóstico sobre la pesca (a través de talleres participativos y observaciones directas), una estrategia de desarrollo y una propuesta de Ley de Pesca y Acuicultura (FAO 2010). Y por último, recopilando trabajos del II Simposio Internacional del lago Titicaca - Puno (2013), un posible estudio de actualización de la información íctica (Osorio 2013), un análisis de la implementación de un Registro de Pesca local (Lino 2013) y un acercamiento al conocimiento sobre la pesca sobre el manejo de la pesca (Lino 2013).

En el sector Peruano, la información es más extensa y continua, pero al mismo tiempo difícil de acceder. Se sabe que la ALT y el IMARPE continúan impulsando las evaluaciones (ALT 2002, 2004, 2005, 2008, IMARPE 2010). Se estiman abundancias y distribución del recurso pesquero en base a técnicas acústicas (Aliaga & Segura 2013), se registran datos pesqueros provenientes de los desembarques de importancia (ALT 2012, Ninaraqui *et al.* 2013), y se generan análisis sobre la recuperación de los recursos pesqueros, entre otros. La información generada por la Universidad de Puno o la Dirección Regional de la Producción – Puno es aún más restringida.

C1.2.2. LA PESCA EN EL LAGO POOPÓ – ESTUDIOS REALIZADOS

Para el lago Poopó es difícil de realizar una cronología de los estudios realizados, solo se reportan datos pesqueros entre el periodos 1986-1994 obtenidos del sistema de registro pesquero apoyado por la Misión Británica (CDP-Misión Británica 1991, CDP 1992, CDP 1993, CDP1994).

Debido a la severa sequía que azotó a la región en 1992, el lago inició su proceso de sedimentación y salinización, la pesca declino significativamente (MAGDR 2005) y hasta 1998 las proyecciones y estudios de desarrollo pesquero realizados a través de instituciones tanto estatales como de cooperación fueron abandonados (PNUMA 2011).

En función al conflicto ambiental que atraviesa la región, la Universidad Técnica de Oruro, realizó una evaluación ambiental del lago Poopó y sus ríos tributarios, incluyendo la evaluación del recurso pesquero (UTO-MINCO 2007).

En 2009 el Ministerio de Desarrollo Agropecuario y Tierras (MDRyT), juntamente la FAO, elaboraron un Diagnóstico sobre la situación de la pesca en base a observaciones directas y entrevistas a los pescadores para la recopilación de información descriptiva en campo. De este estudio se sabe que el sector pesquero del lago Poopó se ha organizado en una Federación de Cooperativas Pesqueras de

Oruro (FEDECOPEO). Los cuatro sectores se mantienen y realizan una pesca artesanal de pequeña escala que se encuentra diseminada por todo el lago; la producción es sobre todo para autoconsumo y muy poco para el comercio (FAO 2010).

C1.2.3. LA ACTIVIDAD PISCÍCOLA – ESTUDIOS REALIZADOS

Bajo formas de cultivo intensivo y tecnología apropiada, la trucha es la especie que mayor éxito de adaptación ha logrado; y hasta la fecha su cultivo se ha desarrollado de manera artesanal, aunque en sistemas de producción intensiva (ALT 2008).

En la región del Perú la piscicultura se ha establecido de forma magnificada, ya que su fomento al desarrollo y explotación fue apoyada a nivel gubernamental, a través del Decreto Supremo en 1947 (Anónimo 1947). Desde entonces, las investigaciones realizadas apuntaron a su estabilización: estudios biológicos sobre la especie (Herrera 1969) y propuestas para desarrollar la actividad (Vegas 1973), sirvieron para que entre 1977 y 1978 el Ministerio de Pesquería del Perú apoyara las primeras experiencias de cultivo en jaulas (ALT 2008).

Operativamente, desde 1980 se reporta la caracterización de rasgos limnológicos para el cultivo, se instalaron salas de incubación y alevinaje (Ayala 1980), se implementaron proyectos de desarrollo comercial, investigaciones sobre la crianza experimental y aprovechamiento en las bahías de Puno, e inclusive, se analizó la factibilidad para el establecimiento de una planta de alimento balanceado (DIREPE/ORDEPUNO 1980a, 1980b, 1980c, 1980d, SELA 1980, Tusman 1980, Mantilla 1982). Y como consecuencia de la sequía que afectó al sector productivo en Puno, se implementaron modalidades tipo Empresas Comunales (Ministerio de Pesquería 1978, IIDSA 1983).

Durante los últimos años, se sabe que el sector peruano ha logrado mayores resultados productivos y es la Dirección Regional de Producción, la encargada de realizar seguimiento a la actividad y menciona que Puno es considerada como el primer productor de trucha del Perú (DIREPRO-Puno 2007). Actualmente exporta a mercados europeos, estadounidenses y canadienses, comercializa volúmenes considerables a la capital y otras ciudades importantes del sur del país (ALT 2008) y realiza importaciones clandestinas hacia el mercado boliviano (FAO 2010). Los mayores centros de producción se ubican en los distritos de Chucuito, Juli, Pomata, Huancané, Moho y las lagunas de Arapa y Lagunillas.

En comparación, Bolivia tiene una actividad insípida. Y a pesar de la realización de diagnósticos de situación apoyados por el Ministerio de Economía (Sanches 1941, Matsui 1961), su verdadero impulso fue gracias a la Cooperación Japonesa (JICA), a través del establecimiento del ex Centro de Investigación y Desarrollo Piscícola del Altiplano (CIDPA), actualmente, Centro de Investigación y

Desarrollo Acuícola Boliviano (CIDAB). Durante 19 años, el CIDPA (1988-2007) difundió el cultivo de la trucha a través de asistencia técnica, cursos de capacitación y realización de diversas investigaciones supervisadas por expertos en el tema de reproducción artificial (CIDAB 2007); y bajo un enfoque de piscicultura con fines de repoblamiento, se realizaron experimentaciones con especies nativas.

De todo este paquete investigativo, también resultaron las tesis académicas de Aparicio (1993), Arias (1996), Espinoza (1999), Calcina (2001), Rivera (2002), Tarqui (2002), Blaz (2003), Daza (2003), Buitrón (2005), Polo (2005), Poma (2005), Terrazas (2005), Castaño (2004), Loayza (2009), Flores (2010) y Alcón (2013) y la tesis de Cardozo (1997) sobre el tema de experimentación y alternativas alimenticias para el cultivo de truchas.

Actualmente, el CIDAB se dedica a la extensión de la actividad a través del apoyo de proyectos productivos del cultivo de truchas en estanques, jaulas y lagunas, pero la información que genera en investigación es muy escasa en comparación a años anteriores. Solo se puede acceder a informes sobre proyectos productivos ejecutados o de sus planes operativos anuales (CIDAB 2007, 2009).

Otras entidades como la UMSA-ORSTOM, UMSA-IMARPE, OLDEPESCA, Misión Británica-CDP, la Corporación Andina de Fomento (CAF), Comunidad Europea, AECI, PNUD, ALT, CORDECO, Swiss Contact, también invirtieron recursos económicos para lograr establecer la actividad; la mayoría, dirigidos a capacitación, equipamiento, transferencia de tecnología y generación de alternativas económicas (ALT 2004, ALT 2008, FAO 2010), sin embargo esta información es de acceso limitado por ser proyectos de desarrollo económico para los productores.

Respecto a los servicios técnicos para la piscicultura

La información que existe proviene principalmente de la DIREPRO-Puno, del CIDAB, y de proyectos de cooperación para la extensión de la actividad.

Suministro de semilla. La DIREPRO-Puno reporta información sobre importaciones de ovas para la producción de alevinos, p.e. se sabe que en 2008 importaron 35 mil ovas (DIREPRO-Puno 2007). A través de la Resolución Ministerial (226-99-PE) se obliga a entregar certificados de desinfección emitidos por las DIREPRO que garantizan procedimientos establecidos a fin de minimizar la introducción de agentes infectocontagiosos (ALT 2008). En Bolivia, bajo el proyecto ADEPESCA, Angel (1998) indicaba que la semilla de trucha provenía de Perú, Estados Unidos, Italia y/o Chile, pero actualmente, el CIDAB reporta la mayor producción de ovas y alevines (250-300 mil alevines/año); y a pesar de existir criaderos artesanales (CIDAB 2007, 2009, FAO 2010), estas cantidades no se comparan a la actividad en Puno.

Suministro de alimento. La ALT (2008) menciona que aunque hay un número cada vez mayor de productores peruanos emplean alimento balanceado (Nicovita, Tomasino, Purina), sigue siendo un *cuello de botella*. Para Bolivia la situación es más complicada, ya que los insumos (harina de pescado o alimento peletizado o extruido) son importados de Perú o Chile a precios elevados. Las únicas plantas de elaboración de alimento (pienso) para trucha se encuentran en el CIDAB, y otra en Jinchaca apoyada por la ALT (ALT 2008).

Debido al alto costo del alimento balanceado, los productores optan por elaborar sus propias recetas. Durante las primeras fases de crecimiento de la trucha, recurren al aprovechamiento del ispi (*O. ispi*) y carachis juveniles (*O. agassii*, *O. olivaceus*) (ALT 2008). Y aunque no se encontraron reportes sobre la tasa de conversión bajo este sistema de forraje, Lino (2008), indicaba que la cantidad de alimento podría variar entre 10 a 13 k/día por jaula, lo cual pone en riesgo a las especies nativas y al equilibrio en la cadena alimentaria.

C1.3. USO DE OTROS RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS

C1.3.1. APROVECHAMIENTO DE MACRÓFITAS – ESTUDIOS REALIZADOS

Las macrófitas son de gran importancia para las comunidades ribereñas y en función a las cualidades de cada sección de las plantas y de su estado de desarrollo se aprovechan de diversas formas: como alimento para animales, material artesanal (para la fabricación de botes, techos y otros), fertilizantes para la agricultura, alimento humano (principalmente la raíz o S'aqa y la parte sumergida del tallo denominado Chullo, que contienen alto porcentaje de yodo), como medicina (la raíz para curar tumores, el tallo para borrar cicatrices de la piel y curar heridas, y la flor para aliviar dolores la gripe) (Le Vieil & Orlove 1991, Lescano 2001). Los habitantes ribereños reconocen 5 grupos de macrófitas con fines de uso: el Llachu, la Totorá verde, Totorá amarilla, S'aqa o Sipi (rizoma de totora) y el Chullo (base blanca de los tallos).

Desde años pasados los usos tradicionales no han variado significativamente, pero es posible que su aprovechamiento se haya reducido. Hasta la aparición de los botes de madera, las balsas construidas con totora eran el único medio de transporte acuático en el lago, a la fecha son contadas las que pueden observarse.

A pesar de la evidente importancia, se ha podido recopilar pocos trabajos sobre su uso, ya que la mayoría se refiere a diversidad y ecología de las especies. Durante los años 70 y 80, Griffin (1971) reporta aspectos del cultivo tecnológico en laboratorio de las Charophyceas; en la región de Puno,

Gavancho (1975) mencionaba que el 91,2 % de los Urus aprovechaban la totora para usos artesanales, estimando la cantidad extraída en 2 000 t (Levieil & Olove 1991). Collot (1980) estimó el consumo diario de totora verde por cabeza de ganado e indicaba que en el lago Menor era considerablemente bajo frente a la producción neta que podría permitir el medio en términos teóricos; respecto a ello, Le Vieil & Gonzueta (1984) estimaron la extracción en más de 50 000 t en la Bahía de Puno. En 1982, Salm & Arze reportaron las primeras experiencias con totora (*Schoenoplectus tatora*) como purificadoras de aguas contaminadas.

Hasta 1991, gracias a los estudios realizados bajo el convenio UMSA-ORSTOM-IMARPE (1980), Le Vieil & Orlove (1991) indicaban que no se había generado información cuantitativa del recurso, su importancia socio-económica y la diversificación de sus usos.

A partir del 2000, a nivel académico se han presentado pocas tesis. Monasterios (2002) y Chuquimia (2004) reportan evaluaciones de las técnicas de plantación en diversos ambientes, Loza (2002) analiza los patrones de distribución espacio temporal en el lago Titicaca, Aguilar (2003) experimenta la germinación *in vitro* e incubación hormonal para la micro-propagación, y Ninaja (2007) evalúa el uso de la lenteja y la totora como bioindicadoras de contaminación con Zn, Mn y Cd.

En el II Simposio Internacional de lago Titicaca (2013), solo se presenta el trabajo de investigación académica de Vargas (2013) que hace referencia al uso de totora y lenteja de agua como bioindicadores de contaminación con Zn y Cd, alcanzando niveles de 24mg kg^{-1} y 0.76mg kg^{-1} que exceden límites permisibles internacionales.

C1.3.2. APROVECHAMIENTO DE LA RANA GIGANTE – ESTUDIOS REALIZADOS

Los trabajos publicados son antiguos y esporádicos, según Vellard (1991), *Telmatobius culeus* siempre ha tenido un papel importante entre las poblaciones indígenas, ya que se aprovecha con fines medicinales, forma parte de rituales ancestrales y es considerado un animal sagrado asociado a la lluvia. Vellard (1991) indicaba que en tiempo de sequía, los comunarios de la Isla del Sol abandonaban una o dos ranas en jarrones angostos, plantados en la cima de alguna montaña, al “llorar” las ranas llamaban a la lluvia para hacer desbordar el jarrón y permitirles volver al lago. A pesar de que estas prácticas desaparecen paulatinamente aún se realizan solamente por personas ancianas que aún mantienen sus creencias aymaras (Montaño 2004).

Según Vellar (1991), los primeros estudios sobre la rana del lago Titicaca se inician con Agassiz, Orton y las publicaciones de Cope & Garman en 1875 y 1877; se menciona que en 1920 Barbour & Noble hacen una primera revisión del género *Telmatobius* y que a partir de 1940 – 1950 se recogieron

importantes datos durante la expedición Percy Sladen y las dificultades para trabajar con esta especie. Se tienen algunos reportes sobre sus descripciones y biodiversidad (ver Cap. B2), pero sobre su uso y aprovechamiento son limitados.

Telmatobius presenta características particulares que permiten su aprovechamiento integral, al respecto, se sabía que los especímenes más grandes servían para preparar un caldo útil en caso de anemia, tuberculosis, inflamación y fiebre, se elaboraban medicamentos caseros para la esterilidad femenina; en el sector peruano se realizaban licuados tradicionales como afrodisíaco (Vellard 1991, Ruíz *et al.* 2004). Años más tarde ingresó como una alternativa alimenticia, varias familias accedieron a la carne de rana para variar su dieta, aunque su consumo era ocasional siendo más frecuente la comercialización de ancas de rana como un plato exótico para turistas nacionales y extranjeros.

En el sector boliviano, hasta 1996 se podía observar la oferta de platos gastronómicos en sectores de turismo (Batallas, Huarina, Huatajata, Compi, San Pablo y San Pedro de Tiquina, Copacabana, Isla del Sol) (Ruíz *et al.* 2004). Otro tipo de aprovechamiento estaba relacionado al curtido de su piel para la fabricación artesanal, muy cotizada en el mercado exterior (Pacheco 2000), aunque solamente quedó en prácticas experimentales.

A la fecha, continúan siendo escasos o de limitado acceso para su revisión. Solo se cuenta aquellos reportes referidos a investigaciones académicas sobre rasgos alimenticios (Pérez 1998, Catari 2002), y otros referidos a proyectos de conservación ya que se estima que sus poblaciones habrían reducido significativamente (Pérez 2001, MAyA 2009), y al aprovechamiento como alternativa de ingresos económicos para algunas comunidades (Pacheco 2000, Montaña 2004, Ruíz 2004, Álvarez 2006).

Al 2013, se reporta un proyecto dirigido por el Museo de Historia Natural Alcides d'Orbigny (Bolivia) para su conservación y posibles alternativas económicas a través del uso de su imagen como especie amenazada (Céspedes 2013).

C1.4. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL TDP

En la década del 80, se sentaron las primeras bases para considerar la importancia de las funciones ecosistémicas para el sustento de la vida, y que directa o indirectamente contribuirían al bienestar humano. Así, estas funciones se constituirían en *servicios*, adquiriendo un valor económico, p.e. Costanza *et al.* (1997) estimó el valor de la biosfera con un rango de 16 - 54 trillones al año, superior en comparación con el PIB total mundial de 18 trillones al año.

Hasta el 2001 los modelos de desarrollo, aún consideraban a los servicios ambientales como bienes gratuitos ignorando los efectos sociales y ambientales del crecimiento económico (CIRMA - CEDAFOR 2001). Otros autores generaron nuevos conceptos que definen a los servicios ecosistémicos como beneficios que recibe la sociedad a partir del funcionamiento de los ecosistemas y clasificaron cuatro: servicios de **provisión** (alimento, hábitat y refugio para la biodiversidad, agua para consumo humano, animal y riego, medicina, entre otros), de **regulación** (autopurificación del agua, regulación térmica y del ciclo hidrológico, vectores de enfermedades, erosión de suelos), **culturales** (conocimiento tradicional, usos, espiritualidad, recreación, esparcimiento, entre otros) y servicios de **soporte**, referidos a la funcionalidad del ambiente para la producción de los otros servicios (productividad primaria, fertilidad y formación del suelo, la fotosíntesis) (WRI 2005, Balvanera & Cotler 2009, Aguirre 2011, PNUMA 2011). Al margen de ello, existe un “*valor de existencia*” que consiste en la valoración de los mismos por el solo hecho de existir, independientemente del uso que pudiera darse a los bienes y servicios que proveen (WRI 2005, Aguirre 2011).

Bajo este enfoque, Huanca (2010) menciona que las funciones ecosistémicas existirían independientemente de su uso, demanda, disfrute o valoración social, traduciéndose en servicios solo cuando son usados, de forma consciente o inconsciente por la población. Por tanto, ya no se consideraría al lago Titicaca como un simple proveedor de recursos pesqueros o turísticos, sino como un capital natural capaz de suministrar un flujo variado de servicios, visibilizando el potencial de los ecosistemas para generar bienestar humano, más allá de lo que tradicionalmente se conocía como recursos naturales o bienes.

Aplicando este argumento, y recurriendo a la clasificación de WRI (2005), Balvanera & Cotler (2009) y Aguirre (2011) se plantea que el TDPS brindaría diversos servicios considerando las cuatro categorías (Tabla B1-1).

C1.4.1. DETERIORO DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL TDP

En la publicación de PNUMA (2011), se menciona como impactos hacia los servicios ecosistémicos: el cambio del uso de suelo, impactos en los recursos hidrobiológicos, pérdida de áreas naturales y bofedales, residuos sólidos y el avance de la basura, contaminación de cuerpos de agua, degradación de suelos y contaminación atmosférica, y los impactos sobre el bienestar humano como la salud humana, relaciones sociales y conflictos ambientales, entre los principales (UICN 2000, Aguirre 2011, Molina *et al.* 2012).

Tabla C1-1- Servicios ecosistémicos del lago Titicaca.

Servicio de Provisión	Servicio de Regulación	Servicio Cultural	Servicio de Soporte
Alimento (humano, animal)	Regulación térmica	Conocimiento tradicional	Producción primaria
Hábitat	Ciclo hidrológico	Espiritualidad	Formación y fertilidad del Suelo
Agua para consumo (humano, animal, riego)	Autopurificación	Recreación o esparcimiento - Paisaje	Fotosíntesis
Medicinal	Vectores de enfermedades	Educacional	
Biodiversidad	Erosión de suelo		

Fuente : Elaboración propia basado en Huanca (2010)

A la fecha, la biodiversidad del lago se encuentra amenazada. Se evidencia la desaparición del umanto (*Orestias cuvieri*) y peces como la boga (*O. pentlandii*), el suche (*T. rivulatus*) entre otros, se encuentran amenazados o en peligro de extinción (Ergueta & Morales 1996, Sarmiento & Barrera 1996, ALT/OEA/PNUMA 1999, Sarmiento & Barrera 2003, Abell *et al.* 2008, Van Damme *et al.* 2009). Como posibles causas, Lino (2008) identifica a la sobrepesca, competencia interespecífica, reducción de totorales (áreas de desove, alimentación y refugio), características intrínsecas de las especies y variaciones climáticas.

Entre otras especies, como el zambullidor o Q'ëñola (*Rollandia microptera*) y las pariwanas (*Phoenicoparrus jamesi* y *Phoenicoparrus andinus*) se registran en Peligro y Vulnerables (Rocha *et al.* 2003). Otras como la choq'a (*Fulica ardesiaca*), el tiquicho (*Gallinula chloropus*), el pato pana (*Anas ferruginea*), *Anas puna*, *Anas geórgica*, el mijis (*Phalacrocorax brasilianus*) y pariwanas (*Phoenicopterus chilensis*) son susceptibles de caza con fines alimenticios como medicinales, culturales y de turismo. (ALT 1999, Rocha *et al.* 2003, PNUMA 2011; Borjoquez 2013, Mamani *et al.* 2013, Richard 2013).

La pérdida de áreas naturales y totorales se considera moderadamente elevada en el Sistema TDPS, identificando a las actividades extractivas como fuente de combustión y la deforestación como causas principales (Vacher *et al.* 1991). Al respecto, en el Perú FAO-INRENA (2005) contaban con datos cronológicos de superficies deforestadas para los años 1975 (450.189 ha), 1990 (421.574 ha), 1995 (412.000 ha), 2000 (332.996 ha) y 2005 (309.557 ha). Así mismo, entre otras causas el PELT (1998) reportó la extracción de 3 650 kg/año de fardos de thola, como equivalente a una tasa de deforestación de una hectárea anual y la quema de 1 476,45 ha de totorales en áreas ribereñas del lago, durante la época de invierno del año 2009 (PNUMA 2011).

La calidad de los cuerpos de agua, puede deteriorarse, ya sea por actividades antrópicas en los ecosistemas acuáticos y sistemas terrestres, como por la contaminación del suelo, aire y el agua

(Postel & Carpenter 1997; Millennium Ecosystem Assessment 2005). Estudios recientes para el TDPS, identifican a la bahía interior de Puno, el río Torococha y el curso inferior del río Coata (Perú) y a la bahía Cohana, el río Pallina, Río Seco y Katari (Bolivia) como las áreas más contaminadas orgánica y bacteriológicamente por aguas servidas (PNUMA 2011). Sin embargo, estudios realizados en zonas mineras, señalan la presencia de sedimentos metalúrgicos en ríos utilizados para el desove y desarrollo de alevines (truchas), en la Rinconada, Ananea y cuencas altas del sistema Ramis/Huancané, registrando 0,4 ppm de Hg en individuos de pejerrey en la bahía de Puno – Perú. De igual manera, la presencia de compuestos tóxicos y residuos minero-metalúrgicos en aguas superficiales en la región de Oruro, río Desaguadero y cuenca del lago Poopó – Bolivia, presentan concentraciones muy altas de plomo, cobre, cromo, estroncio, zinc y estaño en el pejerrey del lago Poopó (PNUMA 1996). Bajo estos parámetros la contaminación tendría una incidencia en la cadena trófica del TDPS.

Entre el 2002 y 2007, se identifican trece áreas severamente degradadas con contenidos de sulfatos, amonio, As-Hg en sedimentos y Zn en zonas aledañas al lago Titicaca. El 2007, muestreos e inspecciones evidenciaron procesos de eutrofización del lago por la presencia de sustancias químicas y orgánicas contaminantes (PROINTEC 2002, Mendoza 2007).

La calidad de los suelos de la región, se ve afectada por la salinización/alcalinización de la cuenca media y baja del Desaguadero y la región de Oruro. El sobrepastoreo, disminución de los períodos de descanso de las tierras agrícolas de 5-7 a 3-4 años y el uso inadecuado de maquinaria agrícola en suelos tan frágiles, son algunas causas que aceleran su proceso de desertización (Orsag 2009). Como consecuencia, la contaminación con metales pesados, erosión hídrica y eólica, evaporación, compactación de suelos y la siembra en surcos en sentido de la pendiente, provocan la pérdida de la cobertura vegetal con un promedio anual de 1 600 km² (PNUMA 2011).

Los residuos sólidos también pueden generar una contaminación. En el Perú van de 0,2 a 0,4 kg per cápita día en zonas rurales, y de 0,280 a 0,32 kg para zonas urbanas. En el caso de Bolivia, estos promedios bajan entre 0,05 y 0,26 kg (PNUMA 2011). Para las principales ciudades ribereñas del lago Titicaca se registró un rango de 103 000 a 116 000 t de residuos al año (INE 2005).

Además, la región presenta fenómenos atmosféricos agudizados por el cambio climático como heladas, tormentas, inundaciones, granizos, y las precipitaciones pluviales concentradas en menor tiempo, afectando el abastecimiento de agua (Molina *et al.* 2012).

C1.5. VACIOS DE INFORMACIÓN

Basados en la literatura existente, es evidente la extensa actividad científica, técnica-operativa que se ha realizado en el Sistema TDP, sobre todo en el lago Titicaca. Sin embargo, es posible identificar que aún existen vacíos de información puntuales, como en el caso de las pesquerías, y también vacíos referidos al uso y aprovechamiento de macrófitas, anfibios y respecto a los servicios ecosistémicos. En algunos casos, estos vacíos se observan por periodos temporales, otros por la calidad de la información y también por las necesidades actuales, todo ello contextualizado en el Sistema TDPS.

C1.5.1. LA PESCA EN LOS LAGOS TITICACA Y POOPÓ

A pesar de todos los esfuerzos, aún la actividad pesquera en el TDP es incierta. Posiblemente algunas razones se relacionen a las particularidades del TDP: la variabilidad ambiental y socio-económica entre los ecosistemas acuáticos (Titicaca, Poopó), y las condiciones geopolíticas, políticas, administrativas, económicas entre Bolivia y Perú, la calidad de la información, la continuidad y el apoyo institucional o de cooperación.

En el sector boliviano, el principal vacío es el apoyo político-institucional al sector, originado por un marco jurídico insuficiente, que no otorga seguridad legal a los usuarios (públicos, sociales y privados) involucrados, y a lo largo del tiempo se ha ido generando y acentuándose un paulatino abandono que no permite administrar adecuadamente las actividades. En consecuencia, no permite identificar la dinámica pesquera, sus impactos, ni la promoción de consumo de pescado que debería orientarse a contribuir a la soberanía y seguridad alimentaria de los bolivianos, considerando los bajos niveles de consumo per cápita del país mencionados por la FAO (2010) de 1,62 kg por habitante por año.

A la falta de estadísticas pesqueras oficiales entre los periodos 1995 - 2012 se desconoce el efecto de la actividad a nivel socio-económico y ambiental; y a pesar de que, las evaluaciones pesqueras (ya sean científicas y/o participativas) y que los mismos pescadores han identificado una clara reducción del recurso que ingresó a un ciclo de agotamiento como consecuencias de su propia explotación, aún no se aplica un marco normativo.

En cuanto a las estimaciones de los volúmenes extraídos, Perú genera información constante y consolidada gracias a la presencia de la DIREPRO-PUNO, sin embargo, los datos provienen de registros de comercialización que no incluyen capturas locales, por tanto se desconoce la importancia de la pesca de subsistencia y comercial a menor escala. Adicionalmente, la diferencia de

metodologías utilizadas no permiten realizar una comparación entre datos de periodos anteriores con las estimaciones actuales, generando vacíos sobre metodologías estandarizadas y comparables en el tiempo y espacio que sirvan para obtener información sobre capturas por unidad de esfuerzo, tallas de captura, áreas de pesca, variaciones estacionales de la pesca, estimaciones sobre volúmenes extraídos o composición de las capturas.

Sobre la estimación de biomasa íctica total del lago Titicaca reportada por el IMARPE, indican una tendencia decreciente para cada una de las especies de interés comercial (ispi, pejerrey, trucha y carachi); en 1985 se reportaron 91 000 t, reduciéndose a 70 660 t en 2008 (ALT 2005, PNUMA 2011, ALT 2012). Sin embargo, estas estimaciones no incluyen las poblaciones pesqueras de la zona litoral debido al difícil acceso para este tipo de evaluaciones, por ello, los datos deben ser tomados con precaución. Esto indica otro vacío de metodologías para estimar la biomasa en zonas litorales.

Respecto al Poopó, aún los vacíos son más acentuados, puesto que la información es limitada. Datos publicados por el CDP (1993,1994) indicaban que su producción pesquera era mayor a la del lago Titicaca (p.e. un máximo de 3.108 t en 1990). Sin embargo, hacia 1992 se presentó una reducción del 83% (543 t). Las causas se atribuyen a la fuerte sequía que azotó la región, al aumento de niveles salinos y metales pesados en las aguas y ríos que alimentan el lago (ADEDESCA 1998). Datos posteriores a estos años son desconocidos, lo cual lo convierte en un ecosistema potencial para el desarrollo de investigaciones básicas y aplicadas en el tema. Y debido al problema ambiental que también se refleja en un impacto social, hace falta el diseño de políticas para fortalecer las organizaciones y dar una alternativa de producción a las familias pesqueras Urus Muratos, ya que afecta directamente a su seguridad alimentaria y pérdida cultural.

Sobre los aspectos socio-económico-culturales, la actividad pesquera siempre ha sido ejercida por grupos étnicos característicos de la región altiplánica con un fuerte arraigo de conocimientos logrados con la experiencia de vida. Esta riqueza de conocimientos pesqueros no está siendo aprovechada, ya que la mayoría de las investigaciones científicas no incluye la participación activa del sector. Esto indica un vacío en el diseño de estrategias de intercambio de conocimientos locales y académicos que sirvan para definir estrategias de gestión contextualizadas bajo la realidad pesquera en diferentes sectores.

Por último, es necesario enfocar un escenario presente para predecir el rumbo que tomará la actividad pesquera, por ello surge la necesidad de seguir generando información, incluir el saber local en futuras evaluaciones y seguir un proceso de análisis de las mismas que identifique las líneas para una gestión adecuada del recurso pesquero, tanto a nivel nacional, como binacional.

C1.5.2. VACÍOS DE INFORMACIÓN ACTIVIDADES PISCÍCOLAS

Al margen de encontrar vacíos de información, es posible identificar obstáculos a vencer para llevar a cabo un desarrollo ordenado de la piscicultura. En Bolivia, el mayor obstáculo es la inexistencia de un marco normativo bajo el cual se administren las actividades de forma responsable. No existe un sistema de información que permita evaluar las dimensiones de producción y solo se cuenta con estimaciones basadas en encuestas aisladas que deben utilizarse con precaución.

Tampoco existe, información para poder definir cuáles son los sistemas de producción de mayor uso, sus características, ventajas y consecuencias. Se desconoce el área total de producción, y aunque los sistemas de mayor uso son jaulas flotantes, se desconoce la importancia del uso de estanques construidos de concreto o tierra que se establecen en cabeceras de río o vertientes (CIDAB 2002, 2007).

De manera generalizada, los emprendimientos, no cuentan con la obtención de autorizaciones, registros o licencias exigidas por las leyes aplicables (licencia ambiental, sanidad e higiene, etc.), por lo que la actividad se ejerce sin control o seguimiento a su implementación, producción y/o comercialización de insumos y/o productos, lo cual se convierte en un problema ya que la actividad crece de forma desordenada. Adicionalmente, existe un desconocimiento técnico (almacenamiento de alimentos, manejo y mantenimiento de jaulas, clasificación de peces por tallas, contaminación orgánica de los fondos bajo las jaulas de engorde), débil organización, reducida inversión, alto costo de producción y reducido ámbito de mercados para una óptima comercialización y la falta de capacitación en todos los aspectos señalados.

En la región del Perú las condiciones son diferentes, y debido a su mayor desarrollo se generan efectos sobre el ambiente acuático que hasta la fecha no han sido evaluados, p.e. el aprovechamiento de ispi en las fases de alimentación y la tasa de conversión bajo este sistema; aunque algunos mencionan que la calidad de la carne es baja y que desacredita su comercio, aun no ha sido verificado. Se desconoce si existen enfermedades patógenas introducidas y sus efectos a la fauna íctica. El grado de aporte de los desechos a la sedimentación del lago, o cuánto tiempo podría cultivarse en un determinado lugar sin que las condiciones del entorno próximo sean afectadas y/o afecten a la misma producción.

Finalmente, el aprovechamiento de la actividad requiere de la revisión de estrategias y políticas, con base en las experiencias anteriores y una planificación en relación a diversos factores de producción y la generación de alternativas mediante la investigación.

C1.5.3. APROVECHAMIENTO DE MACRÓFITAS

Pese al valor que representa el recurso, los estudios sobre cuantificación del aprovechamiento están desactualizados, esto imposibilita determinar volúmenes extraídos, el estado de sus poblaciones. La magnitud de las reducciones en el tiempo y espacio, la capacidad de regeneración en diversas condiciones de contaminación, sequía, inundación y aprovechamiento local. No se reportan estudios a través de imágenes satelitales que evalúen la cobertura en diversas regiones. Hace falta identificar y evaluar su contribución a la productividad primaria y como refugio y desarrollo de la fauna acuática.

Entre otros, identificar las causas que afectan las poblaciones y el impacto de su reducción sobre el funcionamiento acuático. Estudios de restauración identificando metodologías adecuadas y de fácil aplicación para su propagación. Y adicionalmente, actualizar la importancia socio-económica, sus diferentes usos actuales y su contribución a la economía local.

C1.5.4. APROVECHAMIENTO DE LA RANA

Basados en la escasa bibliografía los vacíos de información son mayores. Resulta necesario incrementar el conocimiento ecológico y biológico de la especie: su importancia en el funcionamiento ecológico, estrategias de vida, dinámica poblacional, causas naturales y/o antrópicas que contribuyan a la reducción de sus poblaciones. Estudios sobre su adaptación a diversos niveles de cambios en las condiciones controladas podrían servir para establecer el grado de adaptabilidad y tolerancia a las variaciones ambientales naturales.

Establecer si la actividad pesquera es la responsable de la reducción de las poblaciones, caracterizar el uso tradicional o las condiciones climáticas y actualizar los estudios sobre la importancia socio-económica cultural y sus diferentes usos actuales.

C1.5.5. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Entre los servicios que se aprovechan, y que no se les ha dado una importancia se tiene p.e. la interacción dinámica entre las sociedades humanas y los ecosistemas, los saberes ancestrales, la espiritualidad, aspectos recreativos, educacionales. Se puede mencionar las interacciones bióticas para la provisión de algunos servicios, como los de regulación de plagas, regulación de vectores de enfermedades, regulación de la polinización o regulación de las especies invasoras. Así mismo, la regulación de la respuesta a eventos naturales extremos dependiendo de las características físicas y bióticas.

Por otro lado, si bien se incursionan estudios de valoración económica, como el uso de la tola y

disponibilidad de pago para su conservación en el Sistema TDPS (Mena & Molina 2013), hace falta documentar experiencias y establecer líneas base sobre valoración económica contemplando las externalidades ambientales, lo cual permitiría nuevos ingresos económicos, y al mismo tiempo el fortalecimiento del conocimiento científico y la valoración de la cosmovisión de las culturas que habitan en la región. También es importante identificar actores sociales e institucionales corresponsales en la degradación de los servicios ecosistémicos, con compromiso para guiar la intervención de instancias públicas a fin de coordinar procesos, formular planes integrales e intervención de todas las instancias con competencias sobre el área, y formular políticas para canalizar el esfuerzo conjunto y compartido de todos los actores involucrados.

Por otra parte, a partir del enfoque de Huanca (2010), hace falta analizar, incidir e identificar las posibles causas que estarían degradando cada uno de los servicios ecosistémicos del TPDS; p.e. en el caso de los **servicios de provisión**, el impacto hacia la alimentación humana, podría reflejarse en una reducción o pérdida del alimento causado por la sobrepesca, contaminación, salinización, introducción de especies, sedimentación, eutrofización y/o vertidos químicos.

Para el caso de los **servicios de regulación**, el cambio climático (retroceso glaciar), sedimentación, deforestación excesiva y degradación de suelos podrían ejercer influencia y alterar la regulación térmica. Para los **culturales**, la pérdida paulatina del conocimiento ancestral y uso tradicional de los recursos acuáticos, podría verse alterado por la influencia externa, diversificación de actividades, degradación del entorno, introducción de nuevos saberes, prácticas actuales y migración. En los de **soporte**, la reducción o alteración de la producción primaria, podría deberse a la contaminación, sedimentación, salinización, eutrofización y cambios climáticos.

Si bien existen estudios que hacen referencia puntual a algunos servicios como la provisión de alimentos obtenidos de la pesca (Wood *et al.* 2005, CDP 1992-1994), suministro de agua para riego (FAO-UNESCO 1973, Gumiel 1991, Flores 1994, citado por ZONISIG 1998), fertilidad del suelo (PROINTEC 2002, PNUMA 1996), hábitat y refugio para la biodiversidad en los bosques de *Polylepis besseri* ssp. *incarum* (Fjeldsa & Kessler 1996, Padilla 2005). También es importante considerar, que para el funcionamiento de un ecosistema específico, en algunos casos se generan servicios que a su vez interactúan entre ellos (Shvidenko *et al.* 2005), como en bosques y bofedales donde intervienen servicios de regulación de la erosión, ciclo hidrológico, regulación térmica, el mantenimiento de la biodiversidad, la provisión de una amplia gama de recursos para la subsistencia de comunidades rurales e indígenas, así como la protección de patrimonios naturales y culturales, y oportunidades recreativas.

Adicionalmente, si bien los servicios ecosistémicos se definen como beneficiosos para la sociedad, hace falta un análisis sobre la ocurrencia de servicios que generen perjuicios o se transformen en impactos.

En este último caso, sería importante identificar qué tipo de actividades hacen uso de los servicios, p.e. el turismo en el lago atrae visitantes tanto nacionales como extranjeros los cuales de manera directa se benefician del paisaje y de manera indirecta de otros como el hábitat, el conocimiento tradicional, la espiritualidad, alimento y agua, u otros. El uso del paisaje *per se*, podría incidir positivamente en la generación de recursos económicos para numerosas comunidades ribereñas, sin embargo, también podría tener una incidencia negativa en la valoración del servicio ecosistémico (de provisión, regulación, cultural o soporte) a causa del impacto generado por el turismo y/o la modificación del paisaje como servicio (p.e. construcción de nueva infraestructura, servicios básicos, caminos, uso de la biodiversidad y mezcla de culturas, u otros).

C1.6. PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN

C1.6.1. ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA DE REGISTRO PESQUERO A NIVEL LOCAL

El sistema de registro de pesca es una herramienta utilizada para planificar el uso de los recursos pesqueros. En base a ciertas variables intenta recoger información que permita conocer la dinámica de la actividad pesquera y su importancia. Al incorporar actores locales se convierte en una estrategia que permite el involucramiento social de los directos usuarios en actividades de evaluación y estimación del los recursos pesqueros.

Se deben definir *variables a registrarse* en el tiempo y que no sean complicadas para los pescadores: Tecnología de pesca (tipo del arte utilizado, características del artes), tiempo invertido, zonas de pesca, especies y tallas, peso o cuantificación del recurso. Se deben establecer bases: frecuencia y tiempo de registro. Entre algunas actividades a realizar para la implementación del sistema de registro podrían mencionarse:

- Cursos de capacitación para el reconocimiento de las variables, la importancia de su registro y la estandarización ajustándolas a metodologías comparables.
- Análisis de su aplicación piloto para identificar la posibilidad de convertirse en una herramienta que permita tomar decisiones conjuntas.
- Sistematización y análisis de datos para generar estadísticas y datos pesqueros (estudio de cantidad de pesca y captura por unidad de esfuerzo-CPUE).

Si se opera adecuadamente, asegura la obtención de información necesaria (cualitativa y cuantitativa) para identificar y definir líneas estratégicas y alcanzar objetivos de sostenibilidad en la realidad del sector pesquero; organizando esfuerzos individuales, colectivos y principalmente, generando cambios en las condiciones de partida. Genera interés entre los pescadores para realizar actividades técnicas, comprensión de generar información pesquera, y recursos humanos capacitados para las actividades de ordenación pesquera.

Al margen de este sistema de registro, será estratégico complementar con estudios sobre las asociaciones pesqueras, censo de pescadores, número de botes, tamaño, número de redes; y otros estudios científicos experimentales que evalúan el comportamiento biológico de las especies, que permitan monitorear la actividad y poder evaluar las actividades de registro local.

C1.6.2. REDEFINICIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL LAGO TITICACA CON UN ENFOQUE LOCAL

Esta propuesta pretende contribuir a la planificación del manejo de los recursos naturales en comunidades del lago Titicaca a partir de la identificación, caracterización de los servicios ecosistémicos que brinda el lago y realizar un análisis socioambiental de la percepción local sobre los mismos; esto permitirá redefinir conceptos y conocer percepciones de uso de los servicios e identificar una nuevo enfoque para su aprovechamiento.

Para su realización se considera la participación de la sociedad civil, actores públicos y privados durante tres etapas:

Etapa I, identificación de los principales bienes y servicios ecosistémicos del lago Titicaca (realización de talleres participativos con actores claves en comunidades seleccionadas en función a grados de intervención antrópica y entrevistas semiestructuradas para la complementación de la información).

Etapa II, caracterización de los servicios ecosistémicos (hábitat, recreación-paisaje, provisión de agua para consumo humano, entre otros y su ubicación).

Etapa III, análisis socioambiental basado en: a) relación sociedad-naturaleza y las racionalidades que la sustenta; b) los conflictos relativos al derecho de uso y apropiación de recursos y c) identificación y priorización de indicadores socioambientales como herramientas base para el monitoreo de la degradación de los servicios ecosistémicos.

C1.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abell R., M.L. Thieme, C. Revenga, M. Bryer, M. Kottelat, N. Bogutskaya, B. Coad, N. Mandrak, S. Contreras Balderas, W. Bussing, M.L.J. Stiassny, P. Skelton, G.R. Allen, P. Unmack, A. Naseka, N.G. Rebecca, N. Sindorf, J. Robertson, E. Armijo, J.V. Higgins, T.J. Heibel, E. Wikramanayake, D. Olson, H.L. López, R.E. Reis, J.G. Lundberg, M.H. Sabaj Pérez & Petry P. 2008. Freshwater ecoregions of the world: A new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *BioScience* 58 (5): 403- 414.
- ADEPESCA. 1998. Evaluación del medio ambiente acuático de sector pesquero en Bolivia. Proyecto de apoyo a las actividades de la pesca y la acuicultura en Bolivia. BOL/B7-3010/94/053. MacAlister Elliot & Partners. La Paz-Bolivia. 41p.
- Aguirre M. 2011. La Cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. REDESMA-CEBEM. 5:1.12
- Alfaro R., E. Bustamante, J. Torres, H. Treviño & Wurstbaugh W. 1982. La Pesquería en el Lago Titicaca (Perú): Presente y Futuro. Proyecto Rec. Hidrobiolog. en Aguas Continentales. Ed. por G. Hanek. PNUD/FAO/PER/76/022. Roma.
- Aliaga A. & Segura M. 2013. Abundancia y distribución de las especies pesqueras en el lago Titicaca utilizando técnicas acústicas del 207 al 2012. Memorias del II Simposio Internacional del lago Titicaca...una responsabilidad compartida. Puno, Perú
- ALT. 1999. Plan de manejo preliminar de la reserva binacional: Área natural de manejo integrado Titicaca Mauri (Bolivia) y zona de Reservada aymara Lupaka (Perú). Estrategia para el fortalecimiento de las áreas protegidas del TDPS. Convenio OEA/PNUMA. 302p.
- ALT. 2002. Desarrollar la capacidad de programas de pesca artesanal en el ámbito peruano del sistema TDPS. Informe
- ALT. 2005. Plan de Manejo Comunal de la Biodiversidad en la laguna del río Desaguadero. Proyecto Conservación de la Biodiversidad La Paz-Bolivia. 85p.
- ALT. 2008a. Plan Director Binacional Perú-Bolivia. La Paz-Bolivia.
- ALT. 2008b. Plan de Ordenamiento pesquero para las cuencas del lago Titicaca, Río Desaguadero y lago Poopó. Antecedentes, exposición de motivos. La Paz-Bolivia. 79p.
- ALT. 2012. Recuperemos los recursos pesqueros del Sistema TDPS. Boletín Pesquero N° 1. 22p.
- ALT. 2004. Plan Estratégico de Conservación de la Biodiversidad del Sistema TDPS. Proyecto "Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Sistema TDPS". Autoridad Binacional Autónoma Del Sistema Lago Titicaca - Desaguadero-Poopó-Salar De Coipasa (TDPS). 85 p.
- Alzamora C. 1979, Diagnóstico preliminar del sector pesquero de Bolivia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Oficina Regional para América Latina. San-tiago. 126p.
- Angell Ch. 1998. Estudio en Acuicultura en Bolivia. Proyecto de Apoyo a las Actividades de la Pesca y Acuicultura En Bolivia Bol/B7-3010/94/053. 39p.
- Anonimo 1947. Decreto Supremo No. 881, 29 Agto. 1947. Fomentar el desarrollo y explotación de la piscicultura. Bolivia Min. Agricultura. 3p.
- Anonimo. (s/f), Programa preliminar de investigación y promoción pesquera en el Lago Titicaca. Informe final, Servicio de Pesquería, Convenio, Puno, Perú.
- Aragón, E. 2012. Recuperemos los recursos pesqueros del sistema TDPS. La Paz-Bolivia.
- Ayala P. 1980. Instalación de la sala de incubación y alevinos de Trucha. Estudio preliminar DIREPE/ORDEPUNO.
- Ayllon A. 1970. Análisis y proyección de la pesquería en Puno. Tesis. Universidad Nacional Técnica del Altiplano, Puno, Perú.
- Balvanera P. & Cotler H. 2009. Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, 185-245.
- Bejarano G. & Iporre. J. 1973, Informe sobre la situación actual sobre la caza y pesca en Bolivia. En: Simposio

- Internacional sobre fauna silvestre, pesca fluvial y lacustre amazónica. Manaus, Brasil. Bib. Min. Agrie., Bolivia
- Beveridge M. C. M., E. Stafford & R. Coutts. 1985. Metal concentrations in the commercially exploited fishes of an endorheic saline lake in the tin–silver province of Bolivia. *Aquaculture Research* 16: 41–53.
- BIC-PELT. 2001. Evaluación de los recursos pesqueros del lago Titicaca. Crucero. Convenio de Cooperación. Proyecto especial Binacional Lago Titicaca (PELT) y el Instituto del Mar del Perú (IMARPE).
- Blázquez L. & Santiago J. M. 1999. Manual de pesca artesanal para el Lago Titicaca.
- Bojorquez J.A. 2013. Línea base de diversidad biológica en el lago Titicaca en cumplimiento de la convención RAMAR sobre humedades de importancia internacional. En: Simposio Internacional del Lago Titicaca-TDPS. Puno, Perú.
- Bouysson-Cassagne T. 1991. Le lac Titicaca : histoire perdue d'une mer intérieure. Bu//. IFEA (in press).
- Bouysson-Cassagne T. 1991. Poblaciones humanas antiguas y actuales. En: Dejoux, C. & Iltis A. (Eds.) El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. Ed. ORSTOM-HISBOL. La Paz-Bolivia. 481-498.
- Bustamante E. & Treviño H. 1975a. Proyecto de Investigación RC-11-1: Evaluación de Recursos Pesqueros del Lago Titicaca. IMARPE. DIPAC. Lima
- Bustamante E. & Treviño H. 1977. Descripción de las Pesquerías en el Lago Titicaca: 1976—1977. Doc. inédito. IMARPE— Puno. 15 p.
- Bustamante E. & Treviño H. 1977. Informe sobre artes y métodos de pesca del ispi (*Orestias sp.*) En: Aguas someras y profundas del Lago Titicaca. Puno: Instituto del Mar del Perú.
- Bustamante E. & Treviño H. 1982. Introducción de técnicas para pesca pelágica en el Lago Titicaca IMARPE. Puno.
- Bustamante E. H. Treviño & Farfan E. 1976. Sugerencias y opinión técnica del Instituto del Mar Lab. Puno, sobre el establecimiento de una veda total de especies ícticas en la laguna de Arapa. IMARPE — Puno. 3 p.
- Bustamante E. 1975b. Apuntes preliminares para la descripción de la pesquería del Lago Titicaca. IMARPE. Informe 1976.
- Callizaya R. 1980. Censo de pescadores del Lago Titicaca – Bolivia. Informe del proyecto de Estudios Ecológicos y Humanos. Univ. California-Fundación Nal. Ciencias Puras-CORDEPAZ-UMSA. 66 p.
- Campbell H. 1978. Programa de planeamiento de evaluación para recursos en aguas continentales. Proy. FAO/PER/76/022. Seminario de América Latina sobre métodos de evaluación de recursos pesqueros. Guayaquil, Ecuador.
- Campbell H. 1976. Reconocimiento de las pesquerías en aguas continentales del Perú. F1:DP/PER/71 /012/2, F.A.O. Report, Rome. 32 p.
- Catari S. F. 2002. Respuesta alimenticia de la rana del lago Titicaca (*Telmatobius culeus*) a cuatro tipos de alimento natural. Tesis Licenciatura. Univers. Mayor de San Andrés, Bolivia.
- CDP. 1992. Estadística e información pesquera de Bolivia. Ministerio de Asuntos Campesino y agropecuarios. Centro de Desarrollo Pesquero. Misión Británica Pesquerías. 56p.
- CDP. 1993. Estadística e información pesquera de Bolivia. Ministerio de Hacienda Desarrollo Económico. Secretaría Nacional de Agricultura y Ganadería. Dirección Nacional de Producción Pesquera. 52 p.
- CDP. 1994. Estadística e información pesquera de Bolivia. Ministerio de Desarrollo Económico. Secretaría Nacional de Agricultura y Ganadería. Dirección Nacional de Producción Pesquera. 52 p.
- CDP-Misión Británica. 1991. Estadística e información pesquera de Bolivia. Ministerio de Asuntos Campesino y agropecuarios. Centro de Desarrollo Pesquero. Misión Británica Pesquerías. 60 p.
- Céspedes R. Importancia de la conservación de la rana gigante del Titicaca. Exposición magistral. Memorias del II Simposio Internacional del lago Titicaca...una responsabilidad compartida. Puno, Perú.
- CIDAB. 2002a. Proyecto de conservación de la biodiversidad en la cuenca del lago Titicaca, Desaguadero, Poopó, salar de Coipasa (TDPS): desarrollar la capacidad de programas de pesca artesanal en Bolivia."

C-1 Uso actual de recursos acuáticos y servicios ecosistémicos en el Sistema TDPS

- CIDAB. 2002b. Seminario. Manejo de los recursos pesqueros en el Lago Titicaca. Resumen de exposiciones. Ministerio de Agricultura Ganadería y Desarrollo rural. La Paz-Bolivia. 39p.
- CIDAB. 2007a. Diez y Nueve años del CIDAB. Ministerio de Desarrollo Rural, Agropecuario y Medio Ambiente. Centro de Investigación y Desarrollo Acuícola Boliviano (CIDAB) Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). 30p.
- CIDAB. 2007b. CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO ACUÍCOLA BOLIVIANO Plan de Acción y Desarrollo Tecnológico. La Paz. 9p.
- CIDAB. 2007c. CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO ACUÍCOLA BOLIVIANO Plan Operativo Anual. Ministerio De Desarrollo Rural y Tierra. Viceministerio de Desarrollo Rural y Agropecuario. Centro de Investigación y Desarrollo Acuícola Boliviano. La Paz-Bolivia. 29 p.
- CIDAB. 2008. CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO ACUÍCOLA BOLIVIANO Plan Operativo Anual 2009. Ministerio De Desarrollo Rural y Tierra. Viceministerio de Desarrollo Rural y Agropecuario. Centro de Investigación y Desarrollo Acuícola Boliviano. La Paz-Bolivia. 32 p.
- CIDAB. 2010. PLAN OPERATIVO ANUAL 2009. Ministerio De Desarrollo Rural y Tierra. Viceministerio de Desarrollo Rural y Agropecuario. Centro de Investigación y Desarrollo Acuícola Boliviano. La Paz-Bolivia.32p.
- CIRMA-CEDAFOR.2001. Plan Maestro Reserva Nacional del Titicaca. Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del TDPS.86p.
- Collot D.1980. - Les macrophytes de quelques lacs andins (lac Titicaca. lac Poopo, lacsdes vallées d'Hichu Kkota el d'Ovejhujo). ORSTOM: La Paz, 115p.
- Costanza R., d'Arge, R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P. & Van den Belt M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Revista NATURE: Vol 387:253-260.
- Coulter J, 1983. El mercadeo del pescado y productos pesqueros en Bolivia Tropical. Devlopment Research. Institute, London. Misión Británica
- Couts R.& Zuna F. 1981.Estado Actual de Tecnología pesqueras en Bolivia.MACA CDF.36p.
- Couts R.1982. Estadística de la comercialización de pescado en La Paz, Bolivia. Período Feb. 1980— Ene. 1981. Misión Británica.
- Couyts R.1983. Estadística de la comercialización de pescado en La Paz, Bolivia. Período de Feb. 1980 — Ene. 1981. II Rangos de precios. Misión Británica (pesquería). Departamento Pesquero Nacional, Centro de Desarrollo Forestal, M.A.C.A.
- Del Solar E.1944,Pasado y porvenir en la pesquería del Lago Titicaca. Colonias y Foresta, Lima 4:15-7
- Del Valle O. & Mendoza R. 2013. Impacto productivo de la acuicultura de la trucha en el lago Titicaca en relación a la producción acuícola nacional del Perú. Memorias del II Simposio Internacional del lago Titicaca...una responsabilidad compartida. Puno, Perú.
- DIREPE/ORDEPUNO 1980aProyecto: Planta procesadora de conservas de trucha (a nivel de perfil). Con- c venio COFIDE-ORDEPUNO, Puno .17 p.
- DIREPE/ORDEPUNO 1980d. , Crianza de truchas en piscigranjas. Estación Pesquera de Chucuito.
- DIREPE/ORDEPUNO. 1980c .Crianza de truchas. Unidad de Programación
- DIREPE/ORDEPUNO. Divulgación sobre reglamento de pesca. Div. de Registro y Control. Puno
- DIREPE/ORDEPUNO.1980b.Proyecto: Producción comercial de truchas—sistema de jaulas flotantes (perfil). Convenio 17 p. Puno
- DIREPRO-Puno. 2007. Programa de extensión pesquera artesanal Puno. Diagnóstico de la pescas artesanal en la cuenca del lago Titicaca-Puno. Puno-Perú. Estudios biológicos. S.L. Perú. 52p.
- Ergueta P. & Morales C. (Eds). 1996. Libro Rojo de los vertebrados de Bolivia. CDC-Bolivia, La Paz.347p.
- Everett G. 1968. Fishery Development on Lake Titicaca . Overseas Development, Nov. London.

- Everett G. 1967. Lake Titicaca and its fisheries. *Andean Air Mail and Peruvian Times*. 63 (1400), Oct. 1967a 20, 1967, Fish Suppl.
- Everett G. 1973. The rainbow trout *Salmo gairdnerii* (Rich.) fishery of Lake Titicaca. *J. Fish. Biol.* 5: 429-40
- FAO. 2010. Diagnostico de la Pesca Continental y la acuicultura en Bolivia. Proyecto "Mejoramiento de la Legislación para la Pesca y Acuicultura en Bolivia" TCP/BOL/3101 (D). La Paz-Bolivia. 65p.
- FAO-INRENA. 2005. Actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales a 2005. Lima, Perú.
- Farfan E. 1974, Aparejo y método nativo para la extracción del "ispi" *Orestias mooni* (Tchernavin 1944) en el Lago Titicaca: "Collancha". Tesis. Universidad Nacional de San Antonio de Abad, Cuzco, Perú. 1974: 18 p.
- Farfan E. 1974, Bases para el estudio estadístico de la Pesca en el Lago Titicaca. Informe, Octubre 1974, Instituto del Mar. D.I.P.A.C, Lima, Perú. 1974: 22p.
- Fiedler H. 1944, The Peruvian fisheries. Fish Leaflet No. 75, U.S. Dept. Int., Fish and Wildlife Ser, Chicago.
- Fjeldsa J. & Kessler M. 1996. Conserving the Biological Diversity of *Polylepis* woodlands of the highland of Peru and Bolivia. A Contribution of Sustainable Natural Resource Management in the Andes. NORDECO, Copenhagen. 250 p.
- Franc J., L. Lauzanne & Zuna F. 1979. Algunos datos sobre las pesquerías de la parte oriental del Lago Titicaca Menor. Convenio UMSA/ORSTOM. Hidrobiología. La Paz, Bolivia. 24 p.
- Franc J., L. Lauzanne & Zuna F. 1985. Algunos datos sobre las pesquerías de la parte oriental del Lago Titicaca Menor. *Revista Ecología en Bolivia*. Nº 7. La Paz – Bolivia. 1-22.
- Gavancho M. 1975. - La totora base de la economía de Chimu y su repercusión en la escuela. Tesis Esc. Supo mixl. Puno, 30 p.
- Gavidia C. & Zapata V. 1968, La pesca de la trucha en el Lago Titicaca. Ministerio de Trabajo y Comunidades, Instituto Indigenista Peruano, Estudio de dos problemas en Puno. 30-48
- Gil-Albarellos R. 2013. Diagnostico del nivel de contaminación de los recursos hídricos del Lago Titicaca. Memorias del II Simposio Internacional del lago Titicaca...una responsabilidad compartida. Puno, Perú.
- Gilson H. (Ed.). 1939-1955. Reports of the Percy Sladen Trust Expeditions. *Trans. Linn. Soc. Lond.* 1 (Ser. 3), 357 p.
- Gilson H. 1964. The Lake Titicaca. Proyecto de estudio florístico y faunístico del Lago. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 15:112-27
- Griffin D. 1971. Notas sobre las Charophyceae en la región del Lago Titicaca y aspectos de la tecnología de su cultivo en el laboratorio. *Rev. Univer. Nación. Tec. del Altiplano*. No. 4, Puno—Perú
- Herrera E. 1969. La pesquería de la "trucha" en la cuenca del Lago Titicaca, desarrollo y declinación. Tesis. Univers. Nac. Federico Villareal Lima, Perú.
- Herting G. 1967. Lake Titicaca fisheries resources. Problems and possibilities-*Peruvian Times, Fisheries Suppl.*, No. 20, Oct. 1967
- Huanca, Y. 2010. Análisis y propuesta del modelo de gestión del lago Titicaca. Tesis de Maestría Univers. Sede Iberoamericana Santa María de la Rabida. España.
- Hugo H. 1975. Material y métodos de pesca (sus técnicas y sus problemas). Lima, Perú.
- IIDSA 1983. Crianza de truchas en jaulas flotantes por la modalidad de Empresa Comunal. Proyecto de Emergencia frente a la sequía en Puno. Puno
- Illies G. 1964. Fish catching methods of the world. (Ed. A. V. Brandt) — photograph on page 111 of seine netting in the river Have — *Fishing news (Books)*. London. 191 p.
- IMARPE. 1981. Informe No. 80. Proyecto PNUD/FAO/PER/76/022. Partes I y II por T.G. Northcote. Trad.: Antonio Landa C. I.: Investigaciones y recomendaciones acerca de los recursos hidrobiológicos del sistema del Lago Titicaca. II: Métodos y recomendaciones para el muestreo de peces y datos limnológicos en el litoral del Lago Titicaca. 30 p.

C-1 Uso actual de recursos acuáticos y servicios ecosistémicos en el Sistema TDPS

- IMARPE. 2010. Abundancia y biomasa de los principales recursos pesqueros del lago Titicaca y seguimiento de las pesquerías en la parte Peruana.
- IMARPE. s/f. Respuesta al cuestionario SELA, sobre evaluación de las especies más importantes de la cuenca del Titicaca. Documentos sobre proyectos de evaluación de recursos pesqueros del Lago Titicaca.
- IMARPE-UMSA. 1985. Referencias bibliográficas sobre el Lago Titicaca y sus Recursos hidrobiológicos. N°1.67p.
- IMARPE-UMSA. 1985. Referencias bibliográficas sobre el Lago Titicaca y sus recursos hidrobiológicos. Proyecto: Evaluación de los recursos pesqueros del lago Titicaca.67p.
- INE. 2005. Anuario Estadístico.
- INSTITUT FRANÇAIS d'ETUDES ANDINES. 1960. Les Travaux de L'Institut Français d'Etudes Andines. 1950-1960 159-90. Paris.
- James H. 1936. Reports to the Governments of Peru and Bolivia on the feasibility of introducing fish to Lake Titicaca. Mimeographed report, available for USAID, Lima
- James M. 1939. Informe sobre la vigilancia para el desarrollo de las pesquerías en el Lago Titicaca. Min. Agric., La Paz, 1939:8p.
- Johannesson K., R. Vilchez & Bertone. D.1980. Estimación acústica de la ictiomasa y su distribución en el Lago Titicaca. Parte I. Proyecto GCP/RLA/025/NOR. Informe preliminar, Lima.
- Johannesson K., s/f. Calibration. Experiments on live fish in Lake Titicaca. Parte II. Project GCP/RLA/NOR. 22 p.
- Kesteven G. & Edwards I. 1974. Lago Titicaca. Evaluación del equipo existente y sugerencias para mejorarlo.
- Laba R. 1977. A story of development: Lake Titicaca 1935—1977. M.A. Thesis, Dept. Pol. Sei, Univ. Wise, Madison, Wise. :35 p.
- Laba R. 1979. Fish peasants and state bureaucracies. The development of Lake Titicaca. Comp. Polit. Stud. 12 (3): 335-61
- Landa A.1974. Sustentación de un pedido de asistencia económica a la AID para investigación de biología pesquera en el Lago Titicaca. IM ARPE. Dirección Aguas Continentales. Callao, Perú.
- Landa A.1979. La trucha en la cuenca del Titicaca: Desarrollo de un modelo stock-ambiente-reclutamiento, Consecuencias para la administración del recurso. IMARPE, Boletín. Vol. 4. No.2.
- Le Vieil D & Goyzueta G.1984. - Evaluación de la extracción de totora para fines de subsistencia en la Reserva Nacional del Titicaca, sector Puno. CENFOR-Puno, Min. Agric. Alim. Puno, 24 p., multigr.
- Le Vieil D. & Orlove B. 1989. Communal control of aquatic resources in lake Titicaca, Perú. In: Durans, J.R., J. Lemoalle et J.Weber Eds. La Recherche Face a la Peáche Artisanale. Sym.Int. ORSTOM-IFRE-ER, Montepellier.France, 3-7 Julliet.
- Le Vieil D. & Orlove B. 1991. Importancia socio-económica de la macrófitas. En: Dejoux, C. y A. Iltis Eds. El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. Ed. ORSTOM-HISBOL. La Paz-Bolivia. 509-513.
- Le Vieil D. 1987. - Territorial use-rights in fishing (TURFs) and the management of small-scale fisheries : the case of Lake Titicaca (Peru). Ph. D. Thesis, Univ. Brit. Columbia, Vancouver.
- Le Vieil D., H. Treviño, E. Benitez & Torres J. 1980. Economic value estimates of Lake Titicaca Artesanal Fishery. Project. FAO/PER/76/022
- Lémuz C. 2001. Transformaciones en la economía prehispánica de la península de Santiago de Huata, Bolivia.. En: Aguirre, C., C. Miranda & Verhasselt Y.(Eds.) Contribución al Conocimiento del Sistema del Lago Titicaca. Memorias del Simposio Internacional sobre el Sistema del Lago Titicaca. Artes Gráfica Latina. La Paz-Bolivia. 375-396.
- Lescano A. 2001. Conservación, usos y manejo de la Totora (*Schoenoplectus tatora*). En: Aguirre, C., C. Miranda y Y. Verhasselt. Eds. Contribución al Conocimiento del Sistema del Lago Titicaca. Memorias del Simposio Internacional sobre el Sistema del Lago Titicaca. Artes Gráfica Latina. La Paz-Bolivia. 293-304.
- LINA ARRAYA. 2003. Propuesta de Política para Pesca y Acuicultura. Procesos, Practicas y Medidas. Planificación de las Acciones. Small-Scale facility for Faros.Consultoría. 28 p.

- Lino F. 2008. Lineamientos para la planificación del uso sostenible del recurso pesquero en comunidades del lago Titicaca. Tesis de Maestría. Univers. Mayor de San Andrés, Bolivia.
- Lino F. 2013. Registro de la pesca local: un análisis de su implementación en comunidades del lago Titicaca. Memorias del II Simposio Internacional del lago Titicaca...una responsabilidad compartida. Puno, Perú.
- Lino F. 2013. Acercamiento al conocimiento local: manejo de la pesca del lago Titicaca. Memorias del II Simposio Internacional del lago Titicaca...una responsabilidad compartida. Puno, Perú.
- Loza F. 2005. Patrones de distribución espacio temporal de las poblaciones de Totora del Lago Titicaca Menor 1986 – 2004. Tesis de Maestría. Univers. Mayor de San Andrés, Bolivia
- MAGDR. 2005. Diagnóstico Nacional de Desarrollo Pesquero. Unidad de Pesca y Acuicultura. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA Y DESARROLLO RURAL. La Paz-Bolivia. 46 p.
- Mamani M., D. Pari & Flores G. 2013. Diversidad de aves en hábitats contaminados de los alrededores de la laguna de estabilización de Puno. En: Simposio Internacional del Lago Titicaca-TDPS. Ponencias en resumen. Puno, Perú
- Mamani, F. U. 2004. Utilización de la lombriz californiana (*Eisenia foetida*) ipsi (*O. ipsi*) y carachi enano (*O. olivaceus*), como carnadas para la pesca de pejerrey (*Odonthestes bonaraensis*) con dos tamaños de anzuelos en la región de Soncachi. Tesis. Univers. Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- Mantilla B. & Navarro C. 1982 Cultivo de truchas en el Lago Titicaca. Puno.
- Marín R. & Quintanilla J. 2002. Efectos ambientales sobre las pesquerías de los ecosistemas de los lagos Poopó y Uru-Uru. Instituto de Ecología e Instituto de Investigaciones Químicas, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 33 p.
- Matsüi H. 1961. Informe técnico sobre la piscicultura en Bolivia, Titicaca. Min. Agrie., La Paz
- Maya. 2009. Libro rojo de la fauna silvestre de vertebrados de Bolivia. Ministerio de Medio Ambiente y Agua Viceministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambios Climáticos. La Paz, Bolivia.
- Mena M. & Molina C. 2013. Valoración económica del uso de tola y disponibilidad de pago para su conservación en el Sistema TDPS. En: Simposio Internacional del Lago Titicaca-TDPS. Ponencias en resumen. Puno, Perú
- Mendoza M. A. 2007. "Plan de Acción Ambiental del Lago Titicaca". Diagnostico Ambiental. MINISTERIO DE PLANIFICACION DEL DESARROLLO. VICIMINISTERIO DE PLANIFICACION TERRITORIAL Y MEDIO AMBIENTE. DIRECCION DE PLANIFICACION TERRITORIAL.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: A framework for assessment. Island Press, Washington, D.C.
- MINISTERIO DE MARINA. 1980. Relación de embarcaciones registradas. Capitanía de Puerto de Puno. Div. de Regulación y Control.
- MINISTERIO DE MARINA., 1980. Relación de pescadores por sectores. Capitanía de Puerto de Puno. Div. de Regulación y Control.
- MINISTERIO DE PESQUERIA 1978a factibilidad técnico económico de una Empresa de Crianza de truchas en jaulas. Dir. Gen. Extr. Proyecto. Redes trampas fijas. 135 p.
- MINISTERIO DE PESQUERIA. 1970. Diagnóstico de la situación actual de los Grupos Sociales de pesca artesanal de la zona Sur—Este del Perú (Lago Titicaca). Comisión Organizadora de las Cooperativas de Pesca Artesanal. Oficina Nacional de Desarrollo Cooperativo (ONDECOOP). Lima, Perú
- MINISTERIO DE PESQUERIA. 1978. Anuario estadístico pesquero. Of. Sed. Planificación. Lima 256 p.
- MINISTERIO DE PESQUERIA. 1980. I Boletín Estadístico Pesquero. Dir. Reg. Pesquería ORDEPUNO. Of. Planificación. Area de Estadística. Puno, Perú. 42 p.
- MINISTERIO DE PESQUERIA. 1981a. Anuarios Estadísticos Pesqueros 1970—1980. Of. de Estadística. Of. Presupuesto y Planificación.
- MINISTERIO DE PESQUERIA. 1981b. Diagnóstico de la pesca continental, Puno: Informe No. 5.

C-1 Uso actual de recursos acuáticos y servicios ecosistémicos en el Sistema TDPS

- SubProyecto 04.01: Estudio explotación pesquera integral, plan de explotación pesquera regional. Dir. Reg. Pesq. X Puno. Lima, Perú. 99 p.
- MINISTERIO DE PESQUERIA. 1982. II Boletín Estadístico Pesquero 1971 — 1980. Dir. Reg. Pesq. del ORDEPUNO. Of. Planificación. Sist. Estadístico Regional. Puno, 52 p.
- MINISTERIO DE PESQUERIA. 1983. Estudio del potencial hidrobiológico en el Dpto. de Puno Of. Regional V. Puno
- MIRANDA, J., 1978. Evaluación de aguas dulces a salmueras en presencia de boro y litio para la Bocatera Grande (Salar de Uyumi). Rev. Boliviana de Química. UMSA. Vol. 2, Año II, No. 1: 89-100 .
- MISION ORSTOM EN BOLIVIE., 1978. Rapport d'Activités 1977. I Parte Scientifique.
- Molina C., C. Ibañez & Gibon F.M. 2012. "Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopo, Oruro, Bolivia): posible riesgo en la salud de consumidores." Ecología en Bolivia 47(2).
- Mollocondo 2013. Desarrollo de la truchicultura en la región Puno y su proeycción a 2011. Memorias del II Simposio Internacional del lago Titicaca. Puno, Perú.
- Montaño L. M. 2004. Estudio de uso tradicional de la rana gigante del lago (*Telmatobius culeus*) en el ámbito boliviano del lago Titicaca. Tesis Licenciatura. Univers. Mayor de San Andrés, Bolivia.
- Morales S. 2002. Recomendación sobre lineamientos de regulación en el manejo de recursos pesqueros en el lago Titicaca. Manejo de recursos pesqueros en el lago Titicaca. CIDAB and MAGDER. La Paz-Bolivia.
- Ninaja A. F. 2007. Evaluación de la biomasa de macrófitas acuáticas y el grado de contaminación por medio de la lenteja (*Lemna gibba*) y la totora (*Schoenoplectus tatora*) en la bahía de Cohana, lago Titicaca Tesis Licenciatura, Univers. Mayor de San Andrés, Bolivia.
- Northcote T. 1980. Report on Lake Titicaca, July 1979. Second Report on Lake Titicaca Fisheries, Feb. 1980. Lima
- Orlove B. 1974. The Limnology, Fish Ecology and Fisheries of Lake Titicaca: Joint Biological and Anthropological Investigations.
- Orlove B. 1982. Sale, Barter and Subsistence: the distribution and Exchange of Fish in the Lake Titicaca Area. Symposium on Indian participation in markets: The central Andes in the Colonial and Republican Periods. 44th Intern. Congress of Amer., Sept. 1982. Manchester, England.
- Orlove B., D. Levíel & Treviño H. 1991. Aspectos sociales y económicos de la pesca. En: Dejoux, C. y A. Iltis Eds. El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. Ed. ORSTOM-HISBOL. La Paz-Bolivia. 505 – 508.
- Orsag V. 2009. "Evaluación de recursos hídricos (ríos y pozos) para fines de riego en dos épocas del año (húmeda y seca), en las subcuencas de los ríos Poopó y Antequera". En: Memorias del V Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo. Oruro, Bolivia.
- ORSTOM.,1979. Rapport de Mission Effectuée par Aline Royal- Roques a La Paz (Bolivia) du 25 juillet au 20 aout 1979. Ordre de Mission No. 617.
- Osorio F. & Sarmiento J. 2001. Informe preliminar de la actualización de la información de ictiofauna del Lago Titicaca. En: Aguirre, C., C. Miranda y Y. Verhasselt. Eds. Contribución al Conocimiento del Sistema del Lago Titicaca. Memorias del Simposio Internacional sobre el Sistema del Lago Titicaca. Artes Gráfica Latina. La Paz-Bolivia. 305-319.
- Paca F. 190. Proyecto Integral Lagunillas (Resumen). Puno, Perú.
- Pacheco E. 2000. Utilización de la piel de la rana (*Telmatobius culeus*) para la distribución del cuero curtido a través de diferentes procedimientos. Tesis Licenciatura. Univers. Mayor de San Andrés, Bolivia.
- Pacorl H, 1976. Aspectos socio—económicos de la pesca y consumo de las especies ícticas del Lago Titicaca en la localidad de Pusi, Distrito de Pusi, Provincia de Huancane. Tesis, Univers. Nacional Técnica del Altiplano, Puno, Perú
- Padilla, V. 2005 "Evaluación de la distribución del Género *Polylepis* en las Provincias Camacho, Murillo y Sud Yungas del Departamento de La Paz". Tesis Licenciatura. Univers. Mayor de San Andrés, Bolivia.

- Pena M. & Cordova D. 1957. Reports on trout from lake Titicaca. Servicio de Pesquería, Lima
- Pérez M. E. 2001. Conservación de la Rana gigante del lago Titicaca. En: Aguirre, C., C. Miranda y Y. Verhasselt. Eds. Contribución al Conocimiento del Sistema del Lago Titicaca. Memorias del Simposio Internacional sobre el Sistema del Lago Titicaca. Artes Gráfica Latina. La Paz-Bolivia. 321-328.
- Pérez M. E. 1998. Dieta y ciclo gametogénico anual de *Telmatobius culeus* (Anura, Lepodactylidae) en el lago Titicaca. Facultad de Ciencias Puras y Naturales. La Paz, Universidad Mayor de San Andrés. Licenciatura.
- Pillco R. P. & Bengtsson L. 2006. Long-term and extreme water level variations of the shallow Lake Poopó, Bolivia. *Hydrological Sciences Journal* 51(1): 98-114.
- PNACC. 2010. www.mmaya.gob.bo.
- PNUD/FAO. 1980. Investigación de los Recursos Hidrobiológicos en Aguas Continentales. Perú. FI/DP/PER/76/022. Informe Terminal preparado para el Gobierno del Perú. Roma
- PNUMA. 1996. Diagnóstico ambiental del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia-Perú. División de Aguas Continentales, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente (OEA), Comité Ad-Hoc de Transición de la Autoridad Autónoma Binacional del Sistema TDPS (Gobiernos de Perú y Bolivia). La Paz, Bolivia.
- PNUMA. 2011. Perspectivas del Medio Ambiente en el Sistema Hídrico TITICACA-DESAGUADEROPOOPÓ-SALAR DE COIPASA (TD P S). GEO Titicaca. Ed. Novo Art. S.A. Colombia. 187 p.
- Postel, S., y S. Carpenter. 1997. Freshwater ecosystem services, en G.C. Daily (ed.), *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington, D.C.195-214.
- Poulter H., L. Nicolaidis, J. Tejerina & Salcedo S. 1983. Característica y duración de almacenamiento en hielo de pescados bolivianos. Instituto de Investigación y Desarrollo Tropical. Londres. Ministerio de Previsión Social y Salud Pública.
- Poulter H. 1983. Manipuleo, procesamiento y distribución de pescado en Bolivia: antecedentes y status. Institución de Investigación y Desarrollo Tropical, Londres
- PROINTEC. 2002. Diagnóstico del Nivel de Contaminación Recursos Hídricos del Lago Titikaka Bolivia. Informe Fase III. La Paz – Bolivia. 236 p.
- Quiroz A., F. Villaverde & Saravia P. 1979. Artes y métodos de pesca en las riveras del Lago Titicaca. Informe No. 65. IMARPE-Callao, Perú. 20 p.
- Richard E. 2013. Estado Actual de la Keñola (*Rollandia* microptera, Aves: Podicipiformes) en el lago Huiñaymarka en La Paz-Bolivia. Memorias del II Simposio Internacional del lago Titicaca...una responsabilidad compartida. Puno, Perú.
- Richerson P, C. Widmer & Kittel T. 1977. The limnology of lake Titicaca (Peru Bolivia), a large, high altitude tropical lake. *Inst. Ecol. Publi. No. 14, Univ. Calif., Davis, 1977:78*
- Rocha O., C. Quiroga & Hennessey B. 2003. Aves. En Flores, E. y C. Miranda (eds.). *Fauna Amenazada de Bolivia. ¿Animales sin futuro?*. Ministerio de Desarrollo Sostenible Proyecto de Fortalecimiento Institucional BID ATR 929/SF – BO.
- Rojas P. & Coutts R..s/f. Estadísticas de comercialización de pescado en La Paz, Bolivia. Feb. 1981 Ene 1982. Dpto. Pesquero Nacional. Centro de Desarrollo Forestal, M.A.C.A. Misión Británica.
- Ruiz P., I. Callizaya & Castañón V. 2004. Análisis prospectivo de la cadena productiva de la rana del lago Titicaca (*Telmatobius culeus*) en el tramo turístico Huarina - Tiquina. Tesis Licenciatura. Univers. Mayor de San Andrés, Bolivia.
- S.E.L.A, 1980. Comité de Acción de Productos del Mar y de Agua Dulce. Proyecto No. 2: Evaluación de las Especies más importantes de la cuenca del Titicaca. Sub-Proyecto No. 1: Cultivo de Truchas en Jaulas Flotantes. La Paz, Bolivia
- Salm H. & Arze C. 1982. *Schoenoplectus totora* (totora) para la purificación de aguas contaminadas. *Ecología en Bolivia*. 2: 8-41.

C-1 Uso actual de recursos acuáticos y servicios ecosistémicos en el Sistema TDPS

- Sanchez N. 1941 La piscicultura en Bolivia. La Paz, Min. de Economía Nal. Bol. Ini. 1 (1): 77- 9.
- Sanchez N. 1967. Normas para la pesca. Bolivia Min. Agric., La Paz, Cartilla, No. 4:3p.
- Sarmiento J. & Barrera S. 1996. Peces. En: Ergueta, P. & de Morales C. (Eds.). Libro Rojo de los vertebrados de Bolivia. Centro de Datos para la Conservación. La Paz, Bolivia. 33-65.
- Sarmiento J. & Barrera S. 2003. Peces. En: Ibsch, P.L. & Mérida G. (Eds.). Biodiversidad: la riqueza de Bolivia: Estado de conocimiento y conservación. Ed. FAN, Santa Cruz, Bolivia. 638p.
- Saville A. 1978. Métodos de Reconocimiento para la Evaluación de Recursos Pesqueros.
- Shelton W. & Davies W. 1974. Potential trout production and management of lakes in central and southern Peru. Auburn Univ., Internat. Center for Aquaculture, Alabama, U.S.A.: 38 p.
- Shvidenko A., C.V. Barber, R. Persson, P. González & Hassan R. 2005. Forest and woodland systems, en R. Hassan, R. Scholes y N. Ash (Eds.), Ecosystems and human well-being: Current state and trends, Vol. 1, Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, D.C.567-614.
- Talf.A.1954. Informe sobre el estado de la pesca en Bolivia. Min. Agrie., La Paz
- TDPS. 1996. Diagnóstico Ambiental del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopo-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia-Perú.
- Terrazas W. 1966. Situación actual de la pesquería en Bolivia. Min. Agric., La Paz, 5 p.
- Terrazas W. 1968. Posibilidades pesqueras de Bolivia. Gaceta Económica .Bolivia 2 (5): 6-25
- Terrazas W. 1969. Las pesquerías de Bolivia en mesa redonda para la prensa, sobre recursos materiales renovables. La Paz, Bolivia, Nov. 1968. Documentos de trabajo 1. Soc. de Ing. Agrónomos de Bolivia. Bol. Tec. No. 6:4
- Terrazas W. 1982. La rana del Lago Titicaca. Revista de la Sociedad Boliviana de Historia Natural, Bolivia, 2(2), 39-40
- Treviño H. & J. Torres.1982. Evaluación de capturas ícticas y socioeconomía del Lago Titicaca (1979-1980) IMARPE-Puno
- Treviño H. & Levy D.1982. Distribución espacial y abundancia de peces en varias áreas de la Bahía de Puno. IMARPE/UBC. Sem. Informal sobre calidad del agua en la Bahía de Puno y sus vertientes. UNTA/UBC/CIDA. Puno
- Treviño H. 1980. Evaluación de capturas ícticas en el Lago Titicaca (territorio peruano) IMARPE-Puno
- Treviño H. J. Talavera & Torres J. 1981. Pesca experimental en el litoral de la Bahía de Puno Lago Titicaca (Perú). Inf. Julio Agosto 1981. IMARPE-Puno
- Treviño H., J. Torres & Roncal M.1991. El potencial ictiológico. En: Dejoux, C. & Iltis A. (Eds.) El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. Ed. ORSTOM-HISBOL. La Paz-Bolivia. 549-562.
- Treviño H., J. Torres, D. Levy & Northcote T. 1984. Pesca experimental en aguas limpias y negras del litoral de la Bahía de Puno-Lago Titicaca (Perú). Inf. Jul. 1981-Feb. 1982 IMARPE—Puno. (Primer borrador, inédito).
- Tusman J.1980. Caracteres limnológico para el cultivo de truchas arco iris (*Salmo gairdnerii iridens*).U.N. San Agustín, Arequipa
- UICN.2000. Visión del Agua y la Naturaleza. Estrategia Mundial para la Conservación y Manejo Sostenible de Recursos Hídricos en el Siglo XXI" Gland, Suiza.
- Urquidi W.1969. Problemas de conservación de los recursos pesqueros de Bolivia. Bol. Experimental 40: 1-16
- UTO- MINCO 2007. Evaluación ambiental del lago Poopó y sus ríos tributarios.
- Vacher E., Brasier De Thuy, M. Liberman.1991. Influencia del lago en la agricultura litoral. En: Dejoux, C. & Iltis A. (Eds.). El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM-HISBOL. La Paz, Bolivia. 517-523.
- Van Damme P. A., F. Carvajal-Vallejos, J. Sarmiento, S. Barrera, K. Osinaga & Miranda-Chumacero G. 2009.

- Peces. En: Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Libro rojo de la fauna silvestre de vertebrados de Bolivia. La Paz, Bolivia. 25-90.
- Vargas A. 1989. Diseño y Construcción de Artes de Pesca: Informe de Prácticas pre profesionales en el proyecto de Operación de pesca experimental en la zona pelágica del Lago Titicaca (Sector Peruano), Convenio INADE/Pelt-Puno.
- Vargas W. 2013. Evaluación socio-ambiental como apoyo a la remediación de la bahía de Cohana (Bolivia del lago Titicaca).
- Vellard J. 1991. Los batracios.453-462 En: Dejoux, C. y A. Ittis Eds. El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. Ed. ORSTOM-HISBOL. La Paz,Bolivia.
- Vellard J. 1991. La practica antigua de la pesca en el lago Titicaca. 499-504 p. En: Dejoux, C. & Ittis A. (Eds.) El Lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual. Ed. ORSTOM-HISBOL. La Paz,Bolivia.
- Viceministerio de Tierras. Ministerio de Desarrollo Sostenible. 2005. "Bases de Discusión para una Política de Tierras para el Desarrollo Rural Sostenible". Con el apoyo del Servicio Holandés de Cooperación al Desarrollo. La Paz-Bolivia.
- Vilca J. L., & Castillo Y. P. 2002. Desarrollar la capacidad de programas de pesca artesanal en el ámbito peruano del sistema TDPS.
- WIDMER C., P. RICHERSON & LANDA A. 1974. Primary production and its relation to the Lake Titicaca Fishery.
- Wood S., S. Ehui, J. Alder, S. Benin, & Cassman K.G. 2005. Food. In: R. Hassan, R. Scholes & Ash N. (Eds.), Ecosystems and human well-being: Current state and trends, Vol. 1, Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, D.C., 209-242.
- WORLD RESORUCES INSTITUTE. 2005. Impactos de los servicios ecosistémicos. WRI. Washington, DC, Estados Unidos de América.
- ZONISIG.1998. "Zonificación Agroecológica y Socioeconómica de la Cuenca del Altiplano del Departamento de La Paz". Proyecto Zonificación Agroecológica y Establecimiento de una base de datos y red de sistema de información geográfica en Bolivia. DHV Consultores – ITC. Cooperación del Gobierno de los Países Bajos. Fundación Simón I. Patiño. Bolivia. 719p
- Zuna F. & Berger C. 1978. Explotación Pesquera conjunta del Lago Titicaca. Comité de Acción de Productos del Mar y Agua Dulce. La Paz, Bolivia.
- Zuna F. & Coutts R. 1981. Plan de arranque del programa integral de desarrollo pesquero nacional de Bolivia. Min. de Agricultura y A.A.C.C. Centro de Desarrollo forestal. Dpto. Pesquero Nacional. La Paz, Bolivia.
- Zuna F., C. Berger & Aitken R. 1978. Primera Reunión-Lima de Expertos. Proyecto No. 2: Evaluación de las especies más importantes de la cuenca del Lago Titicaca. Lima,Perú.



C-2

CONTAMINACIÓN EN METALES PESADOS EN EL SISTEMA TDP

HEAVY METALS CONTAMINATION IN THE TDP SYSTEM

Jorge Quintanilla, UMSA – CEEDI - La Paz, Bolivia, hidroqui@gmail.com

Carlos Peláez Daza, CEEDI - UMSA - La Paz, Bolivia

RESUMEN

El estudio de los parámetros físico-químicos del Sistema TDP tales como: conductividad, sodio, salinidad, turbidez, sulfatos y sílice disuelta, también de boro, wólfam y estaño, muestra que las aguas superficiales del río Desaguadero, desde su nacimiento a la salida del Lago Titicaca, hasta el ingreso a los lagos Poopó y Uru Uru y en su efluente; no son aptas para consumo humano.

Las aguas de los lagos Uru Uru y Poopó no son aptas para ningún uso, porque las concentraciones cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, sodio, potasio, boro, estaño, plomo, antimonio, arsénico, cadmio, cobalto, cromo, hierro y níquel; están por encima de los límites permisibles para cualquier uso y riego. Solo son aptos para riego algunos afluentes al río Desaguadero y los lagos Poopó y Uru Uru, tales como los ríos: Maure-Mauri, Juchusuma, Azanaques y Sevaruyo (en época de lluvias).

PALABRAS CLAVE: SEQUÍA, SALINIDAD, CONTAMINACIÓN, LAGO POOPÓ

SUMMARY

The TDP System study concerning to physico-chemical parameters, such as: conductivity, sodium, salinity, turbidity, sulfates, dissolved silica, boron, wolfram and tin, show that the surface waters of Desaguadero river from birth at the outlet of Titicaca lake. To the entrance to the lakes Uru Uru and Poopó and its effluent is not suitable for human consumption.

The waters of the lakes Uru Uru and Poopó are not suitable for any use, because the concentrations of: chlorides, sulfates, calcium, magnesium, sodium, potassium, boron, tin, lead, antimony, arsenic, cadmium, cobalt, chromium, iron and nickel are above the permissible limits for any use and irrigation.

Only a few are suitable for irrigation, Desaguadero river tributaries and Uru Uru, Poopó lakes, such as the rivers: Maure-Mauri, Juchusuma, Azanaques and Sevaruyo (during the rainy season).

KEY WORDS: DROUGHT, SALINITY, CONTAMINATION, POOPÓ LAKE

C2.1.INTRODUCCIÓN

El año 2008, LIDEMA publicó información sistematizada sobre ocho temas socio ambientales críticos, priorizados para fines de evaluación y seguimiento, debido a que se advertía que estas problemáticas acumulaban severos impactos y amenazas crecientes sobre la calidad ambiental, los ecosistemas y los medios de vida de las poblaciones locales.

Durante el 2009, y parte del 2010, se hizo seguimiento y actualización de la investigación de estas problemáticas. Muchas de ellas han sido desglosadas en subtemas específicos especialmente complejos, por ejemplo en minería, hidrocarburos o megaproyectos energéticos (LIDEMA 2010).

En la actualidad enfrentamos una mezcla compleja de problemas que van alcanzando niveles de crisis, en la frágil cuenca de los lagos Poopó y Uru Uru, antes conocida por sus recursos acuáticos, con una rica diversidad de especies endémicas (peces, aves y otros). Son varios los factores que determinan el deterioro de los medios acuáticos de estos lagos:

- La variabilidad climática,
- La reducción de los niveles de las aguas por disminución de aportes principales afluentes y en el curso principal del río Desaguadero (trasvase de aguas),
- La contaminación por las actividades mineras y otras actividades humanas.

La sequía y la salinidad se constituyen en problemas críticos de la zona, bajo éste tópico, se puede indicar que la salinidad por efecto de la sequía, son factores que se encuentran relacionados entre sí. El lago contiene altas concentraciones de sales disueltas con aguas de fases cloro – sulfatados – sódica, con valores observados entre 20 y 40 g l⁻¹ y un pH de 8.7 (NaCl y NaSO₄). Las concentraciones de sales disueltas disminuye por que el material disuelto no escapa con el agua que evapora.

Considerando que el lago no tiene efluente importante, las sales como la contaminación minera se concentran en épocas de sequía (Mier 1983). La sequía actual empezó en el año 1988, un período donde la superficie del lago ha reducido aproximadamente 65 % de su extensión normal. Tomando en cuenta la correlación inversa entre el volumen de agua y la salinidad, la concentración de sales disueltas subió mucho durante este período. En algunas especies de peces, el aumento excesivo en la concentración de salinidad puede causar mucho daño, pero esto no parece muy probable en el caso del pejerrey, porque su medio natural son los estuarios salados de Argentina. Teóricamente, los niveles actuales de salinidad pueden causar la degradación pesquera del Lago (Bocángel 1999). La salinidad tan poco ha sido un factor importante sobre la degradación pesquera en sequías anteriores. Sin embargo cuando los niveles de salinidad superan los 40 g/l, entonces la capacidad osmótica del pejerrey o de cualquier pez no aguanta estas concentraciones y su consecuencia es la desaparición del medio.

C2.1. ÁREAS DE IMPACTO POR CONTAMINACIÓN DE METALES PESADOS

El área de mayor impacto en el Lago Poopó es indudablemente la parte Noreste que recibe afluentes provenientes de las zonas mineras.

C2.1.1. METALES DE RIESGO

Los metales de riesgo son en primer lugar el arsénico, en toda la zona estudiada, el cadmio, el plomo, el antimonio y el zinc se encuentran en concentraciones elevadas (Beveridge 1983), a veces encima de los límites permisibles para agua potable a nivel local en algunos lugares.

Zonas de alto riesgo: concentraciones altas de metales pesados:

- Las zonas de riesgo es la parte Noreste del lago Poopó por la influencia de minas activas y/o pasivos ambientales de la minería,
- Son sumideros importantes para los metales pesados que se acumulan en sus sedimentos,
- Toda la zona estudiada muestra muy altas concentraciones de arsénico en los cuerpos de agua.

Los aportes de metales de origen natural hacia los lagos provienen del río Desaguadero desde el norte, y los afluentes del sur hacia el lago Poopó, entre ellos el río Márquez. Las fuentes naturales del arsénico son las vulcanitas del mioceno en la cuenca del río Mauri y las vulcanitas del mioceno tardío/pleistoceno en las cuencas de los ríos Márquez y Sevaruyo (MDSyMA, PPO 1996). Las fuentes naturales del plomo son: las vulcanitas y mineralizaciones asociadas de la caldera de soledad al norte del lago Uru Uru (MDSyMA, PPOb 1996).

Las fuentes antropogénicas de metales son las actividades mineras en el norte del lago Uru Uru y el Noreste del lago Poopó y el procesamiento de minerales en la fundición de Vinto.

Se detectaron las siguientes limitaciones para el uso del agua:

- Salinidad: restringe el uso como agua potable y abrevadero para animales (límite 1g/l de sales), agua de riego (puede llevar a la salinización del suelo).
- pH: en algunos casos el pH sube encima de nueve, lo que restringe el uso del agua para el consumo.
- Contaminación orgánica: en todas las muestras se encontraron valores de DQO encima del límite permisible para agua potable y aguas de la clase A.
- Contaminación con metales: en la mayoría de los casos por lo menos uno de los metales se encuentra por encima de los límites permisibles establecidos para agua potable (MEDMIN 2006).

C2.2.2. LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS Y LA SALUD

Los principales riesgos por contaminación con metales pesados para la conservación de los ecosistemas y para la salud humana (Quintanilla *et al.* 2003) pueden resumirse en:

- Impactos directos en las comunidades acuáticas (ECO ANDINO 1997).
- Impactos directos en la salud humana por el uso del recurso agua como agua potable y por uso alimenticio de ciertos recursos acuáticos (peces y aves).
- Impactos directos en la salud del ganado por el uso de plantas acuáticas (totora, llachu) como forraje y por esta vía impactos indirectos en la salud del hombre.
- Impactos indirectos en la salud humana por el uso del agua contaminada en el riego de productos agrícolas (ALT 2000).

C2.2.3. RIESGOS PARA EL ECOSISTEMA

El contenido de metales pesados en los cuerpos de agua se encuentra en general sobre los límites permisibles establecidos para la protección de la biocenosis acuáticas y sobre los límites para aguas con pesca, porque muchos animales acuáticos reaccionan de forma sumamente sensible frente a una contaminación con metales (Pinto 1994). Como parte de las contaminaciones con metales pesados se debe a fuentes naturales, se puede asumir que la flora y fauna de esta región ha desarrollado ciertas adaptaciones frente a una intoxicación con estos elementos, especialmente arsénico que es muy distribuido en la zona altiplánica (Ayala *et al.* 2009).

C2.2.4. RÉGIMEN HIDROQUÍMICO Y CONTAMINACIÓN NATURAL

La regulación hidroquímica es un factor importante de ser considerado en la evaluación del sistema, dada la condición de sistemas cerrados que estos tienen, lo que supone que el régimen hidroquímico caracteriza la naturaleza y aptitudes de los cuerpos de aguas y corresponde a un factor explicativo sobre la problemática ambiental existente (Proyecto CAMINAR 2009). Sin embargo son pocos los estudios que se disponen sobre este particular, los existentes se refieren principalmente al lago Poopó, que se constituye en el principal referente de evaluación.

La circulación de sales disueltas a través del lago Poopó está regulada por los aportes fluviales, en Desaguadero es alimentado por el río Maure-Mauri y en menor proporción por el río Márquez, y las pérdidas por infiltración y por sedimentación biogeoquímica (García *et al.* 2009).

La composición química de las aguas lacustres y de las aguas fluviales ha sido determinada para el período 1976-1977 por Quintanilla (2003) y comprende las siguientes características de los equilibrios dinámicos de las diferentes sales disueltas:

- Los iones Na⁺ y Cl⁻ son eliminados por infiltración. Por el contrario casi todos los aportes en sílice disuelta y en carbonatos sedimentan en el mismo medio (respectivamente 99% y 94%),
- Las sedimentaciones de Ca⁺², Mg⁺² y SO₄⁻² son igualmente importantes;
- Como las reservas en sales del lago son débiles, la renovación anual de los elementos disueltos es bastante elevada, especialmente para los que sedimentan en parte en el lago. Así el tiempo de residencia de Na⁺ y Cl⁻ es de 26,5 años, el de sílice disuelta de una semana.

Estas condiciones hacen que el lago Poopó sea un medio muy inestable, debido a la gran variación del volumen de agua, se produce también una variación en la concentración; por esto éste medio lacustre es apto únicamente para aquellas especies con gran capacidad de adaptación.

El régimen hidroquímico establece la susceptibilidad de variaciones que son afectadas por procesos de contaminación natural propias de la zona, estas han sido parcialmente consideradas en la Cuenca del Lago Poopó, no existen estudios relacionados a la Cuenca del Salar de Coipasa.

La contaminación natural ha sido establecida por estos elementos:

a) La salinización, cuya relación principal se ubica en la región final del río Desaguadero Lago Poopó, que presenta los siguientes valores críticos: salinidad, total de sólidos disueltos, TDS; los valores de este parámetro van incrementándose del Norte al Sur de la Cuenca, en el lago Poopó alcanza valores máximos de 25 a 40 g/l, en la primavera, que tiene sus máximas concentraciones.

b) Alcalinidad total; hay un ascenso periódico en las concentraciones de éste parámetro del Norte

(Desaguadero), con valores entre 90 a 200 mg/l; hacia el sur de la cuenca (lago Poopó), con valores del orden de 400 a 600 mg/l.

c) Ión sodio; en el lago Poopó, la concentración del ión sodio es 10 veces mayor que en el río Desaguadero, y con un aumento progresivo, en época de primavera, donde alcanza sus mayores concentraciones, en promedio tiene desde 4,11 a 30 g/l, notándose una ligera disminución a la salida del lago (río Lacajahuira).

d) Ión cloruro; tiene un comportamiento similar al ión sodio, con un aumento gradual del norte al sur, alcanzando en primavera sus máximas concentraciones, 20 g/l, notándose también una disminución constante de éste elemento a la salida del Poopó, en el río Lacajahuira, debido posiblemente a una sedimentación en el lago, sus concentraciones varían en función del tiempo desde 7 hasta 18 g/l.

e) Ión sulfato, tiene una concentración 10 veces mayor en el lago Poopó que en los puntos de muestreo en el río Desaguadero, alcanzando en primavera y verano sus máximas concentraciones, de 8 a 19 g/l, evoluciona desde 2 a 6 g/l en su composición media.

La contaminación natural establecida ha sido demostrada por efecto de afluentes salinos, en la región media del Desaguadero, en la zona posterior al vertido de aguas del río Mauri, aguas abajo, donde se presentan arenales, salitrales y vetas salinas importantes (Gutiérrez 2009, Orsac *et al.* 2000)

También se puede notar en la evolución general del sistema una concentración muy fuerte en la región del Poopó, con valores superiores a límites permisibles en los siguientes iones: calcio, magnesio, potasio y boratos (MDSyMA – SGAB 1996).

Contaminaciones por arsénico, este elemento se encontró desde Eucaliptus hacia el sur de la cuenca en el subsuelo, en yacimientos naturales y debido a la salinidad de las aguas y al nivel freático muy variable; este elemento es lixiviado hacia las aguas superficiales de la cuenca. En todos los puntos de muestreo sus concentraciones son elevadas, de 0,6 a 0,8 mg/l, que hace que no sea apta para ningún consumo (Selander & Svan 2007).

C2.2.5. CONTAMINACIÓN ANTRÓPICA

Las fuentes de contaminación antrópica de los ríos de la región pueden ser identificadas por dos causas principales (Ricaldi 2009):

- Contaminación derivada de las actividades minero metalúrgicas, constituyéndose esta en la

principal fuente de deterioro ambiental (Patureau 2008, Mollo 2009);

- Contaminación por efecto de asentamientos urbanos y actividades inherentes no industriales (Calcina 1996).

C2.2.6. CONTAMINACIÓN DEL LAGO POOPÓ

Bajo estas características, el lago Poopó se encuentra sometido a procesos de contaminación combinados, por una parte una contaminación de origen natural, que deviene de su propia naturaleza, por otra la contaminación por aguas residuales de actividades minero – metalúrgicas, ubicadas en la zona (Mendoza 2009).

La contaminación de origen natural proviene de la concentración de compuestos que son: por procesos naturales transportados por medio de los afluentes hacia el lago. El río Desaguadero, principal afluente deposita sus aguas en el lago Uru Uru, pasando luego al lago Poopó y aporta una importante cantidad de sales disueltas, que corresponde principalmente a cloruros (cloruro de sodio, sal común) sulfatos y sílice. Otro afluente importante es el río Márquez al sur del lago, aporta contenidos importantes de sílice y proporcionalmente concentraciones menores de otros contaminantes. Estos compuestos depositados finalmente al lago, se someten a diferentes procesos, perdidas por infiltración y precipitación y una permanencia en forma disuelta, que corresponde a un tiempo de residencia de 16,5 años para los sulfatos, 26,6 años para los cloruros, para la sílice una semana.

En consecuencia siendo elevada la tasa de renovación de las aguas y con tiempos de residencia moderados y la concentración depositada de contaminantes salinos corresponden a tiempos de residencia elevados, el proceso natural corresponde a la concentración salina, principalmente de sal común, lo que hace que el lago Poopó sea un medio inestable, debido a las fuertes variaciones del volumen de aguas, que se refleja en variaciones importantes en la concentración de la salinidad, lo que hace desde el punto de vista biológico que este medio lacustre sea específico para el desarrollo de especies de mayor capacidad de adaptación frente al lago Titicaca (Rivera 2008).

En este contexto, la contaminación por las actividades minero – metalúrgicas se desarrolla como parte de un proceso, que estructura el espacio regional de manera que se concentra la población del altiplano central en la cordillera oriental, en la que se encuentran prácticamente la totalidad de los asentamientos mineros, como las regiones del Centro Minero Huanuni, Cañadón Antequera, Poopó y otras, en las que se ubica la actividad minera extractiva y de procesamiento primario (ingenios), que se abastecen de agua de insumo de los ríos que bajan de la cordillera y vierten sus residuos en los

afluentes a la cuenca del lago Poopó (Orsac 1994, Beveridge 1983, Soria 2001, Castro 1999).

En estas condiciones, de contaminación natural y antrópica los resultados son alarmantes, se evidencia el riesgo inminente de deteriorar irreversiblemente el lago Poopó y de dañar sus riquezas piscícolas, en los sedimentos extraídos de los límites de lago las concentraciones de plomo se encuentran entre 0,06 a 0,71 ppm, el Cobalto entre 0,06 a 0,45 ppm, el níquel entre 0,03 a 0,59 y el zinc entre 0,07 a 17 ppm. Frente a límites recomendados del orden de las diez milésimas en todos los casos, estos metales han sido también detectados en los peces del lago con valores de 3,08 a 5,93 ppm de plomo, 1,65 a 3,81 ppm de cobre, de 0,57 a 1,14 ppm de cobalto, de 0,65 a 2,72 de níquel y de 50 a 101,9 de zinc (Pinto 1994, Cáceres *et al.* 2003).

La problemática considerada en resumen concierne a los siguientes grupos generales de problemas (Tabla C2-1):

- a. Problemas derivados de la contaminación ambiental de origen antrópico, derivada de las actividades mineras (Ribera 2010, Mercado *et al.* 2009, Figura C2-1), poblaciones urbanas y pasivos ambientales relacionados. Esta problemática tiene una fuerte incidencia sobre el estado ambiental de los lagos Poopó y Uru Uru. El nivel de intervención necesario corresponde a una prioridad para reducir las cargas contaminantes y mitigar la contaminación existente (Ribera 2008).
- b. Problemas derivados de la contaminación natural, que tienen directa relación sobre la calidad de las aguas de los lagos y cuya evolución debe ser motivo de una mayor comprensión, para establecer en forma predictiva el comportamiento de los cuerpos de aguas y la evolución del sistema natural. En este grupo se debe considerar la mineralización de aguas y suelos, la salinización del sistema y la regulación hídrica.
- c. Problemas derivados del manejo de recursos naturales, principalmente relacionados con las prácticas culturales y la producción agropecuaria, que permita el uso racional de los recursos existentes y su preservación en forma sostenible (Chambi 2010, Ascarrunz 2010, Ávila 2006).

Finalmente se puede concluir que el río Lacajauira que conecta el lago Poopó con el salar de Coipasa lleva también en sus aguas una concentración importante de sulfatos. Sin embargo las concentraciones de metales pesados, tanto de las muestras de aguas como de sedimentos son bajas, por tanto parecería que los metales pesados se van depositando en la parte noreste y central del lago Poopó, por gravedad y la poca pendiente que tiene este cuerpo de agua, permitiendo un tiempo de renovación de las aguas de mucho tiempo.

En la temporada seca la concentración de metales disueltos en todos los puntos de muestreo, es mucho más elevada que en la época húmeda.

En todos los casos, las concentraciones de As, Pb, Cd y Zn se encuentran por encima de los límites máximos permisibles de aguas aptas para riego y vida acuática.

En épocas de transición (semihúmeda y semiseca), las concentraciones de As, Pb, Cd y Zn permanecen casi constantes.

Tabla C2-1- Matriz de especificación de la problemática, considerando los criterios propuestos.

REG.	Problemática ambiental	Restricciones	Alternativas
1	Problemas ambientales urbanos. Contaminación minera localizada. Pasivos ambientales. Salinización/degradación suelos. Contaminación natural. Desregulación hídrica.	Carencia de políticas e inversión pública Falta de estudios sobre la salinización de suelos Carencia de información sobre la regulación hídrica Recursos económicos limitados	Tratamiento sanitario Aplicación de proyectos específicos Manejo y control de suelos Estudio predictivo de fuentes naturales de contaminación Evaluación obras de regulación hídrica
2	Contaminación minera. Acumulación Pasivos ambientales. Problemas ambientales urbanos.	Ausencia de políticas ambientales sobre la minería tradicional Falta de aplicación del marco regulatorio Recursos económicos limitados	Aplicación de proyectos específicos
3	Contaminación natural de ríos.	Carencia de estudios específicos sobre fuentes de contaminación natural	Desarrollo de estudios de evaluación y predicción de la contaminación natural
4	Salinización de suelos. Desertificación y erosión. Contaminación natural.	Falta de estudios sobre la salinización Limitaciones en la formación de recursos para el manejo de suelos	Proyectos de fomento a la actividad agropecuaria
5	Salinización de suelos. Degradación de praderas.	Ausencia de políticas para el desarrollo agropecuario	Evaluación de la salinización de suelos y recuperación de praderas

Realizar la evaluación ambiental de sistemas de riego y salinización de suelos y complementar, profundizar los estudios de sedimentos en los principales ríos de la cuenca del lago Poopó y Uru Uru; así como también realizar investigaciones más regulares y en puntos conflictivos de los sedimentos en el mismo lago Poopó (Choquehuanca 2006); (Zamora 2008); (Chambi 2010).

Realizar campañas de muestreo hidroquímico y de metales pesados en épocas de contraste (4 veces al año) en aguas y sedimentos, a fin de verificar el transporte o sedimentación de los mismos.

Es necesario llevar adelante estudios que permitan disminuir la carga de metales pesados que son arrastrados a la cuenca; se sugiere como estudios prioritarios preventivos:

- Remediación de los sitios mineros abandonados (pasivos ambientales) mediante tecnologías de recubrimiento con suelos (evapotranspiración).
- Tratamiento de Drenajes Ácidos de Minas, mediante métodos pasivos y activos; en función del caudal, calidad de las aguas, disponibilidad de áreas de tratamiento, efectividad, costos y otros.
- Recolección y Tratamiento de Drenajes Ácidos de Roca por métodos activos y pasivos.

Se debería realizar estudios propositivos encaminados a la Restauración del lago Poopó, considerando:

- Un manejo integral de cuencas
- Bioremediación del lago Poopó (tanto de sus aguas como de sus sedimentos)
- Procurar la conservación de la biocenosis acuática, tratando de mantener los niveles de agua necesarios (regulación del caudal de norte a sur de la cuenca Endorreica) y el control de contaminantes en los ríos afluentes al lago Poopó.

Por último, los futuros estudios deberán considerar evaluaciones en todos los niveles tróficos para identificar procesos de bioacumulación de contaminantes, que serán diferentes entre especies y diferentes comunidades.

C2.4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALT (Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Salar de Coipasa) 2000. Evaluación del impacto del riego con aguas del río Desaguadero sobre la salinización, Sodificación y acumulación de metales pesados en suelos y vegetación. Sectores Chilahualla y El Choro, Anexos del Informe Principal.
- Ascarrunz M.E. et al. 2010. Daño Genotóxico por Contaminación Minera en Oruro. Investigación Ambiental; PIEB; Embajada de Dinamarca. 137 p.
- Ávila M.C.A. 2006. Determinación de Metales Pesados en Plantas Acuáticas de la Parte Norte y Noreste de la Cuenca del lago Poopó. 129 p.
- Ayala G., Taquichiri L. & Nuñez D. 2009. Recuperación de Suelos Salinos Mediante el Cultivo del Q'AWCHI. Prefectura de Oruro, Secretaría Departamental de Recursos Naturales y Medio Ambiente – Oruro, Bolivia 38 p.
- Beveridge M. & R. Coutts R. 1983. Aspectos de Contaminación del Lago Poopó con Metales Pesados .

C-2 Contaminación en metales pesados en el Sistema TDP

Universidad de Stirling - Escocia

- Beveridge M. 1983. Un Estudio de los Niveles de Metales Pesados en el Lago Poopó, Bolivia; Oruro, Bolivia. Institute of Aquaculture, University of Stirling, Escocia, 44 p.
- Bocángel J.D. 1999. Efecto de la contaminación de las aguas del lago Uru Uru sobre las comunidades de Macro invertebrados Acuáticos. Tesis Carrera Biología UMSA La Paz, Bolivia; 137 p.
- Cáceres L., Choque R., Ramos O. & Choque R. 2003. – Especiación de elementos traza en sedimentos. VI Congreso Boliviano de Química, Potosí, Bolivia. Pp. 27-32.
- Calcina C.M.J. 1996. Flora Natural Acuática en la Depuración de Aguas Residuales en la Empresa Metalúrgica Vinto (Fundición de Antimonio) Oruro; 151 p.
- Castro I.M.E. 1999. Aporte Metodológico para la Evaluación Ambiental en las Operaciones de las Cooperativas Mineras (caso cooperativas mineras de Huanuni). Tesis Ingeniería Química, UTO, Oruro; 86 p.
- Chambi L.J., 2010. Evaluación de la Presencia de Metales pesados en Suelos Agrícolas y Cultivos en Tres Microcuencas del Municipio de Poopó. Tesis de Grado para la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor De San Andrés; La Paz, Bolivia. 158 p.
- Choquehuanca M.J.V. 2006. Estudio preliminar y aplicación de técnicas de la percepción remota y el SIG en la detección y mapeo de zonas afectadas por la actividad minera; Distrito Minero Poopó. Proyecto de Grado, Universidad Técnica de Oruro; Oruro, Bolivia; 207 p.
- Dames & Moore Norge 2000. Caracterización de los Medios Receptores Mina San José. PMAIM Informe Final N° 2.; 192 p.
- ECO ANDINO 1997– Contaminación Lago Poopó: Salud Pública , Aguas Residuales y Residuos sólidos, Biodiversidad y Parque Sajama. Revista del Centro de Ecología y Pueblos Andinos (CEPA) Oruro, Bolivia.
- García M.E., Mattiasson B, & Persson K. A comparative study of phytofiltration and bioremediation for metal removal from water in a mining area of Poopó Lake basin; Bolivia. 2 p.
- Gutiérrez R. 2009. Contaminación minera en Oruro y Potosí. PIEB y Embajada Real de Dinamarca; La Paz, Bolivia. 105 p.
- LIDEMA 2010. Minería en Bolivia; Amenazas, Impactos y problemas socio – ambientales. Revista HABITAT N° 79, La Paz, Bolivia. 21 p.
- Mamani C.I. 2009. Estudio Ambiental sobre Metales Pesados en la Micro cuenca de San Juan de Sora Sora. UTO Oruro, Bolivia; 170 p..
- Maritza M., García M.E. & Quintanilla J. 2009. Evaluación de los niveles de contaminación por plomo y arsénico en muestras de suelos y productos agrícolas procedentes de la región cercana al complejo Metalúrgico Vinto. Revista Boliviana de Química. Volumen 26, No. 2; La Paz, Bolivia; pp. 101-109.
- MEDMIN 2006. Plan de Acción Ambiental Municipal- Diagnóstico Minero Ambiental- Estudio de Minería- Municipio de Poopó. MEDMIN y Gobierno Municipal de Poopó. 76 p.
- Mendoza D. 2009. Tratamiento de descontaminación de las aguas ácidas de la mina San José, aplicando un sistema combinado de Bioremediación Físicoquímico; La Paz, Bolivia; 43 p.
- Mier A. 1983. Mesa Redonda sobre Contaminación de Aguas. Sociedad Boliviana de Ecología, La Paz, Bolivia. 18 p.
- Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Secretaría Nacional de Minería, Proyecto Piloto Oruro (PPO) 1996. Evaluación de Recursos Minerales y su Utilización; 32 p.
- Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente; Secretaria Nacional de Minería; Proyecto Piloto Oruro 1996. Impacto de la minería y el procesamiento de minerales en cursos de agua y lagos; Oruro, Bolivia; 178 p.
- Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente; Secretaria Nacional de Minería; Proyecto Piloto Oruro 1996. Depósitos de residuos minerales en el área del PPO I; Caracterización de Colas Proyecto PPO; Oruro, Bolivia; 65 p.
- Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente; Secretaria Nacional de Minería; Proyecto Piloto Oruro 1996. Impacto de la contaminación minera e industrial sobre aguas subterráneas; Oruro, Bolivia; 117 p.
- Mollo M.N. 2009 (Ed). Remediación Ambiental Minera. Oruro, Bolivia. 58 p.

- Montoya J.C., Mendieta R. 2006. Salinización y metales pesados; Evaluación ambiental de la mina "Kori Kollo" (EMIRSA) en el área de influencia, con aplicación de la teledetección SIG; CEPA, Oruro, Bolivia; 206 p.
- Orsag C.V. 1994. Consideraciones sobre la contaminación química de los suelos circunlacustres al lago Poopó. Seminario Taller Regional Sobre el Lago Poopó, Oruro, Bolivia; 15 p.
- Orsag C.V., Miranda C. & Roberto 2000. Evaluación del Impacto del Riego con Aguas del Río Desaguadero sobre la Salinización, Sodificación y Acumulación de Metales Pesados en Suelos y Vegetación. ALT, La Paz, Bolivia: 44 p.
- Patureau N. 2008. Contaminación de Aguas Subterráneas en la Ciudad de Oruro (Bolivia) y Posibles Soluciones para evitar mas polución en el futuro – University Mewcastle upon Tyne – Inglaterra.
- Pinto J. 1994. Estudio de la contaminación del lago Poopó, en relación a metales pesados en la cadena trófica, incluido el hombre. Seminario Taller Regional sobre el Lago Poopó, Oruro, Bolivia 11 p.
- Proyecto CAMINAR (Gestión de Cuencas con Actividad Minera en Regiones Áridas y Semiáridas en Sudamérica) UNESCO -PHI – Lac, Documento Técnico Nº 17; 2009; Agua y Minería en Cuencas Áridas y Semiáridas - Guía para la Gestión Integral.
- Quintanilla J., Ramos O., García M.E., Bengtsson L., Berndtson R & Kennett P. 2003. Distribución de metales pesados en aguas superficiales y sedimentos en la subcuenca de los lagos Poopó y Uru Uru, Bolivia. Memoria VI Congreso Boliviano de Química; La Paz, Bolivia; 7 p.
- Ribera M.O. 2010 El Sector Minero. Programa de Investigación y Monitoreo Ambiental LIDEMA; La Paz, Bolivia; 110 p.
- Ricaldi Y.E. 2009. Halos de Contaminación de la Sub-Cuenca del Rio Antequera (Pazña Departamento de Oruro). Instituto de Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés; La Paz, Bolivia. 10 p.
- Rivera M.O. 2008. La hiper contaminación de la bahía de Cohana; Observatorio Ambiental de LIDEMA – Estudio de caso 1; Lidema – La Paz – Bolivia; 85 pp.
- Rivera M.O. 2008. Problemas Socio ambientales de la Minería en Bolivia. LIDEMA, la Paz, Bolivia. 153 p.
- Selander L. & Svan P. 2007. Occurrence and Distribution of Heavy Metals in Lake Poopó, Bolivia. Department of Chemical Engineering del Center for Chemistry and Chemical Engineering y el Department of Water Resources Engineering del Lund Institute of Technology; Lund, Suecia. 78 p.
- Soria P.N.B. 2001. Estudio Exploratorio de Alternativas de mitigación de la Contaminación de aguas ocasionada por las Cooperativas mineras de Huanuni. Trabajo Dirigido, UTO – Oruro, Bolivia; 147 p.
- Zamora G. 2008. Plan de Manejo Integral de la Cuenca del río San Juan de Sora Sora Huanuni – Oruro; Dirección de Postgrado e Investigación Científica (DPIC) / UTO; Oruro, Bolivia; 35 p.
- Zamora G. 2010. Remediación ambiental como alternativa de desarrollo local. PIEB, Investigación Ambiental; Oruro, Bolivia; 198 p.



C-3

CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA CADENA TRÓFICA DE LOS LAGOS TITICACA, URU-URU Y POOPÓ

HEAVY METAL CONTAMINATION IN THE TROPHIC CHAIN OF TITICACA, URU-URU AND POOPÓ LAKES

Carlos I. Molina, UMSA-IE camoar6088@gmail.com

David Point, IRD-GET

RESUMEN

Mediante la revisión de diferentes trabajos, se observó la carencia de información primaria (artículos científicos). La mayoría de los trabajos existentes no especifican sobre la trazabilidad de referencia para la validación de los niveles de metales pesados reportados. Es muy probable que los diferentes niveles o patrones de bioacumulación de metales pesados observados en organismos acuáticos de las lagunas del sistema TDP, estén influenciados por la variación temporal del nivel de agua y la intensa actividad minera de la región. Por otro lado, la transferencia metálica están influenciada en gran medida por los taxones presentes y las cadenas tróficas. La longitud de las cadenas tróficas influye en los patrones de bioamplificación de Hg. Influye también la interrupción de las mismas, en donde los contaminantes que tienden a biodiluirse, como el As, Fe y Zn, muestran elevados niveles en bajas posiciones tróficas. Proponemos realizar monitoreos de la carga de contaminantes, mediante la obtención de sangre en la ave acuática Choca (*Fulica ardesiaca*).

PALABRAS CLAVE: BIOACUMULACIÓN, BIOAMPLIFICACIÓN, BIODILUCIÓN, LONGITUD DE LA CADENA TRÓFICA Y TRAZABILIDAD DE REFERENCIA

SUMMARY

Through the revision of different works, we detected the absence of primary information (papers). Most of the found works do not specify about the reference traceability for the validation of the reported levels of heavy metals. It is likely that different levels or patterns of heavy metals observed in aquatic organisms in the TDP

system, are influenced by the temporal variation of the water level, and the intense mining activity of the region. Furthermore, we observed that the heavy metal transfer is mostly influenced by the food chains. The food chain length influences biomagnification patterns of Hg. Also influences the disruption, where contaminants, which tend to be biodiluted, such as As, Hg and Zn, show high levels in low trophic positions. We propose to conduct biomonitoring of the burden of contaminants, by obtaining blood in the waterfowl specie.

KEY WORDS: BIOACCUMULATION, BIOAMPLIFICATION, BIODILUTION, FOOD CHAIN LENGTH, TRACERS REFERENCE.

C3.1. INTRODUCCIÓN

Se denominan metales pesados a un grupo de elementos no muy bien definidos, ya que exhiben diferentes propiedades físicas. En general cuando se hace alusión al término de metal pesado, se entiende como un contaminante inorgánico metálico que incluye a algunos metaloides como el arsénico (As). Aunque muchas de estas sustancias se encuentran disponibles en forma natural en el ambiente, como resultado de las actividades humanas, éstos pueden ser movilizados o modificados y llegan a convertirse en un serio problema no solo en los ecosistemas, sino también en la salud de los organismos.

Muchos de estos metales pesados, así como el Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeseo (Mg), Selenio (Se) y Zinc (Zn), son micronutrientes, es decir que los sistemas biológicos requieren pequeñas dosis para su funcionamiento, pero cuando éstos se hallan en elevadas concentraciones, llegan a ser tóxicos. Por otro lado, Arsénico (As), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg) y Plomo (Pb), son más tóxicos porque, a bajas concentraciones, ya desencadenan reacciones.

En el Altiplano boliviano se reconocen dos tipos de fuentes de contaminación metálica: la de origen natural y aquella que es producto de actividad minera (PPO 1996). Estas fuentes están relacionadas con los depósitos polimetálicos de la Cordillera Occidental de los Andes en Bolivia, de los cuales desde la antigüedad, se ha extraído zinc (Zn), plomo (Pb), Plata (Ag), Wolfram (W), Estaño (Sn), Bismuto (Bi), cobre (Cu), Oro (Au) y Antimonio (Sb) (Arce-Burgoa 2007). Estas actividades extractivas han estado asociadas con la emanación y dispersión de otros elementos como As, Cd y Hg.

Mediante el sistema de drenaje del Altiplano y las aguas residuales no procesadas de las mineras, los grandes lagos del sistema TDP (lagos Titicaca, Uru-Uru y Poopó), son receptores de toda esta carga de contaminantes. Estos contaminantes, en sistemas biológicos como los ecosistemas acuáticos, son sometidos a procesos de bioacumulación y biomagnificación. El primer proceso referido a que los organismos pueden tomar más rápidamente el contaminante que eliminarlo (Market 2007), y el segundo referido a que la concentración de este contaminante se incrementa al pasar a un nivel superior en la cadena trófica (Molina *et al.* 2010a).

En los organismos acuáticos, los principales órganos de asimilación de contaminantes metálicos, son: las branquias, el recubrimiento cutáneo y el tracto digestivo; en cambio la eliminación está dada por vías urinaria, fecal y algunas glándulas de excreción (Sweet & Zelikoff 2001). Sin embargo, la disponibilidad del contaminante en los organismos acuáticos es muy heterogénea, ya que depende de la variabilidad de factores ecológicos y fisiológicos, tales como: estado de crecimiento, posición trófica, tamaño, biomasa, sexo, así como también del comportamiento migratorio de las especies (Meili 1997) y ruta trófica de asimilación (Molina *et al.* 2010a).

El presente capítulo, pretende sintetizar y analizar los principales trabajos sobre contaminación metálica en organismos acuáticos y su relación con cadena trófica en los lagos Titicaca, Uru-Uru y Poopó. Al mismo tiempo, damos recomendaciones para la validación de la información disponible, identificamos los vacíos de información para proponer líneas de investigación y biomonitoreo por contaminación metálica en los lagos del sistema TDP.

C3.1.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA EXPRESIÓN DE UNIDADES DE CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN ORGANISMOS ACUÁTICOS.

La expresión de unidades de concentraciones de metales pesados en organismos acuáticos, dependen de los métodos analíticos de determinación. Los estudios pioneros sobre la acumulación de metales pesados en organismos acuáticos del sistema TDP, han estado expresados en amplias unidades de miligramos por kilogramos de peso analizado (mg kg^{-1}) o en partes por millón (ppm). A medida que los métodos técnicos y analíticos fueron desarrollando, la expresión de unidades fueron disminuyendo a microgramos por gramo de peso ($\mu\text{g g}^{-1}$) o nano gramos por microgramos de peso ($\text{ng } \mu\text{g}^{-1}$). En este sentido, también la expresión de los niveles de referencia sugeridos por organismos internacionales se fueron adaptando a la evolución de los métodos analíticos, pero con la particularidad que la expresión de estas unidades siempre han estado expresadas en peso húmedo (p.h.) del material biológico evaluado. Esta expresión en unidades de p.h., viene de la noción de que los organismos poseen contenido acuoso y los contaminantes pueden estar disueltos en líquidos corporales o adheridos a otras moléculas en diferentes compartimentos tisulares de los organismos. Dependiendo del tejido que se analiza, la detección de los metales por métodos analíticos, evalúan la concentración total del contaminante (a excepción de los métodos analíticos de especiación). Este mismo principio es aplicado a la interpretación de la transferencias de contaminantes en la cadena trófica, en donde el contaminante se transfiere de un nivel trófico inferior a otro superior y, en función al tipo del contaminante, éste se bioacumula y se biomagnifica.

La mayoría de trabajos revisados presentan sus unidades en mg kg^{-1} de peso seco (p.s.), por lo cual les homogenizamos a estas unidades para su comparación. Para realizar las comparaciones sobre

niveles de referencias para el consumo de peces, tomamos los valores de la Comisión Europea (2006), y los convertimos a unidades de peso seco (p.s.), en función al factor de conversión de 0.2 sugerido por Pourang *et al.* (2004) (Tabla C3-1).

Tabla C3-1. Valores de referencia regulados para el consumo de peces definidos en p.h. Los valores límites de referencia en peso seco (p.s.) fueron calculados en base a Pourang *et al.* (2004).

Unidad	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn	Referencia
mg kg ⁻¹ (p.h)	0.5	0.05	20	0.5	0.3	50	European Commission (2006)
mg kg ⁻¹ (p.s.)	2.5	0.25	100	2.5	1.5	250	Valores definidos para el presente trabajo

A continuación se hará una descripción cronológica de los diferentes estudios y, para tal fin, se construyó una tabla en donde se detallan los diferentes valores de metales pesados que fueron registrados por diferentes estudios en organismos y lagos del sistema TDS (Tabla C3-2).

C3.2. CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN LA BIOTA ACUÁTICA DEL SISTEMA TDP

C3.2.1. LAGO TITICACA

Existe poca información sobre niveles de acumulación de metales en la biota acuática del lago Titicaca. Mucha de esta información está restringida a informes de consultorías y universidades, cuyo acceso es limitada por la escasa difusión. Para este lago, la información disponible muestra acumulación de Hg como una prioridad ambiental a consecuencia del uso artesanal de este metal para la recuperación de oro (Au) en minas instaladas en partes superiores de ríos que tienen desembocadura en el lago Titicaca, como los ríos Ramis y Suches (región norte y noreste del lago).

A inicios del presente siglo, la Corporación Andina de Fomento (CAF), licitó a concurso para realizar el diagnóstico de contaminantes, como metales pesados, en el lago Titicaca. De este concurso fue seleccionado el consorcio formado por las empresas españolas, TÉCNICA Y PROYECTOS, S.A. (TYPESA) y PROINTEC, S.A. Este estudio resultó ser importante por el gran esfuerzo de trabajo, es decir se llegaron a evaluar 30 sitios alrededor de todo el lago (lagos mayor y menor). El estudio fue importante, pero limitado por su baja representatividad de las muestras (una muestra de peces o planta acuática por sitio de muestreo). El informe tampoco detalla los métodos analíticos para la determinación de los metales pesados, ni aporta con datos biológicos sobre las especies colectadas, ni fechas de las campañas de muestreo. A pesar de estas limitantes, el estudio llegó a la conclusión de que en la mayoría de los peces evaluados: *Odonthestes bonariensis* (Pejerrey) y *Orestias agassizii* (K'arache), la concentración medida del metaloide As estuvo por debajo del límite de detección analítico y contrariamente las macrófitas presentaban elevada acumulación de este metaloide (122-381 mg g⁻¹).

C-3 Contaminación por metales pesados en la cadena trófica de los Lagos Titicaca, Uru-Uru y Poopó

Tabla C3-2: Media y desviación estándar de las concentraciones de metales pesados en organismos acuáticos reportados en los lagos del sistema TDP.

Lago y sitio	Grupo biológico	Periodo de muestreo	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn	Método de detección	Trazabilidad de referencia	Referencia			
Lago Titicaca														
Bahía de Puno														
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Jul-02	-	-	-	1.19 (±0.21)	-	-	CV-AAS	?	Gammons et al. (2006)			
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Jul-03	-	-	-	2.04 (±1.12)	-	-						
	Pez - ? <i>Orestias agassizii</i>	Jul-03	-	-	-	2.21 (±1.59)	-	-						
Huatajata														
	Pez - <i>Orestias cf. agassizii</i>	Dec-10	-	-	-	0.44 (±0.05)	-	-	CV-AFS	TORT-2	COMIBOL (2012)			
	Ave - <i>Fullica ardesiaca</i>	Nov-09	-	-	-	0.01 (±0.00)	-	-						
	Ave - <i>Fullica ardesiaca</i>	Dec-10	-	-	-	0.003 (±0.001)	-	-						
Lago Uru-Uru														
Este														
	Ave - <i>Phoenicopterus chilensis</i>	Jul-93	-	0.25	7.21	0.08	<0.50	23	FI-AAS	?	Apaza et al. (1996)			
	Ave - <i>Fullica ardesiaca</i>	Jul-93	-	0.075	11.3	< LD	1.25	61						
	Ave - <i>Oxyura jamaicensis</i>	Jul-93	-	< LD	10.2	< LD	1.13	24						
	Pez - <i>Orestias sp1</i>	Jul-93	-	0.106	2.4	1.12	<0.50	41						
	Pez - <i>Orestias sp2</i>	Jul-93	-	< LD	<2.0	0.61	1.56	25						
	Pez - <i>Orestias sp3</i>	Jul-93	-	0.065	3.6	1.35	3.03	57.5						
	Pez - <i>Orestias sp4</i>	Jul-93	-	0.07	6	1	1.25	23						
	Pez - <i>Orestias sp5</i>	Jul-93	-	< LD	4.9	3.9	1.42	29.5						
	Pez - <i>Orestias agassizii</i>	Jul-93	-	< LD	3.17	0.12	0.95	35.5						
	Pez - <i>Orestias luteus</i>	Jul-93	-	< LD	2.12	0.45	1.06	29.5						
	Zooplankton	Jul-93	-	15	15	1.29	1.5	86.5						
	Macrófita - <i>Scirpus</i> sp.	Oct-94	< LD	0.061	27.3	-	0.405	0.069						
	Macrófita - <i>Myriophyllum</i> sp.	Oct-94	77.4	< LD	3.23	-	1.8	80						
Norte														
	Sedimento superficial	Apr-08	105(±6)	11.5(±4.5)	60(±11)	0.30(±0.01)	< LD	380(±18)				ICP-OES CV-AFS	TORT-2	Molina et al. (2010)
	Perifiton	Apr-08	55(±2)	7.5(±0.5)	51(±1.5)	0.29(±0.01)	< LD	343(±14)						
	Macrófita - <i>Scirpus</i> sp.	Apr-08	< LD	< LD	< LD	0.01	< LD	38(±4)						
	Macroinvertebrados	Apr-08	6.11(±1.5)	< LD	25(±5)	0.03(±0.02)	< LD	69(±3)						
	Pez - <i>Orestias agassizii</i>	Apr-08	6.53(±0.65)	< LD	< LD	2.24(±0.12)	< LD	48(±7)						
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Apr-08	6.51	< LD	< LD	0.90(±0.11)	< LD	51(±9)						
	Ave - <i>Rollandia rolland</i>	Apr-08	< LD	< LD	13(±4)	2.48(±0.14)	< LD	52(±4)						
	Sedimento superficial	Apr-08	75(±3)	5(±1.20)	37(±6.00)	0.12(±0.01)	42(±6.20)	114(±0.71)						
Centro														
	Perifiton	Apr-08	159(±12)	2(±0.41)	19(±0.60)	0.10(±0.01)	26(±5.70)	51(±12)	ICP-OES CV-AFS	TORT-2	Molina et al. (2010)			
	Alga - <i>Cladofora</i>	Apr-08	16(±3)	< LD	5(±1.00)	0.04(±0.01)	< LD	38(±8)						
	Limnofitas - <i>Myriophyllum</i> sp.	Apr-08	68(±9)	< LD	4(±0.70)	0.14(±0.03)	< LD	26(±5)						
	Macroinvertebrados	Apr-08	16(±2)	< LD	18(±3.40)	0.09(±0.01)	< LD	85(±7.66)						
	Pez - <i>Orestia cf. luteus</i>	Apr-08	< LD	< LD	< LD	0.48(±0.07)	< LD	43(±4.40)						
	Pez - <i>Orestia cf. agassizii</i>	Apr-08	6(±0.14)	< LD	5(±1.30)	0.97(±0.08)	< LD	37(±2.00)						
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Apr-08	< LD	< LD	< LD	0.55	< LD	37						
	Ave - <i>Rollandia rolland</i>	Apr-08	6.53(±0.65)	< LD	26(±3.00)	2.24(±0.21)	< LD	47(±2.00)						
Norte														
	Sedimento superficial	Nov-09	-	-	-	0.08(±0.03)	-	-	CV-AFS	TORT-2	COMIBOL (2012)			
	Perifiton	Nov-09	-	-	-	0.02(±0.01)	-	-						
	Alga - <i>Cladofora</i>	Nov-09	-	-	-	0.03(±0.01)	-	-						
	Limnofitas - <i>Ruppia</i> sp.	Nov-09	-	-	-	0.01(±0.00)	-	-						
	Heliófitas - <i>Schoenoplectus</i> sp.	Nov-09	-	-	-	0.01(±0.00)	-	-						
	Invertebrado - <i>Hyellela</i> spp.	Nov-09	-	-	-	0.10(±0.01)	-	-						
	Invertebrado - <i>Hyellela</i> spp.	Oct-10	-	-	-	0.13(±0.02)	-	-						
	Invertebrado - <i>Corixidae</i> sp.	Oct-10	-	-	-	0.15(±0.01)	-	-						
Centro														
	Sedimento superficial	Nov-09	-	-	-	0.07(±0.02)	-	-				CV-AFS	TORT-2	COMIBOL (2012)
	Perifiton	Nov-09	-	-	-	0.07(±0.02)	-	-						
	Alga - <i>Cladofora</i>	Nov-09	-	-	-	0.02(±0.01)	-	-						
	Limnofitas - <i>Myriophyllum</i> sp.	Nov-09	-	-	-	0.02(±0.01)	-	-						
	Limnofitas - <i>Ruppia</i> sp.	Nov-09	-	-	-	0.02(±0.01)	-	-						
	Heliófitas - <i>Schoenoplectus</i> sp.	Nov-09	-	-	-	0.01(±0.00)	-	-						
	Plancton	Nov-09	-	-	-	0.15(±0.01)	-	-						
	Invertebrado - <i>Hyellela</i> spp.	Nov-09	-	-	-	0.11(±0.03)	-	-						
	Pez - <i>Orestia cf. agassizii</i>	Nov-09	-	-	-	0.60(±0.06)	-	-						
	Pez - <i>Orestia cf. luteus</i>	Nov-09	-	-	-	1.01(±0.02)	-	-						
	Pez - <i>Orestia cf. luteus</i>	Oct-10	-	-	-	0.85(±0.13)	-	-						
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Oct-10	-	-	-	0.65(±0.16)	-	-						
	Ave - <i>Fullica ardesiaca</i>	Nov-09	-	-	-	0.16(±0.01)	-	-						
	Ave - <i>Fullica ardesiaca</i>	Oct-10	-	-	-	0.13(±0.02)	-	-						
	Ave - <i>Rollandia rolland</i>	Oct-10	-	-	-	2.61(±0.3)	-	-						
Sur														
	Sedimento superficial	Nov-09	-	-	-	0.09(±0.00)	-	-	CV-AFS	TORT-2	COMIBOL (2012)			
	Perifiton	Nov-09	-	-	-	0.01(±0.00)	-	-						
	Alga - <i>Cladofora</i>	Nov-09	-	-	-	0.02(±0.01)	-	-						
	Heliófitas - <i>Schoenoplectus</i> sp.	Nov-09	-	-	-	0.01(±0.00)	-	-						
	Plancton	Oct-10	-	-	-	0.15(±0.02)	-	-						
	Invertebrado - <i>Notonecta</i> sp.	Nov-09	-	-	-	0.04(±0.01)	-	-						
	Invertebrado - <i>Corixidae</i> sp.	Oct-10	-	-	-	0.09(±0.01)	-	-						
	Pez - <i>Orestia cf. agassizii</i>	Oct-10	-	-	-	0.20(±0.01)	-	-						
	Ave - <i>Fullica ardesiaca</i>	Oct-10	-	-	-	0.03(±0.02)	-	-						
	Ave - <i>Rollandia rolland</i>	Oct-10	-	-	-	0.68(±0.18)	-	-						
Lago Poopó														
Norte														
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Nov-82	-	0.13 - 0.53	1.65 - 3.81	-	3.08 - 5.93	50.00 - 101.92				AAS	?	Beveridge et al. (1985)
	Pez - ? <i>Orestias agassizii</i>	Nov-82	-	0.36 - 1.09	4.16 - 8.73	-	5.53 - 7.94	101.48 - 152.4				AAS		
Sureste														
	Macrófita - <i>Zannichellia</i> sp	Jul-93	56.3	0.42	5.63	-	< LD	55	AAS	?	Apaza et al. (1996)			
	Macrófita - <i>Ruppia</i> sp	Sep-94	4.76	0.25	7.94	-	0.8	149	AAS					
Norte														
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Dec-05	21.5(±5.0)	0.1(±0.08)	-	0.55(±0.10)	< LD	392(±31)	AAS	RM8419	Molina et al. (2012)			
	Pez - <i>Orestia cf. agassizii</i>	Dec-05	< LD	0.32	-	1.23	< LD	50	AAS					
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Dec-05	< LD	0.26	-	0.17	< LD	35.3	AAS					
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Apr-06	3.1(±2.4)	4(±1.63)	-	0.08(±0.03)	< LD	276(±21)	AAS					
	Pez - <i>Orestia cf. agassizii</i>	Apr-06	< LD	0.25(±0.01)	-	0.73	< LD	82	AAS					
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Apr-06	< LD	0.2	-	0.24	< LD	51	AAS					
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Oct-06	13.2(±1.4)	0.12(±0.06)	-	0.06(±0.01)	< LD	266(±22)	AAS					
	Pez - <i>Orestia cf. agassizii</i>	Oct-06	2.5	<0.059	-	0.2(±0.01)	2.23	98(±23)	AAS					
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Oct-06	< LD	0.98(±0.09)	-	0.32	0.71(±0.11)	38.4(±4)	AAS					
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Feb-07	21.5(±5.4)	0.15(±0.07)	-	0.06(±0.03)	< LD	198(±17)	AAS					
	Pez - <i>Orestia cf. agassizii</i>	Feb-07	< LD	<0.059	-	0.15(±0.08)	< LD	149.4(±9.3)	AAS					
	Pez - <i>Odontesthes bonariensis</i>	Feb-07	< LD	0.21(±0.06)	-	0.22	< LD	37.5(±3.2)	AAS					
Centro														
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Apr-06	3.9(±0.9)	1.5(±0.10)	-	1.01(±1.6)	< LD	143(±20)	AAS			RM8419	Molina et al. (2012)	
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Oct-06	17(±2.7)	0.05(±0.07)	-	0.1(±0.05)	4.5(±2.2)	138.5(±15)	AAS					
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Feb-07	27(±7.3)	0.05(±0.05)	-	0.1(±0.05)	11(±3.6)	103.3(±13)	AAS					
Sur														
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Apr-06	3.6(±1.4)	2(±0.13)	-	1(±2.5)	< LD	178(±18)	AAS	RM8419	Molina et al. (2012)			
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Oct-06	16.3(±2.4)	0.06(±0.04)	-	0.04(±0.01)	6.5(±2.3)	134.4(±11)	AAS					
	Invertebrado - <i>Artemia cf. franciscana</i>	Feb-07	26(±8.4)	0.1(±0.04)	-	0.04(±0.01)	16(±4)	100(±8)	AAS					

< LD = Por debajo del límite de detección
 CV-AAS = Cold Vapor - Atomic Absorption Spectrometry
 FI-AAS = Flow Injection - Espectrofotómetro de absorción atómica
 ICP-OES = Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometer
 CV-AFS = Coldvapor atomic fluorescence spectrophotometry

Para el caso del Hg en las especies ícticas, mostraron un rango de 0.01 a 0.52 mg kg⁻¹ (TYPSA-PROINTEC 2003). Este estudio tampoco detalla si las concentraciones de metales pesados están expresadas en p.s. o p.h. para relacionarlas con las concentraciones límites de referencia recomendados para el consumo.

La única información científica disponible sobre concentraciones de mercurio en peces del lago Titicaca, corresponde a Gammons *et al.* (2006). Este estudio muestra el incremento progresivo de las concentraciones de metales pesados desde la cuenca superior del río Ramis hasta la desembocadura del lago Titicaca, correspondiente a la bahía de Puno. En dicha bahía, las dos especies de peces evaluadas: Pejerrey y K'arache, no mostraron diferencias significativas en la acumulación de Hg, pero estas concentraciones están en el límite inferior de las concentraciones de referencia para el consumo humano, es decir un poco menor a 2.5 mg kg⁻¹ (Tabla C3-2).

Entre los años 2009 y 2011, la cooperación francesa para el desarrollo (IRD – Institut de Recherche pour le Développement), mediante el proyecto COMIBOL (2012), estuvo realizando algunos muestreos de prospección sobre los niveles de acumulación de Hg en peces y aves del lago menor del Titicaca. Este estudio encontró concentraciones de Hg en especímenes de K'arache, inferiores a las concentraciones halladas por Gammons *et al.* (2006). Este estudio también reportó bajas concentraciones de Hg en la ave acuática Choca (*Fullica ardesiaca*), entre un rango de 0.01 a 0.03 mg kg⁻¹.

Finalmente, no hallamos reportes sobre niveles de acumulación de metales pesados en otras especies de peces comerciales existentes sobre el lago Titicaca, como el Mauri (*Trichomycterus rivalatus*) o como la especie exógena de la Trucha (*Oncorhynchus mykiss*), la cual es ampliamente utilizable para su producción en jaulas flotantes.

C3.2.2. LAGO URU URU

Este lago es receptor del afluente principal del río Desaguadero, así como también de desechos orgánicos de la ciudad de Oruro y de la intensa actividad minera de la región (PPO 1996). A consecuencia de esta intensa actividad minera, los estudios estuvieron diversificados a la evaluación de diferentes metales pesados y en diferentes organismos acuáticos.

El primer estudio que intentó abordar la dinámica de transferencias de contaminantes metálicos en la cadena trófica, fue el trabajo de Apaza *et al.* (1996). En general, este estudio reportó concentraciones de Cd por debajo del límite de detección, a excepción del plancton y de flamencos (*Phoenicopterus chilensis*), en donde vincula una asociación trófica directa por el hábito alimenticio filtrador del ave. Este estudio constató siete variedades de peces del género *Orestias*, en donde se

encontraron altas concentraciones en el orden de importancia de Pb, Hg y Zn.

Distribución polimetálica en la cadena trófica en el lago Uru-uru

Para el año 2006, las Universidades Mayor de San Andrés y Técnica de Oruro, en colaboración con el IRD, desarrollaron un estudio sobre el “Origen de la Contaminación Polimetálica y su Impacto en el Ambiente, la Salud y la Sociedad” (Tox-Bol 2010). El componente ecológico de este estudio, para obtener relación fehaciente entre las asociaciones tróficas de los organismos, se emplearon los isótopos estables carbono y nitrógeno ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$) con la finalidad de dilucidar el origen de la materia orgánica (fuentes) y la estructura de las cadenas tróficas de la región sur y central del lago Uru-Uru. En ambas regiones se observaron diferentes estructuras tróficas y la mayor longitud de la cadena trófica fue observada en la región central (cuatro posiciones), en cambio la parte del norte mostró menor longitud (tres posiciones). Para ambas regiones, la acumulación de Hg desde la posiciones tróficas inferiores hacia las superiores, muestran un claro patrón de bioamplificación, en cambio el As muestra un patrón de biodilución (Figura C3-1). Asimismo, en ambas cadenas tróficas identificadas, la posición trófica más alta estuvo ocupada por el ave zambullidor (*Rollandia rolland*), con una acumulación de Hg en concentraciones equivalentes entre norte y centro (respectivamente entre 2.24 a 2.48 mg). En este sentido, a la conclusión que llegó este estudio fue que no sólo es importante la longitud de la cadena trófica para la amplificación de contaminantes, sino que también importa la cantidad de Hg disponible en las fuentes y el tipo de cadena trófica que se llegan a estructurar. En otras palabras, los sedimentos superficiales poseen más Hg y estructuran una cadena trófica directa (transferencia eficiente del Hg) (Molina *et al.* 2010b).

El estudio de ToxBol, a diferencia de Apaza *et al.* (1996), tanto el Pb como el Cd, siempre fueron registrados por debajo del límite de detección, a excepción del sedimento superficial y perifitón de ambas regiones en donde mostraron concentraciones considerables. Aparentemente el Zn y el Hg, mostraron también patrones de biodilución, y en cambio el Cu no fue registrado en consumidores de primer, segundo ni de tercer orden. A partir de estos resultados, en el proyecto COMIBOL (2012), se estudió con mayor detalle la dinámica de especiación del Hg y la incorporación en las cadenas tróficas. Este proyecto priorizó sus muestreos desde la región norte hacía sur del lago Uru-Uru en relación al gradiente de salinidad (incremento de la salinidad hacia el sur). Además este estudio consideró mayor cantidad y diversidad de organismos, encontrando los mismos patrones de bioamplificación reportados por Molina *et al.* (2011), y donde la posición trófica superior estaba ocupada por el ave Zambullidor con las más altas tasas de acumulación de Hg (2.61 ± 0.3).

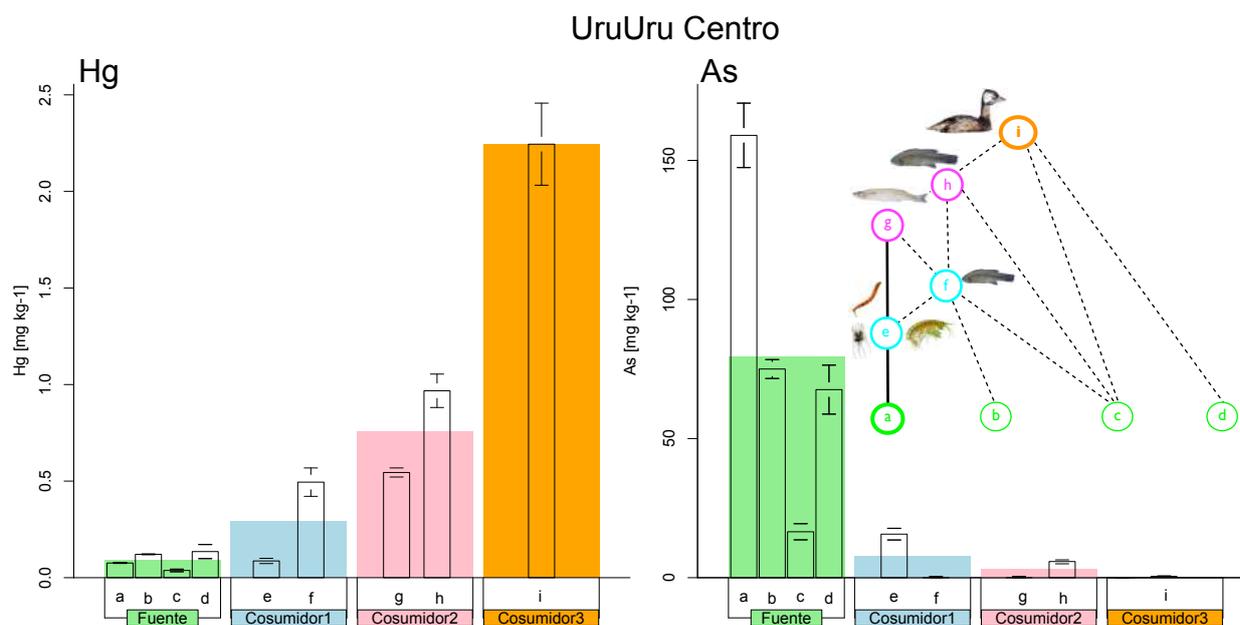


Figura C3-1: Media y desviación estándar de las concentración de Hg y As en cada posición trófica de la estructura trófica de la región central del lago Uru-Uru. Las letras del esquema indican el espécimen o gremio trófico. a=Scirpus sp., b=Sedimento superficial, c=Perifitón, d=Macroinvertebrados, e=Orestas agassizii y Oxyura jamaicensis, f=Zooplancton, i=Odontesthes bonariensis, f=Rollandia rolland.

Estos altos niveles de biomagnificación, están dados por las altas tasas de metilación del Hg (conversión a la forma orgánica), en biofilms y en la columna del agua (Monperrus *et al.* 2011), la cual se transfiere efectivamente por la cadena trófica.

En este sentido, identificamos una problemática ambiental a consecuencia de los altos niveles de acumulación del Hg en depredadores superiores. Sugerimos realizar estudios sobre los daños toxicológicos que pueda estar generando estas elevadas concentraciones de Hg en el Zambullidor y además se deben proponer estudios de restauración para mitigar estas elevadas concentraciones.

C3.2.3. LAGO POOPÓ

Este lago, al estar situado en la parte baja del sistema TDP, constituye el depósito final de materiales disueltos y en suspensión. A inicio de la década de los 80's Beveridge *et al.* (1985), reportó por primera vez los niveles de acumulación metálica en organismos acuáticos en el Lago Poopó. Este estudio surgió como una demanda de los pescadores hacia el gobierno boliviano, quienes atribuían la reducción de los volúmenes de pesca a consecuencia de la actividad minera que se desarrollaba en la región del Poopó. Este estudio de Beveridge *et al.* (1985), reportó significativos niveles de Fe, Zn, Mg y Sn para las dos especies de peces conocidas en el lago: Pejerrey y K'arache. Luego, Apaza *et al.*

(1996) reportó únicamente concentraciones significativas del As en limnofitas (plantas acuáticas sumergidas de los géneros *Zannichellia* y *Ruppia*).

Posteriormente, a partir de muestreos efectuados entre los años 2005 al 2007; Molina *et al.* (2012), publicó los resultados sobre la dinámica de incorporación polimetálica en la cadena trófica. Estos resultados mostraron una cadena trófica simple en la parte norte del lago Poopó (fuentes, invertebrados y peces), porque en la parte sur de lago y a consecuencia de la extremada salinidad del medio, el único consumidor es el crustáceo *Artemia* cf. *franciscana*. La comunidad de peces estuvo compuesta por el Pejerrey y el K'areche, cuyo principal recurso alimenticio fueron los invertebrados (dominados por crustáceos). Al igual que en los estudios del Uru-Uru, el Hg se bioamplifica en promedio hasta 10 veces más de concentraciones basales, y a diferencias de los anteriores estudios, el Cd mostró considerables concentraciones y, al mismo tiempo, con tendencia a biomagnificarse. A pesar que la concentración de estos metales es importante, aún son un poco inferiores a los límites de referencias propuesto. Aunque la diversidad de aves es menor que en el lago Uru-Uru, identificamos un vacío de información a nivel de los niveles de acumulación de metales pesados para este grupo de organismo para el lago Poopó.

C3.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE Hg EN EL SISTEMA TDP

La mayoría de los estudios mostrados, se han concentrado en la evaluación del Hg en peces del sistema TDS, a consecuencia del empleo de este metal pesado en la actividad aurífera de la región. A partir de la recopilación de todos los datos (desde la década de los 90's hasta la actualidad), no existe un claro patrón temporal de acumulación de Hg. Aunque muchos de los muestreos no corresponden específicamente a las mismas áreas de muestreo, muchas de las concentraciones en peces han tendido a ser inferiores a los valores reportados desde un principio (Figura C3-3). Espacialmente, estas concentraciones muestran un comportamiento: las máximas concentraciones están dadas por peces del lago mayor del Titicaca; en el lago menor, estas concentraciones son intermedias y comparables con el lago Uru-Uru; finalmente las más bajas concentraciones corresponden al lago Poopó.

C-3 Contaminación por metales pesados en la cadena trófica de los Lagos Titicaca, Uru-Uru y Poopó

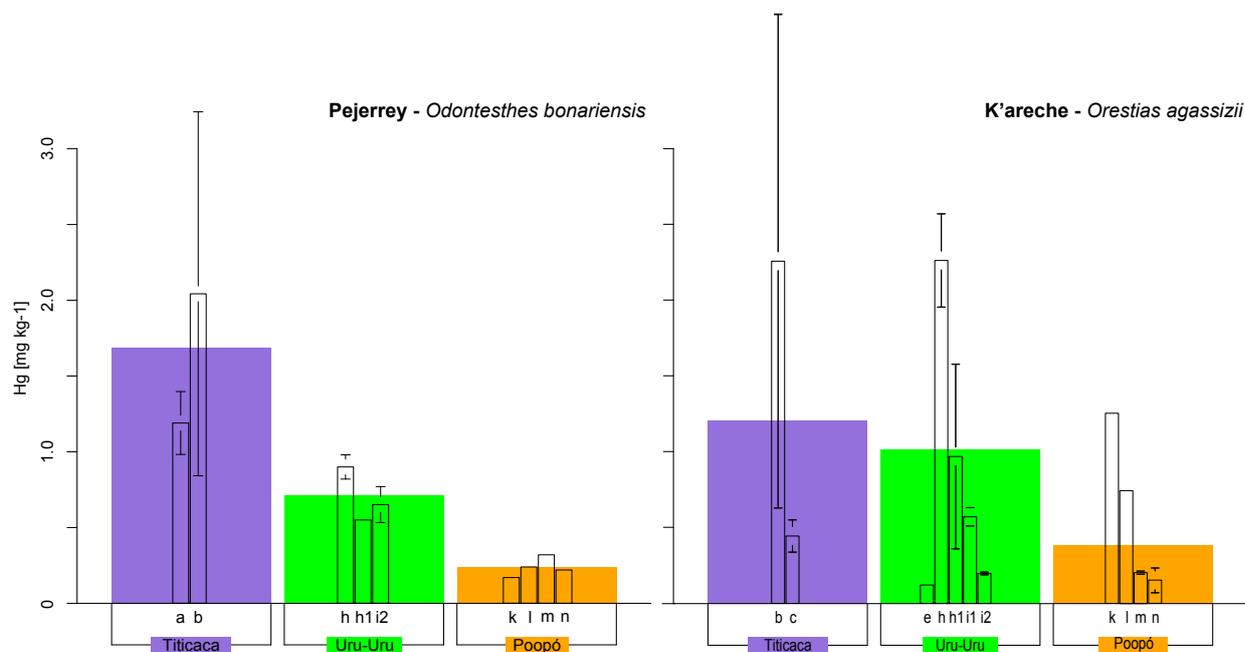


Figura C3-2: Media y desviación estándar de las concentración de Hg en peces de los lagos del sistema TDP. Las letras del esquema indican la comparación espacio-temporal de diferentes estudios. a=Julio 2002 (Gammons et al. 2006), b= Julio 2003 (Gammons et al. 2006), c=Diciembre 2010 (COMIBOL 2012), e=Julio 1993 (Apaza et al. 1996), h=Abril 2008 – Norte (Molina et al. 2010), h1= Abril 2008 – Centro (Molina et al. 2010), i1= Noviembre 2009 – Centro (COMIBOL 2012), i2=Octubre 2010 – Centro (COMIBOL 2012), k=Diciembre 2005 (Molina et al. 2012), l=Abril 2006 (Molina et al. 2012), m=Octubre 2006 (Molina et al. 2012), n=Febrero 2007 (Molina et al. 2012).

Por otro lado, para evidenciar mejor estos patrones espaciales de acumulación de Hg en peces del mencionado sistema, hicimos la relación del nivel de Hg con la longitud estándar de los peces. Estos parámetros muestran una buena relación en ambas especies de peces, es decir a mayor talla de los peces, las concentraciones de Hg también llegaron a ser mayores (Figura C3-4). Este patrón está explicado porque las tallas más grandes fueron registradas en especímenes del lago Titicaca, y las intermedias a bajas corresponde a los lagos Uru-Uru y Poopó. En este sentido, al parecer el tamaño del ecosistema está ejerciendo una factor importante en el desarrollo de las tallas de los peces y por ende en los patrones de acumulación de Hg.

Las mayores tasas de acumulación de Hg en peces, provienen de datos del lago mayor del Titicaca (Gammons et al. 2006); cuyas concentraciones en su mayoría se encuentran en el límite inferior de los límites de referencias sugeridos para el consumo. En base a la relación hallada, nosotros recomendamos evitar el consumo de peces que presenten tallas mayores 450 mm en el caso del Pejerrey y tallas mayores 180 mm en el caso del K'areche.

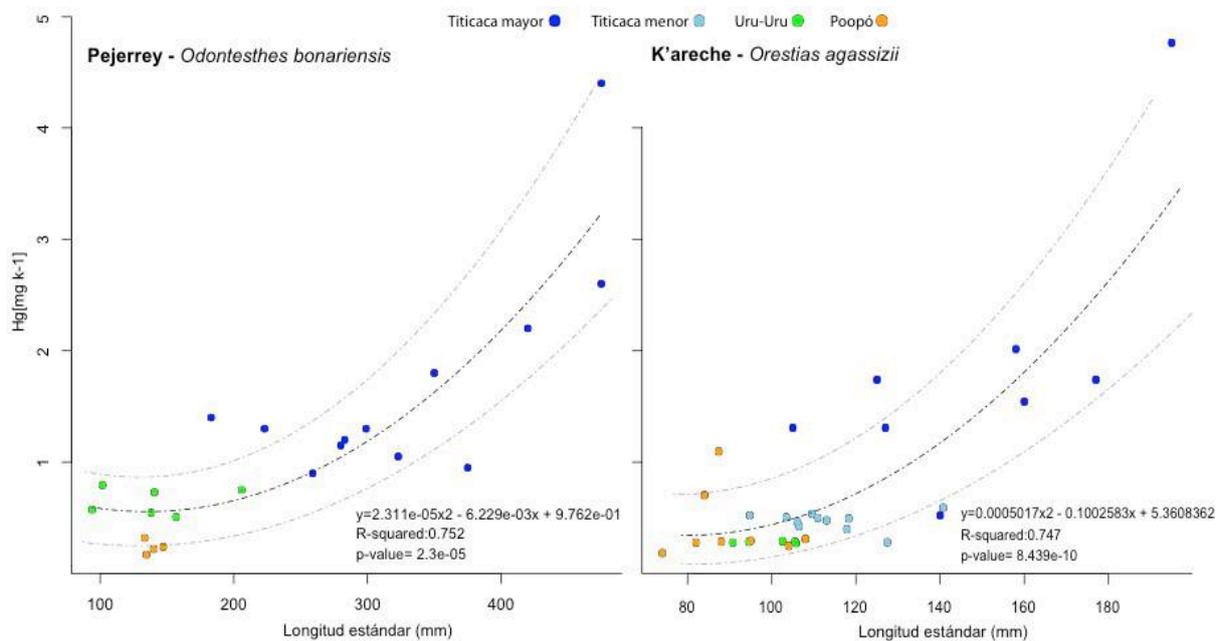


Figura C3-3: Relación polinomial entre la longitud estándar y la acumulación de Hg en músculos de peces de los lagos del sistema TDP.

C3.4. PROPUESTA DE BIOMONITOREO DE LA CONTAMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SISTEMA TDP

Al finalizar la década de los 90's, el gobierno boliviano estableció leyes y regulaciones ambientales con el fin de limitar impactos producidos por la intensa actividad minera y promover el manejo de diques de colas (represas) así como el tratamiento de las aguas residuales u otras medidas de mitigación ambiental (Bocángel 2007). Sin embargo, aún no existen mecanismos eficientes de control o vigilancia ambiental frente al impacto de la minería.

Tradicionalmente los peces que ocupan las posiciones tróficas más elevadas, han sido empleados como indicadores de exposición de contaminantes en la salud pública humana (Harris *et al.* 2007). Estudios sobre acumulación de metales pasados en plantas acuáticas en el sistema TDS, muestran que la información es ampliamente heterogénea y variable (Anexo A). Por otro lado los invertebrados acuáticos mostraron mejores resultados como biomonitores de carga de contaminantes en un ecosistema (Molina *et al.* 2011), porque estos no experimentan fuertes migraciones, poseen ciclos de vida corto y dan una medida puntual de lo que está ocurriendo en el

ecosistema. Sin embargo, todos los métodos propuestos de biomonitores con individuos, llegan a sacrificar el organismos para hacerlos analizables. En este sentido, en base a los primeros resultados del proyecto COMIBOL (2012), desde el año 2009 se han estado realizando colectas de diferentes tejidos del ave acuática Choca (*Fulica ardesiaca*), en las lagunas del sistema TDP. A pesar que no existen censos sobre la estimación de la dinámica poblacional de esta especie, es una ave ubicua que no posee ninguna restricción por la UICN (2010), ni en libro rojo de la fauna silvestre de Bolivia (MMAyA 2009). Estos resultados muestran que la cantidad de Hg disponible en la sangre muestran estrecha relación con la cantidad de Hg disponible en músculos y secundariamente en el hígado. Mediante la dinámica de incorporación de alimentos, esta ave ingiere el contaminante, lo almacenarse en el hígado, desde donde buena proporción de este Hg pasa al torrente sanguíneo para que en el tejido muscular lo acumule. La acumulación en tejidos de plumas es tardía y paulatina porque llegan a presentar los valores más altos (Figura C3-4).

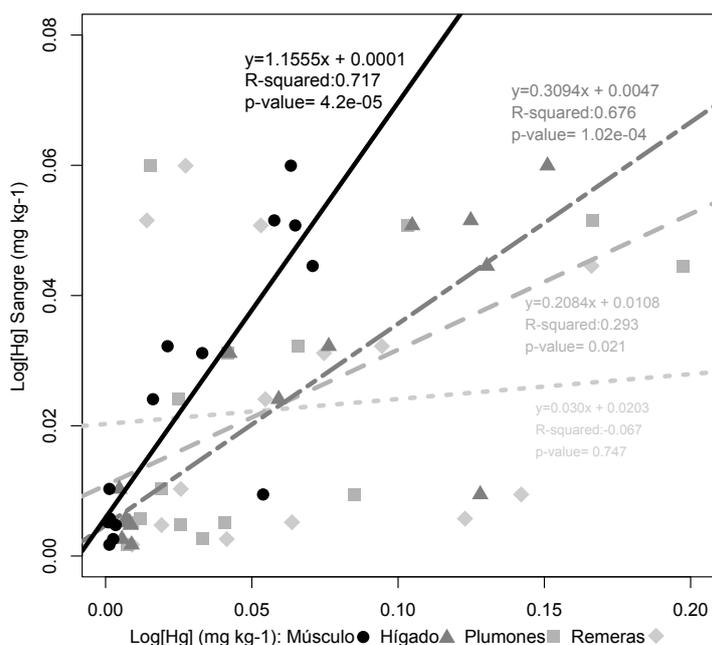


Figura C3-4: Relaciones lineales entre la concentración de Hg en la sangre con respecto a tejidos de músculos, hígado, plumas del pecho (plumones) y plumas de las alas (remeras).

Por otro lado, la sangre de esta ave presenta concentraciones de Hg equivalentes a las halladas en músculos de peces. En este sentido proponemos realizar un biomonitoreo temporal (entre época seca y húmeda) y espacial (lagunas del sistema TDP), de las concentración de metales pesados en sangre de especímenes adultos de la Choca, porque dan una buena respuesta a la carga de contaminantes en los ecosistemas acuáticos.

C3.5. COMENTARIOS FINALES

Los diferentes niveles o patrones de acumulación de metales pesados observados en organismos acuáticos de las lagunas del sistema TDP, están influidos por la variación temporal del nivel de agua (periodos de extensión o contracción de los lagos) y la intensa actividad minera de la región. Por otro lado, como se observó durante las primeras investigaciones, la transferencia metálica esta determinada por los taxones presentes, por sus características biológicas y las cadenas tróficas. En particular, la longitud de la cadenas tróficas influye en los patrones de bioamplificación de Hg, que alcanza valores elevados en los niveles tróficos superiores; pero también influye la disrupción de las mismas en donde los contaminantes que muestran elevados niveles en bajas posiciones tróficas pero tienden a biodiluirse (como el As y Zn).

Por otro lado en base a la revisión de los diferentes trabajos para la elaboración del presente capítulo, se observó la carencia de información al nivel de fuentes de información primaria (artículos científicos), y en este sentido todos los trabajos revisados no especifican métodos sobre la trazabilidad de referencia para la validación de los niveles de metales pesados reportados (Tabla C3-2). Es por esto que, en futuros trabajos, se recomienda no olvidar incluir este factor y, en lo posible, difundidos en fuentes primarias de información científica.

C3.6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Apaza R., Franken M., Osorio F., Pinto J. & Marín R. 1996. Estudio de la contaminación del lago Poopó con relación a metales pesados en la cadena trófica, incluido el hombre. Estudio de la contaminación del lago Poopó con relación a metales pesados en la cadena trófica, incluido el hombre. La Paz, Bolivia. 144 p.
- Arce-Burgoa O. R. 2007. Guía de los yacimientos metalíferos de Bolivia. La Paz, SPC Impresores S.A. 56 p.
- Beveridge M. C. M., Stafford E. & Coutts R. 1985. Metal concentrations in the commercially exploited fishes of an endorheic saline lake in the tin-silver province of Bolivia. *Aquaculture Research* 16: 41-53.
- Bocángel D. 2007. La gestión ambiental minera en Bolivia. *Revista Redesma* 1:76-99.
- COMIBOL. 2012. Fractionnement isotopique, transfert et transformation de deux contaminants miniers modeles (Zn,Sn) aux interfaces sediment-eau-systeme trophique d'un ecosysteme lagunaire de l'Altiplano bolivien. Rapport final.
- European Commission 2006 Commission Regulation (EC) No. 1881/2006 of 19 December 2006, setting maximum levels contaminants. *Toxicology* 230, 219, 2007. For certain contaminants in foodstuffs. *Off J Eur Comm. L* 364/5.
- Gammons C. H., Slotton D. G., Garbrandt B., Weinght W., Young C. A., McNeamy R. L., Cámac E., Calderón R. & Tapia, H. 2006. Mercury concentrations of fish, river water and sediment in the Río Ramis-Lakes Titicaca watershed, *Peu. Science of the Total Environment* 368: 637-648.
- Harris R., Krabbenhoft D. P., Mason R., Murray M. W., Reash R., Saltman T. Eds. 2007. Monitoring and evaluating trends in methylmercury accumulation in aquatic biota. *Ecosystem responses to mercury contamination*. Florida, SETAC. 2 p.

C-3 Contaminación por metales pesados en la cadena trófica de los Lagos Titicaca, Uru-Uru y Poopó

- IUCN. 2012. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2012.2. (<http://www.iucnredlist.org>).
- Meili M. 1997. Mercury in lakes and rivers. Mercury and its effects on environmental and biology. Sygel A. & Sigel H. Eds. New York, Taylor & Francis Group. Vol. 34: 22-48 p.
- MMAyA 2009. Libro rojo de la fauna silvestre de vertebrados de Bolivia. La Paz, Bolivia, Ministerio de Medio Ambiente y Agua. 310 p.
- Molina C. I., Gibon F. M., Duprey J.-L., Dominguez E., Guimarães J.-R. D., Roulet M. 2010a. Transfer of mercury and methylmercury along macroinvertebrate food chains in a floodplain lake of the Beni River, Bolivian Amazonia. *The Science of the Total Environment* 408(16): 3382-3391.
- Molina C. I. Gibon F. M., Ibañez C., Pinto J. & Duprey J. L. 2010b. Transferencia de contaminantes polimetálicos en la estructura trófica acuática de los lagos Uru-Uru y Poopó, Oruro – Bolivia. Coloquio Internacional, Contaminación por metales: Impacto sobre el ambiente, la salud y la sociedad, Oruro, Bolivia.
- Molina C. I., Gibon F.M., Ibañez C., Pinto J., Duprey J. L. & Point D. 2011. Mercury trophic transfer in high altitude lakes of the bolivian Altiplano. 10th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Halifax, Nova Scotia, Canada. 213 p.
- Molina C. I., Ibañez C. & Gibon F. M. 2012. Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopó, Oruro, Bolivia): Posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecología en Bolivia* 47(2): 99-118.
- Monperrus M., Amouroux D., Sharef A., Alanoca L. & Point D. 2011. Biogeochemistry of mercury species in high altitude lake, Uru-Uru lake, bolivian Altiplano. 10th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Halifax, Nova Scotia, Canada. 214 p.
- Pourang N., Dennis J.H. & Ghourchian, H. 2004. Tissue distribution and redistribution of trace elements in shrimp species with the emphasis on the roles of metallothionein. *Ecotoxicology* 13: 519–533.
- PPO 1996. Proyecto Piloto de Oruro. Proyecto Piloto de Oruro. La Paz, Bolivia. 356 p.
- Sweet L. I. & Zelikoff J. T. 2001. Toxicology and immunotoxicology of mercury: a comparative review in fish and humans. *Journal of Toxicology and Environmental Health* 4(B): 161-205.
- ToxBol 2010. Origine des pollutions polymétalliques et impact sur l'environnement, la santé et la société. Rapport final.
- TYPSA-PROINTEC 2004. Diagnóstico del nivel de contaminación - recurso hídrico del lago Titicaca, Bolivia. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación, Viceministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Clasificación de Tierras y Cuencas. La Paz, Bolivia. p 28-29.



C-4

BIOMONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUAS EN EL SISTEMA TDPS

WATER QUALITY BIOMONITORING IN THE TDPS SYSTEM

Edgar Goitia, UMSS-ULRA, Cochabamba. limnoed@fcyt.umss.edu.bo

Nabor Moya, UNIBOL QUECHUA "Casimiro Huanca", Chimoré, Cochabamba, Bolivia

Thierry Oberdorff, IRD-BOREA y UMSS-ULRA, Cochabamba, Bolivia.

RESUMEN

Los ríos del sistema hídrico Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coipasa (TDPS), se encuentran con un alto grado de impacto, principalmente provocados por procesos antrópicos debidos al vertimiento de aguas residuales urbanas y mineras, así como a las actividades agrícolas. Tomando en cuenta estos aspectos es necesario desarrollar políticas claras de gestión para evitar la continua degradación de estos ecosistemas. Se propone desarrollar un Índice de Integridad Biótica (IBI) en todo el sistema TDPS, además de la adecuación del índice BMWP/Bol, ambas para la evaluación del estado ecológico de los ríos tomando en cuenta una red de biomonitoreo que utilizará como bioindicadores a los macroinvertebrados acuáticos. Esta red de biomonitoreo permitirá establecer las bases para la planificación de la prevención, el control y la restauración de ambientes fluviales que han sido afectados por las perturbaciones antrópicas.

PALABRAS CLAVE: BMWP/BOL, ESTADO ECOLÓGICO, ÍNDICE DE INTEGRIDAD BIOLÓGICA, MACROINVERTEBRADOS

ABSTRACT

Streams and rivers of the Titicaca, Desaguadero, Poopó and Salar de Coipasa hydrological system (TDPS) are subjected to an increasing environmental degradation due to chemical (e.g. heavy metals, pesticides, fertilizers) and organic (e.g. domestic and cattle-raising waste water) loadings. In this context it becomes increasingly necessary to develop water policies for avoiding future environmental degradation. To reach this goal we propose to develop a biotic index based on macroinvertebrates to evaluate biotic integrity and biodiversity over the all TDPS system. The proposed index could be later used to identify rivers where restoration activities are needed and to monitor trends in biotic integrity and biodiversity over time.

KEY WORDS: BMWP/BOL, BIOTIC INDEX, ECOLOGICAL CONDITION, MACROINVERTEBRATES, WATER QUALITY

C4.1. INTRODUCCIÓN

El sistema hídrico Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coipasa (TDPS) es una parte del altiplano boliviano, el cual es una planicie tropical muy grande ubicada a gran altura, desde los 3 600 m.s.n.m., tiene una compleja topografía, geología, un clima con amplia variación estacional y diaria en temperatura y precipitación, fuerte radiación solar y baja presión atmosférica (Jacobsen & Marín 2008). En esta región se encuentra el lago Titicaca, a 3 810m de altura y produce un microclima local que permite diversos tipos de cultivos en sus alrededores, que son las fuentes principales de ingreso económico a las poblaciones de esa región; también se encuentra el lago Poopó el cual se une con el lago Titicaca mediante el río Desaguadero pasando por el lago Uru Uru a través de uno de sus brazos.

Los ríos que drenan el altiplano, y los lagos, están influenciados por características ambientales naturales y además se encuentran altamente impactadas, principalmente por procesos antrópicos provocados por el vertimiento de aguas residuales urbanas y mineras, el cual repercute en el funcionamiento ecológico (PNUMA 2011). Estos ambientes son también una fuente de agua importante para las poblaciones del altiplano así como también de pobladores que viven a menor altura como en la ciudad de La Paz.

Tomando en cuenta las diversas actividades que se desarrollan en el sistema TDPS, es necesario determinar el “estado ecológico” de los ríos, entendiéndose como la calidad de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos de aguas superficiales, con un enfoque de “integridad biológica” el cual incluye a las comunidades acuáticas para su evaluación, además de los análisis físicos, químicos e hidromorfológicos, en estos ambientes. Para ello es necesario estudiar y medir los componentes de las comunidades biológicas, entre las que se encuentran los macroinvertebrados bentónicos, que se proponen para el monitoreo de los ambientes acuáticos de este sistema y a la larga podrían integrarse otras comunidades biológicas (fitoplancton, flora acuática y peces).

Los macroinvertebrados acuáticos son organismos que se pueden ver a simple vista y proporcionan excelentes señales sobre la calidad o estado ecológico de los ecosistemas lóticos, por esta razón pueden ser usados en el biomonitorio para entender cómo se encuentran estos ambientes acuáticos; algunas poblaciones pueden ser tolerantes o intolerantes a ciertas condiciones del medio y la presencia o ausencia de algunos grupos nos indican adecuadamente su estado.

Los macroinvertebrados incluyen larvas y adultos de insectos, así como moluscos, crustáceos, planarias, sanguijuelas, ácaros y lombrices de agua.

C4.1.1. ANTECEDENTES

Los ríos altoandinos, en general son los menos estudiados entre los ecosistemas de aguas

continentales; la fauna bentónica de los sistemas lóticos del altiplano boliviano y de la cordillera adyacente ha tenido mayor relevancia durante los últimos años desde los estudios de Dejoux (1988) donde establecen la presencia de algunas especies de macroinvertebrados colectados en algunos ríos de este sistema; posteriormente en un estudio sobre la tipología de ríos en esta región, Wasson & Marín (1988) discuten sobre la distribución de estos organismos, incluyendo la descripción del hábitat; Wasson *et al.* (1998) estudiaron la variabilidad hidromorfológica y la comunidad bentónica en cinco ríos de los Andes; otros estudios que incluyen a los macroinvertebrados bentónicos, a nivel ecológico, son los de Lévêque *et al.* (2005), Maldonado *et al.* (2007), Molina *et al.* (2008), Jacobsen & Marín (2008), Moya *et al.* (2009), Williams *et al.* (2012).

En los últimos años, tomando en cuenta el grado de perturbación al que han sido sometidos los ríos de este sistema, se han realizado algunos estudios para determinar la calidad o estado ecológico de estos ecosistemas, enmarcados en el desarrollo o el uso de índices bióticos con el fin de establecer herramientas para el biomonitorio de ríos tomando en cuenta a los macroinvertebrados como indicadores del estado ecológico o la salud de estos sistemas; entre ellos podemos mencionar algunos trabajos sobre la evaluación ambiental del lago Poopó y sus ríos tributarios (UTO-MINCO-FUNDECO-KOMEX 2007), donde se utilizan a los macroinvertebrados mediante el índice BMWP, otros estudios desarrollados por Moya *et al.* (2008, 2011) establecieron un índice multimétrico (IBI), el mismo que puede ser aplicable para evaluar y monitorear los ríos que sufren distintos tipos de alteración antropogénica, entre ellos la agrícola, doméstica y minera, siendo esta última la que genera mayor impacto sobre la fauna acuática.

Asimismo, Jacobsen & Marín (2008) probaron la respuesta de distintos índices bióticos y otras medidas como la riqueza, en relación a las variaciones de temperatura y oxígeno disuelto, donde los índices bióticos como el BMWP, ASPT y FBI resultaron más sensibles a la disminución de oxígeno asociado a la polución, pero no así a la temperatura.

Por otro lado, Rocabado & Goitia (2011) desarrollaron una guía para evaluar la calidad de aguas mediante el índice BMWP/Bol, adaptada para Bolivia tomando como base el BMWP original de Inglaterra. Este trabajo ha sido desarrollado para los ríos de las tres cuencas principales de Bolivia, resultando más aplicable para la región del Altiplano y los Valles Interandinos. Mediante este índice se realizó una evaluación del estado ecológico de las aguas superficiales de la cuenca del lago Poopó, propuesto por el Programa Cuenca Poopó, determinándose un alto grado de contaminación en sus ríos (Goitia & Maldonado 2012).

C4.2. VACÍOS DE INFORMACIÓN SOBRE BIOMONITOREO

Si bien la subcuenca Poopó ha sido estudiada en los últimos años (UTO-MINCO-FUNDECO-KOMEX 2007, Goitia & Maldonado 2012), las otras subcuencas, dentro del sistema TDPS, no han sido muy examinadas.

La poca información existente sobre biomonitorio del estado ecológico de los ríos en el sistema TDPS se encuentra fragmentada, habiéndose realizado en solo pocos arroyos de una cuenca dentro del área del sistema TDPS (Jacobsen & Marín, 2008), o por otro lado, incluyen pocos arroyos dentro de un trabajo a escala regional (Moya *et al.* 2011, Villamarín *et al.* 2013), donde la mayoría de los arroyos se sitúan en regiones fuera del sistema TDPS. Es por ello que hay la necesidad de desarrollar un plan y un método de biomonitorio estándar que abarque geográficamente todas las subcuencas del sistema TDPS.

El plan de biomonitorio que incluya el análisis de variables físicas y químicas, permitirá evaluar y controlar la perturbación del estado ecológico de los ríos en el sistema TDPS, lado boliviano.

C4.3. PROPUESTA DE BIOMONITOREO PARA EL SISTEMA TDPS

En el sistema TDPS, donde gran parte de los ríos aún se encuentran en condiciones poco alteradas, hay una creciente necesidad de desarrollar políticas claras de gestión de calidad de aguas, para evitar en el futuro una posible degradación de estos sistemas acuáticos. Para alcanzar este propósito es necesario desarrollar herramientas prácticas y efectivas usando criterios biológicos para monitorear la calidad de los recursos acuáticos. Estas herramientas necesitan ser eficientes, con base ecológica y adecuadamente aplicables a diferentes lugares. Sin embargo, el uso de estas herramientas sobre amplias áreas geográficas, requiere una comprensión detallada tanto de los patrones de distribución y composición de las comunidades entre cuerpos de aguas bajo condiciones naturales, y la naturaleza de los gradientes ambientales que causan o al menos explican esos patrones. Con esta base es posible discriminar la respuesta de la biota acuática a los estresores provenientes de las actividades humanas como también de la variación ambiental natural.

Con estos antecedentes, se proponen algunos objetivos para el desarrollo de métodos y un plan de monitoreo para la evaluación del estado ecológico de los ríos del sistema TDPS.

OBJETIVO 1

Desarrollar un índice multimétrico (tipo IBI, Moya *et al.* 2011) basado en comunidades de macroinvertebrados bentónicos para evaluar la integridad ecológica de los ríos del sistema TDPS, y adecuar el BMWP/Bol (Rocabado & Goitia 2011) como herramienta de fácil uso. Los

macroinvertebrados son de interés particular por su presencia en muchos cuerpos de agua, la facilidad de muestreo, el rápido cambio en la estructura trófica, composición y abundancia de algunos grupos a diversos tipos de perturbación y su naturaleza sedentaria que proporciona una buena señal espacial de lo que ocurre en cada hábitat muestreado.

OBJETIVO 2

Se determinará las fuentes puntuales de contaminación realizando un inventario y cuantificando las cargas contaminantes, y se aplicaran los índices para determinar el grado de contaminación en las zonas de influencia.

OBJETIVO 3

Se implementará una red de monitoreo de la calidad ambiental de las aguas de la cuenca tomando en cuenta las fuentes puntuales de contaminación (alrededor de 30 sitios de muestreo uniformemente distribuidos en toda la cuenca TDS) y 30 sitios considerados de referencia, en lugares donde no se observen fuentes de contaminación antropogénica. Estos sitios serán muestreados cada dos o tres años. Con base en esta red de monitoreo se podría dimensionar la evolución (negativa o positiva) del estado ecológico de los ríos en el TDPS.

Tomando en cuenta la red de monitoreo establecida por el programa PNUMA – Lago Titicaca (MMAyA 2011), para el sistema TDPS, la figura C4-1 muestra la red de calidad de agua ya establecida, al cual se le suman ríos localizados en la región de Sajama, que pueden ampliar la red y además servir de referencia en cuanto al estado ecológico de los ríos.

Los resultados permitirán aportar bases para planificar la prevención, el control y la restauración de ambientes fluviales afectados y/o amenazados por perturbaciones antrópicas en la cuenca endorreica del Altiplano. Además, el proyecto permitirá la capacitación técnica de recursos humanos a nivel de las instituciones participantes y la transferencia de una herramienta básica a instancias de gestión ambiental (gobernación, municipios, empresas de agua potable, gestores ambientales) que apoyará sus futuras acciones competentes al manejo integral de las cuencas.

C-4 Biomonitoreo de la calidad de aguas en el Sistema TDPS

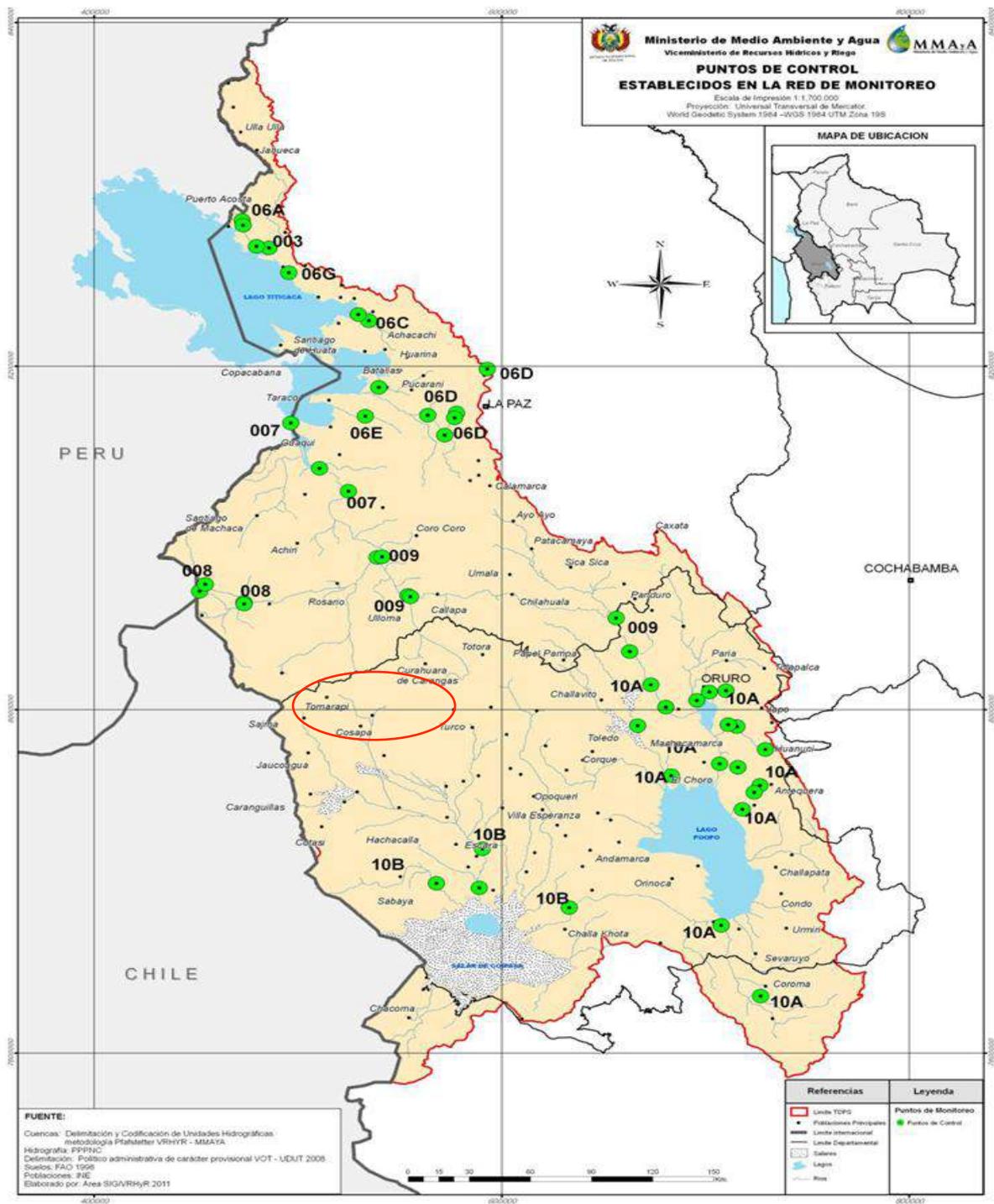


Figura C4-1. Red de Monitoreo establecida por el programa PNUMA – Lago Titicaca, la elíptica roja indica posibles nuevos puntos de monitoreo. Extraído de MMAyA 2011.

C4.4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Goitia E. & Maldonado M. 2012. Análisis biológico de aguas superficiales y fuentes de provisión de aguas salubres dentro la Cuenca Poopó. Programa de Gestión Sostenible de los Recursos Naturales de la Cuenca del Lago Poopó. Estado Plurinacional de Bolivia – Unión Europea. Gobierno Autónomo Departamental de Oruro. 53 p.
- Jacobsen D. & Marín R. 2008. Bolivian Altiplano streams with low richness of macroinvertebrates and large diel fluctuations in temperature and dissolved oxygen. *Aquat. Ecol.* 42: 643-656.
- Léveque C., Balian E. V. & Martins K. 2005. An assessment of animal species diversity in continental waters. *Hydrobiologia* 542: 39-67.
- Maldonado M., Goitia E. & Bustamante M. 2007. Patrones de composición y distribución de la fauna bentónica fluvial sobre gradiente geofísico y bioclimático en Bolivia, p. 1143-1149. In Feyen J., Aguirre L. & Moraes M. Eds. Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales, Vol II. UMSS-LEUVEN-VLIR. Cochabamba, Bolivia.
- MMAYa. 2011. Plan de monitoreo de calidad del agua en el Sistema Hídrico Titicaca, Poopó y Salar de Coipasa – Bolivia. Estado Plurinacional de Bolivia, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Bolivia. 61 p.
- Molina C.A., Gibon F.M., Pinto J. & Rosales C. 2008. Estructura de macroinvertebrados acuáticos en un río altoandino de la cordillera Real, Bolivia: Variación anual y altitudinal en relación a factores ambientales. *Ecología Aplicada* 7: 105-116.
- Moya N., Hughes R. M., Domínguez E., Gibon F. M., Goitia E. & Oberdorff T. 2011. Macroinvertebrate-based predictive models for evaluating the human impact on biotic condition of Bolivian streams. *Ecological Indicators* 11: 840-847.
- Moya N., Gibon F. M., Oberdorff T., Rosales C. & Domínguez E. 2009. Comparison of aquatic macroinvertebrate communities from intermittent and perennial Bolivian headwater Andean streams: Implications for future climate change. *Revista de Ecología Aplicada* 8:105-114.
- Moya N., Gibon F. M., Oberdorff T. & Domínguez E. 2008. Desarrollo de un índice multimétrico para la evaluación de la calidad de las aguas de los ríos altoandinos de Oruro, Bolivia. *Memorias Coloquio Internacional "Contaminación en los Andes y la Amazonía"*.
- PNUMA 2011. Perspectivas del Medio Ambiente en el sistema Hídrico Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa TDPS. PNUMA, Colombia. 187p.
- Rocabado G. & Goitia E. 2011. Guía para la evaluación de la calidad acuática mediante el índice BMWP/Bol. Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Bolivia. 84p.
- UTO-MINCO-FUNDECO-KOMEX. 2007. Evaluación ambiental del lago Poopó y sus ríos tributarios. Universidad Técnica de Oruro, Worley Parsons Komex, Mining consulting & Engineering y Laboratorio de Limnología de La Paz. Bolivia.
- Villamarín C., Rieradevall M., Paul M., Barbour M.T. & Prat N. 2013. A tool to assess the ecological condition of tropical high Andean streams in Ecuador and Peru: The IMEERA index. *Ecological Indicators* 29:79-92.
- Williams J. J., Brooks S. J. & Gosling W. D. 2012. Response of chironomids to late Pleistocene and Holocene environmental change in the eastern Bolivian. *Andes. J. Paleolimn.* DOI 10.1007/s10933-012-9626-1.
- Wasson J. G. & Marín R. 1988. Tipología y potencialidades biológicas de los ríos de altura en la región de La Paz (Bolivia): Metodología y primeros resultados. *Memoria Sociedad de Ciencias Naturales La Salle*. Tomo XLVIII. Suplemento:97-122.
- Wasson J. G., Marín R., Guyot J. L. & Maridet L. 1998. Hydro-morphological variability and benthic community structure in five high altitude Andean streams (Bolivia). *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26:1169–1173.



C-5

CAUDAL AMBIENTAL: PERSPECTIVAS DE EVALUACIÓN EN EL SISTEMA TDPS

ENVIRONMENTAL FLOW: ASSESSMENT PERSPECTIVE IN THE TDPS SYSTEM

Marc Pouilly, IRD-BOREA, marc.pouilly@ird.fr

Carla Ibañez, UMSA-IE

Claudia Zepita, UMSA-IE

Ramiro Gutiérrez, UMSA-IE

Gastón Aguilera, CONICET-Fundación Miguel Lillo, Tucumán, Argentina

Mario Aguirre, UICN Oficina Regional para Sudamérica

RESUMEN

El concepto de caudal ambiental es considerado actualmente como un insumo imprescindible para los sistemas de gestión integrada de los recursos hídricos. Generalmente se define como la cantidad, calidad y régimen de agua necesarias por cada fase del ciclo hidrológico de un río para asegurar la conservación de su biodiversidad y de su funcionamiento ecológico. Esa necesidad es reconocida en las leyes o normas de numerosos países y en especial en los países de la región andina, aunque las herramientas y la capacidad técnica para evaluar esos caudales aún no fueron desarrolladas para las cuencas hídricas más representativas de la región como lo es el sistema hídrico del TDPS. El concepto o evaluación de caudal ecológico no fue aun desarrollado o experimentado en el sistema hídrico del TDPS.

Este trabajo presenta en una primera parte el concepto y las metodologías de evaluación del caudal ecológico. La segunda parte describe la necesidad de incluir esa herramienta en la gestión, a través de elementos de los marcos normativos de Perú y Bolivia y de la información disponible sobre la demanda de agua en el sistema TDPS. Finalmente debido a la falta de información sobre la distribución las especies y su dependencia al

hábitat, se propone un plan de estudio biológico para desarrollar una herramienta de evaluación del caudal ecológico a nivel de cuencas internas en el sistema TDPS.

PALABRAS CLAVE: CAUDAL AMBIENTAL, CAUDAL ECOLÓGICO, LEGISLACIÓN AMBIENTAL, RÍO, PECES, RELACIÓN HÁBITAT – ESPECIES

SUMMARY

Environmental flow is a key concept included in nowadays advocated Integrated Water Resource Management systems. Its general definition corresponds to the water quality and quantity necessary for each hydrological period of a river to insure the conservancy of its biodiversity and ecological functioning. The necessity to take into account the environmental flow concept is recognized in laws of numerous countries, especially in the Andean region. However tools and technical capacities necessary to evaluate the environmental flow are still undeveloped in many of the most representative hydric basins of the region as the TDPS system and for the whole Andean region. This work presents in a first part a definition of the concept and the methodologies used to evaluate the environmental flow. In a second part, elements of the Bolivian and Peruvian laws and of water demands are mentioned, highlighting the need to include this tool in the management system of the TDPS. Finally, due to the scarce availability of species distribution and habitat relationships, a biological study is proposed to develop a tool for the evaluation of the environmental flow at the sub-basin level of the TDPS.

Key word: Environmental flow, ecological flow, environmental law, river, fish, species-habitat relationships

C5.1. INTRODUCCIÓN

Los ríos, lagos, bofedales y otros humedales son ecosistemas acuáticos que presentan su propio funcionamiento ‘interno’ pero no están desvinculados de los demás ecosistemas de su alrededor. En particular, la primera característica de estos ecosistemas acuáticos es que dependen de las aguas que reciben de los otros ecosistemas. Así el área que se debe considerar para el estudio o la gestión de un ecosistema acuático es el espacio global de donde pueden llegar las aguas, delimitándose por los límites de la cuenca hidrográfica. En Bolivia este enfoque es promovido a través el *Plan Nacional de Cuenca* (Ministerio del Agua, 2007), que reconoce la escala de la cuenca como el nivel de intervención para el desarrollo de un sistema de *Gestión Integrada de Recursos Hídricos* (GIRH), promoviendo “la gestión coordinada del agua, de la tierra y de los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social con equidad y sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales”.

La cantidad y calidad del agua que llega y transcurre por un sistema va a influir sobre sus características físicas y biológicas. Una alteración en cualquiera de los principales componentes del régimen de caudales (duración, frecuencia, magnitud, predictibilidad y periodicidad) puede, directa o indirectamente, afectar estas características, el funcionamiento ecológico general (Poff *et al.* 1997) y los beneficios que las poblaciones reciben de este funcionamiento. Por lo tanto es necesario poder asegurar que cada sistema recibirá la cantidad y calidad de agua suficiente para mantener las funciones ecológicas básicas en dicho sistema y para asegurar que el mismo podrá proveer una cantidad y calidad de agua suficiente a los otros sistemas que alimenta. Esa cantidad y calidad de agua asociada al régimen hídrico es conocida como el caudal ecológico.

En la gran mayoría de los ecosistemas acuáticos continentales, el régimen hidrológico varía naturalmente a lo largo del año. Esa temporalidad es clave y tiene relación con varias funciones del sistema. Por ejemplo en un río, las crecidas anuales son necesarias para limpiar y regenerar los hábitats; los caudales altos permiten la migración de los peces y los caudales de estiaje, la colonización vegetación ribereña. La determinación de un caudal ecológico tiene de hecho una dimensión temporal importante.

La evaluación de caudal ambiental no fue aun implementado en las cuencas del sistema hídrico TDPS. El presente capítulo propone definir el concepto y describir los métodos de evaluación del caudal ecológico. En una segunda fase, luego de un análisis de las normativas vigentes en Bolivia y en Perú, así como del análisis de los datos existentes, se propone un plan de estudio para desarrollar una herramienta de evaluación del caudal ecológico basada en un relevamiento de información biológica a nivel de las cuencas internas del sistema.

C5.2. CONCEPTO DE CAUDAL AMBIENTAL

El caudal ambiental se define como el régimen, volumen y calidad de agua que se debe mantener en un sistema, por cada periodo del ciclo hidrológico, para conservar su funcionamiento ecológico y asegurar el ciclo de vida (crecimiento, circulación y reproducción) de los organismos que lo habitan y el bienestar humano que depende de éstos ecosistemas (Dyson *et al.* 2003, Declaración de Brisbane 2007). Definiciones semejantes aparecen ahora en la legislación de muchos países y en particular en los países andinos del Perú, Ecuador, Colombia, Chile y Argentina.

Conceptualmente, la idea y la definición del caudal ambiental es pertinente si se asume que la extracción de una parte del caudal no tendrá consecuencias notables sobre el sistema y que un nivel de conservación o restauración puede ser alcanzado con un caudal menor que el caudal natural. Sin

embargo Aguilera & Pouilly (2012) proponen diferenciar el caudal ecológico, que permitirá mantener un sistema a un nivel óptimo de conservación y de funcionamiento ecológico, del caudal ambiental, “el cual incluye todos los usos a realizarse en el río ya sean de servicios básicos, industriales, agrícolas, energéticos, turísticos, ecológicos, cultural, etc. Este último concepto aparece como un compromiso de derechos de uso del recurso agua que implica una negociación entre los actores, siendo el funcionamiento ecológico y el ciclo de vida de los organismos que lo colonizan, vistos como usuarios” (Figura C5-1). La nueva constitución política de Bolivia menciona que “es deber del Estado gestionar, regular, proteger y planificar el uso adecuado y sustentable de los recursos hídricos, con participación social” (art. 374), reconociendo como fundamento el concepto de los caudales ambientales y ecológicos y abriendo entonces la necesidad de desarrollo de herramientas para estimarlo. Para el caso del Perú, el Artículo 53 inciso 2 de la Ley de Recursos Hídricos (Ley Nro. 29338 de marzo de 2009), trata el tema de otorgamiento de derechos de uso de agua, haciendo mención a la necesidad que en dicho proceso se asegure la conservación de caudales ecológicos.

C5.3. PRINCIPALES METODOLOGÍAS DE CAUDAL ECOLÓGICO

Los métodos desarrollados para determinar el caudal ecológico se basan en distintos tipos de criterios, indicadores indirectos cualitativos o cuantitativos del funcionamiento del río, para los cuales es posible estimar las variaciones de estado o valor por un rango de caudal y en algunos casos por diferentes periodos hidrológicos del río. El uso de estos criterios y de los métodos asociados debe plantearse en relación a la futura condición deseada del ecosistema, como por ejemplo el mantenimiento o mejoramiento de los ecosistemas acuáticos, incluyendo la biota acuática y de ribera, la maximización de la producción comercial de peces, la conservación de especies en peligro, o la protección de valores culturales, recreacionales o científicos (Tharme 2003). Consensuar el objetivo de la gestión debe ser el inicio de todo proceso de negociación entre los diferentes actores.

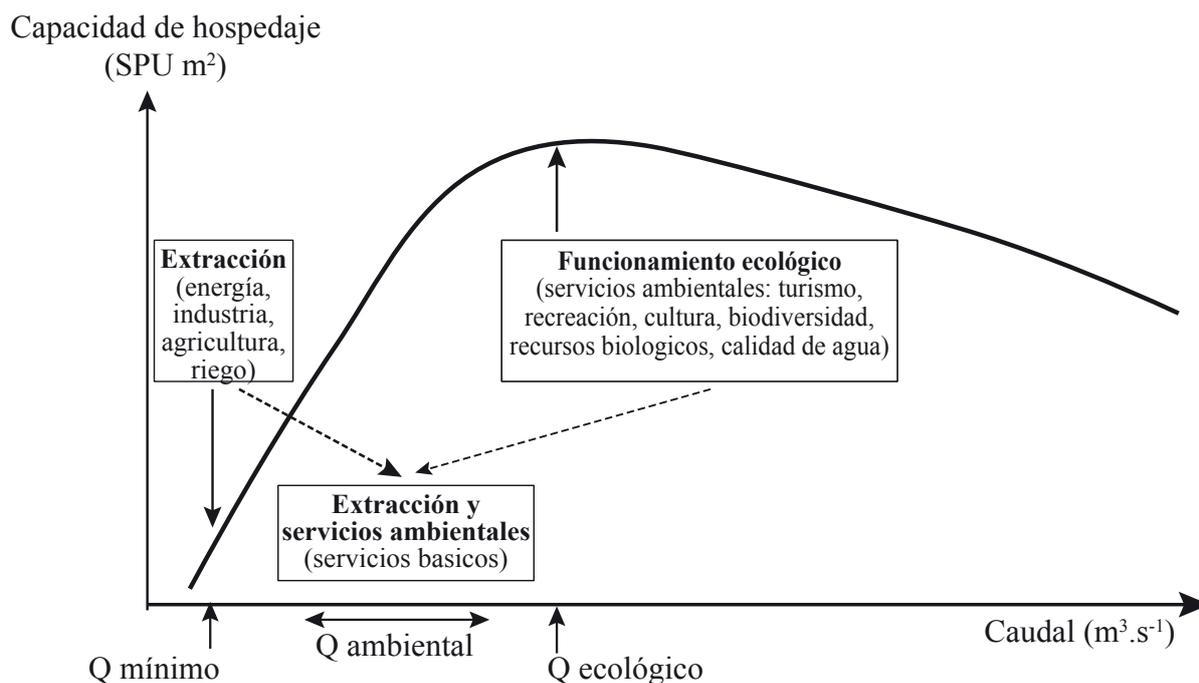


Figura C5-1. Curva teórica de evolución de la capacidad de hospedaje de una especie de peces (o Superficie Potencialmente Utilizable como evaluada en el método PHABSIM), indicadora del funcionamiento ecológico del río. Los caudales mínimo, ambiental y ecológico están ilustrados en relación a los usos que favorecen. Esos caudales deben variar en función al ciclo hidrológico y a los ciclos biológicos de los organismos indicadores (por ejemplo para los peces: reproducción, crecimiento de alevines, estiaje para los adultos). Extraído de Aguilera & Pouilly 2012.

Los métodos de estimación de caudal ecológico pueden ser clasificados en cuatro grupos, de acuerdo a: 1) si integran solamente parámetros físicos (hidrológicos o hidráulicos) o además parámetros biológicos y 2) si permiten generar pronósticos por simulación o modelación o si se basan sobre el peritaje de expertos. Tharme (2003) reportó la existencia de más de 200 métodos de evaluación de los caudales ecológicos usados en 44 países del mundo, todas pertenecen a una de las cuatro categorías que a continuación se describen:

C5.3.1. MÉTODOS HIDROLÓGICOS

Consideran la determinación de un caudal de referencia a partir de una relación cualitativa entre la calidad del hábitat y el porcentaje del caudal anual natural. El primero en desarrollar esa metodología fue Tennant (1976) quien calificó la fauna íctica y diferentes parámetros físicos que representan el hábitat de los peces en once ríos de los EE.UU. A partir de esa clasificación, estableció una tabla que permite determinar, en una primera aproximación, el caudal ambiental a conservar en un río del área de estudio en relación al objetivo de conservación que se plantea. Este es un método bastante general y la clasificación es válida para una región pero no permite analizar las particularidades de cada río dentro la región. Las clases de objetivos son subjetivas y no incluyen una

modulación temporal en relación al ciclo hidrológico y a las diferentes fases de funcionamiento del río.

C5.3.2. MÉTODOS HIDRÁULICOS

Consideran una relación teórica empírica entre un parámetro hidráulico, como la superficie mojada (“wetted perimeter”, Collings 1972), y la calidad de hábitats para la biota en general. En estos métodos el caudal de referencia se establece buscando el ratio más elevado entre el parámetro hidráulico y el caudal (correspondiendo a los puntos de inflexión en la relación entre el perímetro mojado y el caudal, Figura C5-2). Aunque basada sobre una aplicación local, estos métodos utilizan un criterio físico sin que se demuestre la relación entre este criterio, la calidad del hábitat y las preferencias de hábitat de los organismos.

C5.3.3. MÉTODOS DE MODELIZACIÓN DEL HÁBITAT

Los métodos de modelización del hábitat y en particular el método PHABSIM (Physical Habitat Simulation) constituyen uno de los métodos de evaluación más eficientes y más utilizados en la actualidad (Tharme 2003). Al contrario de las dos familias de métodos precedentes, el modelado del hábitat permite establecer un pronóstico cuantitativo de la calidad del hábitat por un rango de caudal, basándose sobre la información física local e información biológica local o regional.

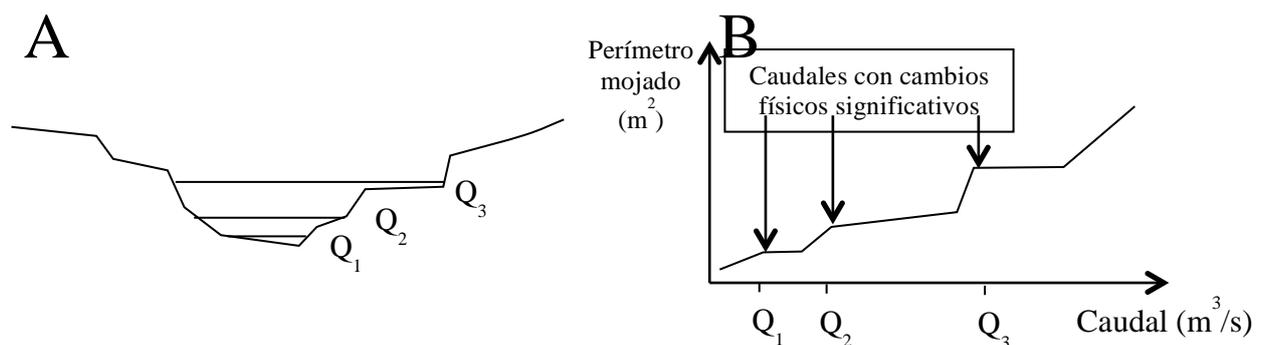


Figura C5-2. Ilustración del método del perímetro mojado. A- Sección transversal de un río y B- relación entre el caudal y el perímetro mojado en este río. Los caudales en los cuales se produce un cambio físico significativo en relación a la morfología del lecho son remarcados (Q_1 , Q_2 y Q_3) que sirven de guía para la evaluación de un caudal ecológico. Extraído de Aguilera & Pouilly 2012.

El método PHABSIM (Bovee 1982) acopla modelos biológicos e hidráulicos para evaluar los cambios en la capacidad de hospedaje del río para una especie sobre un rango de caudal (Figura C5-3). El

análisis de los resultados interpreta los caudales ecológicos como aquellos caudales que generen la mayor capacidad de hospedaje o los que optimicen el ratio entre la capacidad de hospedaje y el caudal. En base a una serie hidrológica, el método determina la evolución de la capacidad de hospedaje a lo largo del ciclo hidrológico anual, lo que permite analizar y proponer caudales ecológicos relacionados a las diferentes fases del ciclo biológico de los organismos (i.e. migración, reproducción, condiciones críticas de estiaje, etc.).

Estos métodos suponen la selección de especies indicadoras o representativas, que reflejan el funcionamiento ecológico global del río y que deben ser elegidas en relación a los objetivos de cada estudio. En ríos de baja diversidad, el objetivo de optimizar el caudal que favorece a la especie (nativa) dominante es pertinente. En ríos con alta diversidad la elección de la especie resulta más complejo y se pueden considerar distintos enfoques, como por ejemplo optimizar el hábitat de las especies que presenten importancia local cultural o comercial o de especies “paraguas” generalizadoras (que representan funcionalmente a las demás especies), establecer gremios de especies que representan las diferentes estrategias de uso del hábitat, o buscar un caudal que favorezca una comunidad de peces cuya composición se asemeja a una comunidad de referencia natural regional (actual o histórica).

C5.3.4. MÉTODOS HOLÍSTICOS

Estos métodos consideran la compilación, por un grupo de expertos, de información disponible sobre diferentes aspectos de la ecología funcional del río (como las necesidades ecológicas de las especies acuáticas y ribereñas representativas y el comportamiento hidrológico y geomorfológico del río) y de los aspectos socioeconómicos (como la calidad estética, la dependencia social y cultural respecto al río y los beneficios económicos del uso del recurso hídrico; Castro Heredia *et al.* 2006). En base a esa información las metodologías de Bloques de Construcción (Building Block Methodology, BBM; King & Louw 1998; King *et al.* 2000, 2008) y de Límites ecológicos de la alteración hidrológica (Ecological Limits of Hydrologic Alteration, ELOHA, Poff *et al.* 2010) utilizan el hidrograma natural del río como referencia para establecer, empíricamente o cuantitativamente, recomendaciones de caudales que permitirán satisfacer las necesidades de caudal en cantidad y las variaciones temporales para diferentes funciones ecológicas.

C-5 Caudal ambiental: perspectivas de evaluación en el Sistema TDPS

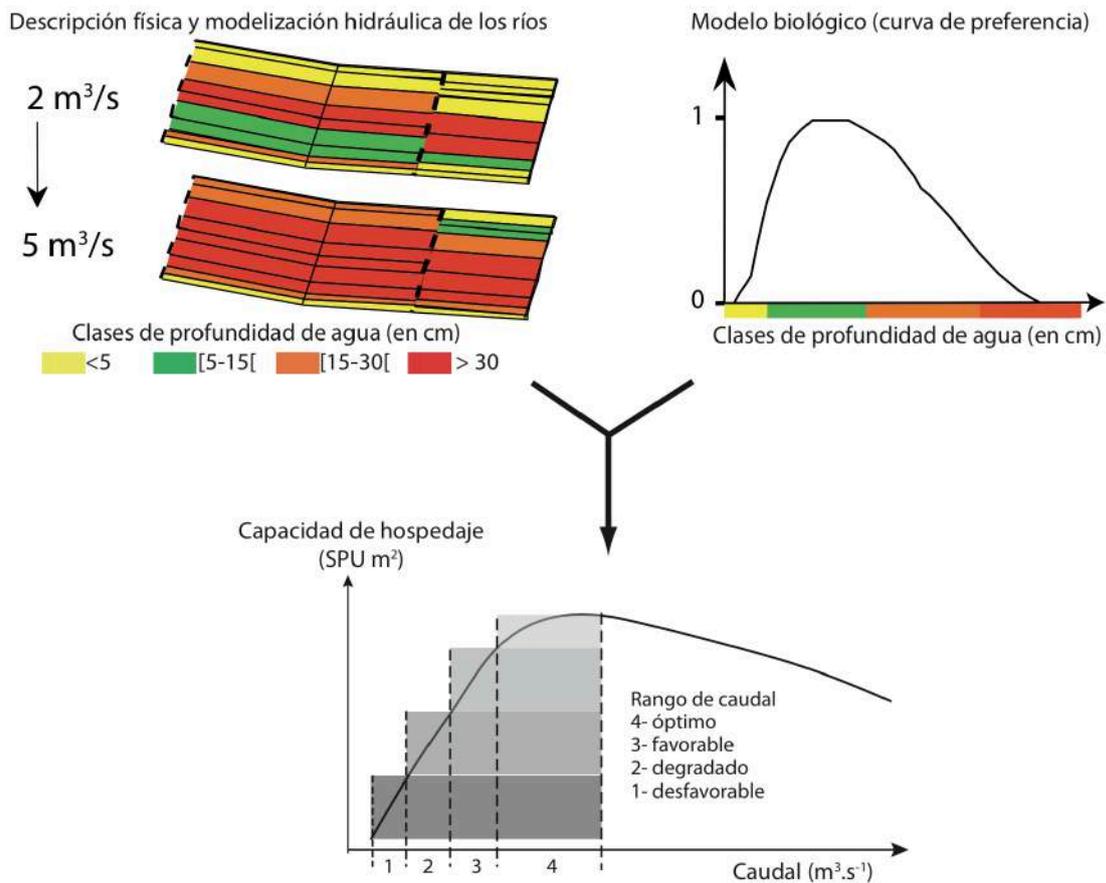


Figura C5-3. Esquema del acople entre los modelos hidráulicos y biológicos según PHABSIM. A- modelización hidráulica de un tramo de río. Para cada caudal el modelo estima en cada celda (rectángulos) el valor de los parámetros de velocidad, profundidad y sustrato; B- Modelo biológico. La curva indica las preferencias (entre 0 y 1) de la especie para cada valor de velocidad, profundidad y sustrato; C- Evolución de la Superficie Potencialmente Utilizable (SPU) para la especie en un rango de valor de caudal modelado. Modificado de Aguilera & Pouilly 2012.

C5.4. INFORMACIÓN Y ELEMENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL SISTEMA TDPS

C5.4.1. NORMAS Y LEYES EN BOLIVIA Y PERÚ

En Bolivia la ley de Medio Ambiente fue promulgada el 27 de abril de 1992 como ley 1333. En esta ley, el capítulo II “Del recurso agua” (artículos 36 al 39) plantea la protección del recurso agua como una tarea fundamental del estado y de la sociedad. El artículo 38 estipula que “el Estado promoverá la planificación, el uso y aprovechamiento integral de las aguas, para beneficio de la comunidad nacional, con el propósito de asegurar su disponibilidad permanente; priorizando acciones a fin de garantizar agua de consumo para toda la población”. Si bien el artículo 37 menciona que se “constituyen prioridad nacional la planificación y conservación de las aguas en todos sus estados y el manejo integral y control de las cuencas donde nacen o se encuentran las mismas”, esa ley presenta

ambigüedad entre el aprovechamiento y el manejo integral del recurso. La nueva Constitución del Estado Plurinacional de Bolivia promulgada en el 2009, en su Capítulo quinto (artículos 373 al 377) reafirman esta tarea, además de reconocerlos como recursos finitos y considerar la participación de la sociedad como parte fundamental para la protección, planificación en el uso adecuado y sustentable del recurso agua. Además el Estado reconoce la dinámica de las cuencas hidrográficas, por lo que establece que en las nacientes y zonas intermedias de los ríos, se deben evitar las acciones que puedan ocasionar daños a los ecosistemas o la disminución sus caudales (art. 376). Bajo estos lineamientos se desarrolló el Plan Nacional de Cuencas (PNC, MMAyA 2007). Este plan, que ha cobrado mayor fuerza en los últimos años por consecuencias del cambio climático, promueve la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) y el Manejo Integrado de Cuencas (MIC), como dos ejes necesarios y complementarios. El objetivo principal del PNC es el mejorar la calidad de vida de las comunidades y pobladores a través de su participación, como sustento del desarrollo ambiental sostenible, promocionando proyectos de inversión e iniciativas locales dentro de las dos modalidades GIRH y MIC. Donde el MIC considera las tareas técnicas del uso y manejo de los recursos y el GIRH reforzará los aspectos sociales e institucionales de gestión y administración como acciones adecuadas para el uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales de la cuenca (Ministerio del Agua, 2007).

Aunque el concepto de caudal ecológico no está mencionado de manera explícita en la normativa boliviana, la visión y los principios incluidos en la constitución y en la ley son argumentos para un desarrollo y una aplicación de este concepto a través del manejo integrado y del reconocimiento de la dinámica de las cuencas hidrográficas.

En el caso del Perú el Artículo 53 de la Ley N° 29338 de Recursos Hídricos del 2009 menciona, en relación a la obtención de una licencia para el uso del agua, que “la fuente de agua a la que se contrae la solicitud tenga un volumen de agua disponible que asegure los caudales ecológicos, los niveles mínimos de reservas o seguridad de almacenamiento y las condiciones de navegabilidad, cuando corresponda y según el régimen hidrológico”. De acuerdo a Del Castillo *et al.* (2012) “la deficiencia en el tratamiento del tema en la Ley de Recursos Hídricos del Perú es cubierta en el Reglamento de esta Ley (aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG). El citado reglamento le dedica todo el Capítulo VIII del Título V (sobre Protección del Agua) a los Caudales Ecológicos, el cual está compuesto por tres artículos (153 a 155). El artículo 153 contiene una definición de caudales ecológicos (“153.1. Se entenderá como caudal ecológico al volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico o cultural). El referido artículo 153 señala las responsabilidades de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Ministerio del Ambiente (MINAM).

No obstante la definición de caudales ecológicos anotada, que hace mención a fuentes naturales en general, los siguientes incisos del artículo 153 parecen referirse exclusivamente al agua de los ríos. El artículo 154, por su parte reconoce que los referidos caudales pueden presentar variaciones a lo largo del año, volviendo a referirse a los ríos: “Los caudales ecológicos pueden presentar variaciones a lo largo del año, en cuanto a su cantidad, para reproducir las condiciones naturales necesarias para el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos y conservación de los cauces de los ríos”. Dicha prescripción lleva a afirmar la necesidad de evitar la extracción de agua de los ríos en los períodos en que precisamente los mismos no tienen condiciones naturales para el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos. Finalmente, el artículo 155 dispone que las metodologías para la determinación de los caudales ecológicos serán establecidas por la ANA en coordinación con el Ministerio del Ambiente”. De acuerdo a lo previamente tratado el concepto de caudal ecológico es parte de la legislación peruana, por lo que en base a los acuerdos pre existentes sería más fácil su implementación en el sistema TDPS.

Los primeros acuerdos para el estudio y manejo del Lago Titicaca entre Perú y Bolivia se remontan a 1955, cuando ambos países firmaron un documento que declara "la copropiedad indivisible y excluyente de ambos países de las aguas del lago". Posteriormente en 1996 los gobiernos del Perú y Bolivia con el propósito de generar acciones para la protección y conservación del Lago Titicaca crearon la Autoridad Binacional Autónoma del sistema hídrico TDPS (ALT), estableciendo un marco legal y a partir del cual se elaboró un plan director para la sistematización de datos e información procedente de diferentes fuentes posibilitando su consulta e intercambio entre Perú y Bolivia.

C5.4.2. DEMANDA Y USO DEL AGUA EN EL TDPS

El ecosistema más destacado y simbólico a nivel ecológico, económico, social y cultural del sistema TDPS es el lago Titicaca; siendo considerado como una fuente importante de agua dulce, clave para la sobrevivencia de las personas que viven a su alrededor. Sin embargo todas las estrategias que han sido implementadas tanto por los gobiernos de Perú y de Bolivia y la ALT se refieren al aprovechamiento del recurso sin necesariamente tomar en cuenta los aspectos ecológicos. Se refieren principalmente a programas de ordenamiento pesquero tanto para las especies nativas del género *Orestias* como para las dos especies introducidas *Onchorynchus mykiss* y *Odontesthes bonariensis* o a estrategias para el desarrollo de una acuicultura sostenible (Gobierno del Perú 1992; CIDAB 2002; Gobierno del Perú 2008; Araoz 2009; Conterno 2009; Gonzales 2010; Aragón 2012). Una de las actividades de regulación llevadas por la ALT en 1997 fue la construcción de compuertas para mantener el nivel del lago Titicaca tanto en época seca como en época húmeda, lo que según el plan

director de la ALT permitiría lograr un equilibrio paritario entre Perú y Bolivia, regulando el flujo del agua hacia el Desaguadero con un mínimo de $10\text{m}^3/\text{s}$ (ALT – PNUD 2001). El modo de operación de estas compuertas no contempla reglas que tomen en cuenta la evaluación de un caudal ambiental que debería circular en cada fase del ciclo hidrológico para asegurar la integridad ecológica de los ecosistemas que están río abajo del lago Titicaca y que dependen en parte de sus aguas para mantenerse (río Desaguadero y lagos Uru-Uru y Popoó). La cuenca del lago Titicaca ocupa el 39.1% de la superficie del sistema TDPS. Su efluente natural del lago Titicaca, el río Desaguadero, representa el 21.6% y desemboca en el lago Poopó que representa el 17.3% del TDPS (Monje *et al.* 2011). Estos porcentajes y conexiones revelan la importancia del manejo de las aguas del Titicaca, debido a que este manejo impactará a más del 70% de la superficie del sistema TDPS, siendo esa parte la que alberga la mayor parte de las actividades antrópicas. En las últimas décadas estos ecosistemas se han visto afectados por la degradación ambiental como: contaminación por aguas residuales, contaminación por minería, por practicas pesqueras y acuícolas inadecuadas (Monje *et al.* 2011), así como por el efecto del cambio climático, lo que hace que el ecosistema sea más sensible y vulnerable a una reducción o modificación de su régimen hidrológico.

Los aportes al lago por sus afluentes se estiman en unos $201\text{ m}^3/\text{s}$ (UNEP – PNUMA 1996), sin embargo no es posible utilizar todo este caudal, pues la mayor parte se consume en el mantenimiento del propio lago (UNEP – PNUMA 1996). El caudal máximo aprovechable en la cuenca del Titicaca fue estimado por UNEP – PNUMA (1996) entre 20 a $25\text{ m}^3/\text{s}$, lo que es considerablemente inferior a la demanda estimada. La demanda global potencial de agua es de $125\text{ m}^3/\text{s}$ en todo el sistema TDPS, de los cuales $2\text{ m}^3/\text{s}$ se destinarían para consumo doméstico, $19\text{ m}^3/\text{s}$ para trasvases previstos hacia otras cuencas, $103\text{ m}^3/\text{s}$ para proyectos de riego actuales y futuros, y $1\text{ m}^3/\text{s}$ para otros usos que incluyen minas, industrias y abrevaderos (UNEP – PNUMA 1996). La demanda total prevista solo para la cuenca del Lago Titicaca es de $95\text{ m}^3/\text{s}$ y la correspondiente a la cuenca del Desaguadero y Popoó sería de $30\text{ m}^3/\text{s}$ (UNEP – PNUMA 1996). De nuestro conocimiento no existen estimaciones más recientes de esa demanda y de su evolución. Aunque en este estudio del 1996 se incluían las estimaciones de las obras futuras planificadas por el plan director de la ALT, no se ha considerado la demanda en agua de actividades de minería importantes como por ejemplo las de la concesión minera EMIRSA. Esa explotación ha requerido la creación de dos lagos, ambos de una extensión de aproximadamente un kilómetro y de mas de 200 metros de profundidad. En el 2008, los pobladores se alarmaron de la poca disponibilidad de agua río debajo de estos lagos y se genero una polémica sobre la procedencia y el uso del agua entre las minerías y los agricultores locales (La Razón del 3 de enero 2012, La Patria del 19 de octubre de 2012). Estos conflictos entre usuarios generan una tensión social y al final perjudican el desarrollo regional así mismo que la

sostenibilidad de las poblaciones, actividades y de los ecosistemas del TDPS. Son la prueba clara de una urgente necesidad de un dialogo y de una negociación transparente sobre la gestión del agua que incluya tanto a los actores extractivos (mina y agricultura) y conservadores (poblaciones dependientes y ecología) para establecer un replanteamiento de las demandas y una selección y priorización de proyectos de trasvase y riego en función de criterios ambientales junto con los sociales, económicos e hidrológicos y que contemple métodos de medición adecuados para obtener los caudales ecológicos.

C5.4.3. INFORMACIÓN BIOLÓGICA Y ECOLÓGICA

La información biológica que se requiere para aplicar las diferentes metodologías sobre caudales ecológicos, es casi inexistente para el sistema TDPS. En el caso de peces no existen reportes escritos de la presencia de peces en el río Desaguadero. Por consultas y observaciones personales, hemos confirmado la presencia de *Orestias* sp. y *Odontesthes bonariensis* en el río Desaguadero; y aunque los comunarios indican la captura del “Mauri” *Trichomycterus* sp., este no ha sido colectado (Datos no publicados Proyecto FISHLOSS – IRD 2009-2011). En su estudio sobre la distribución del genero *Orestias*, De La Barra *et al.* (2009) reportan a *O. agassii* para los lagos Uru Uru y Poopo y Zepita (2013), reporta la presencia de *O. luteus* en el Lago Uru Uru. La especie introducida en el Lago Poopo *Odontesthes bonariensis* fue reportada recientemente en el estudio de concentración de metales pesados en peces e invertebrados de Molina *et al.* (2008). A pesar de estos registros, la distribución de peces en los ríos del sistema TPDS es casi desconocida o no publicada.

En cuanto a la distribución de invertebrados contamos con el estudio de Moya (2009) en ríos intermitentes y permanentes que se encuentran en el Altiplano (Oruro), los resultados mostraron que la estacionalidad no ha tenido efecto sobre la riqueza y la densidad, pero si se encontraron diferencias significativas en la composición taxonómica. Por lo que se esperarían cambios en la estructura taxonómica y funcional si el cambio climático acentúa la estacionalidad de estos dos tipos de ríos intermitentes y permanentes.

Toda esta información, aunque poco documentada, ya puede ser considerada una base preliminar sobre la cual se puede y se requerirá ampliar los datos.

C5.5. VACIOS DE CONOCIMIENTOS Y PERSPECTIVAS DE APLICACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE CAUDAL ECOLÓGICO EN EL SISTEMA TDPS

De forma general la región andina ha recibido poca atención en el tema de los caudales ecológicos (Tharme 2003, Aguilera & Pouilly 2012). En su trabajo de revisión de los trabajos sobre caudal ecológico en la región Andina, Aguilera & Pouilly (2012) mencionan dos trabajos vinculado al tema para Bolivia y tres para Perú. Los trabajos para Bolivia corresponden a descripciones y perspectivas sin aplicaciones (Verweij 2005, Anderson *et al.* 2011). En Perú aún no se ha definido una metodología a aplicar y los estudios corresponden a trabajos de consultorías para resolver problemas locales (Vilchez Ochoa 2010) que utilizan métodos hidrológicos y hidráulicos (Egasa 2008) pero a veces también métodos de simulación del hábitat (Vilchez Ochoa 2010).

Generalmente los métodos hidrológicos y hidráulicos son de más fácil y rápida aplicación, sin embargo por no tener en cuenta las necesidades ecológicas particulares a cada ecosistema, son actualmente considerados como insuficientes para la recomendación de los caudales ecológicos. La definición misma del concepto de caudal ecológico y las metodologías consideradas relevantes para evaluar estos caudales, implican un conocimiento sobre: 1) la distribución de las especies en la cuenca para determinar las especies indicadoras del funcionamiento del sistema o las especies de interés cultural o económico; 2) la relación de dependencia de estas especies a su hábitat; y 3) la variación natural temporal del ciclo hidrológico como indicador de las variaciones de disponibilidad del hábitat.

Los estudios que buscan comprender la relación que existe entre las alteraciones del caudal y las especies que habitan los ecosistemas acuáticos son escasos en la región andina (Anderson *et al.* 2011). Según Aguilera & Pouilly (2012), esa falta de conocimientos regionales sobre la respuesta ecológica de los distintos grupos biológicos a la alteración de los caudales y el alto grado de endemismo de las especies limitan actualmente el uso de metodologías holísticas, como la metodología de Bloques de Construcción BBM o ELOHA, en la región andina. Los métodos de simulación de hábitat (tipo PHABSIM) se presentan como una solución efectiva para la generación de esa información ecológica sobre la biota acuática y al mismo tiempo establecer primeras recomendaciones de caudal ecológico.

En el caso del sistema TDPS no pudimos encontrar ninguna experiencia científica en el tema de los caudales ecológicos. La revisión de más de 200 estudios vinculados la biodiversidad de fauna acuática en sistema TDPS, reveló 108 referencias referidas a la biodiversidad de peces (20% específicamente al género *Orestias*) y 20 referencias para aves anfibios, mamíferos, macroinvertebrados. El resto corresponde a normativas, reglamentación de pesca y pesquerías y usos potenciales de recurso. Esa

revisión no permitió revelar ningún estudio que podría apoyar al desarrollo de una aplicación de métodos de evaluación de caudales ecológicos.

La evaluación de la variación natural temporal del ciclo hidrológico como indicador de las variaciones de disponibilidad del hábitat se puede beneficiar a través de la información hidrológica generada por las estaciones hidrológicas existentes en la cuenca (Cap. A-2).

Una propuesta de desarrollo de una herramienta para la evaluación de caudales ambientales o ecológicos en el sistema hídrico TDPS deberá entonces tener como primer objetivo la generación de información biológica sobre la distribución y la relación especies-hábitat para las especies indicadoras o de interés en el marco del desarrollo de una herramienta de simulación del hábitat. En el caso del sistema TDPS los peces pueden servir de especies indicadoras ya que no presentan una gran diversidad, lo que favorece la aplicación de estos métodos que tienen un enfoque sobre una o pocas especies representativas del sistema. Según los objetivos establecidos en cada parte del sistema se podrá enfocar sobre especies nativas locales (*Orestias* o *Trichomycterus* sp.) o en algún caso favorecer a la trucha (*Onchorynchus mykiss*) o al pejerrey (*Odontesthes bonariensis*), las cuales corresponden a especies exóticas adaptadas a los sistemas alto-andinos que están presentes desde hace varias décadas y que tienen una importancia en el desarrollo socio-económico local. En los sistemas más extremos donde los peces no están representados, las especies de invertebrados podrían servir de indicadores.

El segundo objetivo deberá dedicarse a adaptar herramientas existentes a los sistemas y a las especies presentes en el TDPS y por las cuales el relevamiento de información sobre su dependencia al hábitat se revelara positivo. Sería recomendable utilizar para este fin los recientes modelos ESTIMHAB (Lamouroux 2008), derivados de la metodología PHABSIM (Physical Habitat Simulation, Bovee 1982 o sus derivados como EVHA, Pouilly *et al.* 1995, Ginot *et al.* 1997). Una vez generada la información biológica, estos modelos permiten una aplicación rápida, sin mucho requerimiento de personal capacitado y de material, por tanto permiten su aplicación a una escala espacial más amplia que los métodos tales como PHABSIM. En caso de aplicación a la escala de la cuenca, el método puede servir para detectar los lugares menos sensibles a la reducción del caudal o para hacer recomendaciones generales. Así como el bioíndice (Cap. C-3), una red de estaciones de referencia puede permitir el monitoreo temporal de la calidad del hábitat físico de los ríos. Esta herramienta podrá servir también localmente para establecer con mayor precisión las necesidades del caudal ecológico en los proyectos locales de obras civiles (represas, canal de derivación, boca toma para

riego, etc.).

Estos elementos previsionales son de gran interés como insumos para la elaboración de planes locales de gestión del agua y dentro de un modelo más general para la gestión del agua a nivel de cuenca, en el marco de una gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) adoptada por Bolivia y Perú. En un plazo mayor una metodología óptima podrá desarrollarse para la generalización de la simulación de hábitats y la inclusión de otros aspectos funcionales tal como están considerados en las metodologías holísticas de evaluación de caudales ambientales.

Propuesta de estudio para el desarrollo de una herramienta de evaluación de caudal ecológico en el sistema TDPS

Objetivo general:

Recomendar, con sustento científico, el nivel de caudal a conservar en los ríos de las sub-cuencas del TDPS en cada fase del ciclo hidrológico para mantener su biodiversidad y favorecer su funcionamiento ecológico.

Objetivos específicos:

- Desarrollar un estudio biológico de distribución de las especies de peces más comunes en los ríos del sistema TDPS.
- Establecer el grado de dependencia entre la repartición de los individuos de estas especies y los parámetros del hábitat a escala regional, local y del microhábitat.
- Elaborar modelos biológicos de preferencia de hábitat de las especies de peces más comunes para adaptar la metodología ESTIMHAB en las diferentes sub-cuencas del sistema TDPS.
- Aplicar la metodología ESTIMHAB en 15 a 20 ríos de la parte Peruana y Boliviana del sistema TDPS, repartidos en las diferentes sub-cuencas y aprovechando la información de las distintas estaciones hidrométricas repartidas en estos ríos para el monitoreo hidrológicos del sistema TDPS.
- Evaluar por cada sub-cuenca, las épocas hidrológicas críticas para la conservación del hábitat físico de los peces y recomendar un caudal ecológico para estas épocas.

C5.6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilera G. & Pouilly M. 2012. Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. Acta zoológica lilloana, 56, 15-30.
- ATL – PNUD. 2001. Estudio socioeconómico. Proyecto de conservación de la biodiversidad en el sistema TDPS. 343 p.
- Anderson E. P., Encalada A. C., Maldonado-Ocampo J. A., McClain M. E., Ortega H., & Wilcox B. P. 2011. Environmental Flows: a Concept for Addressing Effects of River Alterations and Climate Change in the Andes. En S. K. Herzog, R. Martinez, P. M. Jørgensen y H. Tiess Eds. Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 348 p.
- Aragón E. 2012. Reglamento de ordenamiento pesquero y acuícola para la cuenca del lago Titicaca ROPA.

C-5 Caudal ambiental: perspectivas de evaluación en el Sistema TDPS

- Araoz M. 2009. Resolución ministerial. In: N° 498-2009-PRODUCE (ed. Perú Rd), p. 4
- Bovee, K. D. 1982. A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. Instream Flow Information Paper No. 12. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-82/26. Fort Collins, Colorado
- Castro Heredia, L. M., Carvajal Escobar Y. & Monsalve Durango E. A. 2006. Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. Ingeniería y Universidad, año/vol. 10, N° 2. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá Colombia: 28 p.
- CIDAB 2002. Proyecto de conservación de la biodiversidad en la cuenca del lago Titicaca, Desaguadero, Poopo, salar de Coipasa (TDPS): desarrollar la capacidad de programas de pesca artesanal en Bolivia. CIDAB
- Collings, M. R., Smith R.W. & Higgins G. T. 1972. The hydrology of four streams in western Washington as related to several Pacific salmon species. USGS Water-Supply Paper 1968. Washington, DC. 109p.
- Conterno E. 2009. Resolución ministerial. In: N° 217-2009-PRODUCE (ed. Perú Rd)
- Declaración de Brisbane 2007. Los Caudales Ambientales son esenciales para la Salud de los Ecosistemas y el Bienestar Humano. http://www.nature.org/initiatives/freshwater/files/brisbane_declaration_with_organizations_final.pdf
- De la Barra E., Maldonado M., Carvajal-Vallejos F. & Coronel J. 2009. Los peces del genero Orestias (Cyprinodontiformes, Cyprinodontidae) en la Puna meridional de Bolivia. Rev. Bol ecol. y Cons. Amb. 26.
- Del Castillo, L. & Llerena C. 2012. Análisis del marco legal e institucional sobre los caudales ecológicos/ambientales en el Perú. UICN, Quito, Ecuador. 57 pp.
- Dyson M., Bergkamp G., Scanlon, J. Eds. 2003. Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. Tr. José María Blanch. San José, C.R.: UICN-ORMA. xiv + 125 pp.
- EGASA 2008. Determinación de caudal ecológico mínimo del Río Molloco. Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa S.A. (EGASA)- Estudio de Impacto Ambiental de la Central Hidroeléctrica Molloco: 10 pp. Disponible en: <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgae/publicaciones/resumen/molloco/Anexo%20Caudal.pdf>
- Ginot V., Souchon Y., Capra H., Breil P. & Valentin S. 1997. Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière. Guide Méthodologique. Cemagref, Lyon et Ministère de l'Environnement, Direction de l'eau. 130p. (www.irstea.fr/evha)
- Gonzales J. N. 2010. Resolución ministerial. In: N° 209-2010-PRODUCE (ed. Perú Rd), p. 4
- King J. M. & Louw D. 1998. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the building block methodology. Aquatic Ecosystem Health and Management 1:109-124.
- King J. M., Tharme R. E. & de Villiers M. S. Eds. 2008. Environmental flow assessments for rivers: Manual for the Building block methodology (Updated Edition). WRC Report No TT 354/08. 364p.
- Lamouroux N. 2008. Estimhab. Estimation de l'impact sur l'habitat aquatique de la gestion hydraulique des cours d'eau. Informe Cemagref (www.irstea.fr/estimhab)
- Gobierno de Bolivia. 1992. Ley de Medio Ambiente 1333.
- Gobierno de Bolivia. 2009. Constitución Política del Estado Plurinacional.
- Gobierno del Perú. 2009. Ley 29338 de Recursos Hídricos.
- Gobierno del Perú. 1992. Ley general de pesca. In: Decreto de ley N° 25977
- Gobierno del Perú. 2008. Normas legales. In: El Peruano, p. 16, 28/12/2008
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua 2007. Plan nacional de cuencas. Marco conceptual y estratégico, La Paz, Bolivia.
- Monje M., Ortuño C., Rocabado G., Abán N. & Montesinos J. 2011. Plan de monitoreo de calidad de agua en el sistema hídrico Titicaca, Desaguadero, Poopo y Salar de Coipasa, Bolivia. MMAyA, La Paz Bolivia 61p.
- Moya N., Gibon F. M., Oberdorff T., Rosales C. & Domínguez E. 2009. Comparación de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos intermitentes y permanentes del Altiplano boliviano: Implicaciones para el futuro cambio climático. Ecología aplicada, 8(2).
- La Patria. 2012. Ambientalistas observan uso del agua en minería.

- La Razón. 2012. El agua tiene otro destino por la explotación a cielo abierto.
- Poff N. L., Allan J. D., Bain M. B., Karr J. R., Prestegard K. L., Richter B. D., Sparks R. E. & Stromberg J. C. 1997. The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, Vol. 47, No. 11: 769-784.
- Poff N. L. & Zimmerman J. K. H. 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 55, 194–205..
- Poff N.L., Richter B. D., Aarthington A. H., Bunn S. E., R.J., Naiman, E., Kendy, M., Acreman, C., Apse B. P., Bledsoe M. C., Freeman J., Henriksen R. B., Jacobson J. G., Kennen D. M., Merritt J. H. O’Keeffe J. D. Olden K. Rogers R. Tharme E. & A. Warner, A. 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology* , 55:147–170.
- Pouilly M., Valentin S., Capra H., Ginot V. & Souchon Y. 1995. Méthode des microhabitats, principes et protocoles d'application. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 336: 41-54.
- Tennant, D. L. 1976. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1(4):6-10.
- Tharme, R. E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19:397-441.
- UNEP – PNUMA. 1996. Diagnóstico ambiental del sistema TDPS, Bolivia – Perú. 223 p.
- Verweij, M. 2005. A propósito del caudal ecológico. Disponible en: <http://neolectum.com/pdfdocs/ndpz2002.pdf>
- Vilchez Ochoa G. 2010. Servicio de consultoría para la sistematización y seguimiento de la aplicación de metodologías de determinación del caudal ecológico en cuencas hidrográficas en el marco de las acciones de seguimiento e intervención. Ministerio del Ambiente Viceministerio de Gestión Ambiental Dirección General de Calidad Ambiental: 30 pp. Disponible en: <http://cdam.minam.gob.pe:8080/dspace-consultorias/bitstream/123456789/83/1/CD000040.pdf>
- Zepita C. 2013. Dieta y rasgos sexuales de las poblaciones del complejo *agassii* (género *Orestias*, (Pisces-Cyprinodontidae)) en los lagos: Titicaca, Uru Uru y Poopo. Tesis de Licenciatura, Carrera de Biología. Universidad Mayor de San Andrés. 61 p.

LISTA DE CONTACTOS DE LOS COAUTORES

Coautor	Institución	Dirección	Tel. / Fax	E-mail / url
Francisca ACOSTA C. MSc., Investigadora	Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos (ULRA), Universidad Mayor de San Simón (UMSS)	Calle Sucre y Parque La Torre s/n, Casilla postal 992 Cochabamba, Bolivia	Tel./Fax. +(591-4) 423 56 22; Cel. +(591) 707 04 265	f.acosta.pachy@gmail.com www.lab-ulra.com
Gastón AGUILLERA Ph.D., Investigador	CONICET-Fundación Miguel Lillo	Miguel Lillo 251- San Miguel de Tucumán- CP:4000- Argentina	Tel. +(54) 0381 433 0868	aguileragaston@gmail.com www.lillo.org.ar/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=61&Itemid=132
Mario AGUIRRE NÚÑEZ Ph.D., Oficial Senior - Programa de Agua	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) Oficina Regional para Sudamérica	Quiteño Libre E15-12 y La Cumbre Sector Bellavista Quito, Ecuador	Tel. +(593-2) 226 10 75 Ext. 34	mario.aguirre@iucn.org www.iucn.org/sur
Jacques CALLÈDE Ph.D. Director de investigación	Jubilado del IRD	QE15, conj. S, casa 51, Guará II, 71050-191 Brasília (DF), Brasil	Tel. +(55 61) 33 81 95 14	cld@apis.com.br
Jhan Carlo ESPINOZA Ph.D., Investigador	Instituto Geofísico del Perú (IGP)	Calle Badajoz # 169 - Mayorazgo IV Etapa - Ate Vitarte, Lima, Perú	Tel. +(51-1) 317 23 00 (135)	jhan-carlo.espinoza@igp.gob.pe sites.google.com/site/jhancarloeepinoza
Yareli ESQUER GARRIGOS Ph.D., Investigadora	UMR BOREA, Département Milieux et Peuplements Aquatiques MNHN - CNRS 7208 - IRD 207 - UPMC	Muséum National d'Histoire Naturelle, 43 rue Cuvier, 75231 Paris, Francia	Tel. +(33) 01 40 79 37 67	esquer@mnhn.fr
Wanderley FERREIRA Ing. Agrónomo	Gerente General de RUMBOL SRL	Av. America Nro 435. Edificio Jaque Of. 7 piso 2 Cochabamba, Bolivia	Tel./Fax +(591-4) 445 79 00	wferreira@rumbol.com www.rumbol.com
César GAMARRA PERALTA Ph.D., Biólogo	IMARPE Coordinador del Laboratorio Continental de Puno	Av. Circunvalación Sur Nro. 1911 Puno, Perú	Tel. +(51-51) 36 62 41 +(51-51) 36 62 41	cgamarra@imarpe.gob.pe www.imarpe.gob.pe

Lista de contactos de los autores

Coautor	Institución	Dirección	Tel. / Fax	E-mail / url
Edgar GOITIA ARZE MSc., Docente Investigador	Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos (ULRA), Universidad Mayor de San Simón (UMSS)	Calle Sucre y Parque La Torre s/n, Casilla postal 992 Cochabamba, Bolivia	Tel./Fax: +(591-4) 423 56 22 Cel: +(591) 71732891	limnoed@fcyt.umss. edu.bo www.lab-ulra.com
Ramiro GUTIÉRREZ Lic., Investigador asociado	Instituto de Ecología (IE), Unidad de Limnología (UL), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)	Campus universitario, Calle 27 de Cota Cota La Paz, Bolivia		ramiro.gutierrez.chip ana@gmail.com
Bernard HUGUENY Ph.D., Director de investigación	IRD, UMR 'BOREA' CNRS 7208/IRD 207/MNHN/UPMC, DMPA	Muséum National d'Histoire Naturelle 43 rue Cuvier, 75231 Paris Cedex, Francia.	Tel. +(33) 01 40 79 37 67	hugueny@mnhn.fr www.mnhn.fr/mnhn /UMR7208/equipe6/ team6uk.php
Carla IBAÑEZ LUNA Ph.D., Investigadora de convenio	IRD (Institut de Recherche pour le Développement) & Instituto de Ecología (IE), Unidad de Limnología (UL), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)	Campus universitario, Calle 27 de Cota Cota La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 279 41 65	carla.lunallena@gmail. il.com
David LABAT Ph.D., Professeur des Universités	IRD-GET Géosciences Environnement Toulouse (GET), Midi- Pyrénées Observatory (OMP)	14, avenue Edouard Belin - 31400 Toulouse, Francia	Tel. +(33) (0)5 61 33 29 12	labat@get.obs- mip.fr www.get.obs-mip.fr
Waldo LAVADO CASIMIRO Ph.D., Investigador	SENAMHI-PERÚ Servicio Nacional de Meteorología y Hidrología	Jr. Cahuide 785 Lima 13 Perú	Tel. +(51-1) 614 14 14 Cel. +(51) 975 453 987	wlavado@senamhi.g ob.pe www.senamhi.gob.p e
Xavier LAZZARO Ph.D., Investigador	IRD, UMR BOREA CNRS 7208/IRD 207/MNHN/UPCM, DMPA Representación del IRD en Bolivia	Muséum National d'Histoire Naturelle, 43 rue Cuvier, 75231 Paris Cedex, Francia. Av.Hernando Siles N°5290 esq. Calle 7 CP 9214, 00095 La Paz, Bolivia	Tel : +(591 2) 278 29 69 Fax +(591 2) 278 29 44 Cel. +(591) 60 76 04 20	xavier.lazzaro@ird.fr www.mnhn.fr/mnhn /UMR7208/equipe5/ equipe5.php www.bolivia.ird.fr/in vestigacion/proyecto s-de- investigacion/depart amento-medio- ambiente-y- recursos/balsa

Coautor	Institución	Dirección	Tel. / Fax	E-mail / url
Favianny LINO PIMENTEL M.Sc., Investigadora asociada	Instituto de Ecología (IE), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Centro de Postgrado (CPEC)	Campus universitario, Calle 27 de Cota Cota La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 277 14 42 Cel. +(591) 719 52 458	favylino@yahoo.com
Mabel MALDONADO MSc., Docente investigadora	Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos (ULRA), Universidad Mayor de San Simón (UMSS)	Calle Sucre y Parque La Torre s/n, Casilla postal 992 Cochabamba, Bolivia	Tel. +(591-4) 423 56 22 Cel: +(591) 71471749	mabelmaldonado.m @fcyt.umss.edu.bo www.lab-ulra.com
Jean Michel MARTINEZ Ph.D., Director de investigación	IRD-GET Géosciences Environnement Toulouse (GET), Midi- Pyrénées Observatory (OMP)	14, Avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, Francia	Tel. +(33) (0)5 61 33 26 21 Fax +(33) (0)5 61 33 25 60	jean- michel.martinez@ird .fr www.get.obs-mip.fr www.ore-hybam.org
Maria del Carmen MENDOZA ESPAÑA Ph.D., Investigadora	Empresa Consultora en Medio Ambiente y Recursos Naturales: WE_AMBIENTE & TECNOLOGÍA	Of. Central La Paz: Edif. Diana 8º Piso of. 803 nº 2048 Av. 6 de Agosto entre JJ. Perez y Aspiazu Of. Sucursal Santa Cruz: Edif. Guapomo 1º Piso Calle Fortin Platanillos nº 79	Tel./Fax +(591-2) 2 244 16 98 Cel. +(591) 720 93 111	mmendozaespana@ yahoo.com
Carlos I. MOLINA ARZABE Ph.D., Investigador asociado	Instituto de Ecología (IE), Unidad de Limnología (UL), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)	Campus universitario, Calle 27 de Cota Cota La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 279 41 65	camoar6088@gmail. com
Jorge MOLINA CARPIO Ing., Docente, Director de investigación	Director del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) Observatoire de Recherche en Environnement (ORE- HYBAM)	Campus universitario, Calle 30 de Cota Cota La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 279 57 24 Fax +(591-2) 279 57 25	jmolina_ihh@aceler ate.com www.ore- hybam.org/ www.bolovie.ird.fr/re cherche/projets-de- recherche/departem ent-environnement- et-ressources/ore- hybam

Lista de contactos de los autores

Coautor	Institución	Dirección	Tel. / Fax	E-mail / url
Nabor MOYA Ph.D., Docente investigador	Universidad Indígena Boliviana Quechua "Casimiro Huanca" (UNIBOL)	Carretera Principal Cochabamba - Santa Cruz Km 190 "La Jota", Chimoré – Cochabamba, Bolivia	Cel. +(591) 674 47 878	nabor.moya@gmail. com
Gonzalo NAVARRO SANCHEZ Ph.D., Investigador	Consultor independiente	Cochabamba, Bolivia	Tel. +(591-4) 428 70 47	gonzalonavarrosanc hez@gmail.com
Thierry OBERDORFF Ph.D., Director de investigación	IRD, UMR BOREA CNRS 7208/IRD 207/MNHN/UPCM, DMPA Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos (ULRA), Universidad Mayor de San Simón (UMSS)	Museum National d'Histoire Naturelle, 43 rue Cuvier, 75231 Paris Cedex, Francia Calle Sucre y Parque La Torre s/n, Casilla postal 992 Cochabamba, Bolivia	Tel. +(591-4) 423 56 22, 411 98 34 Cel. +(591) 685 11 153	thierry.oberdorff@ir d.fr www.mnhn.fr/mnhn /UMR7208/ www.bolivia.ird.fr/in vestigacion/proyecto s-de- investigacion/depart amento-medio- ambiente-y- recursos/biodiversid ad-acuatica
Verónica PADILLA CALLEJAS Ing., Investigadora asociada	Instituto de Ecología (IE), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Centro de Postgrado (CPEC)	Campus universitario, Calle 27 de Cota Cota La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 277 14 42 Cel. +(591) 715 13 807	veropadi52@hotmail .com
Carlos PELÁEZ DAZA Lic., Investigador	CEEDI - Centro de Estudios Ecológicos y Desarrollo Integral	Calle Rosendo Gutierrez Nº 774, Barrio Sopocachi, La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 241 21 14 Cel. +(591) 701 11 766	ceedi- ong@hotmail.com www.lidema.org.bo/ portal/index.php?op tion=com_content& view=article&id=171 :ceedi&catid=41:info rmacion- institucional&Itemid =296
Ramiro PILLCO ZOLA Ph.D., Investigador	Instituto de Hidráulica y Hidrología (IHH), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)	Campus universitario, Calle 30 de Cota Cota La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 279 57 24, 279 57 25 Fax +(591-2) 279 57 25	rami_lund99@hotm ail.com

Coautor	Institución	Dirección	Tel. / Fax	E-mail / url
David POINT, Ph.D., Investigador	IRD, Geosciences Environment Toulouse (GET), Midi-Pyrénées Observatory (OMP)	14 avenue Edouard Belin 31400 Toulouse Francia		david.point@ird.fr www.get.obs- mip.fr/Annuaire/Poi nt-David
	Representación IRD en Bolivia	Av.Hernando Siles N°5290 esq. Calle 7 CP 9214, 00095 La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 278 29 69 Fax +(591-2) 278 29 44	http://www.bolivia.i rd.fr/investigacion/p royectos-de- investigacion/depart amento-medio- ambiente-y- recursos/comibol
Marc POUILLY Ph.D., Investigador	IRD, UMR 7208 BOREA (MNHN, CNRS, IRD, UPMC) - Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris (MNHN)	62 rue Buffon F75005 Paris, Francia	Tel. +(33) (01) 40 79 31 14	marc.pouilly@ird.fr www.mnhn.fr/mnhn /UMR7208/equipe5/ team5.php
				www.bolivia.ird.fr/in vestigacion/proyecto s-de- investigacion/depart amento-medio- ambiente-y- recursos/parapeti
Israel QUINO LIMA Lic., Investigador	Instituto de Investigaciones Químicas (IIQ), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)	Campus universitario, Calle 27 de Cota Cota La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 279 22 38, +(591-2) 277 06 26	israelquino@hotmail .com
Jorge QUINTANILLA AGUIRRE Lic., Docente investigador	Instituto de Investigaciones Químicas (IIQ), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)	Campus universitario, Calle 27 de Cota Cota La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 279 22 38, +(591-2) 277 06 26	hidroqui@gmail.com
Josyane RONCHAIL Ph.D., Maître de conférence	Université Paris Diderot-LOCEAN: Université Paris Diderot - Paris 7, UFR Géographie, Histoire et Sciences de la Société,	Bâtiment Olympe de Gouges, Rue Antoine de Baïf – 75013 Paris, Case courrier 7001, 75205 Paris Cedex 13	Tel. +(33) (0)1 44 27 84 67	josyane.ronchail@lo cean-ipsl.upmc.fr
	Laboratoire LOCEAN/IPSL, UMR 7159	Tour 45-55, 4ème étage, 4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, Francia.		

Lista de contactos de los autores

Coautor	Institución	Dirección	Tel. / Fax	E-mail / url
Frédéric SATGE Ing., Voluntario Internacional	IRD, Geosciences Environment Toulouse (GET), Midi- Pyrenees Observatory (OMP) & UMR BOREA CNRS 7208/IRD 207/MNHN/UPCM	14 avenue Edouard Belin 31400 Toulouse Francia	Cel. +(591) 765 38 045	frederic.satge@gmai l.com
	Representación IRD en Bolivia	Av. Hernando Siles N°5290 esq. Calle 7 CP 9214, 00095 La Paz, Bolivia		
Claudia ZEPITA QUISPE Lic., Investigadora asociada	Instituto de Ecología (IE), Unidad de Limnología (UL), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)	Campus universitario, Calle 27 de Cota Cota La Paz, Bolivia	Tel. +(591-2) 277 14 42	clazeq@gmail.com



Fotos de Xavier Lazzaro ©



Building River Dialogue and Governance
http://iucn.org/about/work/programmes/water/wp_our_work/wp_our_work_bridge



Institut de Recherche pour le Développement Représentation de l'IRD en Équateur
<http://www.equateur.ird.fr>



UICN – Oficina Regional para América del Sur
<http://iucn.org/sur>
Calle Quiteño Libre E15-12 y La Cumbre
Quito, Ecuador
Tel. + 59302 2261-075



Swiss Agency for Development
and Cooperation SDC