

## Contaminación de la Bahía de Cohana, Lago Titicaca (Bolivia): Desafíos y oportunidades para promover su recuperación

Pollution at Cohana Bay, Lake Titicaca (Bolivia): challenges and opportunities  
to promote its recovery

Carlos I. Molina<sup>1</sup>, Xavier Lazzaro<sup>1,2</sup>, Stéphane Guédron<sup>3,4</sup> & Dario Achá<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Unidad de Calidad Ambiental (UCA), Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés,  
Campus Universitario de Cota Cota, Casilla Central #10071, La Paz, Bolivia

<sup>2</sup>Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques (BOREA), Institut de Recherche pour le  
Développement (IRD) – UMR 7208, Paris, Francia

<sup>3</sup>Université Grenoble Alpes et Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISTerre, 38000 Grenoble, Francia

<sup>4</sup>Laboratorio de Hidroquímica - Instituto de Investigaciones Químicas - Universidad Mayor de San  
Andrés, Campus Universitario de Cota-Cota, Casilla #3161, La Paz, Bolivia

\*Autor de correspondencia: [darioacha@yahoo.ca](mailto:darioacha@yahoo.ca)

### Antecedentes

El Lago Titicaca tiene una gran extensión (ca. 8.562 km<sup>2</sup>) y profundidad máxima de 248 m (Dejoux & Iltis 1992). Recibe elevada radiación solar, ya que está ubicado a elevada altitud (~3.800 m), y sus aguas son ligeramente salinas (~1.500 µS cm<sup>-1</sup>). Muestra una biodiversidad particular, con un alto grado de endemismo como los peces del género *Orestias*, aves acuáticas como el zambullidor (*Rollandia microptera*) y la rana gigante (*Telmatobius culeus*) (MMAyA 2009) y también algunos invertebrados, en especial los anfípodos del género *Hyaella* (González & Watling 2003). Proporciona servicios ecosistémicos como principal fuente de agua y de recursos hidrobiológicos para los habitantes de las islas y de sus alrededores (peces como fuentes de proteínas y la planta acuática totora (*Schoenoplectus californicus*) para la elaboración de artesanías y alimento). También es importante en la modulación del clima (mayor precipitación anual, temperaturas más templadas, riesgos medios de sequía y heladas (Quiroga *et al.* 2008) y en la fertilidad de los suelos circundantes, que de hecho constituyen algunos de los más fértiles de todo el Altiplano boliviano, a pesar de la altura (Nordgren 2011).

Geográficamente, el Lago Titicaca se divide en dos partes: el Lago Menor, llamado Huinaymarca (SE) y el Grande, llamado Lago Chucuito (NW). El 67% del volumen total del lago depende de los aportes de varios afluentes (Molina-Carpio *et al.* 2014). Estos afluentes controlan el régimen hidrológico de la región y al mismo tiempo contribuyen con la carga de nutrientes que son acarreados desde la región montañosa y a su paso también pueden ser contaminados. Este es el caso particular de la cuenca del Río Katari, cuyas aguas nacen en el nevado del Huayna Potosí y luego atraviesan la mancha urbana de El Alto, hasta llegar a la Bahía de Cohana en la región del Lago Menor.

La Bahía Cohana se ha estado enriqueciendo por nutrientes y otros contaminantes por más de dos décadas. Dichos contaminantes provienen de desagües domésticos e industriales de la ciudad de El Alto y centros urbanos próximos y además de actividad minera dispersa en la región (Duwig *et al.* 2014, Archundia *et al.* 2016). El centro urbano más importante de la región es la ciudad de El Alto, cuya población aumentó de 95 mil habitantes en 1976 a cerca de 1.2 millones

según el último censo de 2012 (Mazurek 2012), cuenta con poca planificación y ordenamiento territorial. El problema de contaminación de esta Bahía, fue detectado a fines de la década de los 90's por la proliferación de la planta acuática conocida como lenteja de agua (*Lemna gibba*) (LIDEMA 2012) y una composición atípica de algas microscópicas como un indicador del enriquecimiento por nitrógeno (Fontúrbel *et al.* 2006). Este enriquecimiento de nutrientes trae consigo un cambio trófico y en las interacciones biológicas de la flora y fauna local, que provocan la reducción de la biodiversidad y en el deterioro de la calidad del agua. A comienzos de 2015, durante un evento extremo de una proliferación de microalgas del fitoplancton (comúnmente llamado "bloom" en inglés), se evidenció una elevada mortalidad de peces y ranas a consecuencia de la reducción de oxígeno del agua, producto de la contaminación orgánica (Lazzaro *et al.* 2016).

En los últimos años, diversas instituciones han evaluado el nivel de contaminación por las descargas de desechos en la cuenca del Río Katari, así como de sus afluentes más importantes (ríos Seco y Pallina). Tanto la sociedad civil como las autoridades del Estado Boliviano están preocupadas de este proceso de deterioro de la Bahía de Cohana. El Instituto de Ecología de la Universidad Mayor de San Andrés (IE/UMSA), en coordinación con el Instituto de Investigaciones para el Desarrollo (de las siglas en francés IRD - Institut de Recherche pour le Développement), están concentrando sus esfuerzos y recursos en investigaciones que van desde la ecología trófica, la biogeoquímica hasta la paleolimnología de este sistema. La principal finalidad es de comprender el efecto perturbador de las diversas actividades humanas en el Lago Titicaca y proponer alternativas de evaluación para su remediación.

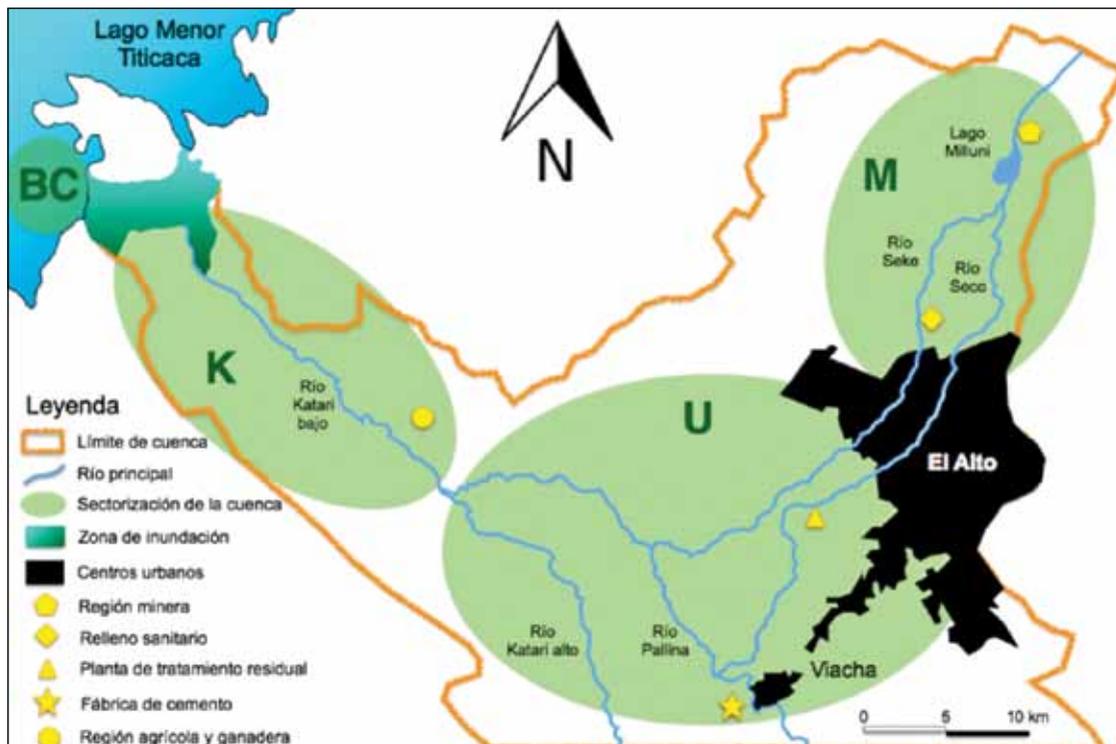
A continuación se mostrará un breve análisis sobre la problemática de contaminación de la cuenca del Río Katari y su repercusión sobre la Bahía de Cohana.

A partir de la conformación de un equipo de investigadores entre el IE y el IRD, en base a previas experiencias de este equipo, se resumirán las diferentes estrategias de evaluación y mitigación ante las alteraciones antrópicas en el Lago Menor del Titicaca.

### **Área de influencia y diagnóstico de la contaminación en la cuenca del Río Katari**

La cuenca del Río Katari se encuentra conformada principalmente por tres sistemas hídricos. Según Archundia *et al.* (2016) el área se divide en cuatro sectores de acuerdo a su influencia antrópica que existe en la región. El primero corresponde al nevado Huayna Potosí donde nacen los ríos Seke y Seco (sector M) y éstos a su vez atraviesan el centro urbano de la ciudad de El Alto (sector U). Estos ríos, salen de la ciudad para luego desembocar en el río Pallina a la altura de otro importante centro urbano, como es Viacha (sector K). Este último desemboca en el río que tienen el mismo nombre de la cuenca, Katari (sector K). Las aguas de este río continúan a una especie de delta conocida como la Bahía de Cohana, Lago Menor del Titicaca (sector BC) (Fig. 1).

En general, estas aguas están tipificadas como aguas poco mineralizadas (conductividad  $<12 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y con pH neutro. Biológicamente estos ríos tienen una fauna particular de invertebrados y con grupos sensibles a perturbaciones por la influencia de las aguas limpias del glacial. A medida que las aguas descienden desde la región montañosa, se mineralizan a consecuencia de la naturaleza geológica del lugar y también pueden contaminarse naturalmente a consecuencia de la influencia de cordón geológico estanífero donde se asienta la naciente de la cuenca. Con la influencia del afloramiento de aguas subterráneas, se aporta principalmente el metaloide arsénico (MDSMA 1996). Por otro lado, en la región montañosa existen cuerpos de agua que están influenciados por



**Figura 1.** Zonificación según el tipo de influencia en la cuenca del Río Katari: M= Sector de Milluni, U= Centro urbano, K= Cuenca del Katari y BC= Bahía de Cohana. Modificado según: Archundia *et al.* (2016).

actividad minera actual e histórica, como es el caso del Valle de Milluni. En esta región, desde los 40's hasta inicios de los 90's se ha explotado estaño, zinc y plomo. Los primeros datos sobre la presencia de metales pesados en agua superficial después del cierre de las actividades mineras mostraron condiciones muy ácidas a consecuencia de la oxidación de sulfuro por los desechos de mina, lo cual favorece al enriquecimiento de elementos potencialmente nocivos, en el orden de:  $Cd > Zn \gg As \gg Cu \gg Ni > Pb > Sn$  (Salvarredy-Aranguren *et al.* 2008). Aunque las actividades mineras son esporádicas desde hace unos 15 años, el impacto de los residuos mineros en la calidad del agua es un serio problema en la región. Así también, la actividad minera

no se limita únicamente a la extracción de minerales, sino también en el margen de las nacientes de estos ríos, donde se extrae turba, grava y arena. Esta actividad desequilibra la armonía paisajística del lugar y contribuye en la desestructuración del curso normal de los ríos, que libera cantidades considerables de sólidos suspendidos y materia orgánica.

Aguas abajo, los ríos Seke y Seco son los principales receptores de desechos urbanos e industriales de la ciudad de El Alto (efluentes cloacales). Sus aguas servidas son tratadas en la planta de Puchucollo, cuyo funcionamiento se puso en marcha en 2010. Esta planta tardó mucho tiempo en ser implementada, ya que se diseñó en 1989, con una capacidad de tratamiento para 400.000

habitantes. En 2008 El Alto superaba el medio millón de personas (LIDEMA 2012, K2/AP05/J13 2013). Actualmente, se cree que la mencionada planta tiene una capacidad de remoción de contaminantes del 80% (BID 2016). Sin embargo, de acuerdo con los datos de Archundia *et al.* (2016), la eficiencia para varios parámetros es mucho menor. De hecho, de acuerdo a los últimos autores las concentraciones de carbón orgánico disuelto que salen de la planta son superiores a las que ingresan. En este sentido parece que la planta reduce principalmente contaminantes en la fracción particulada y no así en la disuelta.

Parte de la contradicción entre los datos disponibles radica en el uso de diferentes marcadores para la evaluación de la eficiencia de la planta. Los desechos orgánicos, clásicamente son evaluados a partir de dos parámetros bioquímicos, como es el DQO (demanda química de oxígeno) y el DBO5 (demanda biológica de oxígeno). Ambos son parámetros que básicamente evalúan la cantidad potencial de oxígeno que se requiere para degradar la materia orgánica por agentes químicos y microbiológicos, respectivamente. Estas técnicas presentan métodos analíticos estándares de evaluación, pero la del DBO5 posee el sesgo que los laboratorios analíticos no emplean una misma cepa estándar de inoculación y esto podría sobrestimar o subestimar la verdadera proliferación de microorganismos que ya podría contener un agua residual (EPA 2006). Por otro lado, los métodos asumen que la descomposición de la materia orgánica es lo único que consume el oxígeno y la producción de sustancias altamente reductoras como el hidrógeno y el sulfuro de hidrógeno podrían alterar la exactitud de las medidas. En suma, las medidas clásicas no proporcionan una aproximación fiable del contenido de materia orgánica. Por la revisión de los diferentes trabajos, en afluentes de la cuenca del Katari, la mayoría de éstos dan importancia a los valores de DBO5. Si bien estos reportes de DBO5 en los centros

urbanos tanto en la ciudad de El Alto como en Viacha arrojan valores por encima de los 100 mg l<sup>-1</sup> y estos corresponden a aguas muy contaminadas en cualquier normativa (Chiqui 2001, K2/AP05/J13 2013, BID 2016, MMAyA 2016), idealmente deberían reportarse como la razón de las concentraciones de DBO5/DQO, lo cual daría una idea aproximada sobre la capacidad de biodegradación natural de los afluentes (DBO5/DQO > 0.5) o si requieren métodos físico-químicos más severos que posibiliten su recuperación (DBO5/DQO > 0.2) (Shawaqfaha *et al.* 2012).

Para controlar estos sesgos, algunas compañías recomiendan que estas aguas además deberían ser evaluadas con el Carbono Orgánico Disuelto (siglas en inglés DOC), (EPA 2006), que mide la concentración real de materia orgánica en solución y que sumada al carbón orgánico particulado (POC) proporcionan una idea real de la materia orgánica. Dichas medidas fueron las utilizadas por Archundia *et al.* (2016). Otra clara alternativa que ha surgido recientemente es la utilización del fraccionamiento isotópico para diferenciar la materia orgánica de origen natural y la de origen antrópico. Esta última ha sido testada de forma positiva en Bahía Cohana dentro del proyecto EUTITICACA ejecutado por la Unidad de Calidad Ambiental del Instituto de Ecología de la UMSA y el IRD (Achá *et al.* 2014, Achá 2016).

En la ciudad de El Alto se hacen algunos esfuerzos para racionalizar los drenajes para separar aguas servidas de las de lluvia, así las residuales sean adecuadamente tratadas en plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), como en Puchucollo y ahora en la actual planta de Tacachira (distrito 7 de El Alto). Adicionalmente se debería garantizar que cualquier tipo de actividad industrial cuente con su propio tratamiento de residuos líquidos y sólidos. Sin embargo, el sostenido crecimiento de la población de El Alto sumado al de las pequeñas poblaciones circundantes plantean un serio desafío que deberá ser considerado en todos los planes de contingencia. Además, para

consolidar medidas de control y fiscalización se requiere desarrollar instrumentos efectivos de diagnóstico de contaminantes.

En la región de la cuenca del Katari, también existen tres importantes acuíferos o depósitos de aguas subterráneas, como: Purapurani (municipio de El Alto), Viacha (municipio de Viacha) y Pucarani (municipio de Pucarani). Los dos primeros tienen una importante influencia en relación al tamaño e influencia en esta cuenca y además son vulnerables a las descargas y lixiviados provenientes de actividades urbanas e industriales de la región (MMAyA/VRHR 2016). Recientemente, la falta de recursos hídricos está causando un incremento del bombeo de estas aguas para el aprovisionamiento de industrias y pobladores del lugar. Por la naturaleza geológica del lugar estas aguas subterráneas poseen elevadas concentraciones de solutos, pero también se han encontrado atípicamente en zonas urbanas algunos nutrientes en considerables concentraciones, como: ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ), DBO5 y DQO (MMAyA/VRHR 2016). Todos estos muestran las descargas y lixiviados provenientes de actividades urbanas e industriales, y es por ello, que la contaminación no solo es horizontal en los cursos de ríos superficiales, sino también vertical a consecuencia de la contaminación de pozos.

### La Bahía de Cohana

La cuenca de Katari termina en la Bahía de Cohana (Fig. 1, sector BC). La región de Cohana, se caracteriza por un área de inundación de baja inclinación del terreno y además es muy conocida por su aptitud ganadera y agrícola. En esta región predominan los pastizales y la misma Bahía está dominada por totorales, los cuales son empleados para el forraje de ganado vacuno y ovino, y estos a su vez contribuyen con el enriquecimiento de nutrientes a consecuencia de sus desechos metabólicos.

Aunque las condiciones físicoquímicas del agua en el río Katari mejoran en la región de inundación, según el índice de Calidad Química determinado por MMAyA (2016), esto no evita que gran parte de la contaminación llegue a las aguas del Lago Menor del Titicaca. Es por ello, como una primera medida de mitigación en contra del ingreso de los contaminantes a la Bahía de Cohana, los habitantes del lugar represaron las aguas del Katari en ciertos puntos de la Bahía de Aygachi, lugar donde se manifiesta el mayor problema de contaminación (K2/AP05/J13 2013).

Se han desarrollado campañas locales con la intención de remover manualmente la proliferación de la vegetación flotante, desconociendo el papel que dicha vegetación juega para evitar la dispersión de contaminantes (Achá *et al.* 2014). Actualmente, para evitar el ingreso de los contaminantes a las Bahías de Cohana, el VRHR está desarrollando un programa para la consolidación de cinturones de vegetación en la orilla del lago con el uso de totora (Achá 2016). A corto plazo, esta es una buena medida de filtración natural de las aguas servidas, pero a largo plazo se debe tener en cuenta que estos cinturones de totorales se van a cubrir gradualmente de sedimentos y esto podría sumarse a la reducción artificial del espejo de agua del Lago.

En el caso particular del Titicaca, se tiene un escenario particularmente sensible a la eutrofización debido a que el sistema es naturalmente enriquecido por sulfatos (Achá *et al.* 2014). En condiciones anóxicas o microaerófilas favorece la proliferación de bacterias sulfato reductoras (SRB, siglas en inglés *Sulphate Reducing Bacteria*), las cuales producen el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), gas neurotóxico y poderoso agente reductor que exacerba la reducción del oxígeno en la columna de agua e incrementa el riesgo para la fauna acuática (Effler *et al.* 1988, Reese *et al.* 2008). De hecho, se cree que la producción de  $\text{H}_2\text{S}$  fue favorecida durante el “*bloom*” de abril del 2015 y que fue esta

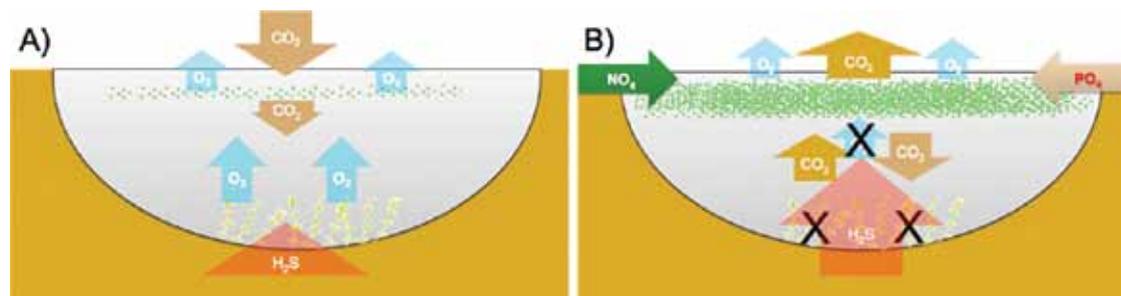
sustancia la que exacerbó las condiciones de anoxia responsables de las casi dos toneladas entre peces, ranas y aves muertas en todo el Lago Menor, destacando de esta manera la fragilidad del ecosistema (Achá 2016, Fig. 2).

Por otro lado, la problemática de contaminación en la Bahía de Cohana involucra también bacterias y parásitos patógenos que son acarreados a partir de las descargas de aguas residuales desde la cuenca superior del Katari (Duwig *et al.* 2014, Archundia *et al.* 2016). Una serie de parásitos que han sido hallados en el agua y asociados a la lenteja de agua. El con mayor prevalencia fue el protozooario (*Giardia lamblia*) y el helminto (*Ascaris lumbricoides*) y en menor proporción se hallaron amebas (K2/AP05/J13 2013). Se ha denunciado que los ovinos de la región son afectados por el parásito tremátodo (*Fasciola hepática*) y este problema posiblemente repercute en las diferentes enfermedades infecciosas que aquejan a la población (Molina 2017).

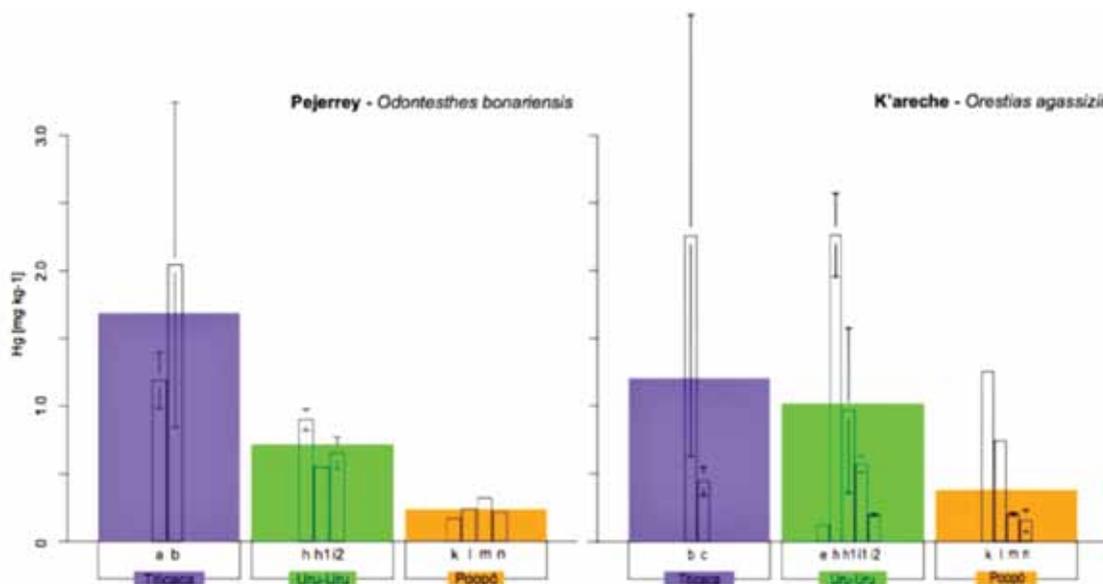
En general los contaminantes orgánicos persistentes y los emergentes no han sido estudiados en el Lago Titicaca, pero estos son potencialmente abundantes y dañinos porque muchos son cancerígenos y disruptores endócrinos en animales y humanos. Estos contaminantes son fácilmente bioacumulables y transferibles en la cadena trófica.

En relación a metales bioacumulables tampoco existe una evaluación integral en la cadena trófica y únicamente se cuenta con

algunos datos significativos para el mercurio. Entre 2009 y 2012, el IRD ha realizado estudios sobre los niveles de acumulación de mercurio en peces alguívoros (carache, *Orestia spp.*) y en el omnívoro (pejerrey, *Odontesthes bonariensis*) (Molina & Point 2014). Este estudio encontró concentraciones de Hg en caraches relativamente inferiores a las concentraciones halladas en pejerrey y en relación al sistema lacustre del Altiplano boliviano (Titicaca-Uru-Uru-Poopó) evidenciaron mayor acumulación en el Lago Mayor, en el Menor son intermedias y algunas veces comparables con el Uru-Uru, finalmente las más bajas corresponden al Poopó (Fig. 3). En base a recientes estudios, este comportamiento podría ser explicado por la cantidades basales de mercurio inorgánico producto de la actividad minera de cada región, pero así mismo influye la descomposición de la materia orgánica asociado a condiciones anóxicas en las tasas de metilación del mercurio producto de la actividad microbiana de las SRB (trasformación a su forma orgánica) (Guédron *et al.* 2017). Este tipo de mercurio es el que amplifica con preferencia en la cadenas tróficas hacia los consumidores superiores, pero un estudio de ecología trófica en relación a longitud de cadenas, tipos de interacciones tróficas y diferentes tipos de aguas (enriquecidas por nutriente y oligotróficas), hasta el momento no ha sido testeada en relación a esta problemáticas de contaminación de la Bahía de Cohana.



**Figura 2.** Esquema sobre condiciones hipotéticas del ecosistema en el Lago Menor del Titicaca: A. condiciones no perturbadas y B. durante el evento de eutrofización aguda del 2015.

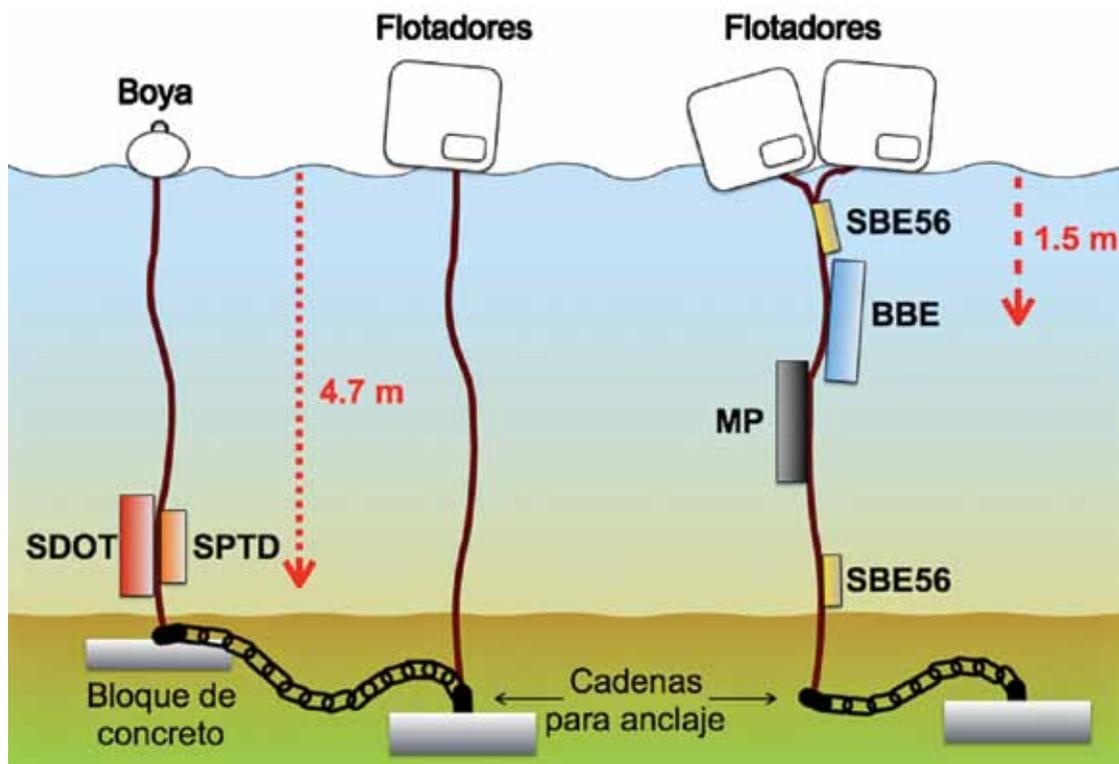


**Figura 3.** Media y desviación estándar de las concentración de Hg en peces de los lagos del Altiplano Central (Titicaca, Uru-Uru y Poopó). El fondo coloreado corresponde a la media general de cada sistema y las letras del esquema a la comparación de diferentes estudios: a. y b. (Gammons *et al.* 2006), c. (COMIBOL 2012), e. (Apaza *et al.* 1996), h, h1 (Molina *et al.* 2011), i1 y i2 (COMIBOL 2012), k, l, m y n (Molina *et al.* 2012).

### Consolidación de un sistema de monitoreo biogeoquímico del Lago

Entre los escenarios climáticos existe una percepción general que las precipitación en el sur del Perú se reducirían y esto traería consigo una reducción en las alimentación de los volúmenes de agua al Lago Titicaca (Vuillé *et al.* 2008). Otros modelos sugieren un aumento de la precipitación en la temporada húmeda (diciembre a marzo) y una reducción drásticas de lluvias para la seca (junio a agosto) (Vera *et al.* 2006). Este escenario de lluvias extremas podrían movilizar tanto los contaminantes orgánicos (nutrientes y materia orgánica principalmente), como inorgánicos (metales pesados). En cambio, la reducción en la precipitación, acentuaría consigo la concentración de contaminantes en la Bahía de Cohana.

El Lago Titicaca es uno de los 20 más grandes del mundo, pero no cuenta con un sistema de observación y monitoreo continuo que permita aplicar modelos predictivos y planificar acciones oportunas. Por ello, se requiere con un monitoreo espacial y temporal de alta resolución que permita identificar los mecanismos y cambios biogeoquímicos en el Lago Menor. En este sentido, recientemente se consiguió con el financiamiento para consolidación del proyecto: "Observatorio permanente del Lago Titicaca". Esta plataforma, se basa en la experiencia del proyecto SENSORS, la cual será equiparada por una serie de sondas multiparamétricas automáticas con la finalidad de identificar las fluctuaciones diurnas, temporales y anuales de datos biogeoquímicos, y de esta manera establecer los procesos y mecanismos que llegan a desencadenar alteraciones importantes como el "bloom" de algas (Fig. 4).



**Figura 4.** Esquema de la plataforma TITICACA SENSORS sondas multiparametricas automáticas de alta-frecuencia (15 min). A derecha, sistema de superficie (1.5 m): sonda multiparametrica **MP** NKE (conductividad, temperatura, presión, OD), sonda FluoroProbe **BBE** (fluorescencia *in vivo* de la clorofila-*a* entre 4 clases de fitoplancton: Chlorophyta, Cryptophyta, Cyanobacteria, Diatomea+Dinoflagelados), sondas SeaBird **SBE56** (temperatura con alta precisión  $\pm 0.002$  °C). A izquierda, sistema profundo (4.7 m, a proximidad de las macrófitas *Chara* sp.): sonda **SPDT** NKE (temperatura, presión, OD), sonda **SDOT** NKE (OD).

### Estrategia para reducir las emisiones antrópicas en el Lago

Frente a las evidencias de contaminación en Bahía Cohana y ante el dramático impacto del “bloom” del 2015, las autoridades nacionales se han interesado en identificar métodos y alternativas para reducir las descargas de aguas residuales de origen antrópico. El primer e ineludible paso fue elaborar una estrategia para la gestión de la cuenca Katari que involucra la construcción y mejoramiento

de plantas de tratamiento de los principales centros urbanos. En este sentido, se consiguió con el financiamiento sobre el proyecto “Bioremediación de las zonas de Huatajata y Bahía de Cohana del Lago Titicaca y revalorización cultural económica de la totora”, cuyo propuesta se basa en previos estudios sobre la dispersión de la contaminación orgánica en Cohana y su autodepuración natural observada. Se crearán pequeñas plantas pilotos de tratamiento de aguas residuales bajo el sistema de fitoremediación empleando

la macrófita nativa (totora). Estos sistemas complementar el trabajo de las convencionales de tratamiento del tipo PTAR y reducir el impacto de la contaminación dispersa en los alrededores del Titicaca (Fig. 5).

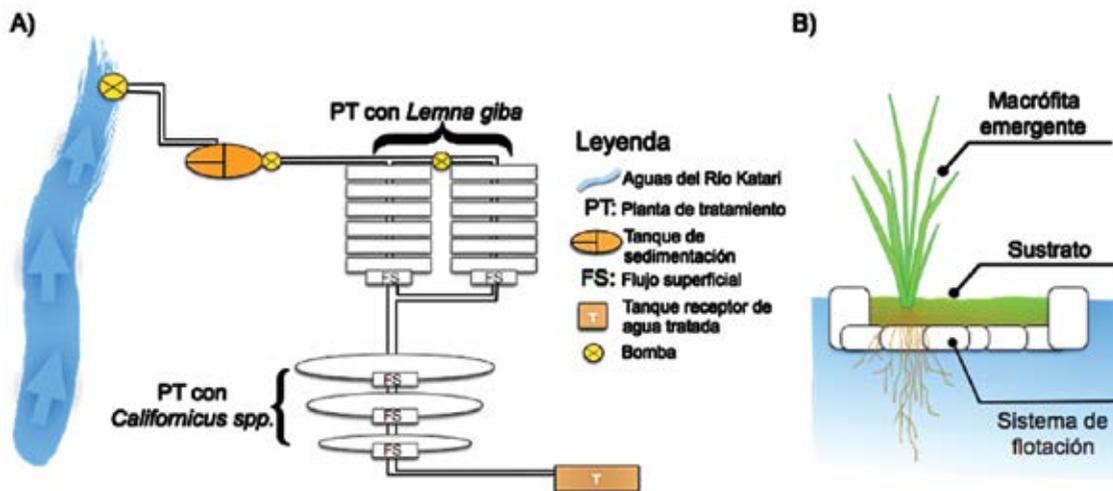
### Otras necesidades

La región de la Bahía de Cohana estaba considerada como un sitio de protección RAMSAR (tratado de convención sobre los humedales del Mundo). Este tratado tiene como énfasis la conservación y uso sostenible de la biodiversidad, y hasta la fecha pocos han sido los estudios sobre la actualización de los inventarios de la biodiversidad en esta cuenca, y la mejora de esta información ayudaría a comprender los resultados que se llegarán a obtener por el proyecto del “Observatorio del Lago Titicaca” .

No existen estudios claros y puntuales sobre el balance hídrico de la cuenca del Katari y sus respectivas descargas temporales de los diferentes ríos que componen la red de la cuenca. Esta información posibilitaría

comprender mejor la magnitud de influencia de la disponibilidad, uso y efecto perturbador del recurso agua en la cuenca, y su influencia en la Bahía de Cohana. Si bien la mayoría de los estudios se están enfocando en el entendimiento de la contaminación aguas superficiales, pero son escasos respecto a la ecología de las aguas subterráneas y su rol sobre la influencia en la Lago Menor del Titicaca.

También es recomendable, realizar estudios sobre los efectos ecotoxicológicos de los efluentes que ingresan a la Bahía de Cohana; considerando el efecto de mezcla de los contaminantes, su transformación (acción bacteriana), y su transferencia en la red trófica, así como sus posibles consecuencias en la salud humana. Así también, es imprescindible el pronto abordaje del problema de los contaminantes emergentes. Dichos contaminantes están sub-estudiados a nivel mundial y plantean desafíos analíticos muy importantes pero son una prioridad para la salud del ecosistema y las poblaciones que viven o se alimentan del mismo.



**Figura 5.** Esquema sobre la planta piloto para el tratamiento de aguas residuales bajo el sistema de fitoremediación: A) humedal artificial para tratar aguas residuales del río Katari y B) sistema de tratamiento con macrófitas flotantes.

## Agradecimientos

Dedicamos este editorial a la familia Katari, quienes colaboran constantemente en las investigaciones de la UMSA y del IRD en más de cuatro décadas. Su apoyo ha sido decisivo en la comprensión del Lago Titicaca y sin ellos, no hubiéramos podido investigar este ecosistema tan particular. En especial, estamos agradecidos con Don Ramón Catari quien participó en todas las expediciones desde el inicio de los años 1970, siempre con un total empeño y compromiso. Agradecemos también la participación de nuestros jóvenes colegas investigadores asociados al IE/UMSA que contribuyeron al éxito de los proyectos TITICACA SENSORS, ANRLA PACHAMAMA y el programa ECERP, en particular: Stéfany Rocha, Carlos Heredia, Ana Julia Flores, Valeria Ramos, Marizol Flores, Pablo Fernández, María Elena Espinoza, Gustavo Lanza, Pamela Alcoreza, Erick Loayza y Adilen Fernández. Estamos muy agradecidos con Céline Duwig quien contribuyó de manera decisiva en la comprensión de los mecanismos de contaminación en la Cuenca Katari. Finalmente a David Point quien inició con la implementación de herramientas indispensables para estudiar la biogeoquímica de la contaminación metálica, en particular del mercurio, en los Lagos Titicaca, Uru Uru y Poopó.

## Referencias

Achá, D. 2016. Conceptos básicos para el fortalecimiento de los cordones de totora en las orillas del Lago Titicaca. RVRHR/MMAyA, La Paz. 52 p.

Achá, D., X. Lazzaro, D. Point, S. Guedron, J. Nuñez, S. Hardy, M.T. Alvarez, C.R. Heredia, P.E. Fernandez & M.E. Espinoza. 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. Informe no publicado.

- Unidad de Calidad Ambiental, Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 69 p.
- Apaza, R., M. Franken, F. Osorio, J. Pinto & R. Marín. 1996. Estudio de la contaminación del lago Poopó con relación a metales pesados en la cadena trófica, incluido el hombre. Informe no publicado. Instituto de Ecología, UMSA, La Paz. 144 p.
- Archundia, D., C. Duwig, L. Spadini, G. Uzu, S. Guédron, M.C. Morel, R. Cortez, O. Ramos Ramos, J. Chincheros & J.M.F. Martins. 2016. How uncontrolled urban expansion increases the contamination of the Titicaca Lake Basin (El Alto, La Paz, Bolivia). *Water, Air & Soil Pollution* 44(228):1-17.
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2016. Programa de saneamiento del Lago Titicaca (Cuenca Katari, Bahía de Cohana), análisis ambiental y social (AAS). La Paz. 122 p.
- Chiqui, F.R.F. 2001. Evaluación del río Pallina, en relación a su calidad de aguas en la zona urbana de Viacha. Tesis de Maestría en Ecología y Conservación, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 109 p.
- COMIBOL (CONTaminants MINiers d'un écosystème lagunaire de l'Altiplano BOLivien). 2012. Fractionnement isotopique, transfert et transformation de deux contaminants miniers modèles (Zn, Sn) aux interfaces sédiment-eau-système trophique d'un écosystème lagunaire de l'Altiplano bolivien. Institut de Recherche pour le Développement - IRD, Marsella. 86 p.
- Dejoux, C. & A. Iltis (eds). 1992. Lake Titicaca: a synthesis of limnological knowledge. Kluwer Academic, Dordrecht (NLD). 579 p.
- Duwig, C., D. Archundia, F. Lehembrea, L. Spadini, M.C. Morela, G. Uzua, J. Chincheros, R. Cortez & J.M.F. Martins. 2014. Impacts of anthropogenic activities on the contamination of a sub watershed of Lake Titicaca. Are antibiotics a concern

- in the Bolivian Altiplano? *Procedia Earth and Planetary Science* (10): 370–375.
- Effler, S.W., J.P. Hassett, M.T. Auer & N. Johnson. 1988. Depletion of epilimnetic oxygen and accumulation of hydrogen sulfide in the hypolimnion of Onondaga Lake, NY, USA. *Water Air and Soil Pollution* (39): 59-74.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2006. Guidance on systematic planning using the data quality objectives process. Washington DC. 111 p.
- Fontúrbel, F., C.I. Molina & E. Richard. 2006. Evaluación rápida de la diversidad de fitoplacton en aguas eutrificas del algo Titicaca (Bolivia) y su uso como indicador del grado de contaminación. *Ciencia Abierta Internacional* (29): 1-12.
- Gammons, C., D.G. Slotton, B. Gerbrandt., W. Weight, C.A. Young, R.L. McNearny, E. Cámac, R. Calderón & H. Tapia. 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.
- González, E.R. & L. Watling. 2003. Two new species of *Hyalella* from Lake Titicaca, and redescription of four others in the genus (Crustacea: Amphipoda). *Hydrobiologia* (497): 181–204.
- Guédron, S., D. Point, D. Acha, S. Bouchet, P.A. Baya, E. Tessier, M. Monperrus, C.I. Molina, A. Groleau, L. Chauvaud, J. Thebault, E. Amice, L. Alanoca, C. Duwig, G. Uzu, X. Lázaro, A. Bertrand, S. Bertrand, C. Barbraud, K. Delord, F.M. Gibon, C. Ibanez, M. Flores, P. Fernandez Saavedra, M. E. Ezpinoza, C. Heredia, F. Rocha, C. Zepita & D. Amouroux. 2017. Mercury contamination level and speciation inventory in Lakes Titicaca & Uru-Uru (Bolivia): Current status and future trends. *Environmental Pollution* (231, Part 1): 262-270.
- K2/AP05/J13 (Contraloría General del Estado). 2013. Informe de auditoría sobre el desempeño ambiental respecto a la contaminación hídrica en la cuenca del río Katari y la Bahía de Cohana. Informe no publicado. Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Ministerio de Minería y Metalurgia, Ministerio de Relaciones Exteriores, Gobierno Autónomo Departamental de La Paz, Gobiernos Autónomos Municipales de El Alto, Viacha, Laja, Pucarani y Puerto Pérez, Empresa Pública y Social de Agua y Saneamiento (EPSAS), Empresa Municipal de Aseo de El Alto (EMALT) y el Fondo Nacional de Inversión Productiva y Social (FPS), La Paz. 268 p.
- Lazzaro, X., P. Alcoreza, G. Lanza, A.J. Flores, P. Fernández, A. Fernández-Paz, C. Zepita, E. Loayza & C. Ibañez. 2016. Crucero binacional de evaluación de recursos pesqueros y condiciones limnológicas del Lago Titicaca –CR.1507-08 – Jul-Ago 2015–. Informe no publicado. IE/UMSA & BOREA/IRD, La Paz. 85 p.
- LIDEMA (Liga de Defensa del Medio Ambiente). 2012. Problemas socio ambientales de la Bahía de Cohana. Informe no publicado. La Paz. 23 p.
- Mazurek, H. 2012. Parcours de territoire: La géographie à l'épreuve des Andes. Aix-Marseille University, Marsella. 79 p.
- MMAyA (Ministerio de Medio Ambiente y Agua). 2009. Libro rojo de la fauna silvestre de vertebrados de Bolivia. Viceministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambios Climáticos, La Paz. 571 p.
- MMAyA (Ministerio de Medio Ambiente y Agua). 2016. Plan director de la cuenca del Katari, estrategia de recuperación integral de la cuenca Katari y del sector boliviano del Lago Titicaca. Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR), La Paz. 72 p.
- MMAyA/VRHR (Ministerio de Medio Ambiente y Agua/ Viceministerio de

- Recursos Hídricos y Riego). 2016. Plan de manejo preliminar de los acuíferos de Purapurani y Viacha. Informe no publicado. La Paz. 184 p.
- Molina, C.I. 2017. Diagnóstico biofísico de la cuenca del Río Katary y Bahía de Cohana., Incorporación del Enfoque de Resiliencia Climática en el Plan Directorio de la Cuenca Katari. Informe no publicado. TYPASA-AGRER-CIAT-SIMBIOSIS, La Paz 29 p.
- Molina, C.I., C. Ibañez & F.-M. Gibon. 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.
- Molina, C.I. & D. Point. 2014. Contaminación por metales pesados en la cadena trófica de los lagos Titicaca, Uru Uru y Poopó. pp. 264-278. En: Pouilly, M., X. Lazzaro, D. Point & M. Aguirre (eds). Línea Base de Conocimientos sobre los Recursos Hidrológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca. IRD - UICN, Quito.
- Molina, C. I., F.M. Gibon, C. Ibañez, J. Pinto, J.L. Duprey & D. Point. 2011. Mercury trophic transfer in high altitude lakes of the bolivian Altiplano. p. 213. En: 10th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Halifax.
- Molina-Carpio, J., F. Satgé & R. Pillco. 2014. Los recursos hídricos del sistema TDPS. pp. 17-39. En: Pouilly, M., X. Lazzaro, D. Point & M. Aguirre (eds). Línea Base de Conocimientos sobre los Recursos Hidrológicos en el Sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca. IRD - UICN, Quito.
- Nordgren, M. 2011. Cambios climáticos, percepciones, efectos, respuestas en cuatro regiones de Bolivia. Centro de Investigación y Promoción del Campesinado, La Paz. 149 p.
- MDSMA (Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente). 1996. Proyecto piloto de Oruro. Informe no publicado, Secretaria Nacional de Minería, La Paz. 356 p.
- Quiroga, R.B., L.A. Salamanca, J.C. Espinoza-Morales & G.C. Torrico. 2008. Atlas de amenazas, vulnerabilidades y riesgos de Bolivia. OXFAM International; Fundación para el Desarrollo Participativo Comunitario; North South – Swiss National Centre of Competence in Research North-South, La Paz. 198 p.
- Reese, B.K., M.A. Anderson & C. Amrhein. 2008. Hydrogen sulfide production and volatilization in a polymictic eutrophic saline lake, Salton Sea, California. *Science of the Total Environment* (406): 205-218.
- Salvarredy-Aranguren, M., A. Probst, M. Roulet & M.-P. Isaure. 2008. Contamination of surface waters by mining wastes in the Milluni Valley (Cordillera Real, Bolivia): Mineralogical and hydrological influences. *Applied Geochemistry* (23): 1299-1324.
- Shawaqfaha, M., F.A. Al-Momanib & Z.A. Al-Anber. 2012. Ozone treatment of aqueous solutions containing commercial dyes. *AfinidAd LXIX*: 229-234.
- Vera, C., G. Silvestri, B. Liebmann & P. González. 2006. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical Research Letters* (33): 1-4.
- Vuillé, M., B. Francou, P. Wagnon, I. Juen, G. Kaser, B.G. Mark & R. S. Bradley. 2008. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews* (89): 79-96.