

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## ESTUDIO DE CASO DE LA LAGUNA ALALAY, BOLIVIA: TRECE AÑOS DE DINAMICA AMBIENTAL EN UNA LAGUNA EUTROFIZADA

\* Cesar A. Perez-Fernandez <sup>1</sup>  
Ana María Romero Jaldín <sup>2</sup>  
Rosario Montañó Mérida <sup>2</sup>  
Gary A. Toranzos <sup>3</sup>

### CASE STUDY AT LAGUNA ALALAY LAKE, BOLIVIA: THIRTEEN YEARS OF ENVIRONMENTAL DYNAMICS OF AN EUTROPHIED LAKE

Recibido el 14 de enero de 2019; Aceptado el 4 de mayo 2020

#### Abstract

*Human activities provoke drastic changes in aquatic ecosystems that result in events such as eutrophication, algal blooms, massive fauna mortality, and, in extreme cases, the complete loss of the aquatic resources. Some of these events were registered at Laguna Alalay Lake in Cochabamba, Bolivia in 2016. We present a case study with the aim of detecting relevant changes in Alalay's environmental parameters in recent years. The study was done by the use of descriptive statistics for the period 2003 -2016. Although data gaps exist because of inconsistent monitoring of the lake, results show that levels of phosphorus and nitrogen remain high over time despite the changes in precipitation and influent levels. The high levels of nutrients suggest that Alalay receives a constant influx of untreated sewage and run-off as sources of nutrients, and the main culprit seems to be the Rio Rocha River. The alkaline pH, in conjunction with the possible increasing in conductivity, were likely factors triggering a cyanobacterial bloom following by massive death of the resident fauna. Under the current conditions, algal blooms may be a recurrent problem in the lake. We recommend the continuous environmental monitoring, wastewater treatment, and a pattern of inclusion of the local community are critical activities for the restoration of the body of water. We propose to use this approach in cases when only incomplete data sets are available.*

**Keywords:** Alalay Lake, eutrophication, missing data, nitrogen, phosphorus.

<sup>1</sup> Departamento de Biología, Escuela de Artes y Ciencias Krieger, Universidad Johns Hopkins, Maryland, USA.

<sup>2</sup> Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología, Cochabamba, Bolivia.

<sup>3</sup> Laboratorio de Microbiología Ambiental, Universidad de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

\* *Autor correspondiente:* Departamento de Biología, Escuela de Artes y Ciencias Krieger, Universidad Johns Hopkins, recinto Homewood, 3400 North Charles St., Mudd Hall 240, Baltimore, Maryland, 21218. Email: [capfz200@hotmail.com](mailto:capfz200@hotmail.com)

## Resumen

Las actividades humanas ocasionan profundas alteraciones en los ecosistemas acuáticos resultando en lagunas eutrofizadas, afloramientos algales, mortandad masiva de peces, y pérdida de recursos hidrológicos. En la Laguna Alalay de la ciudad de Cochabamba, Bolivia se registraron los eventos mencionados durante el año 2016 por lo que presentamos un estudio de su caso con el objetivo de detectar cambios en distintos parámetros ambientales durante los últimos años. El estudio se hizo mediante el análisis descriptivo de distintos parámetros fisicoquímicos correspondientes al periodo 2003-2016. A pesar de no contar con datos provenientes de un monitoreo constante, nuestros resultados muestran que Alalay se mantuvo con niveles altos de fósforo y nitrógeno, y bajos niveles de oxígeno disuelto a pesar de las variaciones estacionales y cambios en la precipitación de la región. Esto sugiere que la laguna recibe un aporte constante de nutrientes provenientes, posiblemente, del Rio Rocha, y de otras fuentes de agua residual cruda haciendo que los afloramientos algales sean un problema latente. El pH alcalino del agua y el aparente aumento en conductividad, desencadenaron en un afloramiento de cianobacterias con un concomitante incremento en la materia orgánica y la muerte de la fauna habitante del lugar. Conociendo este escenario recomendamos el monitoreo ambiental constante, el tratamiento del flujo de aguas residuales (usando métodos de bajo costo) y la inclusión de la comunidad adyacente en la solución del problema como actividades críticas para la restauración de la laguna. Sugerimos el uso de este tipo de abordaje cuando los datos de monitoreo están incompletos.

**Palabras clave:** Laguna Alalay, datos incompletos, eutrofización, fósforo, nitrógeno.

## Introducción

Desde la revolución industrial, las actividades humanas han causado profundas alteraciones en el ambiente. El crecimiento de la población se ve reflejado en el crecimiento del uso de recursos terrestres y acuáticos (Smith *et al.* 1999). La eutrofización de cuerpos de agua se da por la descarga de aguas residuales sin previo tratamiento, las cuales aportan macronutrientes tales como fósforo y nitrógeno a los ecosistemas lacustres. Todo este proceso conduce al excesivo crecimiento de productores primarios, el consumo de oxígeno en la columna de agua, la muerte de los organismos aeróbicos, y el empobrecimiento de la calidad del agua (Van der Does *et al.* 1992, Morales & Rivera 2012).

Entre las consecuencias de las altas densidades de algas está la muerte masiva de peces. Uno de estos eventos de mortandad ocurrió en la laguna Alalay en Cochabamba, Bolivia en marzo de 2016, hecho documentado por la prensa local (Manzaneda 2016). Esta laguna comenzó su proceso de eutrofización desde inicios de los años noventa, problema que se fue agravando por el crecimiento urbano (Barra *et al.* 1993, Van Damme *et al.* 1998). Desde entonces, se registraron dos intentos de solucionar este problema, en 1997 se removieron los sedimentos con elevado contenido de fósforo, y entre 2004 y 2006 se removieron manualmente las macrófitas que ya presentaban altas densidades poblacionales. A pesar de la gestión del espejo de agua, con el tiempo las concentraciones de fósforo subieron (Ayala *et al.* 2007). Este plan de manejo no dio resultados a largo plazo porque no se consideró el tratamiento de los influjos de aguas residuales

domésticas y escorrentías de agricultura. El control del flujo de nutrientes es la acción más crítica en la restauración de lagunas y control de afloramientos algales (Lee *et al.* 1978).

Al ser la eutrofización de Alalay un problema que data de varios años atrás se realizaron múltiples monitoreos siendo los más largos los realizados por Ayala *et al.* (2007) y Acosta *et al.* (2007), sin embargo existen brechas de información ya que estos se realizaron de 1989 – 2003, y 2004 – 2006. Posteriormente, el último estudio fue realizado por Nieto (2014). La compilación de información en largos periodos de tiempo tiene como resultado la existencia de datos faltantes que limitan los análisis a utilizarse en el estudio de calidad. Por ejemplo, el uso de estadística multivariada (tales como componentes principales) no son adecuados cuando existen datos incompletos, de la misma manera el uso de índices de calidad de agua requiere datos completos (Fertig *et al.* 2014). Para analizar los datos de largos periodos de tiempo es recomendable realizar la imputación de valores faltantes para los cuales existen numerosos métodos (Philippart *et al.* 2000, Qian *et al.* 2000, Srebotnjak *et al.* 2012, Fertig *et al.* 2014). Este tratamiento no se hizo antes en los estudios realizados en Alalay por lo que las conclusiones están limitadas a algunos periodos de tiempo.

Los objetivos del presente estudio de caso de Alalay son: (i) detectar cambios en los distintos parámetros ambientales que pudieron culminar en el afloramiento de cianobacterias y la mortandad masiva de peces en el año 2016, (ii) actualizar el seguimiento realizado por Ayala *et al.* (2007) donde se observa los cambios en los nutrientes de Alalay hasta 2006, y (iii) ejemplificar como se puede utilizar la compilación de datos obtenidos en distintas campañas de muestreo para proveer un documento técnico con la mayor información posible para el manejo de un cuerpo de agua, utilizando el caso de Alalay como ejemplo, ya que las autoridades responsables declararon a la prensa local que: "... se tenía información a ciegas, así que el Plan de Emergencia (del manejo de Alalay) tuvo actividades que no fueron muy relevantes (Amurrio-Montes 2017).

## Métodos

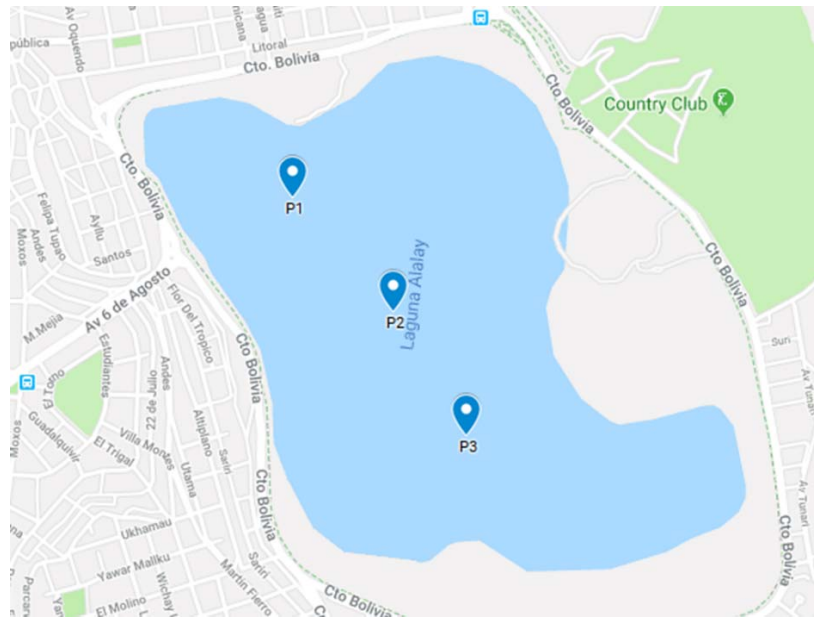
### Área de estudio

La Laguna Alalay se encuentra localizada en el valle de Cochabamba, Bolivia. Esta se encuentra en una depresión local a 2.560 m.s.n.m (17.398 S, 66.028 O) y presenta una profundidad de hasta 3 m reportada entre 2004 y 2005 por Ayala *et al.* (2007). Este cuerpo de agua fue construido en los años 1930 con el objetivo de proteger a la ciudad de inundaciones, lográndose mediante el excavado y la conexión al río Rocha mediante un acueducto (Barra *et al.* 1993).

### Compilación de datos

Para este estudio se utilizaron datos correspondientes a distintas campañas de muestreos realizadas por el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA – Universidad Mayor de San Simón) entre los años 2003 y 2016. Los valores utilizados provienen de una compilación de

variables físicas, químicas y biológicas medidas en tres puntos superficiales de la Laguna Alalay (Figura 1). Sin embargo, estos datos son el resultado de distintas campañas de muestreo correspondientes a solicitudes del gobierno local y no de un monitoreo constante de la laguna, resultando en parámetros con mediciones incompletas para dicho periodo de tiempo, además las fechas de muestreo no corresponden a ninguna época en particular, ya sea época seca o húmeda.



**Figura 1.** Puntos de muestro dentro de la laguna Alalay. Los valores presentados en el Anexo 1 corresponden a la media de las mediciones en los tres puntos de muestreo ilustrados.

### Tratamiento de datos faltantes y análisis estadístico

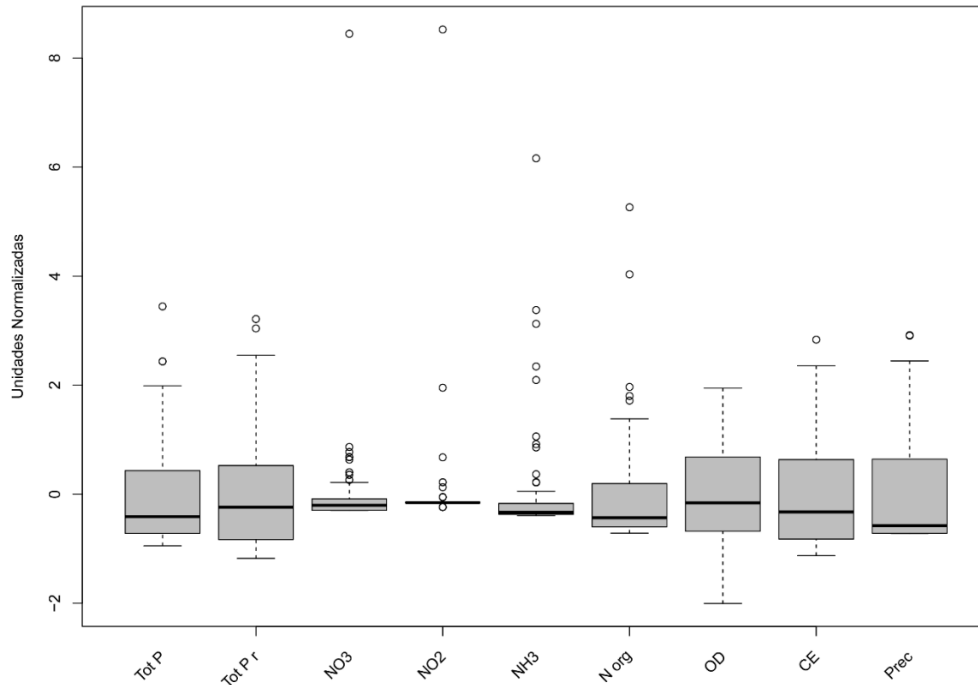
Para el pretratamiento de los datos ambientales se hizo una selección de los parámetros como sigue: Inicialmente se eliminaron todas las variables que contenían menos del 75% de las observaciones y luego se eliminaron las observaciones que contengan menos del 50% de las variables estudiadas, estos valores se eligieron para capturar la mayor cantidad de información posible; el porcentaje de observaciones a incluir suele elegirse arbitrariamente dependiendo del estudio (Dong & Peng 2013). Posteriormente, se rellenaron los datos restantes mediante el método de la imputación multivariada utilizando el método cart basado en arboles de clasificación y regresión del paquete mice del programa estadístico R (Buuren & Groothuis-Oudshoorn 2011). Este paso se basa en la idea de que una vez eliminadas las variables que contengan poca o ninguna información, se pueden imputar los valores faltantes en las demás variables utilizando un método no paramétrico capaz de mantener la complejidad de las variables y así evitar vicios en las interpretaciones obtenidas de estos datos (Burgette & Reiter 2010).

El método de la imputación para completar variables faltantes se utilizó anteriormente en proyectos de monitoreo de la calidad de agua como ser en los realizados en Antigua y Barbuda, Benin, Burkina Faso entre otros países (Srebotnjak *et al.* 2012), el Mar de Wadden en el Mar del Norte (Philippart *et al.* 2000), o el Río Neusen, Carolina del Norte (Qian *et al.* 2000). Finalmente se descargaron valores de precipitación media mensual de la página web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia ([www.senamhi.gob.bo](http://www.senamhi.gob.bo)) correspondientes al observatorio Aeropuerto – Cochabamba. El análisis exploratorio se hizo con el objetivo de describir la dinámica de las variables ambientales. Primero se estandarizaron las mediciones para evitar que las magnitudes de los valores y unidades de los parámetros nos lleven a conclusiones incorrectas, este paso se realizó mediante la transformación de los datos originales para que los datos tengan una distribución normal y media de 0 (Becker *et al.* 1988). Seguidamente, se exploraron los estadísticos en un gráfico de cajas (media, mínimo, máximo y los cuartiles) para seleccionar aquellos parámetros que presenten variación para el periodo de tiempo. Después, se buscó la existencia de correlación entre las variables seleccionadas mediante la correlación de Pearson entre variables, esfericidad de Bartlett para saber si existe correlación entre variables y el test de KMO para saber si es adecuado seguir la exploración mediante un análisis multivariado de factores. Finalmente, las variables se graficaron en media por mes para observar estacionalidad, y media por año para apreciar la tendencia hasta el 2016. Los parámetros que presentaron correlación se graficaron en la misma figura, y las variables independientes se graficaron de manera separada.

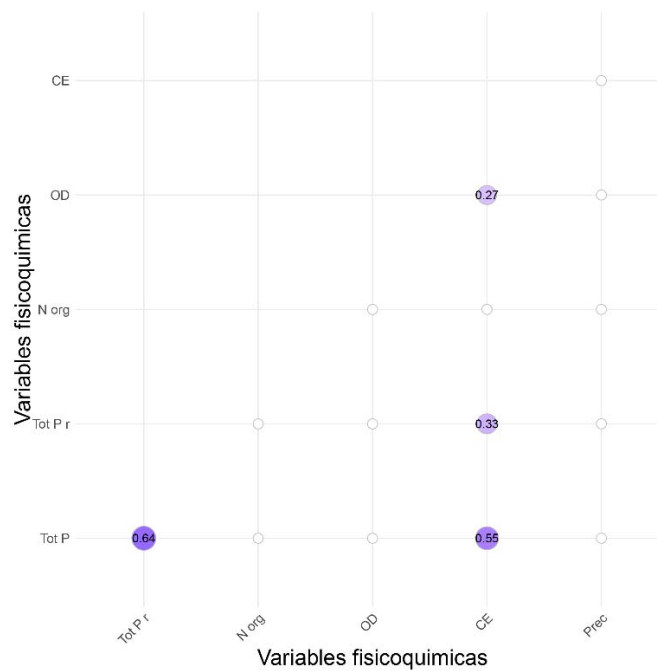
## Resultados

En esta sección no se detallarán los resultados del tratamiento de los valores faltantes y nuestro enfoque será en la dinámica de Alalay. Los parámetros que se pudieron completar fueron el fósforo total (Tot P), fósforo total reactivo (Tot P r), nitratos (NO<sub>3</sub>), nitritos (NO<sub>2</sub>), nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>), nitrógeno orgánico (N Org), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE); estos añadidos a la precipitación media mensual (Pr). Entre todas las variables analizadas, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> presentaron valores casi constantes para los 13 años (Figura 2). Por este motivo, dichos parámetros fueron excluidos de los siguientes pasos.

Al momento de explorar la correlación entre variables, los valores resultantes de Bartlett ( $p < 0.05$ ) y MSA general = 0.56 nos indican que existen parámetros correlacionados entre sí. Además, el valor de MSA nos indica que el uso de análisis multidimensionales es inapropiado para el caso de Alalay porque también existen parámetros independientes de los demás. La presencia de estos valores no relacionados son los que nos impiden el uso análisis de factores, componentes principales o correspondencias para resumir la información ambiental de la laguna. En la Figura 3 se muestran las relaciones que pudimos detectar: Tot P – Tot P r - CE y CE – Pr. Adicionalmente, N Org y OD son las variables no relacionadas a los demás parámetros estudiados.



**Figura 2.** Diagrama de cajas para las variables completadas. Las cajas detallan la media, los cuartiles, y los valores atípicos para cada una de las variables para el periodo completo de 13 años.



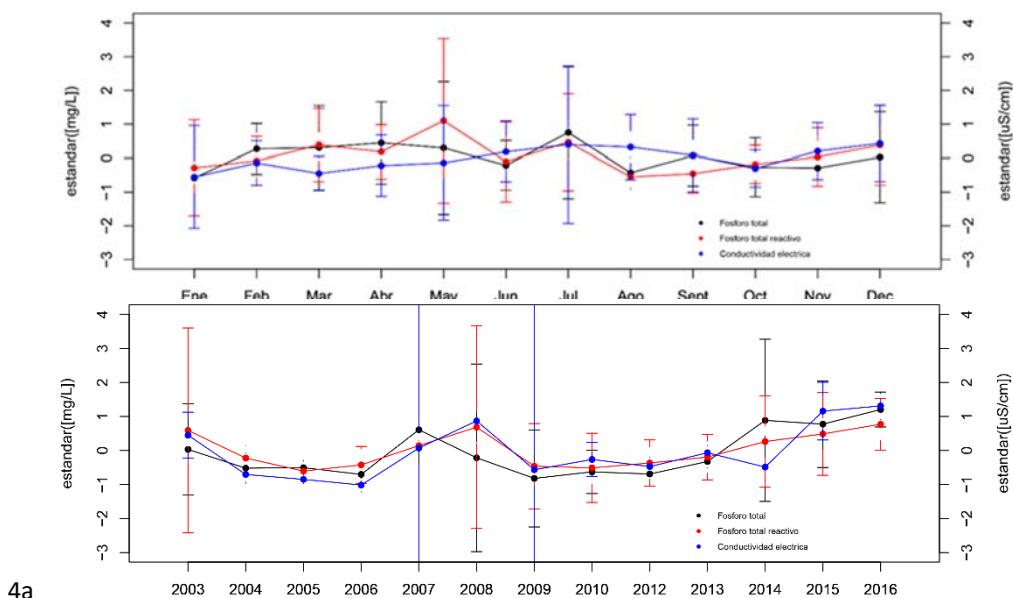
**Figura 3.** Correlación entre variables ambientales. Los valores representan el índice de correlación de Pearson; los círculos que tienen un valor de 0 son las correlaciones con un p-valor < 0.05 por lo que dichas variables no presentan correlación.

Una vez encontradas las relaciones entre variables podemos describir la dinámica de la laguna. En la Figura 4 se agruparon las variables en base a sus correlaciones. En la figura 4a se puede observar cómo Tot P, Tot P r, y CE presentan valores oscilantes entre meses. Contrariamente sus concentraciones son casi constantes a través de los años con una posible tendencia a aumentar desde el 2014.

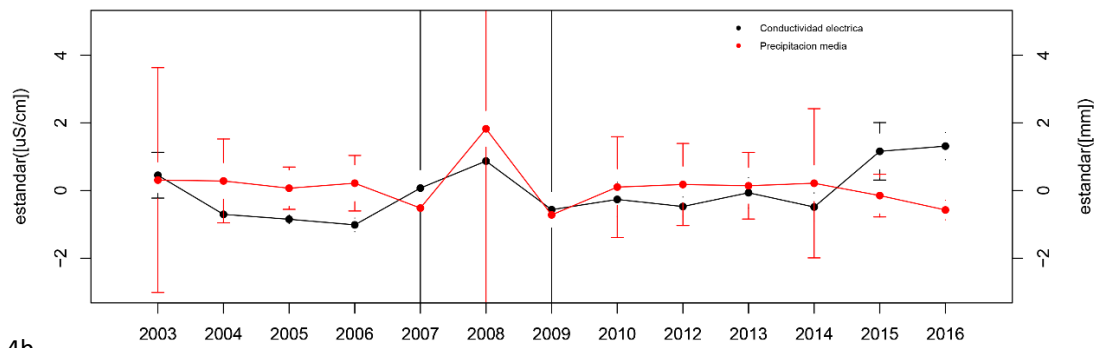
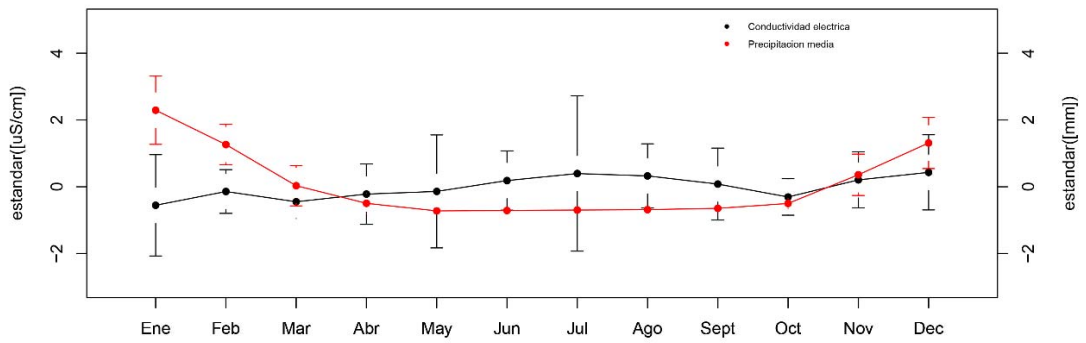
En el caso de CE– Pr se aprecia una correlación inversa, en los momentos que la precipitación aumenta, los valores de conductividad eléctrica bajan. Este fenómeno está bastante marcado en la variabilidad mensual donde los meses de lluvia alta (diciembre a febrero) tienen la conductividad más baja. Anualmente se observa poca variación entre el 2013 y el 2014. Los últimos dos años presentan un descenso en la precipitación y el consecuente aumento de conductividad en las aguas de Alalay (Figura 4b).

Las concentraciones de nitrógeno orgánico y oxígeno disuelto son constantes entre meses y entre años con algunos eventos puntuales como ser el aumento del N Org en 2005 y 2019 (Figura 4c), o el descenso de OD en el 2012 (Figura 4d). Con los datos y análisis presentados es difícil explicar la causa de estas variaciones especialmente en el año 2005 donde se encontraba en proceso la remoción de macrofitas.

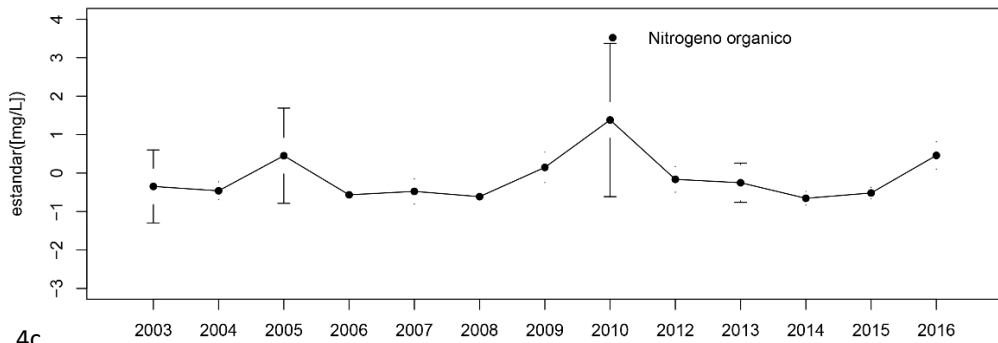
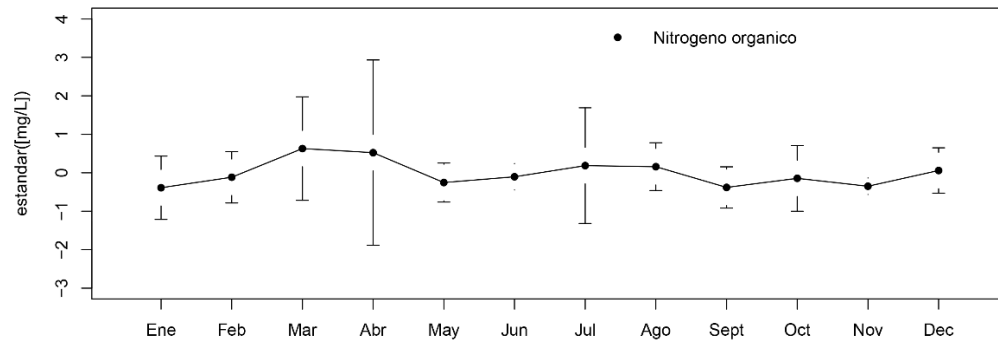
Las desviaciones estándar de las variables estudiadas, resultantes de la calidad de los datos, complican la descripción de la estacionalidad o la tendencia anual existente. De todos modos estos valores nos permiten afirmar que las variables ambientales se mantienen constantes en el periodo de tiempo analizado con la dinámica descrita en los párrafos anteriores.



4a



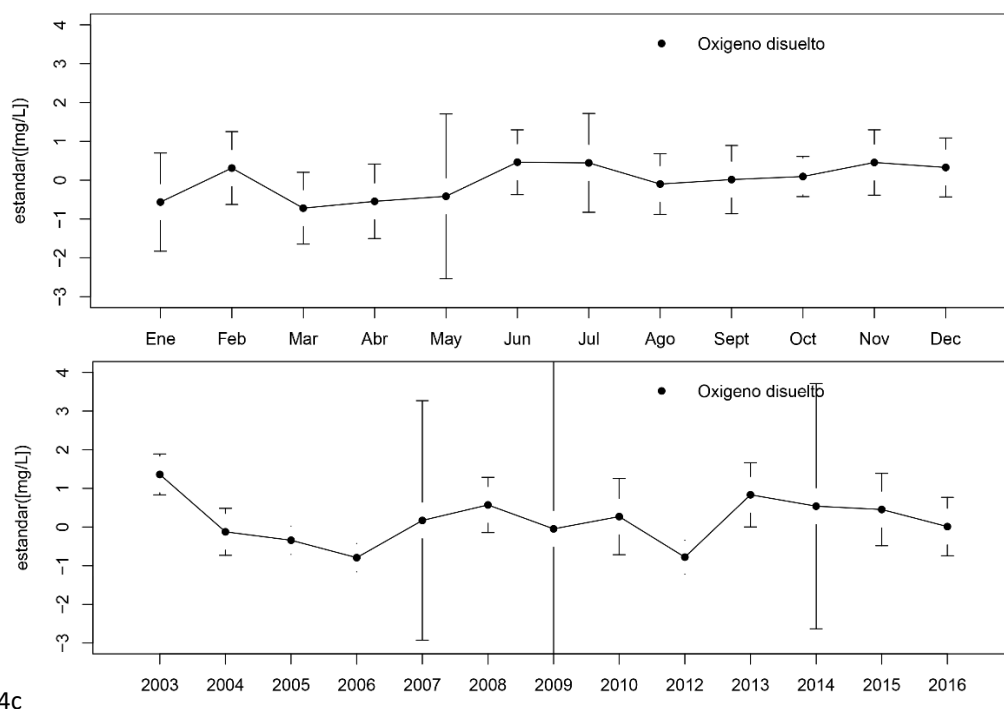
4b



4c

d)





**Figura 4.** Estacionalidad mensual (arriba) y tendencia anual (abajo) para PT – PTR – Cond, (a), Cond – Pr (b), NO (c) y OD (d). Los puntos representan la media de las mediciones para la fecha indicada y las barras muestran el intervalo de confianza de 95% para dicha fecha.

## Discusión

La medición de la variabilidad temporal de distintos parámetros ambientales es fundamental para el análisis de cuerpos de agua. Como se mencionó, datos incompletos podrían cambiar el peso de cada parámetro en los análisis, provocando un impacto en las conclusiones generales de cada estudio (Fertig *et al.* 2014). Los métodos actuales de imputación de variables, como el método cart, mantienen la distribución original de los valores reales por lo que permiten tener un set de datos completo sin vicios estadísticos (Qian *et al.* 2000). Sin embargo, existen otros problemas que afectan los distintos monitores de calidad de agua como ser la falta de diseño experimental, datos pobres e inconsistentes y medidas que no abarcan toda la variabilidad temporal (Srebotnjak *et al.* 2012). En este caso se presenta el problema de la inconsistencia temporal en los reportes por lo que no se pueden utilizar análisis multivariado o series de tiempo, aunque todos los análisis fueron llevados a cabo por el mismo laboratorio, eliminando el posible vicio metodológico.

En este contexto, es posible comparar los valores promedio obtenidos (datos no mostrados) con los valores de referencia de la Ley del Medio Ambiente de Bolivia (MMAyA 1992). La laguna, según la ley, estaría clasificada como un cuerpo de agua salobre de clase “D”; pero las interpretaciones

se harán en base a los cuerpos de agua de utilidad general y que requieren tratamiento de la clase “C” por dos razones. La primera es por el manejo propuesto anteriormente para Alalay, donde las alternativas son una laguna clara dominada por macrofitas y una laguna turbia dominada por algas (Maldonado *et al.* 1998). También se mostró el interés de que la laguna albergue peces de valor comercial ya que anteriormente se describieron poblaciones de *Astyanax bimaculatus* y *Odontesthes bonariensis* (Muñoz *et al.* 2007). La segunda razón es que Alalay se construyó con el objetivo de proteger a Cochabamba de las inundaciones del Río Rocha (Barra *et al.* 1993). Dichos escenarios serían imposibles en una laguna de clase “D” que no es apta ni para acuicultura, ni de abrevadero de animales, ni para el manejo de recursos hidrobiológicos.

La ley Boliviana del Medio Ambiente establece que los cuerpos de agua clase “C” deben tener pH de 6 a 9, DBO<sub>5</sub> menor a 20 mg/l, oxígeno disuelto mayor a 60% del punto de saturación, sólidos totales disueltos de 1500 mg/l (correspondiente a 2400  $\mu\text{s/cm}$  de conductividad aproximadamente), nitrógeno amoniacal de 2 mg/l, fosfato total de 1 mg/l, nitratos de 50 mg/l, nitritos menores a 1 mg/l, entre otros parámetros. En el año 2016, la laguna excede algunos de estos valores al presentar un pH de 9.55, DBO<sub>5</sub> de 40 mg/l, conductividad de 4759  $\mu\text{s/cm}$ , fósforo total de 2.96 mg/l, nitrato de 0.07 mg/l, nitrito de 0.013 mg/l, oxígeno disuelto de 5.96 mg/l (valores correspondientes al promedio del año 2016). Hay que añadir que el fósforo total en Alalay indica que pasó a ser una laguna hiper-eutrofizada según el límite establecido de 0.1 mg/l que separa la eutrofización de la hiper-eutrofización (Nürnberg 1996).

Además, los datos señalan que los nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal presentaron poca variación en los 13 años de estudio, mientras que la variabilidad del fósforo total, fósforo total reactivo, nitrógeno orgánico, conductividad, y oxígeno disuelto se puede atribuir a la variación estacional de los datos y no así a una tendencia a través del periodo entero estudiado. Esta estacionalidad ambiental también fue detectada por Acosta *et al.* (2007); en este caso los autores afirman que variables ambientales y biológicas como ser oxígeno disuelto, pH, temperatura, conductividad, sólidos totales, clorofila a, cladóceros, entre otras tienen estrecha relación con el ciclo hidrológico. El estudio realizado por Ayala *et al.* (2007) que comprende los periodos 1989-1993, 1998-2003, y 2004-2006 ilustra una disminución en nitratos y fosforo total atribuido a la remoción de sedimentos realizada en 1997. Los datos presentados, que corresponden al periodo 2003 – 2016, muestran que los nutrientes retomaron sus valores elevados y que muchos de los valores ambientales se mantuvieron casi constantes, es decir que son trece años de hiper-eutrofización. Sin embargo, Las conclusiones del presente estudio están limitadas por la calidad de los datos, ya que los monitoreos deben realizarse mediante la toma de muestras en intervalos constantes de tiempo como sugiere la EPA (Autoridad de Protección Ambiental por sus siglas en inglés) (Duncan *et al.* 2007).

El fenómeno de hiper-eutrofización constante se atribuye al ingreso de agua con elevada concentración micro y macronutrientes. Esta afirmación se basa principalmente en el aumento

de precipitación pluvial ocurrido en 2008. En este año se observó una subida importante de la precipitación en Cochabamba, lo que ayudaría a oxigenar el agua de Alalay y diluir la carga de nutrientes. Sin embargo, pudimos detectar que parámetros como ser nitrato, nitrito y nitrógeno amoniacal permanecen constantes en el tiempo analizado, mientras otros como fósforo total, fósforo total reactivo y oxígeno disuelto presentan variación estacional. El mayor aportante de agua contaminada a la laguna es el Río Rocha que atraviesa la ciudad de Cochabamba. Anteriormente, Acosta (1990) describió los cambios en nutrientes a lo largo de su cauce donde puede apreciar como el ortofosfato que aumenta desde 0.74 mg/l hasta 6.5 mg/l y el oxígeno disuelto se reduce hasta 0 mg/l. Un estudio más actual muestra la misma tendencia donde la calidad del agua del Río Rocha baja hasta la calidad mínima con concentraciones mínimas de oxígeno disuelto acorde a la ley boliviana del medio ambiente (Medrano & Derpic 2006). A pesar de que estos datos no corresponden al presente, describen el proceso de contaminación en el Río Rocha, suceso que pudo agravarse recientemente por la creciente urbanización y densidad demográfica en Cochabamba. Existen otras fuentes de contaminación de la laguna como ser sus sedimentos que contienen niveles de fosforo superiores a 42 mg/kg (Barra *et al.* 1993) y un DBO<sub>5</sub> de hasta 1569 mg/kg en sus lodos (Nieto 2014), la importancia de esta fuente de contaminación se vio en la drástica disminución de fosforo en el cuerpo de agua luego de la remoción de sedimentos en el año 1997 (Ayala *et al.* 2007).

La dinámica descrita llegó a un punto crítico en marzo de 2016, momento en el que ocurrió la muerte masiva de peces y el inicio de la muerte de distintas especies de aves, suceso documentado en la prensa local (Carrillo 2016, Manzaneda 2016, Melgarejo 2016). La presencia de cianotoxinas en el agua surgió como una posible explicación a este evento por el afloramiento de las cianobacterias *Microcystis aeruginosa* (Morales *et al.* 2015), *Anabaenopsis*, *Aphanocapsa* y *Arthrospira* (Morales *et al.* 2017). En estos trabajos también se afirma que el aumento en los parámetros como pH, conductividad, nitrato, nitrógeno amoniacal, fósforos total, sulfato están relacionados con los cambios en las comunidades de cianobacterias. A pesar de que no detectamos una tendencia a través de los años, la variabilidad estacional puede ser responsable de los constantes cambios en las poblaciones algales en Alalay. Actualmente, no existen datos en la literatura científica que demuestren que la muerte de peces de Alalay se haya debido a la producción de toxinas por parte de cianobacterias, siendo el conteo de células de cianobacterias presentado por Morales *et al.* (2017) el estudio más detallado sobre el afloramiento reciente de la laguna, sin embargo en este no se presenta evidencia directa de la relación entre la mortandad de peces y la producción de cianotoxinas.

La falta de oxígeno en los cuerpos de agua causada por el sobre-enriquecimiento de materia orgánica y nutrientes también puede causar la mortandad masiva de peces. La disminución de oxígeno, y consecuente mortandad, puede darse de manera rápida por el colapso de poblaciones algales y afectar toda la columna de agua como fue el caso de anoxia en Mariager Fjord, Dinamarca provocada por el colapso masivo de *Prorocentrum minimum* (Fallesen *et al.* 2000,

Breitbart 2002) o la muerte de peces en la laguna Angostura de Cochabamba atribuida al afloramiento del dinoflagelado *Ceratium furcoides* y la baja de oxígeno en esta laguna (Morales 2016). Como se mencionó antes, el estado de Alalay es de hipoxia constante en la superficie, y probablemente en toda la columna de agua, al tener un DBO<sub>5</sub> que duplica al establecido por norma ambiental boliviana, la constante entrada de agua sin oxígeno disuelto, y la presencia de lodos con alto contenido de nutrientes y materia orgánica.

Se sospecha que la mortandad de las aves, más difícil de explicar, fue provocada por la presencia constante de cianobacterias tóxicas (Morales *et al.* 2017), hecho que puede ser posible por la ingestión y contacto directo de la fauna con el agua contaminada de Alalay. En este caso se cumpliría la vía de contacto por ingestión de agua contaminada. Para la población humana aledaña a Alalay, esta forma de contacto es complicada de realizarse ya que en sus aguas no se realiza ninguna actividad que pueda representar la inhalación o ingesta como ser el nado, la pesca, la movilización en bote durante las floraciones (Backer *et al.* 2010, Giannuzzi *et al.* 2011), o por consumir comida contaminada con cianotoxinas (Li *et al.* 2011).

El manejo del problema de la eutrofización consiste en la restricción de ingreso de nutrientes a los cuerpos de agua. El caso más conocido de restauración es el del lago Washington, Seattle. Este se vio afectado por el afloramiento de la cianobacteria *Oscillatoria rubescens*, resultado de las descargas del alcantarillado a su espejo de agua y los planes de industrialización de la zona. La forma en que se manejó este problema fue desviando las entradas de agua residual, para luego observar como las cargas de nutrientes se redujeron (Edmondson 1996). Otro caso que vale la pena analizar es del lago Maggiore, Italia. En este caso se observa como el monitoreo constante del lago detectó la subida de nutrientes y el afloramiento de cianobacterias resultante. En este caso particular, el empleo de estos datos permitieron a Mosello & Ruggiu (1985) lanzar una afirmación sólida: la reducción del 67% del ingreso externo de fósforo ayudara al lago a recobrar sus condiciones oligotróficas. Finalmente, el lago pudo ser recuperado mediante la construcción de una planta de tratamiento para el sistema de drenaje de la población y la restricción del uso de detergentes que contuvieran fósforo (Smith *et al.* 1999). Existen numerosos ejemplos de restauración de lagos, citamos estos dos por ser casos conocidos donde el monitoreo constante, el tratamiento de aguas y la implicación de la población ayudan a recuperar ecosistemas.

En Cochabamba existen dos ejemplos de monitoreo en lagunas urbanas: En la laguna Alalay (Ayala *et al.* 2007) y la laguna Coña Coña (Acosta & Ayala 2009). En el primer caso, se aplicó la remoción de sedimentos en el año 1997 y la remoción de macrofitas flotantes entre 2004 y 2006. El efecto más notorio fue la reducción del fósforo de 3.3 mg/l en 1991 hasta 0.76 mg/l en 1998, de la misma manera hubo una reducción de nitrato, turbidez y aumento de la profundidad. De todas maneras, los valores de fósforo volvieron a elevarse a más de 1 mg/l para el 2005 (Romero *et al.* 1998, Ayala *et al.* 2007). En el caso de Coña Coña, eutrofizada por aguas residuales domésticas, entre 2003 y 2004, se procedió a vaciar completamente la laguna, dragar los lodos, retirar los peces y a llenarla

nuevamente con agua pobre en nutrientes. Contrariamente a lo esperado, luego de las medidas los valores de fósforo se mantuvieron igual que antes de las medidas, el nitrógeno aumentó, al igual que la clorofila por el crecimiento de macrofitas sumergidas. (Acosta & Ayala 2009). Las dos experiencias de manejo de lagunas eutrofizadas discutidas no tuvieron los resultados esperados porque en ninguno de los dos casos se restringió la entrada posterior de nutrientes.

### Conclusiones y recomendaciones

La ausencia de un monitoreo constante de la laguna Alalay desembocó en la falta de una respuesta oportuna al afloramiento algal del año 2016 por parte de las autoridades responsables. En el presente trabajo ejemplificamos como el uso de datos incompletos correspondientes a distintos periodos de tiempo pueden ser utilizados para describir la dinámica ambiental de un cuerpo de agua y encontrar las posibles causas de eventos relacionados a la contaminación en este. Los análisis presentados en la laguna Alalay se basaron en las mediciones fisicoquímicas realizadas desde el año 2003. Durante este periodo pudimos advertir que, a pesar de las gestiones realizadas en los años 1997 y 2004 al 2006, muchos de estos parámetros presentan concentraciones constantes a través de los años y con variabilidad estacional dentro cada año, estos valores estables están atribuidas a la entrada constante de nutrientes. Es importante notar que desde el 2013 se notó el aumento de la conductividad, periodo que coincide con la reducción de lluvias, y el afloramiento de distintas cianobacterias. Actualmente, Alalay se ha convertido en un sistema hiper-eutrofizado con poco oxígeno disponible y flujo constante de aguas ricas en nutrientes desde el Río Rocha principalmente, condiciones que favorecen los afloramientos algales y la anoxia concomitante.

Teniendo esta problemática descrita consideramos pertinente lanzar las siguientes recomendaciones respecto al manejo del cuerpo de agua: es imperativo realizar un monitoreo constante y sistematizado de Alalay, incluyendo al Río Rocha y otros cuerpos de agua que estén conectados a este sistema. En el presente estudio nos hallamos limitados por los datos presentados por lo que se realizó un análisis descriptivo. Para evitar esto, se deben recolectar las muestras en fechas y puntos de muestreo ya establecidos durante varios años. Además, es crucial contar con datos de pH, temperatura, y turbidez. A esto se le debe añadir datos biológicos como ser las concentraciones de clorofila o abundancia de peces, considerar la medición de distintos metales por el reporte en la prensa de altos niveles de cadmio, cromo, plomo (Amurrio-Montes 2017) y la ausencia de estos valores en la literatura científica. Con un monitoreo de este tipo se puede pasar de la descripción de los cuerpos de agua al modelamiento ambiental para predecir eventos de acumulación de nutrientes, afloramientos algales y muertes masivas de fauna.

Segundo, como se ha discutido, el problema principal es la entrada constante de grandes cantidades de nutrientes, por lo que el flujo de agua debe ser tratado antes de su ingreso al espejo de agua. Para esto, se sugiere el empleo de los humedales artificiales por ser de bajo costo, fácil

mantenimiento, aplicable a sistemas con movimiento constante de agua, y útil para la remoción de nutrientes, metales y patógenos, así como el fácil involucramiento de la población afectada inmediatamente. En Cochabamba, se documentó la eficiencia de tres humedales que lograron reducir significativamente la cantidad de nitrógeno total, amoniacal, fósforo, y bacterias coliformes en las aguas residuales donde fueron aplicados (Spångberg & Söderblom 2008). Igualmente consideramos que las plantas a emplearse en los humedales deben ser las totoras (*Scirpus californicus*). Esta planta es parte de la flora de Alalay y se demostró que son capaces de remover metales pesados, fósforo, nitrógeno y bacterias coliformes al mismo tiempo de soportar inundaciones y valores extremos de pH (Delgadillo *et al.* 2010). Para terminar este punto, la construcción de los humedales no se debe aplicar solamente a la laguna Alalay, sino que se debe incluir todo el recorrido del Río Rocha, con previa identificación de zonas de descarga de aguas residuales, como parte de un sistema de manejo de cuerpos de agua.

Tercero y finalmente, otra parte del problema de los cuerpos de agua en Cochabamba es la creciente urbanización. Por lo que consideramos que los ciudadanos deben estar incluidos en el manejo del agua. En este sentido, se propone la experiencia del “ciudadano científico”. Esta consiste en la participación de ciudadanos, instituciones locales, agencias gubernamentales y no gubernamentales, así como académicos en la colecta de grandes cantidades de datos para monitorear y responder a problemas ambientales (Whitelaw *et al.* 2003). La dinámica mencionada provee beneficios para la comunidad al incluir la comunidad en problemas locales, el incremento de la democracia ambiental, el compartir la información en través de la ciudadanía, y la introducción de la literatura científica al público lego. De la misma manera, el personal académico responsable del manejo de Alalay se beneficiaría al poder monitorear ecosistemas que de otra manera sería imposible, contar con personal activo en el control ambiental, coleccionar grandes cantidades de datos a bajo costo y detectar los problemas de manera anticipada (Conrad & Hilchey 2011).

### Agradecimientos

*Agradecemos a la Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia por financiar y apoyar los monitoreos de la Laguna Alalay y otros cuerpos de agua en el departamento de Cochabamba; y al Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental por proveer los datos necesarios para este estudio.*

### Referencias

- Acosta, F. (1990) *Resultados físico-químicos de las aguas del Río Rocha - Cuarto Informe Técnico de Monitoreo de la Laguna Alalay, Cochabamba*. Programa Aguas y Programa Hidronomía. Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba. 9 pp.
- Acosta, F., Ayala R. (2009) Experiencia de una biomanipulación en la laguna Coña Coña de Cochabamba, Bolivia., *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, **26**, 9-14.

- Acosta, F., Ayala R., Romero A., Muñoz H., Rejas D. (2007) Dinámica de las variables ecológicas ambientales y biológicas de la laguna Alalay (Cochabamba–Bolivia). En: L. Aguirre, J. Feyen and M. Moraes (Eds.). *Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales: Sostenibilidad a Múltiples-Niveles y Escalas*. Universidad Mayor de San Simon.
- Amurrio-Montes, L. (2017) Alalay está más infestada que "una alcantarilla". Los Tiempos. Disponible en: <http://www.lostiempos.com/actualidad/local/20170104/alalay-esta-mas-infestada-que-alcantarilla>.
- Amurrio-Montes, L. (2017) Aplicaron 12 acciones en Alalay, pero sin impacto. Los Tiempos. Disponible en: <http://www.lostiempos.com/actualidad/local/20170115/aplicaron-12-acciones-alalay-pero-impacto>.
- Ayala, R., Acosta F., Mooij W. M., Rejas D., Van Damme P. A. (2007) Management of Laguna Alalay: a case study of lake restoration in Andean valleys in Bolivia, *Aquatic Ecology*, **41**(4), 621-630. doi: <https://doi.org/10.1007/s10452-007-9123-1>
- Backer, L. C., McNeel S. V., Barber T., Kirkpatrick B., Williams C., Irvin M., Zhou Y., Johnson T. B., Nierenberg K., Aubel M. (2010) Recreational exposure to microcystins during algal blooms in two California lakes, *Toxicol*, **55**(5), 909-921. doi: <https://doi.org/10.1016/j.toxicol.2009.07.006>
- Barra, C., Cadima M., Maldonado M., Goitia E., Acosta F. (1993) Diagnóstico limnológico de la laguna Alalay (Cochabamba, Bolivia), *Publicaciones de la Facultad de Ciencias y Tecnología UMSS. Serie Científica*, **2**, 1-13.
- Becker, R., Chambers J., Wilks A. (1988) *The new S language: A programming environment for data analysis and graphics*, CRC Press, California, 720.
- Breitbart, D. (2002) Effects of hypoxia, and the balance between hypoxia and enrichment, on coastal fishes and fisheries, *Estuaries*, **25**(4), 767-781. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02804904>
- Burgette, L. F., Reiter J. P. (2010) Multiple imputation for missing data via sequential regression trees, *American Journal of Epidemiology*, **172**(9), 1070-1076. doi: <https://doi.org/10.1093/aje/kwq260>
- Buuren, S., Groothuis-Oudshoorn K. (2011) mice: Multivariate imputation by chained equations in R, *Journal of Statistical Software*, **45**(3), 1-68.
- Carrillo, K. (2016) Alalay: muerte de peces no para y aves están en riesgo Los Tiempos. desde: <http://www.lostiempos.com/actualidad/local/20160313/alalay-muerte-peces-no-aves-estan-riesgo>.
- Conrad, C. C., Hilchey K. G. (2011) A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities, *Environmental Monitoring and Assessment*, **176**(1), 273-291. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1582-5>
- Delgadillo, O., Camacho A., Perez L., Andrade M. (2010) *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua, Cochabamba, 105.
- Dong, Y., Peng C.-Y. J. (2013) Principled missing data methods for researchers, *SpringerPlus*, **2**(1), 222. doi:10.1186/2193-1801-2-222
- Duncan, D., Walker M., Harvey F. (2007) *EPA Guidelines: Regulatory Monitoring and Testing Water and Wastewater Sampling*. Environment Protection Authority, Adelaide. 35 pp.
- Edmondson, W. T. (1996) *Uses of ecology: Lake Washington and beyond*, University of Washington Press, Washington, 352 pp.
- Fallesen, G., Andersen F., Larsen B. (2000) Life, death and revival of the hypertrophic Mariager Fjord, Denmark, *Journal of Marine Systems*, **25**(3-4), 313-321. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(00\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(00)00024-5)
- Fertig, B., Kennish M. J., Sakowicz G. P., Reynolds L. K. (2014) Mind the data gap: Identifying and assessing drivers of changing eutrophication condition, *Estuaries and Coasts*, **37**(1), 198-221.
- Giannuzzi, L., Sedan D., Echenique R., Andrinolo D. (2011) An acute case of intoxication with cyanobacteria and cyanotoxins in recreational water in Salto Grande Dam, Argentina, *Marine Drugs*, **9**(11), 2164-2175. doi: <https://doi.org/10.3390/md9112164>
- Lee, F. G., Rast W., Jones R. A. (1978) Eutrophication of water bodies: insights for an age-old problem: new information enables water quality managers to predict reliably water quality changes that result from various phosphate control management practices, *Environmental Science & Technology*, **12**, 6.

- Li, Y., Chen J.-a., Zhao Q., Pu C., Qiu Z., Zhang R., Shu W. (2011) A cross-sectional investigation of chronic exposure to microcystin in relationship to childhood liver damage in the Three Gorges Reservoir Region, China, *Environmental Health Perspectives*, **119**(10), 1483. doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.1002412>
- Maldonado, M., Van Damme P., Rojas J. (1998) Contaminación y eutrofización en la Cuenca del Río Rocha (Cochabamba), *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, **3**, 3-9.
- Manzaneda, L. (2016) Crisis de Alalay provoca muerte de miles de peces. Los Tiempos. Recuperado de: <http://www.lostiempos.com/actualidad/local/20160311/crisis-alalay-provoca-muerte-miles-peces>.
- Medrano, R. T., Derpic D. A. (2006) Evaluación de la calidad de las aguas del río Rocha en la jurisdicción de SEMAPA en la provincia Cercado de Cochabamba-Bolivia, *Acta Nova*, **3**(3), 521.
- Melgarejo, A. (2016) Hay emergencia en Alalay por miles de peces muertos La Razón. desde: [http://www.la-razon.com/sociedad/Cochabamba-emergencia-Alalay-miles-peces-muertos\\_0\\_2451954801.html](http://www.la-razon.com/sociedad/Cochabamba-emergencia-Alalay-miles-peces-muertos_0_2451954801.html).
- MMAyA Ministerio de Medio Ambiente y Aguas (1992) *Ley del Medio Ambiente 1333 de 27 de abril de 1992*. L. Paz.
- Morales, E., Rivera S. (2012) Choice of macrophyte substrate in the use of diatoms as indicators of water quality assessment: preliminary data on the case of Alalay Pond (Cochabamba, Bolivia), *Lakes, reservoirs and ponds*, **6**(1-2), 20-42.
- Morales, E. A. (2016) Floración de *Ceratium furcoides* (Levander) Langhans (Dinoflagellata, Dinophyceae) en la represa de La Angostura, Cochabamba, Bolivia, *Acta Nova*, **7**(4), 389-398.
- Morales, E. A., Rivera S. F., Vildoza L. H., Pol A. (2017) Floración algal nociva (FAN) producida por cianobacterias en la laguna Alalay, Cochabamba, Bolivia, *Acta Nova*, **8**(1), 50-75.
- Morales, E. A., Rivera S. F., Wetzel C. E., Hamilton P. B., Bicudo D. C., Pibernat R. A., Ector L. (2015) Hipótesis: la agrupación *Microcystis aeruginosa* Kütz.-*Nitzschia palea* (Kütz.) W. Sm.-bacterias en la laguna Alalay, Cochabamba, Bolivia es de tipo simbiótico, *Acta Nova*, **7**(2), 122-142.
- Mosello, R., Ruggiu D. (1985) Nutrient load, trophic conditions and restoration prospects of Lake Maggiore, *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, **70**(1), 63-75. doi: <https://doi.org/10.1002/iroh.19850700106>
- Muñoz, H., Vallejos A., Ayala R., Acosta F., Meyen J., Aguirre L., Moraes R. (2007) Estructura y dinámica de la comunidad de peces de la laguna Alalay, Cochabamba-Bolivia. 1166-1171. En: L. Aguirre, J. Feyen and M. Moraes (Eds.). *Congreso Internacional sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Recursos Naturales: Sostenibilidad a Múltiples-Niveles y Escalas*. Universidad Mayor de San Simon. Cochabamba
- Nieto, J. (2014) *Distribución Estratificada de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la Laguna Alalay. Cochabamba, Bolivia*. Maestría en ciencias de la geo-información y observación de La Tierra Universidad Mayor de San Simon, Cochabamba. 50.
- Nürnberg, G. K. (1996) Trophic state of clear and colored, soft-and hardwater lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish, *Lake and Reservoir Management*, **12**(4), 432-447. doi: <https://doi.org/10.1080/07438149609354283>
- Philippart, C. J., Cadée G. C., van Raaphorst W., Riegman R. (2000) Long-term phytoplankton-nutrient interactions in a shallow coastal sea: Algal community structure, nutrient budgets, and denitrification potential, *Limnology and Oceanography*, **45**(1), 131-144. doi: <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.1.0131>
- Qian, S. S., Borsuk M. E., Stow C. (2000) Seasonal and long-term nutrient trend decomposition along a spatial gradient in the Neuse River watershed, *Environmental Science & Technology*, **34**(21), 4474-4482. doi: <https://doi.org/10.1021/es000989p>
- Romero, A. M., Van Damme P., Goitia E. (1998) Contaminación orgánica en el Río Rocha (Cochabamba, Bolivia), *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, **3**, 11-29.
- Smith, V. H., Tilman G. D., Nekola J. C. (1999) Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems, *Environmental Pollution*, **100**(1), 179-196. doi: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)
- Spångberg, J., Söderblom J. (2008) *Nutrient removal of domestic waste water in constructed wetlands in Cochabamba, Bolivia*. Aquatic and environmental engineering Uppsala University, Uppsala. 33 pp.





- Srebotnjak, T., Carr G., de Sherbinin A., Rickwood C. (2012) A global Water Quality Index and hot-deck imputation of missing data, *Ecological Indicators*, **17**, 108-119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.023>
- Van Damme, P., Romero A. M., Goitia E. (1998) Estrategias para la recuperación y la conservación de la laguna Alalay (Cochabamba, Bolivia), *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, **3**, 59-72.
- Van der Does, J., Verstraelen P., Boers P., Van Roestel J., Roijackers R., Moser G. (1992) Lake restoration with and without dredging of phosphorus-enriched upper sediment layers, *Hydrobiologia*, **233**(1-3), 197-210. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00016108>
- Whitelaw, G., Vaughan H., Craig B., Atkinson D. (2003) Establishing the Canadian community monitoring network, *Environmental Monitoring and Assessment*, **88**(1), 409-418. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1025545813057>