

# EVALUACIÓN DE FUENTES CONTAMINANTES EN EL ANILLO CIRCUNLACUSTRE DEL LAGO TITICACA (SECTOR PERUANO), 2017

## EVALUATION OF POLLUTANT SOURCES IN THE CIRCUNLACUSTRINE RING OF LAKE TITICACA (PERUVIAN SECTOR), 2017

Humberto Siguayro<sup>1</sup>      José Pasapera (†)<sup>1</sup>      Carmen Villanueva<sup>1</sup>  
Yanet Coila<sup>1</sup>      Cesar Gamarra<sup>1</sup>

<https://doi.org/10.53554/boletin.v37i2.378>

### RESUMEN

SIGUAYRO, H., PASAPERA, J. (†), VILLANUEVA, C., COILA, Y., GAMARRA, C. (2022). *Evaluación de fuentes contaminantes en el anillo circunlacustre del lago Titicaca (sector peruano), 2017*. *Bol Inst Mar Perú*. 37(2): 361-386.- El Lago Titicaca con aportes fluviales (tributarios) considerado endorreico, es un ecosistema que desempeña diferentes funciones y acoge gran biodiversidad. De ahí la importancia de efectuar la evaluación de contaminantes, especialmente la adición de nutrientes, para valorar las fuentes contaminantes en el anillo circunlacustre del lago mediante la exploración de parámetros fisicoquímicos, considerando estado de la calidad del agua, aporte de la carga contaminante y variabilidad entre zonas y periodos evaluados. Se realizaron campañas en abril y setiembre/octubre 2017. Las estaciones de monitoreo estuvieron en zonas de afluencia de la red tributaria que desagua en el lago y en puntos de ingreso de efluentes que captan aguas residuales. Se consideraron 39 estaciones (20 en bahías y desembocaduras de ríos, 10 en afluentes de ríos y 9 en puntos efluentes de aguas residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales - PTAR). Las descargas de aguas residuales presentaron rangos elevados de demanda bioquímica de oxígeno - DBO<sub>5</sub>, nitrógeno y fósforo total, excediendo los límites máximos permisibles. Coliformes termotolerantes en todos los efluentes, excepto la laguna de oxidación de Tilali, no mostraron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre periodos de evaluación. Referente a evaluación de ríos, se observó que la descarga diaria con mayor contribución de contaminantes se presentó en abril (nitrógeno total 15,70 t/día, fósforo total 3,54 t/día, SST 921,69 t/día y DBO<sub>5</sub> 42,02 t/día), en setiembre/octubre se redujo, los mayores aportes se registraron en la confluencia de los ríos Ramis y Huancané, Coata e Ilave. En comparación con lo reportado el 1981-1982, el nitrógeno total se incrementó a 0,65 y el fósforo total a 0,94. Respecto a la evaluación de calidad de agua según ECAs categoría 3 para ríos, excedió el pH en todas las estaciones evaluadas, la DBO<sub>5</sub> superó para el Coata y los coliformes termotolerantes fueron altos para el río Desaguadero. En relación con bahías y zonas de desembocaduras del lago Titicaca (sector peruano), los nutrientes presentaron valores altos en la bahía de Puno y Yunguyo. Según ECA – categoría 2 y 4, en la mayoría de las zonas evaluadas, estuvieron altos conductividad eléctrica, fósforo y nitrógeno totales. En la bahía interior de Puno y Yunguyo se encontraron por encima de los rangos permisibles la clorofila-a, DBO<sub>5</sub>, SST y coliformes termotolerantes, presentando niveles hipertróficos. Según el análisis estadístico no mostró diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre periodos evaluados.

PALABRAS CLAVE: lago Titicaca, carga contaminante, ríos, aguas residuales, calidad de agua, estado trófico2

### ABSTRACT

SIGUAYRO, H., PASAPERA, J. (†), VILLANUEVA, C., COILA, Y., GAMARRA, C. (2022). *Evaluation of pollutant sources in the circunlacustrine ring of Lake Titicaca (Peruvian sector), 2017*. *Bol Inst Mar Perú*. 37(2): 361-386.- Lake Titicaca with river contributions (tributaries) considered endorreic, is an ecosystem that plays different functions and hosts great biodiversity. It is important to evaluate pollutants, especially the addition of nutrients, to evaluate the pollutant sources in the circunlacustrine ring of Lake Titicaca through the exploration of physicochemical parameters, considering the state of water quality, the contribution of the pollutant load, and variability between areas and periods evaluated. In April and September/October 2017, two campaigns were carried out and the monitoring stations were in areas where the tributary inflow drains into the lake, and at effluent entry points that capture wastewater. We considered 39 stations (20 in bays and river mouths, 10 in river tributaries, and 9 in wastewater effluent points of treatment plants - WWTPs). Wastewater discharges yielded high levels of BOD<sub>5</sub>, nitrogen, and total phosphorus, exceeding the maximum permissible limits (D.S. 003-2010-MINAM) for thermotolerant coliforms in all effluents, except for the Tilali oxidation pond, did not show significant differences ( $p > 0.05$ ) between evaluation periods. As for rivers, we observed that the daily discharge with the highest pollutant contribution occurred in April (total nitrogen 15.70 t/day, total phosphorus 3.54 t/day, TSS 921.69 t/day, and BOD<sub>5</sub> 42.02 t/day), while in September/October it was reduced, the greatest contributions were recorded at the confluence of the Ramis and Huancané, Coata and Ilave rivers. There was an increase of 0.65 (total nitrogen) and 0.94 (total phosphorus) compared to 1981-1982. According to the WQS category 3 for rivers, pH exceeded in all the zones evaluated, BOD<sub>5</sub> was higher for the Coata River, and thermotolerant coliforms were high for the Desaguadero River. Regarding the bays and mouths

1 IMARPE, Laboratorio Continental de Puno, Jr. Ciudad de La Paz 205, Puno-Perú, [hsiguayro@imarpe.gob.pe](mailto:hsiguayro@imarpe.gob.pe)

of Lake Titicaca (Peruvian sector), nutrients showed high values in the bay of Puno and Yunguyo. According to WQS – category 2 and 4 (D.S. N° 004-2017-MINAM), the electrical conductivity, total phosphorus, and total nitrogen were exceeded in most of the evaluated areas, while in the inner bay of Puno and Yunguyo, chlorophyll-*a*, BOD<sub>5</sub>, TSS were found above the permissible ranges, presenting hypertrophic levels according to the trophic status of the OECD (1982). No significant differences ( $p > 0.05$ ) were found between the periods evaluated, based on the statistical analysis.

KEYWORDS: Lake Titicaca, pollutant load, rivers, wastewater, water quality, trophic status

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las actividades humanas se han incrementado, como resultado, los lagos y ríos enfrentan un deterioro y desequilibrio ecológico, y eventualmente desarrollan procesos de eutrofización que generan problemas ecológicos (BHAGOWATI & AHAMAD, 2018). Los recursos hídricos son importantes para los hogares, la industria, la agricultura, etc. donde la mayoría de los ríos abastecen y potencian estas actividades, pero son extremadamente susceptibles a la contaminación, asociado al transporte por agentes externos, por ello los lagos alcanzaron y produjeron una severa inestabilidad ambiental (SINGH *et al.*, 2005).

LARIOS *et al.* (2015) mencionan que 70% de aguas residuales en el Perú no tienen tratamiento adecuado. Según SUNASS (2015) hasta el 2013, de las 253 localidades del ámbito de las EPS, 89 no cuentan con tratamiento de aguas residuales, y son vertidos directamente a los ríos, mares, pampas o drenes. En las 164 localidades restantes, todas o parte de las aguas residuales, presentan tratamiento adecuado. De acuerdo con un estudio sobre la situación actual y perspectivas en el sector agua y saneamiento en el Perú, la cobertura es menor al 40% para Puno (ANA, 2013).

El lago Titicaca es un cuerpo hídrico importante para la humanidad, es parte del humedal Ramsar, es un ecosistema que desempeña diferentes funciones y acoge gran biodiversidad que requiere su protección (DEJOUX & ILTIS, 1991; MINAM, 2015; LÓPEZ *et al.*, 2015). Las actividades antrópicas como acuicultura, turismo, agropecuaria, comercial, minera e industria, desarrolladas en el lago Titicaca modifican las características físicas, químicas y biológicas de sus aguas, suelos y biodiversidad ocasionando el acelerado proceso de eutrofización, causando impactos sociales, ambientales y económicos (NORTHCOTE, 1991; RIVAS *et al.*, 2009; POUILLY *et al.*, 2014), siendo los nutrientes originados por fuentes puntuales (descargas domésticas, urbanas y acuícola) y no

## 1. INTRODUCTION

Lakes and rivers are facing ecological deterioration and imbalance as a result of the increasing anthropogenic activities in recent years. Eventually, they develop eutrophication processes that generate ecological problems (BHAGOWATI & AHAMAD, 2018). Water resources are important for households, industry, and agriculture, among other activities in which most of the rivers supply and enhance them, but they are extremely susceptible to pollution, associated with transport by external agents, thus the lakes reached and produced severe environmental instability (SINGH *et al.*, 2005).

LARIOS *et al.* (2015) mention that 70% of wastewater in Peru is not adequately treated. According to SUNASS (2015), as of 2013, of the 253 localities within the scope of the WSS, 89 do not have wastewater treatment, and effluents are discharged directly into rivers, seas, pampas, or drains. In the remaining 164 localities, all or part of the wastewater is adequately treated. According to a study on the current situation and prospects in the Peruvian water and sanitation sector, coverage is less than 40% in Puno (ANA, 2013).

Lake Titicaca, part of the Ramsar wetlands, is an important water body for humanity since it is an ecosystem that performs different functions and hosts great biodiversity that requires protection (DEJOUX & ILTIS, 1991; MINAM, 2015; LÓPEZ *et al.*, 2015). Aquaculture, tourism, agriculture, livestock, trading, mining, and industry, as well as other anthropogenic activities developed in Lake Titicaca modify the physicochemical and biological characteristics of its waters, soils, and biodiversity, resulting in acute eutrophication, which causes social, environmental, and economic impacts (NORTHCOTE, 1991; RIVAS *et al.*, 2009; POUILLY *et al.*, 2014). Nutrients originate from point

puntuales (descargas de contaminantes por agricultura, turismo, transporte acuático, pecuaria, etc.) o bien una combinación de ellas (PARRA, 1979; JICA-INADE, 1999), los ríos son las principales fuentes que aportan diluciones de diferentes compuestos químicos al lago que es medido y controlado por medio de caudales (FRASER *et al.*, 1995; MARGALEF, 1983).

De ahí la importancia de efectuar la evaluación de estos contaminantes en periodos de avenidas (abril) y estiaje (setiembre/octubre) o máximo y mínimo nivel del lago, especialmente la adición de nutrientes mediante sus tributarios (ríos) y efluentes de aguas residuales (tratadas y no tratadas), con el objetivo de evaluar las fuentes contaminantes en el anillo circunlacustre del lago mediante la exploración de los parámetros físico-químicos críticos considerando el estado de la calidad del agua, el aporte de la carga contaminante y su variabilidad entre zonas.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### Área de estudio

El Lago Titicaca ubicado a 3810 m.s.n.m., es el cuerpo de agua dulce más grande de América del Sur con 8.559 km<sup>2</sup> de superficie y volumen de agua de 932 km<sup>3</sup>, está dividido en dos cuerpos de agua "Lago Mayor" y "Lago Menor", tiene profundidad promedio de 280 y 40 m, respectivamente (DEJOUX & ILLIS, 1991; NORTHCOTE, 1991), este lago está incluido en la lista de humedales Ramsar de importancia internacional (MINAM, 2015), por ser fuentes principales de recolección del recurso hídrico, Según MINAM (2015) y OCOLA & LAQUI (2017) el sector peruano cuenta con los principales tributarios: el río Ilave que posee longitud aproximada de 163 km y nace en el nevado Larajanco con un caudal promedio de 40,1 m<sup>3</sup>/s. El río Coata tiene longitud de 141 km que nace en el nevado Huayquera con caudal promedio de 39,3 m<sup>3</sup>/s. El río Ramis, su longitud es de 299 km y nace en el nevado de Ananea Grande y la Rinconada con caudal promedio anual de 88,3 m<sup>3</sup>/s. El río Huancané posee una longitud de 125 km y caudal promedio de 23,7 m<sup>3</sup>/s. El río Zapatilla con longitud de 59,1 km y caudal promedio de 3,2 m<sup>3</sup>/s. El río Illpa cuenta con longitud de 18 km y caudal de 7,5 m<sup>3</sup>/s y por último el río Binacional de Desaguadero es el principal río de la cuenca endorreica del Titicaca que descarga las aguas al

sources (domestic, urban, and aquaculture discharges) and non-point sources (pollutant discharges from agriculture, tourism, aquatic transport, livestock, etc.) or a combination of them (PARRA, 1979; JICA-INADE, 1999). Rivers are the main sources contributing dilutions of different chemical compounds to the lake, which is measured and controlled through flow rates (FRASER *et al.*, 1995; MARGALEF, 1983).

Therefore, we should evaluate these pollutants in flood (April) and dry (September/October) seasons or maximum and minimum lake levels, especially the addition of nutrients through its tributaries (rivers) and wastewater effluents (treated and untreated), to assess the pollutant sources in the circumlacustrine ring of the Lake Titicaca by exploring the critical physicochemical parameters considering the state of water quality, the contribution of the pollutant load, and its variability between zones.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### Study area

Lake Titicaca is located at 3810 m.a.s.l. and is the largest South American freshwater body with a surface area of 8,559 km<sup>2</sup> and a water volume of 932 km<sup>3</sup>. It is divided into two water bodies "Lago Mayor" (deep main basin) and "Lago Menor" (shallow sub-basin) with a mean depth of 280 and 40 m, respectively (DEJOUX & ILLIS, 1991; NORTHCOTE, 1991). This lake is included in the list of Ramsar wetlands of international importance (MINAM, 2015), as it is the main source of water collection. According to MINAM (2015) and OCOLA & LAQUI (2017), the main tributaries of the Peruvian sector are: the Ilave River which has an approximate length of 163 km and has its source in the Larajanco peak with a mean flow of 40.1 m<sup>3</sup>/s; the Coata River, which is 141 km long and originates in the Huayquera mountain with a mean flow of 39.3 m<sup>3</sup>/s; the Ramis River has a length of 299 km and originates in the Ananea Grande peak and La Rinconada with a mean annual flow of 88.3 m<sup>3</sup>/s; the Huancané River, which is 125 km long and has a mean flow of 23.7 m<sup>3</sup>/s; the Zapatilla River is (59.1 km long) with a mean flow of 3.2 m<sup>3</sup>/s; which is 18 km long and has a flow of 7.5 m<sup>3</sup>/s, and the Desaguadero River (shared between Peru and Bolivia) and which is the main river of the Titicaca endorheic basin

Lago Poopó con caudal de 35 m<sup>3</sup>/s. El área de interés se centra en la zona circunlacustre del Lago Titicaca (sector peruano) (Fig. 1).

**Determinación de variables ambientales y colecta de muestras de agua**

En el anillo circunlacustre del lago Titicaca (sector peruano), se seleccionaron 39 estaciones de muestreo en zonas vulnerables a la salud del ecosistema del lago, por diversas actividades antrópicas que se desarrollan en su cuenca, de las cuales 10 estaciones se consideraron en los principales ríos (Tabla 1, Fig. 1), 9 estaciones ubicadas en efluentes de aguas residuales y plantas de tratamiento (Tabla 2, Fig. 1) y 20 estaciones en las principales bahías y zonas aledañas a las desembocaduras de ríos (Tabla 3, Fig. 1). Se realizó dos campañas, la primera del 17 al 21 de abril 2017, periodo de caudal máximo (nivel máximo del lago) y la segunda del 26 de setiembre al 2 de octubre 2017, periodo de caudal mínimo (nivel mínimo del lago). Se registraron parámetros fisicoquímicos en campo como: pH, temperatura, amonio y conductividad eléctrica con un multiparámetro marca YSI Profesional Plus, previamente calibrado, la temperatura fue contrastada con un termómetro de mercurio ASTM, la concentración de oxígeno disuelto se determinó con un oxímetro óptico marca Mettler Toledo y fue contrastado por el método Winkler modificado por CARRIT & CARPENTER (1966).

discharging its waters into Lake Poopó with a flow of 35 m<sup>3</sup>/s. Our area of interest is centered in the circumlacustrine zone of Lake Titicaca (Peruvian sector) (Fig. 1).

**Determination of environmental variables and collection of water samples**

We selected 39 sampling stations in the circumlacustrine ring of Lake Titicaca (Peruvian sector) located in areas vulnerable to the health of the lake ecosystem due to various anthropogenic activities in the basin. Of these stations, 10 were located in the main rivers (Table 1, Fig. 1), 9 were located in wastewater effluents and treatment plants (Table 2, Fig. 1), and 20 stations were located in the main bays and areas near river mouths (Table 3, Fig. 1). Two campaigns were conducted, the first from April 17 to 21, 2017, coinciding with the peak flow period (maximum lake level) and the second from September 26 to October 2, 2017, during the minimum flow period (minimum lake level). The following physicochemical parameters were recorded: pH, temperature, ammonium, and electrical conductivity with a YSI Professional Plus multiparameter, previously calibrated. The temperature was contrasted with an ASTM mercury thermometer and dissolved oxygen concentration was determined with a Mettler Toledo optical oximeter and was contrasted by the Winkler method modified by CARRIT & CARPENTER (1966).

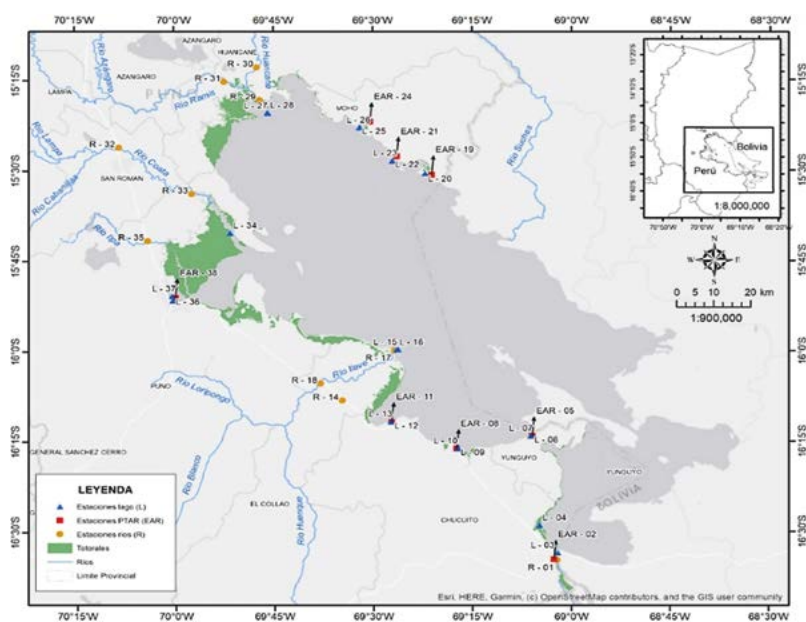


Figura 1.- Ubicación de estaciones de muestreo en el Lago Titicaca. Abril y setiembre/octubre 2017

Figure 1. Location of sampling stations in Lake Titicaca (April and September/October 2017)

Tabla 1.- Estaciones de muestreo en los principales ríos del Lago Titicaca. Abril y setiembre/octubre 2017

Table 1. Sampling stations in the main tributaries to Lake Titicaca (April and September/October 2017)

	Estación muestreo	Río	Lugar	Longitud °W	Latitud °S
1	R - 01	Desaguadero	Puente Binacional Río Desaguadero	69° 2,160'	16° 34,819'
2	R - 14	Zapatilla	Puente Río Zapatilla - Pilcuyo	69° 34,725'	16° 8,307'
3	R - 17	Ilave	Desembocadura Río Ilave - Pilcuyo	69° 26,761'	15° 59,992'
4	R - 18	Ilave	Puente Río Ilave - Ilave	69° 37,977'	16° 5,495'
5	R - 29	Confluencia	Confluencia Ríos Huancane y Ramis	69° 47,097'	15° 18,384'
6	R - 30	Huancane	Puente Río Huancane	69° 47,529'	15° 12,943'
7	R - 31	Ramis	Puente Río Ramis	69° 52,427'	15° 15,319'
8	R - 32	Coata	Puente Río Maravillas/Río Coata - Juliaca	70° 8,400'	15° 26,197'
9	R - 33	Coata	Puente Río Coata - Coata	69° 57,379'	15° 33,929'
10	R - 35	Illpa	Puente Río Illpa - Atuncolla	70° 4,090'	15° 41,725'

Tabla 2.- Estaciones de muestreo en los principales efluentes de aguas residuales. Lago Titicaca. Abril y setiembre/octubre 2017

Table 2. Sampling stations in the main wastewater effluents. Lake Titicaca (April and September/October 2017)

N°	Estación muestreo	Lugar	Efluentes de aguas residuales	Longitud °W	Latitud °S
1	EAR-02	DESAGUADERO	Laguna de oxidación	69° 2,662'	16° 34,713'
2	EAR-04	ZEPITA	Efluente	69° 6,085'	16° 29,833'
3	EAR -05	YUNGUYO	Efluente	69° 5,949'	16° 14,205'
4	EAR-08	POMATA	PTAR	69° 17,400'	16° 16,311'
5	EAR-11	JULI	Laguna de oxidación	69° 27,237'	16° 11,855'
6	EAR-19	TILALI	Laguna de oxidación	69° 21,137'	15° 30,826'
7	EAR-21	CONIMA	Laguna de oxidación	69° 26,425'	15° 27,775'
8	EAR-24	MOHO	Laguna de oxidación	69° 30,451'	15° 22,008'
9	EAR-38	PUNO	Laguna de oxidación	69° 59,950'	15° 51,182'

Tabla 3.- Estaciones de muestreo. Bahías y zonas a las desembocaduras de ríos. Lago Titicaca. Abril y setiembre/octubre 2017

Table 3. Sampling stations. Bays and river mouth areas. Lake Titicaca (April and September/October 2017)

N°	Estación muestreo	Zona muestreo	Longitud °W	Latitud °S
1	L - 03	Bahía Desaguadero Lago Menor	69° 2,105'	16° 33,589'
2	L - 04	Bahía de Zepita 100m del Efluente PTAR Zepita - Lago Menor	69° 4,826'	16° 29,070'
3	L - 06	Bahía Yunguyo 400m del Efluente Yunguyo - Lago Mayor	69° 6,075'	16° 14,085'
4	L - 07	Bahía Yunguyo 100m del Efluente Yunguyo - Lago Mayor	69° 5,977'	16° 14,188'
5	L - 09	Bahía de Pomata 100m del efluente PTAR - Lago mayor	69° 17,242'	16° 16,241'
6	L - 10	Bahía de Pomata 400m del efluente PTAR - Lago mayor	69° 17,162'	16° 16,251'
7	L - 12	Bahía de Juli 100m del efluente PTAR Juli- Lago mayor	69° 27,280'	16° 11,829'
8	L - 13	Bahía de Juli 400m del efluente PTAR Juli- Lago mayor	69° 27,331'	16° 11,786'
9	L - 15	A 400m de la Desembocadura del Río Ilave - Lago Mayor	69° 26,229'	16° 59,826'
10	L - 16	A 100m de la Desembocadura del Río Ilave - Lago Mayor	69° 26,461'	16° 59,893'
11	L - 20	Bahía de Tilali 400m del Efluente PTAR Tilali - Lago Mayor	69° 22,133'	16° 30,597'
12	L - 22	Bahía Conima 400m del Efluente PTAR Conima - Lago Mayor	69° 27,068'	16° 28,554'
13	L - 23	Bahía Conima 100m del Efluente PTAR Conima - Lago Mayor	69° 27,066'	16° 28,476'
14	L - 25	Bahía de Moho 400m del efluente PTAR Moho - Lago Mayor	69° 32,060'	16° 23,005'
15	L - 26	Bahía de Moho 100m del efluente PTAR Moho - Lago Mayor	69° 31,935'	16° 22,938'
16	L - 27	A 400m de la desembocadura del Río Ramis - Lago Mayor	69° 45,816'	16° 20,550'
17	L - 28	A 100m de la desembocadura del Río Ramis - Lago Mayor	69° 45,945'	16° 20,494'
18	L-34	Frente a Capano - Desembocadura Río Coata	69° 51,609'	16° 40,428'
19	L-36	Bahía Interior de Puno 100 m del efluente PTAR Puno	70° 0,349'	16° 51,631'
20	L-37	Bahía Interior de Puno Faro Viejo	70° 0,470'	16° 50,928'

La colecta de muestras de agua en ríos (tributarios al Lago Titicaca) y vertederos de aguas residuales se realizaron con un balde, en bahías con una botella Niskin (5 L de capacidad) y a nivel superficial (0,5 m de profundidad).

#### **Determinación de nutrientes, clorofila-a, SST, DBO<sub>5</sub> y coliformes termotolerantes**

Los fosfatos (PO<sub>4</sub>) se determinaron por el método de ácido ascórbico, nitritos (NO<sub>2</sub>) por diazotación, nitratos (NO<sub>3</sub>) por reducción con cadmio, utilizando el espectrofotómetro Espectrulamb 22C, de acuerdo con las técnicas y modificaciones del protocolo de IMARPE (2013), tomando como referencia los métodos de análisis de STRICKLAND & PARSON (1968) y métodos estándares de análisis de agua (APHA, 2005). La clorofila-a se determinó por filtración usando el filtro Whatman GF/F con posterior extracción con solución de aceta (JEFFREY & HUMPHREY, 1975; APHA, 2005). La sensibilidad de las técnicas analíticas para determinación por espectrofotómetro de nutrientes y clorofila-a, tuvo un margen de error de +/-2 nm de longitud de onda. El fósforo total (PT) se determinó con la prueba HACH con espectrofotómetro DR 2800 y el nitrógeno total (NTK) por el método de digestión Kjeldahl y cuantificación por titulación (APHA, 2005). Los sólidos suspendidos totales por gravimetría (APHA, 2005). Para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) se utilizó el método por simple dilución (INDECOPI, 2015). El recuento de coliformes termotolerantes se realizó con la técnica de fermentación en tubos múltiples Número Más Probable (NMP), utilizando caldo Lauril Sulfato, caldo Brila y caldo EC (IMARPE, 2016).

#### **Estimación de caudal en ríos y efluentes de aguas residuales**

Los registros de caudales diarios de los ríos (tributarios) al Lago Titicaca para los periodos evaluados fueron proporcionados por SENAMHI – Puno.

Para la estimación del caudal de efluentes de vertederos de aguas residuales (Fig. 2), se aplicó el método volumétrico para caudales pequeños, que consiste en medir el tiempo que tarda en llenar un recipiente de boca ancha (balde) de volumen conocido, con repeticiones de cuatro a cinco veces con la finalidad de promediar el tiempo y

The collection of water samples in rivers (tributaries to Lake Titicaca) and wastewater dumps was carried out with a bucket, while in bays, it was carried out with a Niskin bottle (5 L capacity) and at surface level (0.5 m deep).

#### **Determination of nutrients, chlorophyll-a, TSS, BOD<sub>5</sub>, and thermotolerant coliforms**

Phosphates (PO<sub>4</sub>) were determined by the ascorbic acid method, nitrites (NO<sub>2</sub>) by diazotization, and nitrates (NO<sub>3</sub>) by cadmium reduction, using the spectrophotometer Spectrulamb 22C, according to the techniques and modifications of the IMARPE protocol (2013), based on the analysis methods of STRICKLAND & PARSON (1968) and standard methods of water analysis (APHA, 2005). Chlorophyll-a was determined by filtration using a Whatman GF/F filter with later extraction with acetate solution (JEFFREY & HUMPHREY, 1975; APHA, 2005). There was a margin of error of +/-2 nm wavelength for the sensitivity of the analytical techniques for the determination of nutrients and chlorophyll-a by spectrophotometer. Total phosphorus (TP) was determined by the HACH test with the DR 2800 spectrophotometer and total nitrogen (NTK) by the Kjeldahl digestion method and quantification by titration (APHA, 2005). Total suspended solids were measured by gravimetry (APHA, 2005). The simple dilution method was used for biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>) (INDECOPI, 2015). Thermotolerant coliforms were counted using the multiple tube fermentation technique, expressed in terms of the Most Probable Number (MPN), using lauryl sulfate broth, Brila broth, and EC broth (IMARPE, 2016).

#### **Estimation of river and wastewater effluent flows**

SENAMHI – Puno provided the daily flow records of the rivers (tributaries to Lake Titicaca) for the periods evaluated.

We applied the volumetric method for small flows to estimate the effluent flow rate of wastewater dumps (Fig. 2). This method consists of measuring the time it takes to fill a wide-mouth container (bucket) of known volume, with four to five repetitions to average the time and obtain a congruent data (MINAGRI,



obtener un dato congruente (MINAGRI, 2014; ANA, 2017). Luego se aplicó la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Dónde:

Q = Caudal en litros por segundo (L/s)

V = Volumen en litros (L)

T = Tiempo en segundos (s)

### Estimación de la carga contaminante

Para la estimación de la carga disuelta transportada por ríos, vertederos, etc., se aplicó la siguiente fórmula (ANA, 2017):

$$CC = C * Q$$

CC = Carga contaminante

C = Concentración del contaminante

Q = Caudal de la fuente hídrica

El análisis de los diferentes parámetros ayuda a evaluar la concentración de los contaminantes que fluyen en unidad de tiempo por las aguas del afluente. La relación entre la carga contaminante y el caudal es directa.

### Evaluación de la calidad de agua

**Calidad de agua para ríos**, se evaluó según estándares de calidad de agua (D.S. N° 004-2017-MINAM). Para evaluar la calidad de agua según ECA-2017, se aplicó la clasificación de los cuerpos de aguas continentales superficiales (R. J. N° 056-2018-ANA). En ambos casos para ríos, categoría 3 (riego de vegetales y bebidas de animales).

2014; ANA, 2017). The following equation was then used:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Where:

Q = Flow in liters per second (L/s)

V = Volume in liters (L)

T = Time in seconds (s)

### Estimation of pollutant load

The following formula was applied to estimate the dissolved load carried by rivers, landfills, etc. (ANA, 2017):

$$CC = C * Q$$

CC = Pollutant load

C = Pollutant concentration

Q = Water source flow rate

The analysis of the different parameters is helpful to evaluate the pollutant concentration flowing in a unit of time through the waters of the tributary. There is a direct relationship between the pollutant load and the flow rate.

### Water quality assessment

**Water quality for rivers** was evaluated according to water quality standards - WQS (D.S. N° 004-2017-MINAM). The classification of inland surface water bodies was applied to assess water quality according to WQS-2017 (R. J. N° 056-2018-ANA). In both cases for rivers, category 3 (irrigation of vegetables and animal beverages).

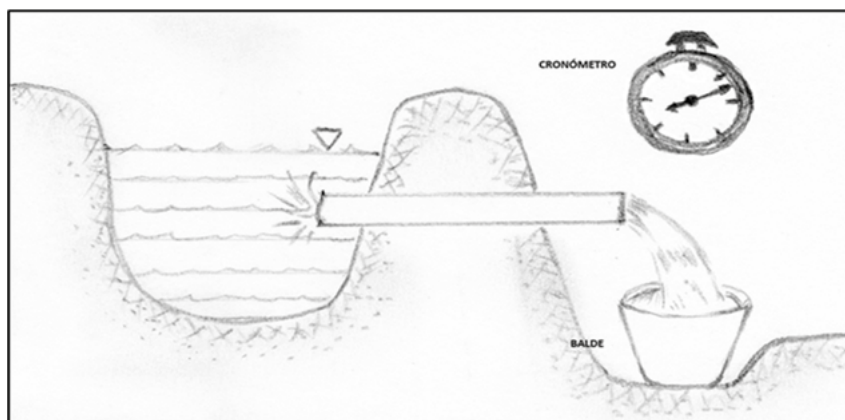


Figura 2.- Estimación de caudal en efluentes de aguas residuales (MINAGRI, 2014)

Figure 2. Estimation of flow rate in wastewater effluents (MINAGRI, 2014)

**Calidad de agua para bahías y zonas aledañas a desembocaduras de ríos del lago Titicaca**, se evaluó de acuerdo con estándares de calidad de agua (D.S. N° 004-2017-MINAM). Para lagos y lagunas, categoría 2 - C4 (Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales. Para extracción y cultivo de especies hidrobiológicas en lagos o lagunas) y categoría 4 - E1 (Conservación del ambiente acuático).

**Calidad de agua para los efluentes de agua residuales**, se valoró según Límites Máximos Permisibles (D.S. N° 003-2010-MINAM). Límites máximos permisibles de las plantas de tratamiento de aguas residuales –PTAR para los efluentes.

#### **Evaluación del estado trófico para bahías y zonas aledañas a las desembocaduras de ríos**

Se estimó el índice de estado trófico propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) que en 1982 propuso una clasificación del grado de eutrofia de lagos y embalses. Esta categorización facilita una representación cuantitativo probabilístico en base a la concentración de fósforo, clorofila-a y disponibilidad de espectro fotosintético en la vertical de la columna de agua (transparencia de la columna de agua) (LÓPEZ *et al.*, 2015). Según VOLLENWEIDER & KERÉKES (1981), estos parámetros se relacionan con el estado trófico de acuerdo con las percepciones cualitativas. Los criterios de aplicación se presentan en la Tabla 4.

#### **Análisis estadístico**

Las variables abióticas y bióticas se sometieron a análisis exploratorio mediante el uso de estadísticos de tendencia central (media aritmética) y de dispersión (desviación estándar y coeficiente de variación). Para comparar estadísticamente el nivel de significancia entre periodos evaluados se utilizó el estadístico t de Student (para muestras paramétricas según la evaluación de supuestos estadísticos) y Wilcoxon-U de Mann-Whitney (test no paramétrico), este método se usó por la poca cantidad de muestras. Los análisis de datos se realizaron con el programa R (R CORE TEAM, 2021). Así mismo se diseñó las zonas de muestreo en QGIS 3.4 (QGIS, 2010).

**Water quality for bays and areas surrounding the mouths of rivers (tributaries to Lake Titicaca)** was evaluated according to WQS (D.S. N° 004-2017-MINAM). For lakes and lagoons, category 2 - C4 (Extraction, culture, and other coastal and inland marine activities. For extraction and culture of hydrobiological species in lakes or lagoons) and category 4 - E1 (Conservation of the aquatic environment).

**Water quality for wastewater effluents** was valued according to Maximum Permissible Limits (D.S. N° 003-2010-MINAM). Maximum permissible limits for wastewater treatment plants - WWTP for effluents.

#### **Evaluation of the trophic status for bays and areas surrounding river mouths**

We estimated the trophic state index proposed by the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), which provided a classification of the degree of eutrophication of lakes and reservoirs in 1982. Thereby, it offers a probabilistic quantitative representation based on the concentration of phosphorus, chlorophyll-a, and the availability of photosynthetic spectrum in the vertical of the water column (transparency of the water column) (LÓPEZ *et al.*, 2015). According to VOLLENWEIDER & KERÉKES (1981), these parameters are related to the trophic state based on qualitative perceptions. Table 4 shows the application criteria.

#### **Statistical analysis**

We used central tendency statistics (arithmetic mean) and dispersion statistics (standard deviation and coefficient of variation) to perform an exploratory analysis of abiotic and biotic variables. To statistically compare the level of significance between evaluated periods, we applied the Student's t-statistic (for parametric samples according to the evaluation of statistical assumptions) and Wilcoxon-U of Mann-Whitney (non-parametric test); this method was used because of the small number of samples. Data analysis was performed with the R software (R CORE TEAM, 2021). The sampling zones were also designed in QGIS 3.4 (QGIS, 2010).



Tabla 4.- Clasificación trófica según OCDE, 1982

Table 4. Trophic classification according to OCDE, 1982

Categoría Trófica	Clorofila -a (mg/m <sup>3</sup> )	Transparencia al Disco Secchi (m)	Fósforo Total (mg/L)
Ultraoligotrófico	< 1	12	< 0,004
Oligotrófico	1- 2,5	6 a 12	0,004 a 0,010
Mesotrófico	2,5 - 7,9	3 a 6	0,010 a 0,035
Eutrófico	ago-25	1,5 a 3	0,035 a 0,100
Hipertrófico	> 25	> 1,5	> 0,100

### 3. RESULTADOS

#### EVALUACIÓN DE CONDICIONES AMBIENTALES DE LOS PRINCIPALES RÍOS

##### Aspectos fisicoquímicos y biológicos

Respecto a la temporalidad (Fig. 3), se observaron valores elevados de temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno además de amonio, fosfato, nitrito y DBO<sub>5</sub> en periodo de estiaje (setiembre/octubre) y ligeramente bajos en época de avenidas (abril), en tanto las concentraciones de nitrato, nitrógeno total, fósforo total, clorofila-a, SST y coliformes totales fueron altos en épocas de avenidas (abril) y levemente bajos en periodo de estiaje (setiembre/octubre).

### 3. RESULTS

#### EVALUATION OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THE MAIN RIVERS

##### Physicochemical and biological aspects

Regarding seasonality (Fig. 3), we observed high values of temperature, electrical conductivity, pH, dissolved oxygen, oxygen saturation, ammonium, phosphate, nitrite, and BOD<sub>5</sub> in the dry season (September/October) and slightly low values during the flood season (April). Conversely, the concentrations of nitrate, total nitrogen, total phosphorus, chlorophyll-a, TSS, and total coliforms were high during the flood season (April) and slightly low during the dry season (September/October).

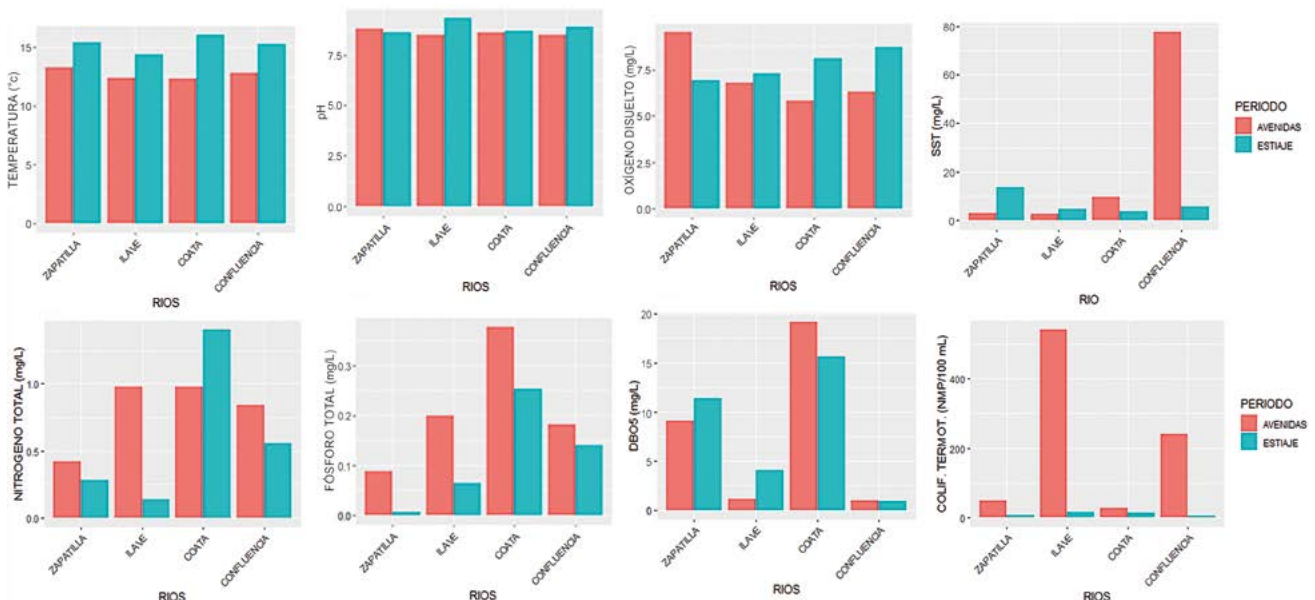


Figura 3.- Parámetros fisicoquímicos. Variación entre ríos y entre periodos de evaluación. Tributarios al lago Titicaca. Abril y setiembre/octubre 2017

Figure 3. Physicochemical parameters. Variation between rivers and evaluation periods. Tributaries to Lake Titicaca (April and September/October 2017)

En relación con la comparación entre ríos, los resultados se muestran en la Tabla 5. Se registró temperatura mínima en el río Illpa (13,00 °C) y máxima en el río Huancané (16,95 °C). El pH varió entre 8,69 en el río Zapatilla (puente Zapatilla) y 9,14 en el río Illpa. El oxígeno disuelto registró valores ligeramente altos en el río Zapatilla (8,18 mg/L), mientras que en el río Ramis fue menor (6,44 mg/L), estas aguas mostraron alta saturación de oxígeno (121,20 y 106,25%). Los fosfatos presentaron valores más altos (0,58 mg/L) en el río Coata (puente Maravillas) mientras que, en los ríos Huancané y Ramis estos valores fueron menores (0,03 mg/L). Las concentraciones de nitritos variaron entre 0,005 mg/L (ríos Ramis) y 0,119 mg/L (río Coata). Los nitratos fluctuaron entre 0,01 mg/L en el río Zapatillas y 0,85 mg/L en el río Coata, elementos que son esenciales para el crecimiento de plantas y microalgas (SINGLER & BAUDER, 2012). La clorofila-a presentó máxima concentración en el río Huancané (3,38 mg/m<sup>3</sup>) y en el río Zapatillas los valores fueron bajos (0,50 mg/m<sup>3</sup>). Los sólidos suspendidos totales (SST) se encontraron entre 1,12 mg/L (río Desaguadero) y 41,63 mg/L en la confluencia de los ríos Ramis y Huancané. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) registró el valor más bajo en el Huancané (0,87 mg/L) respecto al río Coata (17,79 mg/L) que fueron altos, probablemente el incremento se deba al arrastre de residuos antrópicos provenientes de la ciudad de Juliaca.

Table 5 shows the results of the comparison between rivers. The minimum temperature was recorded in the Illpa River (13.00 °C) and the maximum in the Huancané River (16.95 °C). The pH varied between 8.69 in the Zapatilla River (Zapatilla bridge) and 9.14 in the Illpa River. Dissolved oxygen was slightly higher in the Zapatilla River (8.18 mg/L), while it was lower in the Ramis River (6.44 mg/L), these waters showed high oxygen saturation (121.20 and 106.25%). Phosphates showed higher values (0.58 mg/L) in the Coata River (Maravillas bridge) while these values were lower in the Huancané and Ramis Rivers (0.03 mg/L). Nitrite concentrations ranged from 0.005 mg/L (Ramis River) to 0.119 mg/L (Coata River). Nitrates varied between 0.01 mg/L in the Zapatillas River and 0.85 mg/L in the Coata River and are essential for plant and microalgae growth (SINGLER & BAUDER, 2012). Chlorophyll-a had a maximum concentration in the Huancané River (3.38 mg/m<sup>3</sup>) but low values occurred in the Zapatillas River (0.50 mg/m<sup>3</sup>). Total suspended solids (TSS) ranged from 1.12 mg/L (Desaguadero River) and 41.63 mg/L at the confluence of the Ramis and Huancané Rivers. The biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>) recorded the lowest value in the Huancané River (0.87 mg/L) compared to the Coata River (17.79 mg/L), where the values were high; this is probably due to the dragging of anthropogenic waste from the city of Juliaca.

Tabla 5.- Estadístico de la distribución superficial de parámetros fisicoquímicos (T: Temperatura, CE: Conductividad eléctrica, pH: Potencial de hidrogeno, OD: Oxígeno disuelto, SAT: Saturación de oxígeno, NH<sub>4</sub>: Amonio, PO<sub>4</sub>: Fosfato, NO<sub>2</sub>: Nitrito, NO<sub>3</sub>, Nitrato, NT: Nitrógeno total, PT: Fósforo total, Chl-a: Clorofila-a, SST: Sólidos suspendidos totales), DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno, CT: Coliformes termotolerantes. Ríos afluentes y efluente al Lago Titicaca (sector peruano). Abril y setiembre/octubre 2017

Table 5.- Statistics of the surface distribution of physicochemical parameters (T: Temperature, EC: Electrical conductivity, pH: Hydrogen potential, DO: Dissolved oxygen, SAT: Oxygen saturation, NH<sub>4</sub>: Ammonium, PO<sub>4</sub>: Phosphate, NO<sub>2</sub>: Nitrite, NO<sub>3</sub>: Nitrate, NT: Total Nitrogen, PT: Total Phosphorus, Chl-a: Chlorophyll-a, SST: Total Suspended Solids), DBO<sub>5</sub>: Biochemical Oxygen Demand, TC: Thermotolerant Coliforms. Tributary rivers and effluent to Lake Titicaca (Peruvian sector). April and September/October 2017

RÍO	LUGAR MUESTREO	ESTADÍSTICO	T (°C)	CE (µS/cm)	pH	OD (mg/L)	SAT (%)	NH <sub>4</sub> (mg/L)	PO <sub>4</sub> (mg/L)	NO <sub>2</sub> (mg/L)	NO <sub>3</sub> (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	SST (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	CT (NMP/100 mL)
Desaguadero	Puente Desaguadero	Media	15,20	1882,00	8,95	6,87	109,50	2,32	0,212	0,010	0,060	0,770	0,106	1,86	1,12	10,67	1260,00
		Desv. Estandar	0,42	43,84	0,04	0,30	4,24	0,25	0,212	0,008	0,008	0,495	0,021	1,79	1,24	0,06	480,83
Zapatilla	Puente Zapatilla	Media	14,35	1157,00	8,69	8,18	121,20	0,46	0,301	0,008	0,013	0,350	0,047	0,50	8,25	10,24	27,90
		Desv. Estandar	1,48	398,81	0,20	1,87	15,41	0,24	0,366	0,010	0,017	0,099	0,058	0,13	7,42	1,67	29,84
Ilave	Puente Ilave/desemb.	Media	13,53	455,75	8,99	7,38	114,33	0,41	0,137	0,006	0,051	0,399	0,097	1,22	3,50	2,46	201,20
		Desv. Estandar	1,45	150,71	0,41	0,93	8,95	0,08	0,050	0,001	0,067	0,417	0,075	0,60	0,98	1,58	250,08
Illpa	Puente Illpa	Media	13,00	1031,90	9,14	7,65	117,50	0,51	0,055	0,006	0,394	0,168	0,033	2,36	7,38	9,11	4,80
		Desv. Estandar	1,27	667,65	0,27	0,21	1,56	0,28	0,025	0,000	0,503	0,158	0,028	0,75	4,77	0,74	4,24
Coata	Puente Maravillas/Coata	Media	13,75	915,78	8,79	7,29	113,48	0,92	0,585	0,119	0,846	0,735	0,079	2,35	4,56	17,79	19,00
		Desv. Estandar	1,97	502,04	0,21	1,09	19,39	0,36	0,807	0,189	0,928	0,564	0,071	2,34	3,57	1,61	7,12
Ramis	Puente Ramis	Media	16,25	670,55	8,71	6,44	106,25	0,28	0,034	0,005	0,426	0,350	0,051	2,52	31,88	0,92	272,25
		Desv. Estandar	1,77	235,40	0,27	0,69	12,94	0,13	0,011	0,001	0,593	0,099	0,017	2,11	42,25	0,04	378,66
Huancane	Puente Huancane	Media	16,95	1062,15	8,79	7,85	126,85	0,38	0,030	0,006	0,128	0,490	0,038	3,38	25,00	0,87	101,50
		Desv. Estandar	1,48	730,94	0,36	2,55	36,98	0,30	0,013	0,001	0,174	0,099	0,007	3,04	28,28	0,19	96,87
Confluencia (Ramis y)	Confluencia	Media	14,05	749,00	8,70	7,47	114,45	0,33	0,049	0,006	0,399	0,700	0,046	2,15	41,63	0,95	122,25
		Desv. Estandar	1,77	407,29	0,23	1,71	29,20	0,20	0,010	0,001	0,539	0,198	0,051	2,08	50,73	0,01	166,52

Nivel significancia (p = 0,05) entre periodos p<0,05 p<0,05 p<0,05 p<0,05 p<0,05 p<0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05

### Calidad de agua según ECA – 2017, Categoría 3

Según los Estándares de Calidad de Agua – Categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales), los valores que excedieron los rangos permitidos fueron DBO<sub>5</sub> en el río Coata, el pH en todos los ríos evaluados y los coliformes termotolerantes en el río Desaguadero (Tabla 6).

### Estimación de carga contaminante

Respecto a la temporalidad (Fig. 4), en el periodo de estiaje (setiembre/octubre) el río Coata aportó altos contenidos de nitrógeno total (0,796 t/día), fósforo total (0,14 t/día) y DBO<sub>5</sub> (8,88 t/día), la confluencia (Ramis y Huancané) contribuyó con 4,07 t/día de SST. Sin embargo, la carga total de contaminantes entregados al lago en mayor proporción se observó en el periodo de avenidas (abril) así como la contribución de nitrógeno

### Water quality according to WQS – 2017, Category 3

According to the Water Quality Standards – Category 3 (vegetable irrigation and animal drinking), BOD<sub>5</sub> in the Coata River, pH in all the rivers evaluated, and thermotolerant coliforms in the Desaguadero River were the values that exceeded the permissible ranges (Table 6).

### Estimation of pollutant load

Regarding seasonality (Fig. 4), during the dry season (September/October), the Coata River contributed high levels of total nitrogen (0.796 t/day), total phosphorus (0.14 t/day), and BOD<sub>5</sub> (8.88 t/day), the confluence (Ramis and Huancané) contributed 4.07 t/day of TSS. The total pollutant load discharged into the lake was highest during the flood season (April), as was the contribution of total nitrogen (15.70 t/day),

Tabla 6.- Evaluación de la calidad de agua de los principales ríos del Lago Titicaca (sector peruano), según los Estándares de Calidad de Agua (D.S. N° 004-2017-MINAM). Abril y setiembre/octubre 2017

Table 6. Evaluation of the water quality of the main tributaries to Lake Titicaca (Peruvian sector), according to the Water Quality Standards (D.S. N° 004-2017-MINAM). April and September/October 2017

Parámetros	Unidad de medida	ECA - 2017: Categoría 3		Valores promedios (abril y setiembre de 2017)										
		D1: Riego de vegetales	D2: Bebida de animales	Río Desaguadero	Río Zapatilla	Río Ilave	Río Illpa	Río Coata	Río Ramis	Río Huancané	Confluencia Río Ramis - Huancané			
		Pte.	Pte.	Pte.	Desemb. Ilave	Pte. Illpa	Pte. Maravillas Coata	Pte. Ramis	Pte. Huancané					
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	15,20	14,35	13,65	13,40	13,00	13,35	14,15	16,25	16,95	14,05	
Clorofila-a	mg/m <sup>3</sup>	No aplica	No aplica	1,86	0,50	0,75	1,68	2,36	1,26	3,43	2,52	3,38	2,15	
Conductividad	µS/cm	2500	5000	1882,00	1157,00	489,05	422,45	1031,90	897,30	934,25	670,55	1062,15	749	
DBO <sub>5</sub>	mg/L	15	15	10,67	10,240	2,290	2,630	9,110	18,190	17,380	0,920	0,870	0,95	
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	mg/L	100	100	0,060	0,010	0,020	0,080	0,390	0,090	1,610	0,430	0,130	0,400	
Nitritos (NO <sub>2</sub> )	mg/L	10	10	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,120	0,230	0,010	0,010	0,010	
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥4	≥5	6,87	8,18	7,70	7,06	7,65	7,67	6,92	6,44	7,85	7,47	
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidades de pH	6,5 - 8,5	6,5 - 8,4	8,95	8,69	9,05	8,94	9,14	8,95	8,64	8,71	8,79	8,70	
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1000	1000	1260,00	27,90	123,90	278,50	4,80	18,00	20,00	272,25	101,50	122,25	

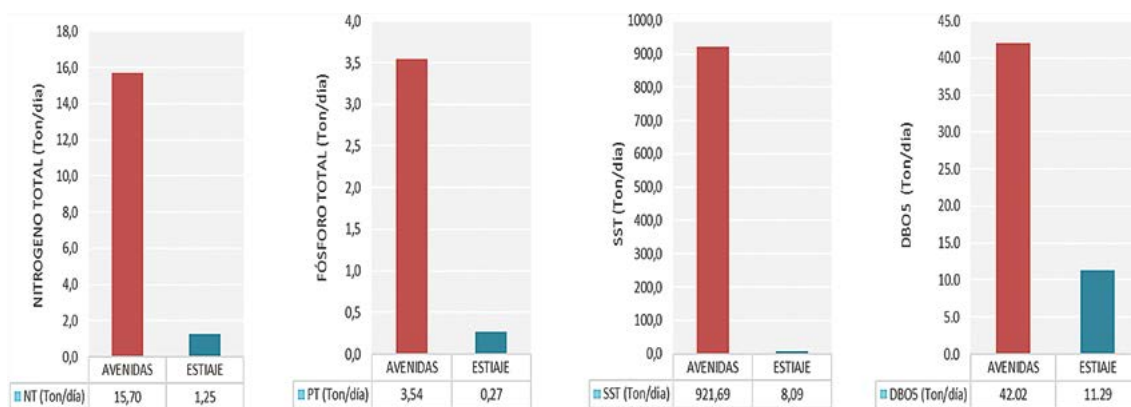


Figura 4.- Carga contaminante global. Variación entre periodos de evaluación. Tributarios al Lago Titicaca. Abril y setiembre/octubre 2017

Figure 4. Overall pollutant load. Variation between evaluation periods. Tributaries to Lake Titicaca (April and September/October 2017)

total (15,70 t/día), fósforo total (3,54 t/día), SST (921,69 t/día) y DBO<sub>5</sub> (42,02 t/día), mostrando disminución en época de estiaje (setiembre/octubre). En tanto, para el río Desaguadero se estimaron contenidos de DBO<sub>5</sub> en 8,09 t/día para el periodo de avenida (abril) y el fósforo total fue bajo (0,08 t/día) en el periodo de estiaje (setiembre/octubre), lo que estaría asociado a la actividad del comercio binacional que genera grandes cantidades de sólidos residuales.

Con relación a la comparación entre ríos (Tabla 7, Fig. 5), se reflejaron altos contenidos de nitrógeno total, fósforo total y SST en la confluencia de los ríos Ramis y Huancané, así como que, la contribución elevada de DBO<sub>5</sub> se observó en el río Coata.

total phosphorus (3.54 t/day), TSS (921.69 t/day), and BOD<sub>5</sub> (42.02 t/day), all of which decreased during the dry season (September/October). The BOD<sub>5</sub> content for the Desaguadero River was estimated at 8.09 t/day for the flood period (April) and total phosphorus was low (0.08 t/day) in the dry season (September/October), which would be associated with the binational trade activity that generates large amounts of solid waste.

As for the comparison between rivers (Table 7, Fig. 5), high contents of total nitrogen, total phosphorus, and TSS were found at the confluence of the Ramis and Huancané rivers, and a high contribution of BOD<sub>5</sub> was observed in the Coata River.

Tabla 7.- Estadístico de la carga contaminante (NT: Nitrógeno total, PT: Fosforo total, SST: Sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno). Ríos del Lago Titicaca (sector peruano). Abril y setiembre/octubre 2017

Table 7. Statistics of pollutant load (NT: Total Nitrogen, PT: Total Phosphorus, SST: Total Suspended Solids, DBO<sub>5</sub>: Biochemical Oxygen Demand). Tributaries to Lake Titicaca (Peruvian sector). April and September/October 2017

RÍO	LUGAR MUESTREO	ESTADÍSTICO	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	NT (Ton/día)	PT (Ton/día)	SST (Ton/día)	DBO <sub>5</sub> (Ton/día)
Desaguadero	Puente Desaguadero	Media	8,77	0,65	0,08	0,69	8,09
		Desv. Estandar	2,96	0,57	0,01	0,65	2,77
Zapatilla	Puente Zapatilla	Media	0,92	0,03	0,01	0,30	0,73
		Desv. Estandar	1,09	0,04	0,01	0,19	0,83
Ilave	Desemb. Ilave	Media	29,86	2,36	0,49	6,89	3,57
		Desv. Estandar	35,83	3,27	0,65	7,12	2,78
Coata	Puente Coata	Media	10,60	0,74	0,24	6,29	17,06
		Desv. Estandar	5,69	0,31	0,23	7,08	10,81
Ramis	Puente Ramis	Media	63,80	1,58	0,22	325,41	4,92
		Desv. Estandar	82,02	1,93	0,27	458,79	6,29
Huancane	Puente Huancane	Media	7,30	0,28	0,03	24,25	0,49
		Desv. Estandar	6,94	0,23	0,03	32,83	0,40
Confluencia (Ramis y Huancane)	Confluencia	Media	71,10	5,06	1,10	450,70	5,83
		Desv. Estandar	88,96	6,60	1,42	631,62	7,31
Nivel significancia (p=0,05) evaluación entre periodos			p<0,05	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p>0,05

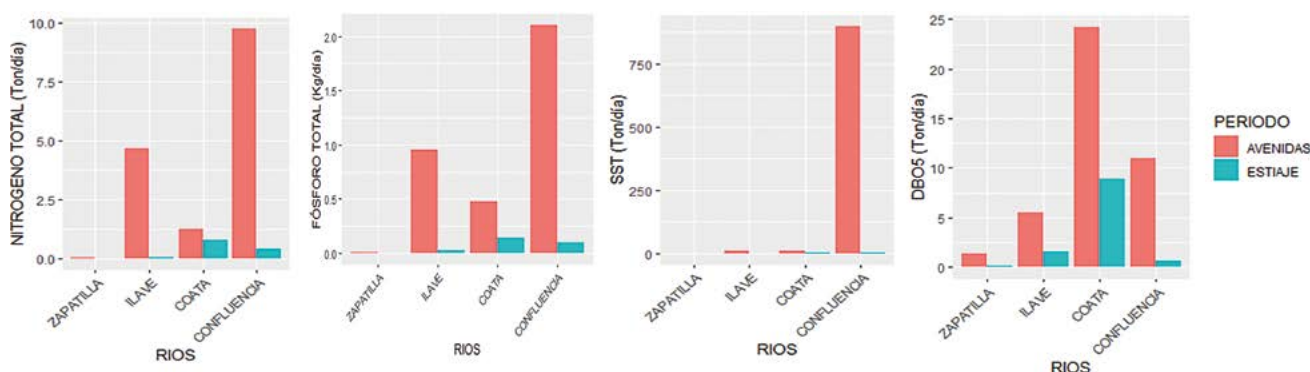


Figura 5.- Carga contaminante. Variación entre ríos y entre periodos de evaluación. Tributarios al Lago Titicaca. Agosto y setiembre/octubre 2017

Figure 5. Pollutant load. Variation between rivers and evaluation periods. Tributaries to Lake Titicaca (April and September/October 2017)



**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN PRINCIPALES EFLUENTES DE AGUAS RESIDUALES**

**Aspectos fisicoquímicos y biológicos**

Los resultados se muestran en la Tabla 8 y Fig. 6. Se observaron valores elevados de oxígeno disuelto en los efluentes de las lagunas de oxidación de Conima (10,92 mg/L), Juli (9,18 mg/L) y Tilali (6,70 mg/L), las concentraciones de coliformes termotolerantes fueron altos en todos los vertederos a excepción de Tilali (3500 NMP/100 mL) y Moho (146500 NMP/100 mL); además, en Tilali este valor se redujo casi a la mitad en setiembre. Se pudo observar también, que la temperatura y pH no presentaron variaciones significativas; la presencia de amonio, nitrato, nitrógeno total y DBO<sub>5</sub> se encontraron altos en el efluente de la laguna de oxidación de Puno. Los efluentes que aparentemente presentaron mejores características (Tilali y Conima) presentaron valores de pH elevados (9,05 y 9,17).

**Calidad de agua según límites máximos permisibles (LMP)**

Para efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (D.S. N° 003-2010-MINAM) (Tabla 9) se encontró la temperatura por debajo del LMP; sin embargo, los valores de pH, SST, DBO<sub>5</sub> y coliformes termotolerantes excedieron en la mayoría de las zonas evaluadas, de modo que el pH fue mayor al permitido por LMP en el efluente de la laguna de oxidación de Conima

**EVALUATION OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN THE MAIN WASTEWATER EFFLUENTS**

**Physicochemical and biological aspects**

Tabla 8 and Fig. 6 show the results. We observed high dissolved oxygen values in the effluents of the Conima (10.92 mg/L), Juli (9.18 mg/L), and Tilali (6.70 mg/L) oxidation ponds. The concentrations of thermotolerant coliforms were high in all the dumps except for Tilali (3500 NMP/100 mL) and Moho (146500 NMP/100 mL); moreover, this value was reduced by almost half in Tilali during September. Temperature and pH did not show significant variations; the presence of ammonium, nitrate, total nitrogen, and BOD<sub>5</sub> was found to be high in the effluent of the Puno oxidation pond. The effluents that had better characteristics (Tilali and Conima) showed high pH values (9.05 and 9.17).

**Water quality according to Maximum Permissible Limits (MPL)**

The temperature was found to be below the MPL for effluents from domestic or municipal wastewater treatment plants (D.S. N° 003-2010-MINAM) (Table 9). Nevertheless, the pH, TSS, BOD<sub>5</sub>, and thermotolerant coliforms values exceeded in most of the evaluated areas, so the pH was higher than the allowed by MPL in the effluent of the Conima oxidation pond in April

Tabla 8.- Estadístico de parámetros fisicoquímicos (T: Temperatura, CE: Conductividad eléctrica, pH: Potencial de hidrogeno, OD: Oxígeno disuelto, SAT: Saturación de oxígeno, NH<sub>4</sub>: Amonio, PO<sub>4</sub>: Fosfato, NO<sub>2</sub>: Nitrito, NO<sub>3</sub>, Nitrato, NT: Nitrógeno total, PT: Fósforo total, SST: Sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno, CT: Coliformes termotolerantes). Efluentes de aguas residuales. Lago Titicaca (sector peruano). Abril y setiembre/octubre 2017

Table 8. Statistics of physicochemical parameters (T: Temperature, CE: Electrical conductivity, pH: Hydrogen potential, OD: Dissolved oxygen, SAT: Oxygen saturation, NH<sub>4</sub>: Ammonium, PO<sub>4</sub>: Phosphate, NO<sub>2</sub>: Nitrite, NO<sub>3</sub>, Nitrate, NT: Total nitrogen, PT: Total phosphate, SST: Total suspended solids, DBO<sub>5</sub>: Biochemical oxygen demand, CT: Thermotolerant coliforms). Wastewater effluents. Lake Titicaca (Peruvian sector). April and September/October 2017

ZONA	EFLUENTE AGUAS RESIDUALES	ESTADÍSTICO	T (°C)	CE (µS/cm)	pH	OD (mg/L)	SAT (%)	NH <sub>4</sub> (mg/L)	PO <sub>4</sub> (mg/L)	NO <sub>2</sub> (mg/L)	NO <sub>3</sub> (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)	SST (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	CT (NMP/100 mL)
Desaguadero	Laguna oxidación	Media	15,80	1783,00	7,91	0,07	0,41	70,70	6,976	0,048	8,355	48,300	8,337	51,63	107,33	8,27E+05
		Desv. Estandar	2,55	203,65	0,16	0,03	0,56	28,19	1,295	0,013	3,717	1,782	4,915	72,66	59,87	1,09E+06
Yunguyo	Efluente	Media	13,25	1327,50	8,23	2,87	44,00	32,34	4,938	0,018	8,775	27,580	3,182	50,25	95,71	8,11E+05
		Desv. Estandar	0,21	598,92	0,16	1,81	28,57	0,50	0,266	0,000	4,062	7,326	1,454	66,82	38,12	1,12E+06
Pomata	PTAR	Media	13,10	699,65	8,23	0,79	12,11	29,05	6,185	0,016	3,965	14,700	5,776	21,25	103,46	8,07E+05
		Desv. Estandar	0,57	139,09	0,18	0,49	7,49	18,50	1,774	0,010	0,781	6,138	0,692	26,52	89,39	1,12E+06
Juli	Laguna oxidación	Media	13,65	795,90	8,49	9,18	141,50	37,62	4,899	0,070	6,116	13,720	6,673	187,50	112,73	8,09E+05
		Desv. Estandar	0,78	282,98	0,62	4,82	76,65	19,36	3,798	0,026	2,186	15,839	7,591	201,53	80,05	1,12E+06
Tilali	Laguna oxidación	Media	13,05	416,15	9,05	6,70	101,30	2,60	3,444	0,192	5,109	4,900	2,007	30,28	42,19	3,50E+03
		Desv. Estandar	0,07	148,28	1,18	7,78	117,95	2,19	0,816	0,260	5,034	3,762	2,054	37,51	23,77	1,56E+03
Conima	Laguna oxidación	Media	14,20	459,45	9,17	10,92	167,60	4,03	4,991	0,058	4,243	9,940	3,051	54,00	38,08	8,09E+05
		Desv. Estandar	1,84	47,45	0,18	1,87	20,65	0,29	0,803	0,049	2,681	8,514	0,761	33,23	12,14	1,12E+06
Moho	Laguna oxidación	Media	12,90	357,80	8,13	3,46	49,65	11,46	4,335	0,031	3,785	6,580	2,529	42,28	24,96	1,47E+05
		Desv. Estandar	1,27	28,43	0,18	0,44	4,31	5,97	0,395	0,032	0,029	1,386	1,731	27,54	2,42	1,89E+05
Puno	Laguna oxidación	Media	16,35	1790,50	8,20	0,15	2,46	74,99	6,339	0,079	10,277	58,240	4,389	154,38	142,77	1,20E+08
		Desv. Estandar	0,21	522,55	0,11	0,17	2,89	17,77	1,48	0,08	3,44	8,32	0,81	68,77	38,99	1,70E+08
Nivel significancia (p<0,05) entre periodos			p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05

en abril y setiembre/octubre (9,04 y 9,29) del mismo modo, para Juli en abril (8,93) y la laguna de oxidación de Tilali en setiembre/octubre (9,88). Los valores permitidos para SST sobrepasaron en setiembre para Juli y la laguna de oxidación de Puno (330 y 203 mg/L). Los valores de DBO<sub>5</sub> fueron superados para abril y setiembre/octubre en el efluente de la laguna de oxidación de Puno (115,2 y 170,33 mg/L), además de Desaguadero, Zepita, Yunguyo, Pomata, Juli, Conima y Moho (122,67; 149,67; 122,67; 166,67 y 169,33 mg/L) también fueron altos en setiembre. En cuanto a los valores de coliformes termotolerantes, se encontró que la laguna de oxidación de Tilali tuvo valores inferiores al LMP en los dos periodos evaluados, de modo que en los demás efluentes excedieron el valor permitido, con picos altos observados en abril y setiembre/octubre ( $3,50 \times 10^3$  y  $2,4 \times 10^8$  NMP/100 mL).

and September/October (9.04 and 9.29), as well as for Juli in April (8.93) and the Tilali oxidation pond in September/October (9.88). In September, the permitted values for TSS were exceeded for Juli and the Puno oxidation pond (330 and 203 mg/L). BOD<sub>5</sub> values were exceeded for April and September/October in the effluent from the Puno oxidation pond (115.2 and 170.33 mg/L), as well as Desaguadero, Zepita, Yunguyo, Pomata, Juli, Conima, and Moho (122.67; 149.67; 122.67; 166.67, and 169.33 mg/L) in September. Regarding thermotolerant coliform, we found that the Tilali oxidation pond had values below the MPL in the two periods evaluated, so in the other effluents, they exceeded the permitted value, with high peaks observed in April and September/October ( $3.50 \times 10^3$  and  $2.4 \times 10^8$  NMP/100 mL).

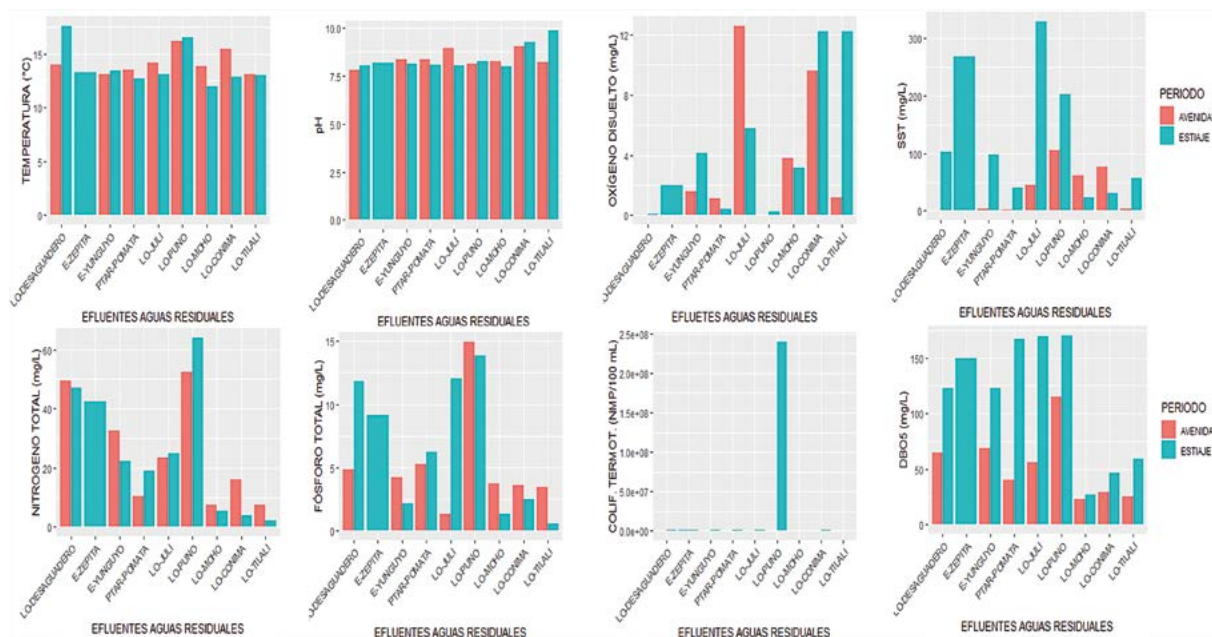


Figura 6.- Parámetros fisicoquímicos. Variación entre efluentes y entre periodos de evaluación. Efluentes de aguas residuales. Lago Titicaca. 2017

Figure 6. Physicochemical parameters. Variation between effluents and evaluation periods. Wastewater effluents. Lake Titicaca (2017)

Tabla 9.- Comparación de valores promedio evaluadas en efluentes de aguas residuales con descarga hacia el Lago Titicaca respecto a los Límites máximo-permisibles (D.S. N° 003-2010-MINAM). Abril y setiembre/octubre 2017

Table 9. Comparison of mean values assessed in wastewater effluents discharged into Lake Titicaca vs. the Maximum Permissible Limits (D.S. N° 003-2010-MINAM). April and September/October 2017

Parámetros	Unidad de medida	Límites máximo permisibles para efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales	Valores promedio evaluados en efluentes de aguas residuales - 2017							
			L. O. Desaguadero	E. Yunguyo	PTAR Pomata	L. O. Juli	L. O. Tilali	L. O. Conima	L. O. Moho	L. O. Puno
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	1,00E+04	8,27E+05	8,11E+05	8,07E+05	8,09E+05	3,50E+03	8,09E+05	1,47E+05	1,20E+08
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100	107,33	95,71	103,46	112,73	42,19	38,08	24,96	142,77
pH	unidad	6,5 - 8,5	7,91	8,23	8,23	8,49	9,05	9,17	8,13	8,20
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	150	51,63	50,25	21,25	187,5	30,28	54	42,28	154,38
Temperatura	°C	<35	15,8	13,25	13,1	13,65	13,05	14,2	12,9	16,35

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales, L.O.: Laguna de oxidación, E.: Efluente de aguas residuales

### Estimación de carga contaminante de efluentes de aguas residuales

La laguna de oxidación Espinar de Puno fue superior en aportes de caudal (174,00 L/s) y carga contaminante (854,33 kg/día de nitrógeno total, 216,33 kg/día de fósforo total, 2296,60 kg/día de SST y 2132,01 kg/día de DBO<sub>5</sub>), seguido por el efluente de la laguna de oxidación de Juli cuyas cargas contaminantes más resaltantes son los SST (81,97 kg/día) y DBO<sub>5</sub> (49,91 kg/día); la laguna de oxidación de Desaguadero presentó como principales aportes nitrógeno total (7,07 kg/día) y DBO<sub>5</sub> (12,45 kg/día) lo mismo ocurrió en Yunguyo (nitrógeno total 7,25 kg/día y DBO<sub>5</sub> 21,42 kg/día); el efluente de la laguna de oxidación de Moho reflejó un aporte de fósforo total que alcanzó 1,08 kg/día y SST 18,01 kg/día; la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Pomata presentó el valor más bajo en cuanto a SST (1,31 kg/día) al igual que la laguna de oxidación de Tilali (Tabla 10, Fig. 7). Los mayores aportes de carga contaminantes evidenciaron altos contenidos de materia orgánica generado por la población asentada en el anillo circunlacustre del lago Titicaca (OCOLA & LAQUI, 2017).

### Estimation of pollutant load of wastewater effluents

The Espinar oxidation pond in Puno had a higher flow (174.00 L/s) and pollutant load (854.33 kg/day of total nitrogen, 216.33 kg/day of total phosphorus, 2296.60 kg/day of TSS, and 2132.01 kg/day of BOD<sub>5</sub>), followed by the effluent from the Juli oxidation pond, whose most important pollutant loads are TSS (81.97 kg/day) and BOD<sub>5</sub> (49.91 kg/day). The main contributions of the Desaguadero oxidation pond were total nitrogen (7.07 kg/day) and BOD<sub>5</sub> (12.45 kg/day), which was also the case in Yunguyo (total nitrogen 7.25 kg/day and BOD<sub>5</sub> 21.42 kg/day). The effluent from the Moho oxidation pond showed a total phosphorus contribution of 1.08 kg/day and TSS of 18.01 kg/day, while the Pomata wastewater treatment plant (WWTP) had the lowest TSS value (1.31 kg/day), as did the Tilali oxidation pond (Table 10, Fig. 7). The highest contributions of pollutant load showed high organic matter content generated by the population settled in the circumlacustrine ring of Lake Titicaca (OCOLA & LAQUI, 2017).

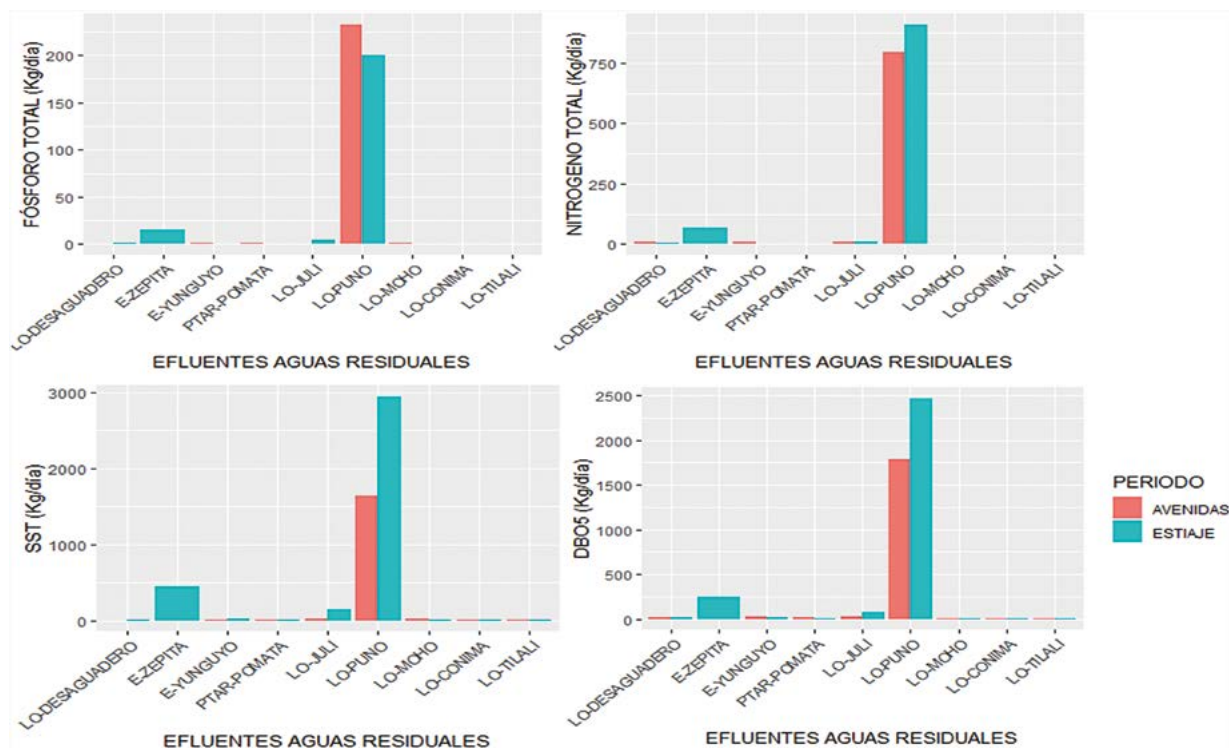


Figura 7.- Carga contaminante. Variación entre efluentes y entre periodos de evaluación. Efluentes de aguas residuales. Lago Titicaca. Abril y setiembre/octubre 2017

Figure 7. Pollutant load. Variation between effluents and evaluation periods. Wastewater effluents. Lake Titicaca (April and September/October 2017)



Tabla 10.- Estadístico de la carga contaminante (NT: Nitrógeno total, PT: Fósforo total, SST: Sólidos suspendidos totales, DBO5: Demanda bioquímica de oxígeno). Principales efluentes de aguas residuales. Lago Titicaca (sector peruano). Abril y setiembre/octubre 2017

Table 10. Statistics of pollutant load (NT: Total Nitrogen, PT: Total Phosphorus, SST: Total Suspended Solids, DBO<sub>5</sub>: Biochemical Oxygen Demand). Main wastewater effluents. Lake Titicaca (Peruvian sector). April and September/October 2017

ZONA	EFLUENTE AGUAS RESUALES	ESTADÍSTICO	CAUDAL (L/s)	NT (kg/día)	PT (kg/día)	SST (kg/día)	DBO <sub>5</sub> (kg/día)
Desaguadero	Laguna oxidación	Media	1,72	7,07	1,06	5,05	12,45
		Desv. Estandar	0,83	3,64	0,13	7,08	0,66
Yunguyo	Efluente	Media	2,90	7,25	0,89	8,10	21,42
		Desv. Estandar	1,56	5,43	0,79	9,99	3,31
Pomata	PTAR	Media	2,02	1,97	0,95	1,31	9,97
		Desv. Estandar	2,09	1,55	0,92	0,79	3,11
Juli	Laguna oxidación	Media	5,25	10,74	2,91	81,97	49,91
		Desv. Estandar	0,35	0,28	3,24	85,68	32,87
Tilali	Laguna oxidación	Media	1,23	0,61	0,27	2,23	3,86
		Desv. Estandar	0,61	0,64	0,32	2,40	0,31
Conima	Laguna oxidación	Media	0,95	1,13	0,28	5,75	2,64
		Desv. Estandar	0,92	1,46	0,30	7,02	2,03
Moho	Laguna oxidación	Media	4,70	2,66	1,08	18,01	10,06
		Desv. Estandar	0,71	0,94	0,86	13,77	0,54
Puno	Laguna oxidación	Media	174,00	854,33	216,61	2295,60	2132,01
		Desv. Estandar	8,49	80,60	22,69	920,63	481,42
Nivel significancia (p=0,05) entre periodos			p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05

Respecto a la temporalidad (Fig. 7), se observó que en periodo de estiaje (setiembre/octubre) se presentaron caudales relativamente bajos en todos los efluentes que en el periodo de avenidas (abril) y, que la carga de SST fue en la mayoría de los casos elevada en épocas de estiaje, mientras que la carga de nitrógeno y fósforo total fue mayor en época de avenidas, con excepción de la laguna de oxidación de Puno donde fueron mayores en periodo de estiaje.

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE PRINCIPALES BAHÍAS Y ZONAS ALEDAÑAS A LAS DESEMBOCADURAS**

**Aspectos fisicoquímicos y biológicos**

Estos aspectos muestran ligeras variaciones, a pesar de la importancia de las zonas del Lago Titicaca que fueron evaluadas según D.S. N° 075-2013-PCM. Se tomaron en consideración 5 lugares de muestreo, entre los cuales se encontraron las bahías de Desaguadero y la Interior de Puno, además de las desembocaduras de los ríos Ilave, Ramis y Coata. Estas locaciones son consideradas las más importantes por caudal, longitud y área de cuenca del Lago Titicaca.

En la Tabla 11 y Fig. 8, se encuentran los resultados. La temperatura máxima se registró en la bahía Interior de Puno (16,7 °C), mientras que en la bahía de Tilali se presentó bajo valor bajo (13,9 °C). El pH registró valores relativamente elevados, 9,63 en la bahía Interior de Puno, calificada como aguas con tendencias muy básicas. La DBO<sub>5</sub> muestra valores

Regarding seasonality (Fig. 7), we observed that in dry season (September/October) all effluent flows were relatively lower than in the flood season (April). In most cases, the TSS load was higher in the dry season, while the total nitrogen and total phosphorus load were higher during the flood season, except for the Puno oxidation pond, where they were higher in dry season.

**EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THE MAIN BAYS AND AREAS SURROUNDING THE RIVER MOUTHS**

**Physicochemical and biological aspects**

There were slight variations in these aspects, despite the importance of the areas of Lake Titicaca that were evaluated according to D.S. N° 075-2013-PCM. We considered 5 sampling sites, including the Desaguadero and Inner Puno bays, as well as the mouths of the Ilave, Ramis, and Coata rivers. These were the most important locations in terms of flow, length, and basin area of Lake Titicaca.

Table 11 and Fig. 8 show the results. In inner Puno Bay, the temperature peaked at 16.7 °C, while in Tilali Bay it was low at 13.9 °C. The pH recorded relatively high values of 9.63 in the inner Puno Bay, which is classified as water with very basic tendencies. BOD<sub>5</sub> showed maximum values of 24.38 mg/L for the inner

máximos de 24,38 mg/L para la bahía Interior de Puno, contrario a la bahía de Moho (1,03 mg/L) que registró valores bajos. Se encontraron, además altos contenidos de nutrientes en la bahía Interior de Puno y bahía de Yunguyo, la desembocadura de Coata alcanzó valores ligeramente elevados de nitrógeno total (0,560 mg/L) que estaría afectada por el aporte de altos volúmenes de aguas residuales, en tanto se encontraron valores bajos en la bahía de Moho y Conima. La clorofila-a máxima se registró en la bahía Interior de Puno (54,17 mg/m<sup>3</sup>) y la mínima (1,29 mg/m<sup>3</sup>) en la bahía de Moho.

Respecto a la temporalidad, los parámetros fisicoquímicos determinados no presentaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre periodos de avenidas (abril) y estiaje (setiembre/octubre); sin embargo, los nitratos marcaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) (Fig. 8).

#### **CALIDAD DE AGUA SEGÚN ECA-2017, CATEGORÍA 2 y 4**

Los valores que excedieron los rangos permisibles (Tabla 12) fueron la conductividad eléctrica, fósforo total y nitrógeno total en la mayor parte de las zonas evaluadas; sin embargo, la bahía Interior de Puno y la de Yunguyo presentaron rangos altos de pH, fósforo total, nitrógeno total, clorofila-a, sólidos suspendidos totales y la demanda bioquímica de oxígeno que excedieron los rangos establecidos por los ECAs – Categoría 4, que estaría asociado al aumento de nutrientes (fertilizantes, detergentes, aguas residuales domésticas e industriales) por actividades antrópicas.

#### **Estado trófico según OCDE (1982)**

Esta categorización facilita una representación cuantitativa probabilística del grado de eutrofia en base a la concentración de fósforo total, clorofila-a y de la disponibilidad del espectro fotosintético en la columna de agua (transparencia). La concentración de fósforo se estimó como una condición hipertrófica a la bahía Interior de Puno y Yunguyo, en tanto las bahías de Desaguadero, Pomata, Juli, Conima, Tilali, zonas de desembocadura de los ríos Ilave, Ramis y Coata fueron catalogados como eutróficos (Tabla 13).

Así mismo, mediante la concentración de clorofila-a, se evaluó como hipertrófico a la bahía Interior de Puno y Yunguyo; las bahías de Juli, Conima, Tilali y la desembocadura de Coata como

Puno Bay, unlike Moho Bay (1.03 mg/L), which recorded low values. The Coata River mouth reached slightly elevated values of total nitrogen (0.560 mg/L), which would be affected by the contribution of high volumes of wastewater, while low values were found in Moho and Conima bays. The maximum chlorophyll-a was recorded in the inner Puno Bay (54.17 mg/m<sup>3</sup>), while the Moho Bay recorded the minimum values (1.29 mg/m<sup>3</sup>).

Regarding seasonality, no significant differences ( $p > 0,05$ ) were found in the physicochemical parameters determined between the flood (April) and dry (September/October) seasons. However, nitrates showed significant differences ( $p < 0,05$ ) (Fig. 8).

#### **WATER QUALITY ACCORDING TO WQS-2017, CATEGORIES 2 AND 4**

Electrical conductivity, total phosphorus, and total nitrogen exceeded the permissible ranges in most of the evaluated zones (Table 12). The inner Puno Bay and Yunguyo Bay exhibited high ranges of pH, total phosphorus, total nitrogen, chlorophyll-a, total suspended solids, and biochemical oxygen demand which exceeded the ranges established by the WQS – Category 4, which would be associated with an increase in nutrients (fertilizers, detergents, domestic, and industrial wastewater) from anthropogenic activities.

#### **Trophic status according to OECD (1982)**

This categorization offers a probabilistic quantitative representation of the degree of eutrophication based on the concentration of total phosphorus, chlorophyll-a, and the availability of the photosynthetic spectrum in the water column (transparency). Phosphorus concentration was estimated as a hypertrophic condition in the inner Puno and Yunguyo bays, while the bays of Desaguadero, Pomata, Juli, Conima, Tilali, and the mouth areas of the Ilave, Ramis, and Coata rivers were classified as eutrophic (Table 13).

Likewise, chlorophyll-a concentration determined that the inner Puno and Yunguyo bays were hypertrophic; the bays of Juli, Conima, Tilali, and the Coata River mouth were mesotrophic;

mesotrófica; las bahías de Desaguadero, Pomata, Moho, además las desembocaduras de los ríos Ilave y Ramis como oligotrófica (Tabla 13).

the bays of Desaguadero, Pomata, Moho, and the mouths of the Ilave and Ramis rivers were oligotrophic (Table 13).

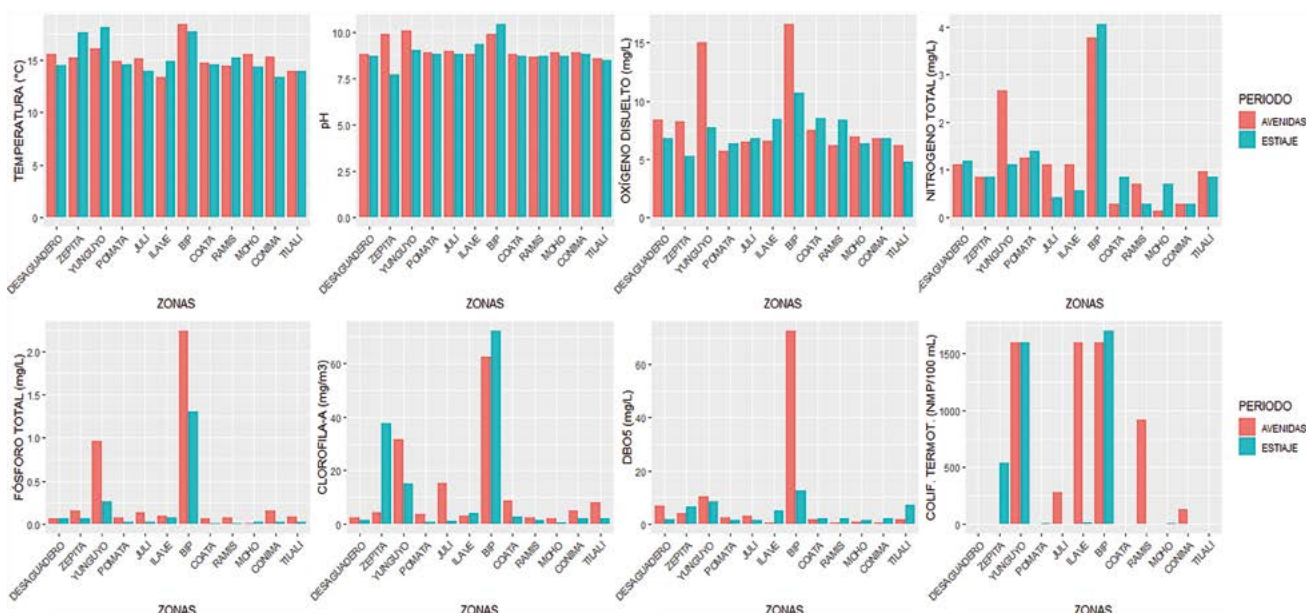


Figura 8.- Parámetros fisicoquímicos. Variación entre bahías y entre periodos de evaluación. Lago Titicaca. Abril y setiembre/octubre 2017

Figure 8. Physicochemical parameters. Variation between bays and evaluation periods. Lake Titicaca (April and September/October 2017)

Tabla 11.- Estadístico de la distribución superficial de Parámetros fisicoquímicos (T: Temperatura, CE: Conductividad eléctrica, pH: Potencial de hidrogeno, OD: Oxígeno disuelto, SAT: Saturación de oxígeno, NH<sub>4</sub>: Amonio, PO<sub>4</sub>: Fosfato, NO<sub>2</sub>: Nitrito, NO<sub>3</sub>: Nitrato, NT: Nitrógeno total, PT: Fósforo total, Chl-a: Clorofila-a, SST: Sólidos suspendidos totales, DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno, CT: Coliformes termotolerantes, TRANSP: Transparencia), en bahías y zonas de desembocaduras del Lago Titicaca (sector peruano), Agosto y setiembre/octubre 2017

Table 11. Statistics of surface distribution of Physicochemical parameters (T: Temperature, CE: Electrical conductivity, pH: Hydrogen potential, OD: Dissolved oxygen, SAT: Oxygen saturation, NH<sub>4</sub>: Ammonium, PO<sub>4</sub>: Phosphate, NO<sub>2</sub>: Nitrite, NO<sub>3</sub>: Nitrate, NT: Total nitrogen, PT: Total phosphorus, Chl-a: Chlorophyll-a, SST: Total suspended solids, DBO<sub>5</sub>: Biochemical oxygen demand, CT: Thermotolerant coliforms, TRANSP: Transparency), in bays and mouth areas of Lake Titicaca (Peruvian sector), August and September/October 2017

LUGAR MUESTREO	ESTADÍSTICO	T (°C)	CE (µS/cm)	pH	OD (mg/L)	SAT (%)	NH <sub>4</sub> (mg/L)	PO <sub>4</sub> (mg/L)	NO <sub>2</sub> (mg/L)	NO <sub>3</sub> (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)	Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	SST (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	CT (NMP/100 mL)	TRANSP (m)
Bahía Desaguadero - Lago Menor	Media	15,00	1876,50	8,76	7,62	119,80	1,94	0,017	0,005	0,029	1,150	0,067	2,14	1,38	4,41	1,80	2,25
	Desv. Estandar	0,71	55,86	0,03	1,15	19,80	0,31	0,000	0,003	0,026	0,042	0,002	0,73	0,53	3,46	0,00	0,35
Bahía de Yunguyo	Media	16,70	1117,75	9,47	9,93	161,35	3,01	0,725	0,175	0,377	1,330	0,351	21,11	33,33	8,61	1205,75	0,40
	Desv. Estandar	1,02	307,63	0,57	4,09	63,34	2,20	0,745	0,171	0,409	0,904	0,415	10,52	14,16	1,33	788,50	0,12
Bahía de Pomata	Media	14,63	1510,25	8,80	5,90	91,88	1,37	0,081	0,012	0,075	0,910	0,044	1,68	1,94	2,05	2,28	2,40
	Desv. Estandar	0,31	14,82	0,09	0,62	9,39	0,19	0,038	0,017	0,094	0,492	0,025	1,37	1,56	0,62	0,95	0,84
Bahía de Juli	Media	14,48	1504,75	8,88	6,56	106,13	1,27	0,100	0,009	0,033	0,630	0,056	5,25	0,56	2,15	75,20	4,78
	Desv. Estandar	0,72	10,53	0,12	0,21	9,57	0,12	0,095	0,008	0,043	0,435	0,056	6,91	0,24	0,73	136,72	2,19
Frente desembocadura Río Ilave - Lago Mayor	Media	14,00	848,50	8,91	6,98	106,68	0,57	0,135	0,007	0,066	0,700	0,075	2,32	1,31	2,03	633,70	2,75
	Desv. Estandar	0,88	500,78	0,31	0,98	17,24	0,27	0,085	0,003	0,076	0,361	0,032	1,60	1,05	2,00	774,65	2,36
Frente desembocadura Río Ramis - Lago Mayor	Media	14,53	808,48	8,61	6,85	106,13	0,45	0,042	0,005	0,404	0,455	0,037	1,76	9,44	1,26	365,95	0,53
	Desv. Estandar	0,59	382,85	0,12	1,07	17,40	0,29	0,008	0,003	0,459	0,289	0,036	0,43	10,63	0,80	448,08	0,34
Frente desembocadura Río Coata	Media	14,65	1115,00	8,77	8,00	126,90	0,80	0,107	0,018	0,300	0,560	0,041	5,74	6,50	2,01	1,90	2,70
	Desv. Estandar	0,07	519,02	0,08	0,74	10,04	0,23	0,003	0,012	0,358	0,396	0,039	4,16	4,24	0,04	0,14	0,42
Bahía Interior de Puno	Media	16,78	1672,75	9,63	9,31	150,05	8,14	0,947	0,101	0,084	2,555	1,068	54,17	25,63	24,38	826,45	0,30
	Desv. Estandar	1,60	106,11	0,85	6,77	107,71	10,94	0,470	0,047	0,039	1,606	0,902	16,76	15,51	32,30	951,83	0,12
Bahía de Moho	Media	14,78	1496,25	8,80	6,59	103,43	0,98	0,058	0,003	0,008	0,266	0,017	1,29	2,19	1,03	2,50	5,00
	Desv. Estandar	0,86	14,29	0,12	0,35	7,64	0,19	0,046	0,004	0,006	0,291	0,012	0,87	2,54	0,48	1,04	1,15
Bahía de Conima	Media	14,20	1498,50	8,84	6,76	104,03	1,12	0,067	0,005	0,008	0,210	0,061	3,47	6,81	1,27	39,15	8,00
	Desv. Estandar	1,00	13,87	0,12	0,04	1,65	0,10	0,030	0,005	0,007	0,081	0,064	1,81	11,63	0,71	61,39	2,31
Bahía de Tilali	Media	13,9	1764,5	8,5	5,5	84,9	1,4	0,037	0,008	0,021	0,910	0,059	5,07	6,62	4,56	1,90	1,90
	Desv. Estandar	0,00	174,66	0,04	1,00	15,13	0,09	0,028	0,007	0,011	0,099	0,037	4,27	4,42	3,76	0,14	0,14

Nivel significancia (p=0,05) entre periodos p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p<0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05 p>0,05

Respecto a la disponibilidad del espectro fotosintético (transparencia) se catalogó como hipertrofico a la bahía Interior de Puno, Yunguyo y la desembocadura del río Ramis; y eutrófico la bahía de Desaguadero, Pomata, Tilali, desembocaduras de los ríos Ilave y Coata; mesotrófica las bahías de Juli y Moho; finalmente la bahía de Conima como oligotrófico (Tabla 13).

Regarding the availability of the photosynthetic spectrum (transparency), the inner Puno Bay, Yunguyo, and the Ramis River mouth were classified as hypertrophic. The Desaguadero Bay, Pomata, Tilali, and the Ilave and Coata river mouths were classified as eutrophic, while the Juli and Moho bays were classified as mesotrophic, and finally, the Conima Bay was classified as oligotrophic (Table 13).

Tabla 12.- Evaluación de la calidad de agua (T: Temperatura, CE: Conductividad eléctrica, pH: Potencial de hidrogeno, OD: Oxígeno disuelto, NT: Nitrógeno total, PT: Fósforo total, Chl-a: Clorofila-a, SST: Sólidos suspendidos totales, DBO5: Demanda bioquímica de oxígeno y CT: Coliformes termotolerantes) de los principales bahías y zonas de desembocaduras del lago Titicaca (sector peruano), según los Estándares de Calidad de Agua (D.S. N° 004-2017-MINAM). Lago Titicaca. Abril y setiembre/octubre 2017

Table 12. Water quality assessment (T: Temperature, CE: Electrical conductivity, pH: Hydrogen potential, OD: Dissolved oxygen, NT: Total nitrogen, PT: Total phosphorus, Chl-a: Chlorophyll-a, SST: Total suspended solids, DBO5: Biochemical oxygen demand, and CT: Thermotolerant coliforms) of the main bays and mouth areas of Lake Titicaca (Peruvian sector), according to the Water Quality Standards (D.S. N° 004-2017-MINAM). Lake Titicaca. April and September/October 2017

Parámetros	Unidad de medida	ECA - 2017		Valores promedios (abril y setiembre de 2017)										
		Categoría 2. C4: Extracción y especies hidrobiológicos en lagos y lagunas	Categoría 4. E1: Lagunas y lagos	Bahía Desaguadero	Bahía Yunguyo	Bahía Pomata	Bahía Juli	Desemb. Río Ilave	Desemb. Río Ramis	Desemb. Río Coata	Bahía Interior Puno	Bahía Moho	Bahía Conima	Bahía Tilali
Clorofila-a	mg/m <sup>3</sup>	No aplica	8,00	2,14	21,11	1,68	5,25	2,32	1,76	5,74	54,17	1,29	3,47	5,07
Conductividad	µS/cm	No aplica	1000	3876,5	1117,8	1510,3	1504,8	848,5	808,5	1115,0	1672,8	1496,3	1498,5	1764,8
DBO <sub>5</sub>	mg/L	10	5	4,41	8,61	2,05	2,15	2,03	1,26	2,01	24,38	1,03	1,27	4,56
Fósforo Total	mg/L	0,062	0,035	0,067	0,351	0,044	0,056	0,075	0,037	0,041	1,068	0,017	0,061	0,059
Nitrógeno Total	mg/L	No aplica	0,315	1,150	1,330	0,910	0,630	0,700	0,455	0,560	2,555	0,266	0,210	0,910
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	mg/L	13	13	0,029	0,377	0,075	0,033	0,066	8,610	0,300	0,084	0,008	0,008	0,021
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥3	≥5	7,62	9,93	5,90	6,56	6,98	6,85	8,00	9,31	6,39	6,76	5,50
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidades de pH	6,8-8,5	6,5-9,0	8,76	9,47	8,80	8,88	8,91	8,61	8,77	9,63	8,80	8,84	8,50
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	No aplica	≤25	1,38	33,33	1,94	0,56	1,31	9,44	6,50	25,63	2,19	6,81	6,62
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	≤30	1000	1,80	1305,75	2,28	75,20	633,70	365,95	1,90	826,45	2,50	39,15	1,90

Tabla 13.- Categorización del estado trófico según la OCDE (1982) para las bahía y desembocaduras de los principales afluentes. Abril y setiembre/octubre 2017

Table 13. Trophic status categorization according to OECD (1982) for the bay and mouths of the main tributaries (April and September/October 2017)

Parámetros	OCDE (1982)		Bahía Desaguadero	Bahía Yunguyo	Bahía Pomata	Bahía Juli	Desemb. Río Ilave	Desemb. Río Ramis	Desemb. Río Coata	Bahía Interior Puno	Bahía Moho	Bahía Conima	Bahía Tilali
	Categoría Trófica	Rango											
Clorofila-a (mg/m <sup>3</sup> )	Ultraoligotrófico	< 1											
	Oligotrófico	1 - 2,5	2,14		1,68		1,76						
	Mesotrófico	2,5 - 7,9				5,25		5,74			1,29	3,47	5,07
	Eutrófico	8,0 - 25,0		21,11									
	Hipertrofico	> 25,0								54,17			
Transparencia al Disco Secchi (m)	Ultraoligotrófico	> 12,0											
	Oligotrófico	6 a 12											8,00
	Mesotrófico	3,0 a 6,0				4,78					5,00		
	Eutrófico	1,5 a 3,0	2,25		2,40		2,75		2,70				1,90
	Hipertrofico	< 1,5		0,40				0,53		0,30			
Fósforo Total (mg/L)	Ultraoligotrófico	< 0,004											
	Oligotrófico	0,004 a 0,010											
	Mesotrófico	0,010 a 0,035									0,017		
	Eutrófico	0,035 a 0,100	0,067		0,044	0,056	0,075	0,037	0,041			0,061	0,059
	Hipertrofico	> 0,100		0,351						1,068			

#### 4. DISCUSIÓN

##### Condiciones ambientales de los principales ríos

Los parámetros fisicoquímicos evaluados, mostraron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en las variables de temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, amonio, fósforo total y coliformes termotolerantes; sin embargo, no se detectaron diferencias significativas entre los periodos de avenidas y estiaje ( $p > 0,05$ ) los fosfatos, nitritos, nitratos, nitrógeno total, clorofila-a, SST y  $DBO_5$ , estarían influenciados por el flujo de caudal asociado a la temporalidad (DEJOUX & ILTIS, 1991; WETZEL, 2001; ROLDAN, 2008), cuando la temperatura más elevada se presentó en setiembre/octubre, temporada de estiaje, y bajas al finalizar el periodo de avenidas (abril). Los valores de conductividad eléctrica registraron valores altos en la temporada de estiaje (setiembre/octubre), según RODIER (1998) la relación que existe entre la mineralización y la conductividad es de  $333 \mu\text{S}/\text{cm}$  a  $666 \mu\text{S}/\text{cm}$ , mineralización media acentuada, en este rango se encuentra el río Ilave, mientras que la conductividad  $>1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  se considera mineralización elevada, en el caso del río Desaguadero la mineralización fue alta.

En tanto, el pH registró tendencias básicas, de acuerdo con la evaluación realizada por la Autoridad Nacional del Agua en el 2016 (ANA, 2016), estos valores coinciden con los obtenidos en el presente estudio. El oxígeno disuelto presentó valores adecuados para la vida acuática (ROLDAN, 2008) con buena saturación de oxígeno, ANA (2016) registró similares valores. Los nitritos, nitratos, amonio y nitrógeno total se encontraron en gran proporción en los ríos Coata y Desaguadero. Para la confluencia de los ríos Ramis y Huancané mostraron ligeros incrementos. Es importante mencionar que los procesos de metabolización del nitrógeno orgánico y amoniacal se ven favorecidos por niveles de oxígeno disuelto a  $0,3 \text{ mg}/\text{L}$  y pH entre 6 y 9,6 unidades (FUENTES & MASS-DEYÁ, 2002).

Así mismo, las concentraciones elevadas de fosfatos y fósforo total observados en los ríos Ilave, Coata y en menor proporción en la confluencia (Huancané y Ramis), estarían asociados a los afluentes de aguas residuales de la actividad antrópica (FONTÚRBEL, 2005; JOHANNA & ABELLA,

#### 4. DISCUSSION

##### Environmental conditions of the main rivers

Significant differences ( $p < 0.05$ ) were found for temperature, electrical conductivity, pH, dissolved oxygen, ammonium, total phosphorus, and thermotolerant coliforms. Conversely, no significant differences were detected between the flood and dry seasons ( $p > 0.05$ ). Phosphates, nitrites, nitrates, total nitrogen, chlorophyll-a, TSS, and  $BOD_5$ , would be influenced by the flow rate associated with seasonality (DEJOUX & ILTIS, 1991; WETZEL, 2001; ROLDAN, 2008), when the temperature peaked in September/October, dry season, and dropped towards the end of the flood season (April). The electrical conductivity recorded high values during the dry season (September/October). According to RODIER (1998), the relationship between mineralization and conductivity ranges from  $333 \mu\text{S}/\text{cm}$  to  $666 \mu\text{S}/\text{cm}$ , which is a medium to high mineralization, the Ilave River is in this range, while conductivity  $>1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  is considered high mineralization, as in the Desaguadero River.

According to the evaluation carried out by the *Autoridad Nacional del Agua* - the Peruvian National Water Authority - in 2016 (ANA, 2016), the pH values recorded basic tendencies; these values coincide with those obtained in our study. Dissolved oxygen had values that were suitable for aquatic life (ROLDAN, 2008) with good oxygen saturation, ANA (2016) recorded similar values. In the Coata and Desaguadero rivers, we found a high proportion of nitrites, nitrates, ammonium, and total nitrogen. There were slight increases at the confluence of the Ramis and Huancané rivers. It is noteworthy that organic and ammonia nitrogen metabolization processes are favored by dissolved oxygen levels at  $0.3 \text{ mg}/\text{L}$  and pH entre 6 and 9.6 units (FUENTES & MASS-DEYÁ, 2002).

Likewise, the high concentrations of phosphates and total phosphorus observed in the Ilave and Coata rivers, and to a lesser extent in the confluence (Huancané and Ramis), would be associated with anthropogenic wastewater effluents (FONTÚRBEL, 2005; JOHANNA & ABELLA, 2012). Chlorophyll-a reached high concentrations



2012). Por otro lado, la clorofila-a alcanzó concentraciones elevadas en el río Coata, lo que estaría asociado a presencia de altos contenidos de nutrientes (NORTHCOTE, 1991). El aporte de sólidos suspendidos totales (SST) fueron elevados en el periodo de avenidas (abril) y bajos en época de estiaje (setiembre/octubre); estaría asociado a la remoción y arrastre de sedimentos en temporada de lluvias como se observó en el río Coata y confluencia de los ríos Ramis-Huancané (NORTHCOTE, 1991; DEJOUX & ILTIS, 1991).

Los ríos Coata y Desaguadero aportaron altos contenidos de coliformes termotolerantes y materia orgánica expresado en demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), probablemente el incremento corresponda al arrastre de residuos antrópicos provenientes de la ciudad de Juliaca y Desaguadero, respectivamente (NORTHCOTE, 1991; POUILLY *et al.*, 2014) en comparación al estudio realizado el 2014 los valores obtenidos para el río Coata fueron ligeramente menores (IMARPE, 2014). ANA (2016) reportó valores altos de  $DBO_5$  en el río Coata, sin embargo, respecto a coliformes termotolerantes difieren ligeramente en los monitoreos realizados a los ríos Desaguadero, Ilave, Coata, Ramis y Huancané.

En relación con la contribución de la carga contaminante, las variables que explicaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) entre los periodos evaluados fueron los aportes de nitrógeno total, fósforo total y SST que dependerían del caudal máximo observado en el periodo de avenidas (abril) donde la carga contaminante es mayor que en el periodo de estiaje (setiembre/octubre), esto no ocurrió con el aporte de  $DBO_5$  que no estaría influenciado por el flujo de caudal. Así mismo, según DEJOUX & ILTIS (1991), en 1981 – 1982 y VINCENT *et al.* (1986) reportaron aporte de carga en nutrientes de los ríos en 10,137 t/día de nitrógeno total y 3,342 t/día de fósforo total, en contraste con lo estimado en abril y setiembre/octubre de 2017 (nitrógeno total 15,70 t/día, fósforo total 3,54 t/día) que se ha incrementado a razón de 0,65 y 0,94, respectivamente. Según los Estándares de Calidad de Agua – Categoría 3 (Riego de vegetales y bebida de animales), la  $DBO_5$  excedió los rangos permisibles en el río Coata, los coliformes termotolerantes en el río Desaguadero; sin embargo, el pH fue alto en todos los ríos evaluados. ANA (2016) reportó altos valores de  $DBO_5$  y coliformes termotolerantes en los ríos Coata y Desaguadero.

in the Coata River, which would be associated with the occurrence of high nutrient contents (NORTHCOTE, 1991). The total suspended solids (TSS) were high during the flood season (April) and low during the dry season (September/October). This would be associated with the removal and dragging of sediments during the rainy season, as observed in the Coata River and the confluence of the Ramis-Huancané rivers (NORTHCOTE, 1991; DEJOUX & ILTIS, 1991).

The Coata and Desaguadero rivers contributed high contents of thermotolerant coliforms and organic matter expressed in biochemical oxygen demand ( $BOD_5$ ). The increase probably corresponds to the dragging of anthropogenic waste from the city of Juliaca and Desaguadero, respectively (NORTHCOTE, 1991; POUILLY *et al.*, 2014); when compared to the 2014 study, the values obtained for the Coata River were slightly lower (IMARPE, 2014). ANA (2016) reported high  $BOD_5$  values in the Coata River, although thermotolerant coliforms differed slightly in the monitoring of the Desaguadero, Ilave, Coata, Ramis, and Huancané rivers.

Regarding the contribution of the pollutant load, there were significant differences ( $p < 0.05$ ) between the periods evaluated for total nitrogen, total phosphorus, and TSS, which depended on the maximum flow observed in the flood season (April) where the pollutant load is greater than in the dry season (September/October). This was not the case for the contribution of  $BOD_5$  which was not influenced by the flow rate. Also, DEJOUX & ILTIS (1991), in 1981 – 1982, and VINCENT *et al.* (1986) reported nutrient load contribution in rivers at 10,137 t/day of total nitrogen and 3,342 t/day of total phosphorus, unlike what was estimated in April and September/October 2017 (total nitrogen 15.70 t/day, total phosphorus 3.54 t/day) which has increased at the rate of 0.65 and 0.94, respectively. According to Water Quality Standards – Category 3 (Vegetable irrigation and animal drinking),  $BOD_5$  exceeded permissible ranges in the Coata River, and thermotolerant coliforms in the Desaguadero River, but pH was high in all rivers evaluated. ANA (2016) recorded high  $BOD_5$  and thermotolerant coliforms in the Coata and Desaguadero rivers.

### Condiciones ambientales de afluentes de aguas residuales que aportan al lago Titicaca

Los parámetros fisicoquímicos evaluados no mostraron estadísticamente diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), por tanto, se puede asumir que no hay influencia de la temporalidad. Cabe mencionar, las aguas de la laguna de oxidación de Conima, Tilali y Juli registraron buena oxigenación respecto a las bajas concentraciones de este gas encontradas en la laguna de oxidación de Puno que registró valores elevados de nitrógeno y fósforo totales. Así mismo, se encontraron altos valores de coliformes termotolerantes en todas las zonas excepto en Tilali y Moho, según el diagnóstico situacional de las plantas de tratamiento de aguas residuales, elaborado por SUNASS y GIZ (GORE, 2018) que indican que las ciudades vierten las aguas residuales sin tratamiento o inadecuado tratamiento al lago Titicaca. Los mayores aportes de carga contaminantes evidencian altos contenidos de materia orgánica generado por la población asentada en el anillo circunlacustre del lago Titicaca (OCOLA & LAQUI, 2017).

Pnuma (2011), citado por MINAM (2013) encontró que el aporte de  $\text{DBO}_5$  en los sistemas de tratamiento de la municipalidad provincial de Puno fue de 578 t de  $\text{DBO}_5/\text{año}$ , en abril y setiembre/octubre 2017 habría sido superado ampliamente solo por el efluente de la laguna de oxidación de Puno que aportaría 778,2 t de  $\text{DBO}_5/\text{año}$ , es decir 200,2 t de  $\text{DBO}_5/\text{año}$  más que el reporte del año 2011. El tratamiento inadecuado e insuficiente de las aguas residuales urbanas se evidencian en altas cantidades de nitrógeno y fósforo totales que son considerados parámetros críticos de la calidad del agua por la fragilidad de los ecosistemas acuáticos andinos (ANA, 2014), pues estos conllevan a un proceso de eutrofización (NORTHCOTE *et al.*, 1991; BELTRÁN *et al.* 2015).

### Evaluación de las condiciones ambientales de las principales bahías y zonas de desembocaduras del lago Titicaca

Según el análisis estadístico no se presentó diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre periodos evaluados de los parámetros fisicoquímicos, por tanto, se puede asumir que no influyen las temporadas de evaluación (abril y setiembre/octubre); sin embargo, los nitratos sí marcaron una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ). Según DEJOUX & ILTIS (1991), las zonas poco profundas muestran

### Environmental conditions of wastewater tributaries to Lake Titicaca

We can assume that seasonality does not have an influence on the physicochemical parameters evaluated since no statistically significant differences were found ( $p > 0.05$ ). It is noteworthy that the waters of the Conima, Tilali and Juli oxidation ponds showed good oxygenation compared to the low concentrations found in the Puno oxidation pond, where high values of total nitrogen and total phosphorus occurred. High values of thermotolerant coliforms were also found in all areas except in Tilali and Moho, according to the situational diagnosis of wastewater treatment plants, prepared by SUNASS and GIZ (GORE, 2018) which indicate that the cities discharge wastewater without treatment or inadequate treatment into Lake Titicaca. The highest pollutant load contributions show high organic matter content generated by the population settled in the circumlacustrine ring of Lake Titicaca (OCOLA & LAQUI, 2017).

Pnuma (2011), cited by MINAM (2013), found that the contribution of  $\text{BOD}_5$  in the treatment systems of the provincial municipality of Puno was 578 t of  $\text{BOD}_5/\text{year}$ , in April and September/October 2017 would have far exceeded only the effluent of the Puno oxidation pond that would contribute 778.2 t of  $\text{BOD}_5/\text{year}$ , *i.e.*, 200.2 t of  $\text{BOD}_5/\text{year}$  more than the 2011 report. Inadequate and insufficient treatment of urban wastewater is evidenced by high amounts of total nitrogen and total phosphorus, which are considered critical parameters of water quality due to the fragility of Andean aquatic ecosystems (ANA, 2014), as they lead to a eutrophication process (NORTHCOTE *et al.*, 1991; BELTRÁN *et al.* 2015).

### Evaluation of the environmental conditions of the main bays and mouth areas of Lake Titicaca

There were no significant differences ( $p > 0.05$ ) between the periods evaluated for the physicochemical parameters, so we can assume that seasonality (April and September/October) does not have an influence, although nitrates did show a significant difference ( $p < 0.05$ ). According to DEJOUX & ILTIS (1991), shallow areas show a polymictic condition, associated with meteorological



una condición polimíctica, asociada a las condiciones meteorológicas, los resultados indican que las temperaturas altas se registraron en la bahía Interior de Puno mientras que en la bahía de Tilali fueron bajas, ANA (2013, 2014 y 2016) reportó valores similares. El pH registró tendencias básicas, la Autoridad Nacional del Agua reportó resultados un tanto similares (7,47 a 8,78) (ANA, 2013), 9,48 a 10,07 (ANA, 2014) y 8,73 a 9,18 (ANA, 2016). El oxígeno disuelto presentó valores muy elevados en la bahía Interior de Puno y Yunguyo con sobresaturación mayor al 100%; estudios de ANA (2013), reportaron valores altos (> 9,27 mg/L) que coinciden con el presente estudio, cabe precisar que estas bahías estarían influenciadas principalmente por los procesos fotosintéticos y la distribución hidromecánica de este gas (ANA, 2013). La conductividad eléctrica registró valores >1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con valores mínimos en la desembocadura del río Ramis (808,48  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); según RODIER (1998), indica que los valores de la relación que existe entre la mineralización y la conductividad es de 333  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 666  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en tal sentido podríamos suponer que existe alta mineralización en las zonas antes mencionadas. Los altos contenidos de la  $\text{DBO}_5$  y nutrientes encontrados en la bahía Interior de Puno y Yunguyo, según ANA (2017) estaría afectado por el aporte de altos volúmenes de aguas residuales. La Chl-a máxima registrada en la bahía Interior de Puno (54,17  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) fue alto respecto al reporte de NORTHCOTE (1991) en 1983 con un valor de 3,09  $\text{m}^3$ . Sin embargo, se puede indicar que estudios realizados en la bahía Exterior de Puno por VINCENT *et al.* (1986), NORTHCOTE (1991), ANA (2015) e IMARPE (2016, informe interno) fueron relativamente muy bajos. Así mismo, se exploró los parámetros cruciales que afectan la calidad del agua según ECAS-2017, la bahía Interior de Puno y Yunguyo excedieron los rangos de pH, fósforo total, nitrógeno total, clorofila-a, sólidos suspendidos totales y la demanda bioquímica de oxígeno, se aseveró con los reportes obtenidos por ANA (2016). A estos resultados podría atribuirse que la concentración de fósforo, clorofila-a y transparencia según OCDE (1982) estimaron condición de hipertrofia y eutrofia para la bahía Interior de Puno y Yunguyo, los efectos que ocasionan se deberían a las presiones antrópicas (aguas residuales, residuos sólidos y urbanístico) como menciona NORTHCOTE (1991) y BELTRÁN *et al.* (2015).

conditions, the results indicate that high temperatures were recorded in the inner Puno Bay while in Tilali Bay, temperatures were low, ANA (2013, 2014, and 2016) reported similar values. The pH recorded basic tendencies, and the *Autoridad Nacional del Agua* - Peruvian National Water Authority - reported somewhat similar results, 7.47 to 8.78 (ANA, 2013), 9.48 to 10.07 (ANA, 2014), and 8.73 to 9.18 (ANA, 2016). In the inner Puno Bay and Yunguyo, dissolved oxygen was very high, with oversaturation greater than 100%; studies by ANA (2013) reported high values (> 9.27 mg/L) coinciding with our study; it should be noted that these bays are mainly influenced by photosynthetic processes and the hydromechanical distribution of this gas (ANA, 2013). The electrical conductivity recorded values >1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  with minimum values at the Ramis River mouth (808.48  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); RODIER (1998) indicates that the values of the relationship that exists between mineralization and conductivity range from 333  $\mu\text{S}/\text{cm}$  to 666  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , so we could assume that high mineralization occurs in the aforementioned areas. According to ANA (2017), the high  $\text{BOD}_5$  and nutrient contents found in the inner Puno Bay and Yunguyo would be affected by the contribution of high volumes of wastewater. The maximum Chl-a recorded in the inner Puno Bay (54.17  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) was high compared to what NORTHCOTE (1991) reported in 1983 with a value of 3.09  $\text{m}^3$ . However, studies conducted in the outer Puno Bay by VINCENT *et al.* (1986), NORTHCOTE (1991), ANA (2015), and IMARPE (2016, internal report) indicate that Chl-a values were relatively very low. Likewise, we explored the crucial parameters affecting water quality according to WQS-2017, the inner Puno Bay and Yunguyo exceeded the ranges of pH, total phosphorus, total nitrogen, chlorophyll-a, total suspended solids, and biochemical oxygen demand; this was confirmed with the reports obtained by ANA (2016). Based on these results, we could assume that phosphorus concentration, chlorophyll-a, and transparency according to OECD (1982) indicated hypertrophy and eutrophication for the inner Puno Bay and Yunguyo, resulting from anthropogenic pressures (sewage, solid waste, and urban development) as mentioned by NORTHCOTE (1991), and BELTRÁN *et al.* (2015).

## 5. CONCLUSIONES

Los parámetros fisicoquímicos evaluados en los ríos mostraron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre periodos evaluados (abril y setiembre/octubre) para la temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, amonio, fósforo total y coliformes termotolerantes, lo que estaría asociado a la temporalidad mas no pareciera para los fosfatos, nitritos, nitratos, nitrógeno total, clorofila-a, SST y DBO<sub>5</sub>.

Se observaron altos contenidos de nitrógeno total y SST en el río Coata y la confluencia entre Ramis y Huancané, con menor tendencia Ilave.

En Desaguadero y Coata se encontró elevada la DBO<sub>5</sub> y coliformes termotolerantes.

Respecto al aporte de carga contaminantes global de los ríos, las mayores descargas se presentaron en el periodo de avenidas (abril) con elevados aportes de nitrógeno total (15,70 t/día), fósforo total (3,54 t/día), SST (921,69 t/día) y DBO<sub>5</sub> (42,02 t/día).

Mayores aportes de DBO<sub>5</sub> presentaron los ríos Coata y Desaguadero (único efluente del lago).

Según estándares de calidad de agua (ECA, 2017), los parámetros que excedieron la categoría 3 fueron el pH en todos los ríos y en ambos periodos evaluados, DBO<sub>5</sub> en el río Coata y la concentración de coliformes termotolerantes en el río Desaguadero con ligeros incrementos en abril.

Los efluentes de lagunas de oxidación de Tilali y Conima presentaron bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo total; sin embargo, para la laguna de oxidación de Puno se reportaron altos los nutrientes, lo que no estaría asociado a la temporalidad. Según los límites máximos permisibles (LPM) para los PTAR's, la laguna de oxidación de la ciudad de Puno excedió en coliformes termotolerantes y DBO<sub>5</sub>, Tilali mantuvo por debajo de los rangos permisibles. Así mismo, mayores cargas de contaminantes provinieron de la ciudad de Puno.

En relación con la evaluación de bahías y zonas que desembocan en el Lago Titicaca (sector peruano), según los resultados obtenidos, la bahía

## 5. CONCLUSIONS

In the rivers, the physicochemical parameters evaluated showed significant differences ( $p < 0.05$ ) between the evaluation periods (April and September/October) for temperature, electrical conductivity, pH, dissolved oxygen, ammonium, total phosphorus, and thermotolerant coliforms. It seems that those parameters are associated with seasonality unlike phosphates, nitrites, nitrates, total nitrogen, chlorophyll-a, TSS, and BOD<sub>5</sub>.

We observed high total nitrogen and TSS contents in the Coata River and the confluence between Ramis and Huancané, with a lower tendency in Ilave.

The BOD<sub>5</sub> and thermotolerant coliforms were found to be elevated in Desaguadero and Coata.

Regarding the overall pollutant load of the rivers, the highest discharges occurred during the flood season (April) with high contributions of total nitrogen (15.70 t/day), total phosphorus (3.54 t/day), TSS (921.69 t/day), and BOD<sub>5</sub> (42.02 t/day).

The Coata and Desaguadero rivers (Lake Titicaca's only effluent) presented the highest BOD<sub>5</sub> contributions.

According to water quality standards (WQS, 2017), the parameters that exceeded category 3 were pH in all rivers and both periods evaluated, BOD<sub>5</sub> in the Coata River, and the thermotolerant coliform concentration in the Desaguadero River with slight increases in April.

The effluents from the Tilali and Conima oxidation ponds showed low concentrations of nitrogen and total phosphorus. Nonetheless, for the Puno oxidation pond, nutrients were reported to be high, which would not be associated with seasonality. According to the maximum permissible limits (MPL) for the WWTP's, the oxidation pond of the city of Puno exceeded in thermotolerant coliforms and BOD<sub>5</sub>, Tilali remained below the permissible ranges. Likewise, the city of Puno contributed the highest pollutant loadings.

As for the evaluation of bays and areas that flow into Lake Titicaca (Peruvian sector), the inner Puno Bay and Yunguyo showed very high values

Interior de Puno y Yunguyo presentaron muy altos los valores de pH, conductividad eléctrica, nitrógeno total, fósforo total y clorofila-a, estos parámetros excedieron los rangos permisibles según ECAs-2017 categoría 2 y 4, además la transparencia fue muy baja, de acuerdo con el estado trófico de la OCDE (1982) se estimó un nivel hipertrofico y eutrófico.

### Agradecimientos

Los autores muestran profundo agradecimiento por la participación de los profesionales Roger Chullunquia y Dennys Arpasi por su apoyo técnico y Cirilo Amesquita por el apoyo logístico durante el desarrollo del estudio.

of pH, electrical conductivity, total nitrogen, total phosphorus, and chlorophyll-a. These parameters exceeded the permissible ranges according to WQS-2017 categories 2 and 4. Also, transparency was very low and, according to the trophic status of the OECD (1982), we estimated a hypertrophic and eutrophic level.

### Acknowledgments

The authors are deeply grateful to Roger Chullunquia and Dennys Arpasi for their technical support and to Cirilo Amesquita for his logistical support during the development of the study.

## 6. REFERENCIAS / REFERENCES

- ABELLA, G., JOHANNA, P., MARTÍNEZ, C., MARÍA, J. (2012). Contribución de un afluente tributario a la eutrofización del lago de Tota (Boyacá, Colombia). *Revista Colombiana de Química* [en línea]. 41 (2), 243-261 [fecha de Consulta 27 de mayo 2021]. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=309028756006>
- APHA. (2005). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. 17 edición. Editores Díaz de Santos S.A. Madrid. 1816 pp.
- AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. (2013). Situación actual y perspectivas en el Sector Agua y Saneamiento en el Perú. Trabajo presentado en el Seminario de Tecnología alemana en el rubro de Agua y Saneamiento. Lima: Autoridad Nacional del Agua. Recuperado de: <http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/938/ANA0000720.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. (2014). Evaluación de la calidad del agua del lago Titicaca Perú – Bolivia.
- AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. (2016). Resultados de monitoreo binacional (Perú-Bolivia) de la calidad del Lago Titicaca 2016- Periodo de avenida. Informe Técnico 014-2016-ANA-AAA.SDGCRH.TIT
- AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. (2016). Gestión de la calidad de los recursos hídricos en la cuenca del Lago Titicaca. Resultados de Monitoreo de la Calidad del agua superficial en la región del Lago Titicaca. Autoridad Nacional del Agua.
- AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. (2017). Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua. 364 pág. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/900>
- BELTRÁN, D. F., PALOMINO, R. P., MORENO, E. G., PERALTA, C. G., MONTESINOS-TUBÉE, D. B. (2015). Calidad de agua de la bahía interior de Puno, lago Titicaca durante el verano del 2011. *Revista peruana de biología*, 22(3), 335-340.
- BHAGOWATI, B., AHAMAD, K. U. A. (2018). Review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecohydrol. Hydrobiol.*
- CARRIT, D., CARPENTER, J. (1966). Comparison and evaluation of currently employed modifications of the Winkler method for determining dissolved oxygen in seawater. *J. Mar. Res.*, 24, 286-318.
- DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM. Aprueban límites máximo permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas domésticas o municipales.
- DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias.
- DECRETO SUPREMO N° 075-2013-PCM (2014). Estado de la Calidad Ambiental de la cuenca del Lago Titicaca ámbito peruano. Pág. 162 <http://www.minam.gob.pe/puno/wp-content/uploads/sites/55/2014/02/ESTUDIO-DEL-ESTADO-DE-LA-CALIDAD-AMBIENTAL-CUENCA-DEL-TITICACA.pdf>
- DEJOUX, C., ILTIS, A. (1991). El Lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM- HISBOL. La Paz – Bolivia, 584 pp.
- FONTÚRBEL, F. (2005). Indicadores Físicoquímicos y Biológicos del Proceso de Eutrofización del Lago Titicaca (Bolivia). *Ecología Aplicada*, 4(1,2), 136-141.
- FRASER, A., MEYBECK, M., ONGLEY, E. (1995). *Water Quality of World Rivers*. UNEP Environment Library N° 14. UNEP / WHO. Nairobi, Kenya. 40 pp.
- FUENTES, F., MASS-DEYÁ, F. (2002). *Manual de laboratorios ecología de microorganismos*. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.
- GORE. (2018). Plan Regional de Saneamiento 2018-2021. Gobierno Regional de Puno, Dirección de Vivienda y Saneamiento – Puno. <http://direzionsaneamiento.vivienda.gob.pe/Planes%20Regionales%20de%20Saneamiento/PRS%20Puno.pdf>
- HACH. (2007). *Manual de procedimientos espectrofotómetro DR 2800*, Catálogo N° DOC 022.53.00725. Junio 2007. 2da edición. 814 pp.

- IMARPE (2013a, b, c, d). Protocolo de análisis de nitrito en agua de mar. Cod. IMP-AFIOQG/Pt-LAB 01.01/NO2. Edición 01, febrero 2013, 5 pp.
- IMARPE (2014). Informe "Evaluación de los impactos ambientales generados por actividades productivas en el Lago Titicaca y zonas de influencia. 79 pp.
- INDECOPI (2015). Calidad de agua. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) Proyecto de norma técnica. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales. 18 pp.
- JEFFREY, S. T., HUMPHREY, G. (1975). New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Pflanz*, 167(19), 1-194.
- JICA-INADE (1999). Estudio para el control integral de la contaminación del agua de la bahía interior de Puno en el Lago Titicaca en la República del Perú. Reporte Principal, Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) e Instituto Nacional de Desarrollo (INADE), Pacific Consultants International, Tokio en asociación con Environmental Technologic Consultant Co., Ltd., Tokio. XI capítulos.
- LARIOS MEOÑO, J. F., GONZÁLEZ TARANCO, C., MORALES OLIVARES, Y. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la USIL*, 2(2), 09-25. <https://www.usil.edu.pe/sites/default/files/revista-saber-y-hacer-v2n2.2-1-19set16-aguas-residuales.pdf>
- LÓPEZ MARTÍNEZ, S., MADROÑERO PALACIOS, M. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: caso laguna de La Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25 (2), 21-42, DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1430>
- MARGALEF, R. (1983). *Limnología*. Ediciones Omega S.A. Barcelona, 1010 p.
- MINAGRI. (2014). *Medición de Agua. Manual N° 5*. Ministerio de Agricultura y Riego, Viceministerio de Desarrollo de Infraestructura Agraria y Riego. Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego – DGIAR. Primera edición. <https://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-riego/manual5.pdf>
- MINAM. (2013A). Estado de la calidad ambiental del lago Titicaca ámbito peruano. 162 pp. <http://www.minam.gob.pe/puno/wp-content/uploads/sites/55/2014/02/ESTUDIO-DEL-ESTADO-DE-LA-CALIDAD-AMBIENTAL-CUENCA-DEL-TITICACA.pdf>
- MINAM. (2015). *Estrategia Nacional de Humedales*. Ministerio del Ambiente/Dirección General de Diversidad Biológica. D. S. N° 004-2015-MINAM.
- NORTHCOTE, T. (1991). Contaminación. En: Dejoux, C. & A. Itis (eds.), *El Lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual*. La Paz: Hisbol – ORSTOM, 584 pp.
- OCDE. (1982). *Eutrophication of Water: Methods for Monitoring, Assessment and Control*. OCDE, Paris, 164 p.
- OCOLA SALAZAR, J. J., LAQUI VILCA, W. F. (2017). Fuentes contaminantes en la cuenca del lago Titicaca: un aporte al conocimiento de las causas que amenazan la calidad del agua del maravilloso lago Titicaca. Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos (DCERH). Autoridad Nacional del Agua. Repositorio institucional – ANA. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/636>
- PARRA, P. (1979) Estudio Integral sobre la Contaminación del Lago de Maracaibo y sus Afluentes. Parte II. Evaluación del Proceso de Eutrofización. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables. Caracas, Venezuela. 222 pp.
- POUILLY, M., LAZZARO, X., POINT, D., AGUIRRE, M. (2014). Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca. Quito, Ecuador: IRD – UICN, 320 pp.
- QGIS. (2010). The Quantum GIS Project. (El proyecto Quantum GIS). Documento en Línea. Disponible en <http://www.qgis.org/>
- R CORE TEAM. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- R. J. 056-2018-ANA. Aprobar la Clasificación de Cuerpos de Agua Continentales Superficiales. <http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/spa/catalog.search?node=srv#/metadata/c50e424e-3020-433e-938e-66e745d-56d9f>
- RIVAS, Z., SÁNCHEZ, J., TRONCONE, F., MÁRQUEZ, R., LEDO DE MEDINA, H., COLINA, M., GUTIÉRREZ, E. (2009). Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia [en línea]*, 34.
- RODIER, J. (1998). *Análisis de las Aguas*. Barcelona: Omega S.A. 1059 pág.
- ROLDAN PÉREZ. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Academia Colombia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales-Acefiyn-Ciencia y Tecnología. Medellín, Colombia. Editorial Universidad de Antioquia. Segunda edición.
- SINGH, K.P., MALIK, A., SINHA, S. (2005). Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques - a case study. *Anal. Chim. Acta* 538, 355-374. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124502>
- SINGLER, B. (2012). *Nitrato y Nitrito*. Estados Unidos: Universidad Estatal de Montana. [On line] s.f. Disponible en <https://goo.gl/rjwCCB>
- STRICKLAND, T., PARSONS, R. (1972). *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Ottawa, fisheries research board of Canada. Bulletin 167 (Second edition).
- SUNASS. (2015). *Estudio Diagnóstico Situacional de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en las EPS del Perú y Propuestas de Solución*. Lima: SUNASS. Recuperado de: [http://www.proagua.org.pe/files/de-62b65581b727d66847f48aa52fbbfd/Libro\\_PTAR.pdf](http://www.proagua.org.pe/files/de-62b65581b727d66847f48aa52fbbfd/Libro_PTAR.pdf)
- VINCENT W. F., WURSTBAUGH W. A., NEALE P. J., RICHERSON P. J. (1986). Polymix and algal production in a tropical lake: latitudinal effects on the seasonality of photosynthesis. *Freshw. Biol*, 16, 781 – 803.
- VOLLENWEIDER, R. A., KERÉKES, J. (1981). Background and summary results of the OECD Cooperative Program on Eutrophication. 25-36 pp. In: *Restoration of lakes and inland waters*. Int. Symp. On inland Waters and Lake Restoration. sEpt.l-fZ, 1980. Portland, Maine, U.S. EPA., Washington D.C., EPA 440/5-81-010.
- WETZEL, R. G. (2001). *Limnología*. Ediciones OMEGA S.A. Barcelona - España. 671 pp.