

Contaminación de agua superficial de la periferia urbana de Puerto Maldonado, al sureste de la amazonia peruana

Surface water contamination in the urban periphery of Puerto Maldonado, southeast of the Peruvian Amazon

Karla Ibana-Lopez¹, Mayra Sihuay-Perales¹, Jorge Garate-Quispe^{2,3,8}, Julio Araújo-Flores^{4,5,6}, Marx Herrera-Machaca¹, Gabriel Alarcón Aguirre¹, Liset Rodriguez-Achata⁷

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la contaminación de aguas superficiales en la periferia urbana de Puerto Maldonado (amazonia peruana), utilizando análisis biológicos, fisicoquímicos y microbiológicos. Las muestras de agua se colectaron en seis cuerpos de agua (dos ríos, tres quebradas y un lago). Los parámetros fisicoquímicos de cada sitio de estudio no superaron los límites del Estándar de Calidad Ambiental peruano

¹ Departamento Académico de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú

² Departament de Biologia Evolutiva, Ecologia i Ciències Ambientals, secció Ecologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, España

³ Ecology & Restoration of Tropical Ecosystems Research Group (ECORET), Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú

⁴ Centro de Innovación Científica Amazónica (CIN CIA), Puerto Maldonado, Perú

⁵ Department of Biology and Center for Energy, Environment, and Sustainability, Wake Forest University, NC, United States

⁶ Colección Científica de Ictiología, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú

⁷ Departamento Académico de Ciencias Básicas, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, Perú

⁸ E-mail: jgarate@unamad.edu.pe

Recibido: 10 de mayo de 2021

Aceptado para publicación: 8 de noviembre de 2021

Publicado: 22 de diciembre de 2021

©Los autores. Este artículo es publicado por la Rev Inv Vet Perú de la Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original

(ECA), excepto el oxígeno disuelto en ríos cercanos a zonas urbanas. La contaminación de los recursos hídricos está relacionada con los vertidos de aguas residuales y la escorrentía de aguas pluviales. Así, los mayores puntos de contaminación fecal fueron en los ríos cercanos a las zonas urbanas, superando el límite establecido por el ECA para la conservación del medio acuático (UFC ml⁻¹ >2000). En el río Madre de Dios, la concentración de coliformes fecales superó en 75 veces al máximo permitido por el ECA, indicando que los ríos Tambopata y Madre de Dios de Puerto Maldonado están fuertemente contaminados.

Palabras clave: aguas residuales, contaminación microbiológica, Madre de Dios, parámetros fisicoquímicos, Tambopata

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the contamination of surface waters in the urban periphery of Puerto Maldonado (Peruvian Amazon), using biological, physicochemical, and microbiological analyses. The water samples were collected in six water bodies (two rivers, three streams and one lake). The physicochemical parameters of each study site did not exceed the limits of the Peruvian Environmental Quality Standard (ECA), except for dissolved oxygen in rivers near urban areas. Pollution of water resources is related to raw sewage and rainwater runoff. Thus, the highest points of faecal contamination were in rivers near urban areas, exceeding the threshold established by the ECA for the conservation of the aquatic environment (CFU ml⁻¹ >2000). In the Madre de Dios River, the concentration of faecal coliforms exceeded the maximum allowed by the ECA by 75 fold, indicating that the Tambopata and Madre de Dios rivers of Puerto Maldonado are heavily contaminated.

Key words: wastewater, microbiological pollution, Madre de Dios, physicochemical parameters, Tambopata

INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos superficiales contribuyen considerablemente al crecimiento económico de un país, y pueden utilizarse con diferentes propósitos como la pesca, riego, transporte, generación de energía, turismo y recreación (Galarza *et al.*, 2021). Sin embargo, estos son muy susceptibles a la contaminación por actividades antrópicas (Karakus, 2020), que pueden incorporar contaminantes derivados de industrias, zonas urbanas, agricultura y minería. Además, el aumento de la población ha generado una mayor demanda de bienes y servicios en el consumo del agua (Boyd, 2020), generando efectos negativos en los cuerpos de agua superficiales (Herrera-R *et al.*, 2020).

La Amazonia a pesar de representar un área de importancia global, que cumple un importante rol en la provisión de servicios ecosistémicos y la regulación del clima global, la presión sobre sus ecosistemas hídricos de agua dulce se ha incrementado en las últimas décadas (Araújo-Flores *et al.*, 2021; Galarza *et al.*, 2021). En la Amazonia peruana el deterioro de la calidad del agua viene siendo crítica en algunas regiones y representa uno de los problemas ambientales más relevantes (Chota-Macuyama *et al.*, 2014; Galarza *et al.*, 2021). Este deterioro se debe a la poca disponibilidad de tratamientos de aguas residuales, la mala gestión de residuos, la agricultura, la minería, el petróleo, la ganadería, etc. (Boyd, 2020), lo cual puede afectar a los ecosistemas cercanos y a los cuer-

pos de agua, causando impacto en las comunidades acuáticas (Araújo-Flores, 2016; Custodio y Chanamé, 2016).

La contaminación de aguas superficiales en Madre de Dios y puntualmente en Puerto Maldonado, no es la excepción al problema global de la contaminación de aguas superficiales en zonas urbanas, generando impactos negativos en la biodiversidad acuática y la salud humana (Gutiérrez, 2015; Langeland *et al.*, 2017; Wasserman *et al.*, 2019). En esta zona, la minería aurífera es la principal fuente de contaminación (Diringer *et al.*, 2015; Araújo-Flores *et al.*, 2021; Garate-Quispe *et al.*, 2021), actividad que se viene extendiendo aceleradamente en el territorio e intensificando el uso del mercurio que es liberado en los cuerpos de agua (Langeland *et al.*, 2017; Martínez *et al.*, 2018; Soto-Benavente *et al.*, 2020), causando riesgos en la salud de los residentes locales y la vida silvestre a través del consumo de peces contaminados por el metilmercurio (Osoreo *et al.*, 2012; Diringer *et al.*, 2015; Soto-Benavente *et al.*, 2020). Por otro lado, la capital de la región Madre de Dios, Puerto Maldonado, ejerce una fuerte presión negativa en los recursos hídricos, debido a la contaminación por el vertido de aguas residuales sin tratamiento previo (Araújo-Flores, 2016); asimismo, la expansión urbana se viene dando de forma desordenada y es una de las ciudades amazónicas con mayor crecimiento poblacional. Tiene una población de cerca de 95 000 habitantes, la cual casi se ha duplicado en los últimos 15 años. Además, es la capital de departamento como mayor crecimiento anual del Perú (4.1% anual) (INEI, 2018).

El monitoreo de la calidad del agua es considerado como una herramienta esencial para verificar la vulnerabilidad de los ecosistemas a las actividades humanas (Galarza *et al.*, 2021). Por lo tanto, la investigación destinada a cuantificar y calificar las características físicas y químicas (Alves *et al.*, 2018) y parámetros biológicos (Jerves-Cobo *et al.*, 2020) de los cursos de agua utilizados por la población son extremadamente

importantes. Asimismo, sirven de base para la planificación, gestión, conservación y desarrollo de políticas públicas (Alves *et al.*, 2018) y alertar a las poblaciones sobre los riesgos de salud y la relevancia de conservar las microcuencas (Langeland *et al.*, 2017; Villena, 2018).

El objetivo del presente estudio fue evaluar la contaminación del agua superficial de la periferia urbana de la ciudad de Puerto Maldonado, mediante la evaluación de parámetros fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos de cuerpos de agua superficiales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se realizó en dos tramos de río, tres quebradas y un lago localizados en la periferia de la ciudad de Puerto Maldonado, provincia de Tambopata (Madre de Dios), sureste de la Amazonía peruana (Figura 1). Para la selección de los sitios se consideró: (1) cuerpos de aguas representativos del entorno periurbano de Puerto Maldonado en un radio de 20 km; (2) cercanía a los vertederos de aguas servidas y escorrentía de aguas de lluvias; (3) fuentes de agua de consumo humano; y (5) fuentes de agua que son tributarios de los ríos Madre de Dios y Tambopata (Cuadro 1).

El río Madre de Dios tiene un ancho que varía entre 500 a 800 m, presenta una elevada carga de sedimentos, y a lo largo de su cauce se encuentran centros poblados, cultivos agrícolas y actividades mineras que vierten sus aguas servidas al río sin tratamiento alguno. Los sitios de muestreo en el tramo del río Madre de Dios fueron: (1) una zona no urbanizada previo a la ciudad y a los vertederos de aguas servidas y escorrentía de las aguas de lluvia de la ciudad (Pastora), y (2) en una zona urbanizada posterior a estos vertederos (Capitanía) (Figura 1, Cuadro 1).

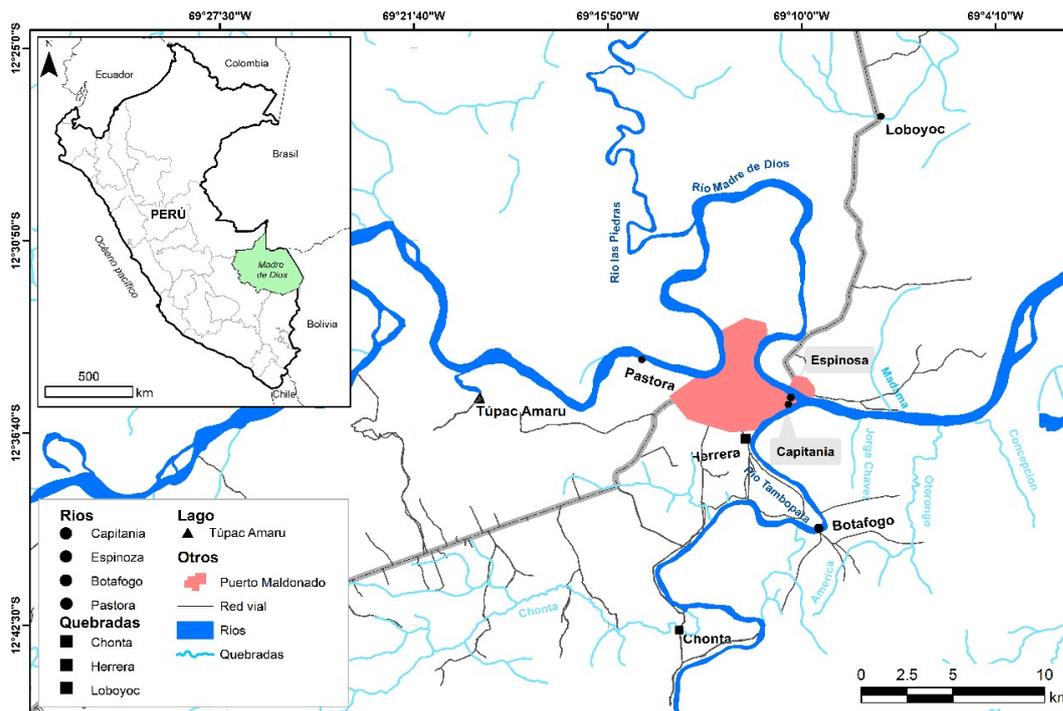


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio en la Amazonía de Madre de Dios. Los símbolos indican los sitios de muestreo (río, quebrada o lago)

Cuadro 1. Sitios de muestreo de los sitios evaluados en la periferia de la Ciudad de Puerto Maldonado, Madre de Dios (Perú)

ID	Nombre	Altitud (msnm)	Descripción
P1	Capitanía (Madre de Dios)	169	Parte baja de Pueblo Viejo, zona urbana de la ciudad, tramo del río Madre de Dios.
P2	Espinoza (Tambopata)	170	Como P1, tramo del río Tambopata.
P3	Quebrada Herrera	178	A 2 km al sur de la ciudad.
P4	Playa Botafogo (Tambopata)	172	A 7 km al sur de la ciudad, zona no urbanizada, tramo del río Tambopata.
P5	Quebrada Chonta	183	A 17 km de la ciudad, carretera a la Comunidad Nativa Infierno.
P6	Pastora (Madre de Dios)	173	A orilla de la carretera de Cusco, zona no urbanizada, tramo del río Madre de Dios.
P7	Lago Túpac Amaru	179	A 13 km al oeste de la ciudad.
P8	Quebrada Loboyoc	189	A 17 km de la ciudad, vía interoceánica hacia Brasil.

El río Tambopata, a diferencia del río Madre de Dios tiene un menor ancho (100 m en promedio) y presenta un menor impacto debido a actividades antrópicas. Los sitios de muestreo fueron seleccionados de forma similar a los del río Madre de Dios, previo a la zona urbanizada (Playa Botafogo) y en la zona urbanizada posterior a la desembocadura de los vertederos de aguas servidas y escorrentía de las aguas de lluvia (Espinoza) (Figura 1, Cuadro 1).

Además, se consideraron otros cuerpos de agua con menor influencia antrópica que servirán como referencia para comparar la influencia de la ciudad en la calidad del agua. La quebrada Chonta discurre paralela a la carretera interoceánica y desemboca en el río Tambopata, y en su microcuenca se desarrollan actividades pecuarias y agrícolas. La quebrada Loboyoc se encuentra en la carretera interoceánica (tramo Puerto Maldonado-Iñapari), nace en una zona de aguajales y desemboca en el río Madre de Dios. La quebrada Herrera se ubica entre Puerto Maldonado y la quebrada Chonta, recoge el agua de zona urbanas de la ciudad y desemboca en el río Tambopata. Finalmente, el lago Túpac Amaru, situado a 10 km de Puerto Maldonado y a 200 m del río Madre de Dios. En su área de influencia se desarrollan actividades agrícolas y pecuaria (Figura 1, Cuadro 1).

Diseño de Muestreo

Los muestreos se realizaron en los ocho sitios definidos (Figura 1), durante el periodo de transición entre la época lluviosa a seca de 2015.

Parámetros Físicoquímicos

Se colectaron seis muestras a 1 m de profundidad, utilizando un brazo telescópico. La temperatura, pH, conductividad, alcalinidad y sólidos totales disueltos (STD) fueron registrados con el medidor multiparámetro portátil Hach HQ40d, calibrado según las especificaciones del fabricante. El oxígeno

disuelto y conductividad fueron medidos mediante el procedimiento del kit Alabama Water Quality Monitoring de LaMotte.

Parámetros Biológicos

Las técnicas de colecta fueron basadas en las recomendaciones del Departamento de Limnología e Ictiología de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM, 2014). Los macroinvertebrados fueron colectados mediante una red Surber de 1 mm de abertura de malla en un área de 1 m² considerando tres muestras por cada sitio de muestreo. Para la identificación taxonómica se vació el contenido en un tamiz de 500 µm de diámetro, y los especímenes se colocaron en placas de Petri, donde fueron micrografados en el estereoscopio, conservados en frascos de 25 ml, separados e identificados hasta el nivel de familia.

Para el caso de los peces se utilizó (1) una red de arrastre a orilla de 10 m × 1.5 m (malla 10 mm), (2) red atarraya de dos brazas (3) redes de espera de 20 m × 2 m, (4) redes de mano tipo calcal y (5) anzuelos. Se realizaron tres colecciones por zona de muestreo. Se registró y se fijó a cada pez en formol al 10% durante 48 horas. La identificación taxonómica se realizó en el Laboratorio Ambiental Regional de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD). El plancton (fitoplancton y zooplancton) se colectó mediante el filtrado de 50 L de agua a través de una red cónica de 40 µm de abertura de malla. La identificación fue realizada por el Departamento de Limnología y Museo de Historia Natural (UNMSM).

Parámetros Microbiológicos

Los niveles de coliformes totales y termotolerantes, expresado en Unidades Formadoras de Colonias por 100 ml (UFC 100⁻¹ ml), fueron determinados mediante métodos estandarizados basados en el método filtro de membrana (APHA, 2017). Los análisis fueron realizados en el laboratorio de la Em-

Cuadro 2. Resultados de los indicadores limnológicos de los ocho puntos de muestreo en comparación con los límites máximos establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua en ríos de selva

Sitio	pH	Temp (°C)	STD ¹ (ppm)	Conductividad (µs)	Oxígeno disuelto (ppm)
Capitanía - Madre de Dios	7.23 ± 0.01 ^b	29.7 ± 0.13 ^a	59 ± 2.92 ^b	115 ± 1.29 ^b	5.0 ± 0.06 ^d
Espinoza - Tambopata	7.1 ± 0.01 ^d	29.0 ± 0.13 ^b	28 ± 1.70 ^d	56 ± 1.37 ^d	4.7 ± 0.05 ^d
Quebrada Herrera	6.65 ± 0.01 ^g	28.3 ± 0.09 ^d	48 ± 1.98 ^c	81 ± 1.07 ^c	4.7 ± 0.01 ^d
Playa Botafogo-Tambopata	6.87 ± 0.01 ^e	28.2 ± 0.10 ^d	26 ± 1.34 ^d	48 ± 1.50 ^e	6.0 ± 0.12 ^c
Quebrada Chonta	6.88 ± 0.01 ^e	28.4 ± 0.09 ^{cd}	14 ± 1.37 ^e	28 ± 1.29 ^g	6.5 ± 0.09 ^{bc}
Pastora - Madre de Dios	7.17 ± 0.01 ^c	28.6 ± 0.07 ^c	48 ± 1.70 ^c	80 ± 0.96 ^c	7.1 ± 0.13 ^{ab}
Lago Túpac Amaru	7.65 ± 0.01 ^a	27.1 ± 0.11 ^e	80 ± 1.70 ^a	137 ± 1.57 ^a	5.8 ± 0.08 ^c
Quebrada Loboyoc	6.7 ± 0.01 ^f	26.8 ± 0.11 ^f	15 ± 1.07 ^e	32 ± 0.96 ^f	7.3 ± 0.06 ^a
ECA ²	6.5 - 9.0	-	-	<1000	≥5

¹ Sólidos totales disueltos

² Estándares Nacionales de Calidad Ambiental

^{a,b,c,d,e,f} Letras desiguales dentro de columnas indican diferencia significativa ($p < 0.05$)

presa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Tambopata (EMAPAT).

Análisis de Datos

Para peces, macroinvertebrados, fitoplancton y zooplancton se cuantificó la abundancia y riqueza para cada sitio evaluado. Para evaluar diferencias significativas de los parámetros fisicoquímicos del agua entre los ocho sitios de muestreo se utilizó el análisis de varianza. En los casos de diferencias significativas se empleó el análisis post hoc de Tukey para comprobar diferencias entre sitios. Previamente se analizó el cumplimiento de los supuestos paramétricos de normalidad

y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene, respectivamente. Estos análisis se desarrollaron en el paquete estadístico SigmaPlot 14 (Systat Software). El promedio de los ocho sitios de muestreo de cada uno de los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua y los niveles de concentración de Coliformes Totales y Coliformes fueron comparados con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para aguas (MINAM, 2017).

Para representar en dimensión reducida los sitios y la relación con los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se utilizó un

Análisis de Componentes Principales (PCA). Para los valores coliformes se utilizó la transformación logarítmica ($\ln(x+1)$). El PCA se realizó con el paquete *factoextra*, disponible en R (R Core Team, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros Físicoquímicos

Se evidenciaron diferencias significativas en todos los parámetros físicoquímicos evaluados en los ocho sitios de muestreo ($p < 0.05$) (Cuadro 2). Los sitios de muestreo con mayor oxígeno disuelto fueron la Quebrada Loboyoc y Pastora (Madre de Dios), mientras que los valores más bajos fueron en la Quebrada Herrera y Espinosa (Tambopata). La temperatura más alta se registró en el sitio Capitanía y la más baja en la Quebrada Loboyoc ($p < 0.05$), en tanto que los valores más altos para la conductividad, sólidos totales disueltos y pH se encontraron en el lago Túpac Amaru y en el río Madre de Dios (Capitanía).

Por otro lado, considerando los ECA para cuerpos de agua de Categoría 4 (Conservación del Ambiente Acuático) (MINAM, 2017), las concentraciones de pH (6.5 a 9.0) y conductividad ($< 1000 \mu\text{S}$) de los medios acuáticos evaluados se encontraron dentro de los límites establecidos por la legislación peruana (Cuadro 2). Sin embargo, los valores de oxígeno disuelto fueron inferiores a los permitidos por los ECA ($\geq 5 \text{ ppm}$) en los seis puntos muestreados en la quebrada Herrera (4.7 ppm) y en el río Tambopata (Espinosa, 4.7 ppm), además de valores cercanos a 5 en el río Madre de Dios (Capitanía).

En el análisis de componentes principales (PCA), los dos primeros componentes del PCA representaron el 84.5% de la varianza acumulada de los datos (PC 1: 45.5% y PC 2: 39.0%) (Figura 2). En el Cuadro 3 se muestran los pesos (vectores propios) que tienen las variables originales en los dos componen-

tes. El primer componente (PC-1) diferencia a los cuerpos de agua según la influencia urbana de la ciudad de Puerto Maldonado. En la parte superior del PC1 se observan a los sitios con mayor impacto urbano y en la parte inferior se observa un gradiente de menor impacto hasta el lago Túpac Amaru, que es el sitio con menor impacto antrópico. Asimismo, el PC1 estuvo negativamente relacionado con el pH, sólidos totales disueltos, conductividad y alcalinidad de los cuerpos de agua evaluados. El segundo componente principal (PC2) mostró la importancia del gradiente por contaminación microbiológica, el cual estuvo positivamente asociado con la temperatura, los coliformes (totales y termotolerantes), y negativamente con las concentraciones de oxígeno disuelto (Cuadro 3, Figura 2).

Los resultados de parámetros físicoquímicos en los sitios analizados son similares a los reportados en estudios previos (Araujo *et al.*, 2014; Gutiérrez, 2015; Martínez *et al.*, 2018), con algunas variaciones en la conductividad y el oxígeno disuelto (Cuadro 4). Los valores de pH se encuentran dentro de los registrados anteriormente por Araujo *et al.* (2014). Para la conductividad, solo en la quebrada Herrera se encontraron valores superiores ($81 \pm 1.07 \mu\text{S}$) a los registrados por Araujo *et al.* (2014) ($67-74 \mu\text{S}$). No obstante, en los sitios de Botafogo y Espinoza fueron entre 15 y 23% inferiores a los registrados por estos autores. Cabe indicar que estas diferencias podrían estar relacionadas con la estación de muestreo (Jerves-Cobo *et al.*, 2020), dado que el presente estudio se realizó en la transición de época de secas a lluvias, mientras que Araujo *et al.* (2014) lo realizaron en los meses típicos de la época de secas y lluvias.

Los elevados niveles de conductividad en el lago Túpac Amaru coinciden con los datos reportados para otros cuerpos de agua lénticos en Madre de Dios; por ejemplo, Cocha Cashu (Araújo-Flores, 2016). En general, los valores de conductividad encontra-

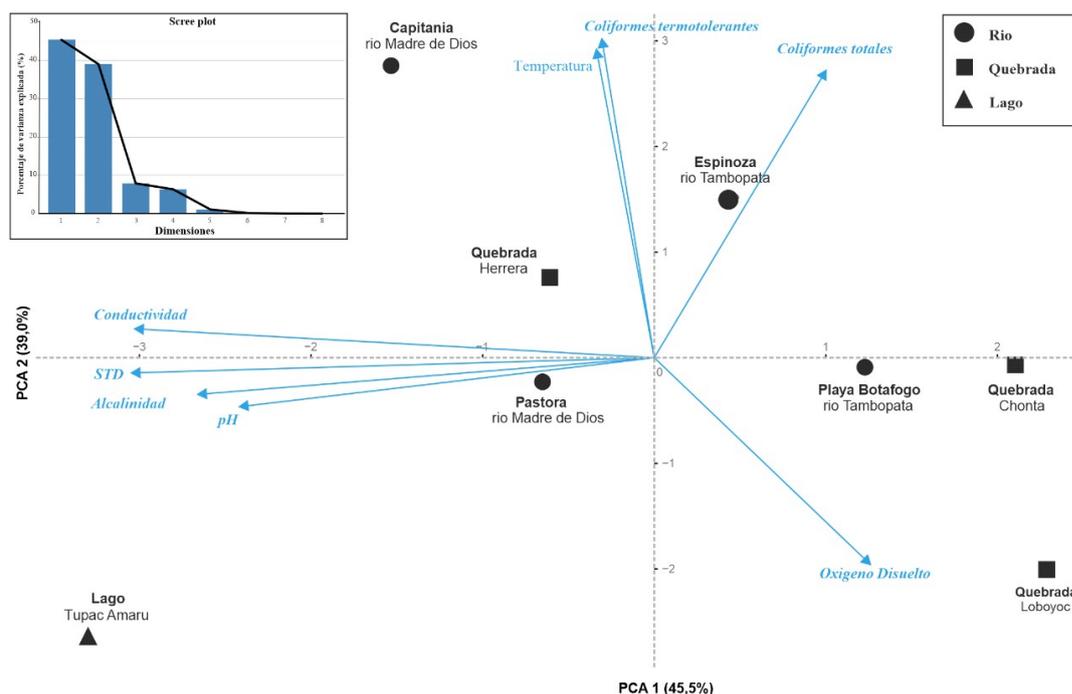


Figura 2. Análisis de componentes principales para los sitios evaluados, variables fisicoquímicas y coliformes de las aguas superficiales de la periferia urbana de Puerto Maldonado, Perú

dos en el presente estudio son bajos (<140 μ S), lo cual es típico en los ríos de la amazonia (Wasserman *et al.*, 2019) y de la cuenca del

río Madre de Dios (Araújo-Flores, 2016); aunque en ríos de la cuenca de Las Piedras y la Intercuenca Alto Acre pueden presentar valores superiores a 200 μ S (Maco-García, 2008; Araújo-Flores, 2016), e incluso valores superiores a 300 μ S en la parte alta de la cuenca del río Inambari (Lujan *et al.*, 2013).

Cuadro 3. Vectores propios (*loadings*) de las dos primeras componentes y su respectiva varianza acumulada en Análisis de Componentes Principales (ACP)

	PC1	PC2
Varianza (%)	45.45	39.04
pH	-0.414	-0.086
Temperatura	-0.058	0.539
Sólidos totales disueltos	-0.521	-0.027
Conductividad	-0.518	0.050
Oxígeno disuelto	0.216	-0.362
Alcalinidad	-0.455	-0.064
Coliformes termotolerantes	-0.052	0.558
Coliformes totales	0.171	0.502

Diversidad Biológica

Los valores de abundancia y riqueza de especies de peces, macroinvertebrados, fitoplancton y zooplancton se muestran en el Cuadro 5. La mayor riqueza de especies de peces se obtuvo en el lago Túpac Amaru y en los sitios de muestreo ubicados en los ríos (Botafogo y Espinoza). La abundancia y riqueza de especies de fitoplancton y zooplancton fue superior en el lago Túpac Amaru en comparación con los sitios en ríos y quebradas evaluadas. Sin embargo, la quebrada Chonta fue el sitio con mayor abundancia y riqueza de macroinvertebrados.

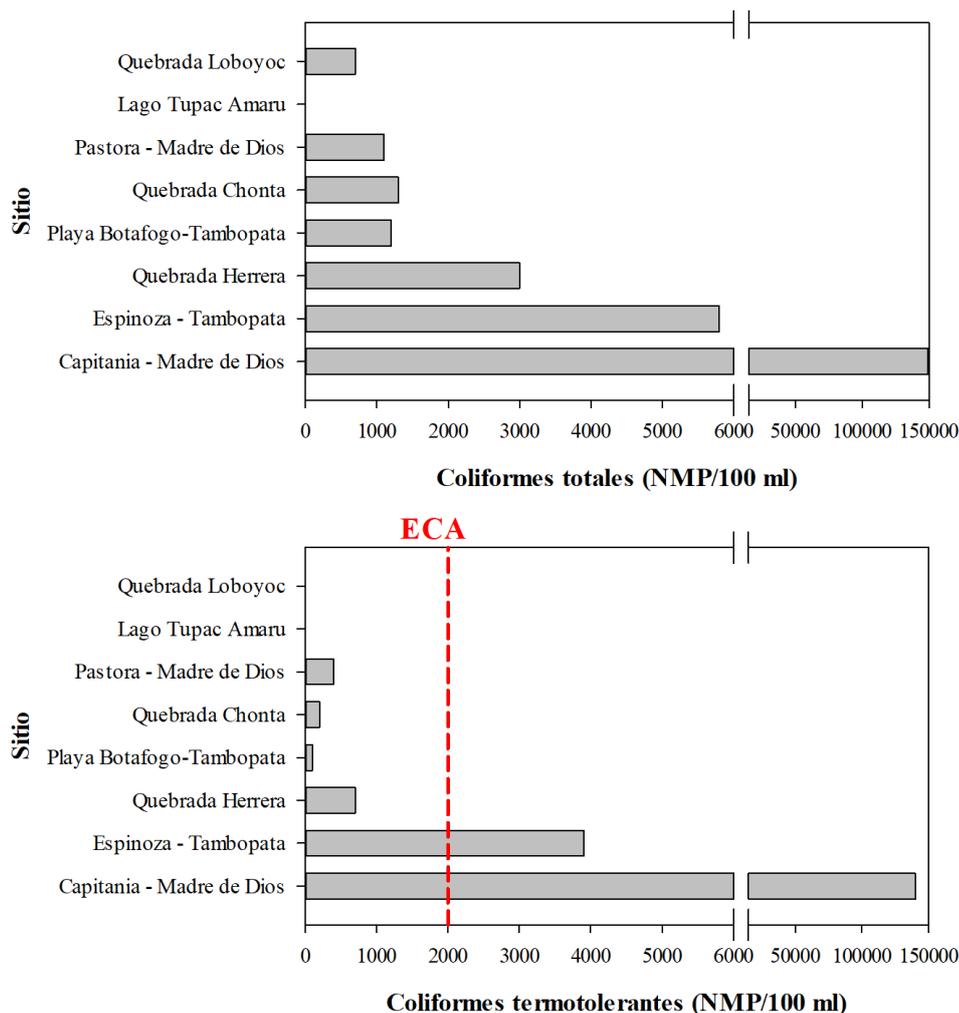


Figura 3. Coliformes totales y termotolerantes encontrados en ocho sitios evaluados de aguas superficiales de la periferia urbana de Puerto Maldonado, Perú y su comparación con los Estándares de Calidad Ambiental peruano

La presencia del oxígeno disuelto es fundamental para mantener una variedad de formas de vida biológica en el agua (Effendi *et al.*, 2015). Los niveles de oxígeno disuelto encontrados, cercanos o superiores a 5 ppm, permitirían a los organismos que habitan en estos cuerpos de agua evaluados cubrir sus actividades metabólicas (Chota-Macuyama *et al.*, 2014). No obstante, se encontró una disminución (entre 4-32%) en la mayoría de los ríos y quebradas en comparación a lo reportado por Araujo *et al.* (2014) (Cuadro 4). Así mismo, los sitios con mayor disminución

de oxígeno disuelto (>24%) fueron aquellos con mayor influencia de la zona urbana (Espinoza y Capitania) y de actividades antrópicas (quebrada Herrera), lo cual estaría relacionado con cambios en la temperatura y pH de estos cuerpos de agua (Effendi *et al.*, 2015; Blair *et al.*, 2019).

Los agentes contaminantes generados por actividades antrópicas deterioran la calidad del agua y pueden influir en la composición y estructura de las comunidades de macroinvertebrados (Meneses-Campo *et al.*,

Cuadro 4. Parámetros fisicoquímicos del agua superficial (A) comparado con la información de Araujo *et al.* (2014) (B)

Sitio	Tipo	pH			Conductividad (μs)			Oxígeno disuelto (ppm)		
		A	B		A	B		A	B	
			Sec	Lluv		Sec	Lluv		Sec	Lluv
Chonta	Quebrada	6.9	6.9	6.7	28	55	14	6.5	6.8	7
Loboyoc	Quebrada	6.7	6.4	6.5	32	23	32	7.3	6.2	6
Herrera	Quebrada	6.7	6.9	7.1	81	69	74	4.7	6.6	6.8
Botafogo	Río	6.9	6.9	6.9	48	63	58	6.0	7.2	7
Pastora	Río	7.2	7.6	7.3	80	88	78	7.1	6.2	6.8
Espinoza	Río	7.1	7.2	7.3	56	66	79	4.7	6.8	7
Capitanía	Río	7.2	7.4	7.2	115	115	97	5.0	6.4	6.6
Túpac	Lago	7.7	7.6	7.1	137	122	138	5.8	5.4	5.8

Sec: Estación seca; Lluv: Estación lluviosa

Para las comparaciones se han considerado los valores promedio

2019). Custodio y Chanamé (2016) encontraron que las descargas de aguas residuales producto de actividades urbanas y pecuarias influyen de forma negativa en la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos, de allí que la riqueza de especies de macrofauna es altamente dependiente de la calidad del agua, en tanto que la presencia de macroinvertebrados suele estar influenciada por la saturación de oxígeno (Custodio y Chanamé, 2016; Araújo-Flores *et al.*, 2021; Galarza *et al.*, 2021), mientras que algunos contaminantes influyen negativamente en las concentraciones de oxígeno (Jerves-Cobo *et al.*, 2020). Estas serían unas de las razones por las cuales no se encontraron especies de macroinvertebrados en la quebrada Herrera, debido a que este sitio presentó los niveles de oxígeno disuelto más bajos que en las otras quebradas. Estos resultados coinciden con otros estudios en los Andes y en la amazonia (Friberg *et al.*, 2010; Jerves-Cobo *et al.*, 2020). Asimismo, dan soporte al uso de los macroinvertebrados como indicadores de eutrofización y contaminación por actividades antrópicas (Pascual *et al.*, 2020).

Contaminación Microbiológica

Las concentraciones de coliformes totales y termotolerantes fueron elevadas (>3000 UFC/100 ml) en los sitios Espinoza (río Tambopata) y Capitanía (río Madre de Dios), mientras que en el lago Tupac Amaru no se encontraron coliformes totales. Asimismo, los niveles más bajos se encontraron en las quebradas Loboyoc y Chonta, y en playa Botafogo (río Tambopata) y Pastora (río Madre de Dios) (Figura 3). Por otro lado, no se registraron coliformes termotolerantes en la quebrada Loboyoc y el lago Túpac Amaru, y la concentración más baja se registró en playa Botafogo (río Tambopata). En Espinoza superan en dos veces los límites del ECA y en Capitanía se supera 75 veces (Figura 3).

Las concentraciones más altas de coliformes termotolerantes que superan los ECA para conservación del ambiente acuático de ríos de la selva (MINAM, 2017) se registraron en los ríos Tambopata (Espinoza) y Madre de Dios (Capitanía). Similares resultados fueron reportados por Araújo-Flo-

Cuadro 5. Abundancia y riqueza de especies de peces, macroinvertebrados, fitoplancton y zooplancton encontrados en las aguas superficiales de la periferia urbana de Puerto Maldonado, Perú

Sitio	Tipo	Peces		Macro invertebrados		Fitoplancton		Zooplancton	
		N ¹	S ¹	N	S	N	S	N	S
Chonta	Quebrada	38	8	20	7	30	3	10	1
Loboyoc	Quebrada	41	7	5	1	60	2	0	0
Herrera	Quebrada	7	5	-	-	40	2	10	1
Botafogo	Río	98	15	-	-	30	2	10	1
Pastora	Río	84	7	-	-	10	1	0	0
Espinoza	Río	47	13	-	-	10	1	0	0
Capitanía	Río	12	7	-	-	10	1	0	0
Túpac	Lago	132	20	5	2	270	8	90	7

¹ N = abundancia y S = riqueza de especies

res (2016) en Puerto Maldonado en un estudio desarrollado entre 2011-2012. Asimismo, Rondón *et al.* (2020) encontraron resultados similares en Pucallpa, ciudad amazónica de características similares a Puerto Maldonado; es decir, los parámetros fisicoquímicos en los niveles permitidos por el ECA, pero con niveles elevados de coliformes.

La elevada cantidad de contaminación microbiana es preocupante debido a que está estrechamente relacionado con los ecosistemas y la salud humana (Frena *et al.*, 2019). Las elevadas concentraciones de coliformes totales y termotolerantes estarían relacionados a su cercanía a zonas urbanizadas (Rodríguez-Romero *et al.*, 2018) de la ciudad de Puerto Maldonado. Similares resultados fueron reportados por Araújo-Flores (2016), que encontró diferencias significativas entre sitios en entornos urbanos y aquellos alejadas de esta. Esto se debería a la contaminación de los ríos Madre de Dios y Tambopata por el vertido de aguas residuales sin depurar; no obstante, el estado y la con-

centración de coliformes en las masas de agua son dinámicos y suelen estar relacionados con factores ambientales (Zhang *et al.*, 2020). En este sentido, Araújo-Flores (2016) reportó que los valores de coliformes varían según la estacionalidad (época seca y lluviosa).

CONCLUSIONES

- Las características fisicoquímicas de los cuerpos de agua evaluados en la periferia de la ciudad de Puerto Maldonado se encuentran dentro los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental del Perú (ECA) para la conservación del medio acuático, a excepción del oxígeno disuelto.
- La abundancia y riqueza de peces, fitoplancton y zooplancton fueron superiores en los cuerpos de agua más alejados de las áreas urbanas y con menor contaminación debido a las actividades antrópicas.

- Los cuerpos de agua cercanos a las zonas urbanas presentaron los niveles más altos de contaminación por coliformes fecales.
- Se demuestran altos niveles de contaminación en los principales ríos de Madre de Dios.

Agradecimiento

Al laboratorio Regional Ambiental de la Universidad Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD) por brindar el soporte del estudio y las facilidades para el uso de sus equipos. La investigación fue financiada con el apoyo de la institución HED con fondos de la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos (USAID), en la actividad «Fortalecimiento de Alianzas entre Universidades y otras Organizaciones de Investigación para Generar Capacidad de Investigación Ambiental en la Amazonía Andina» Sub Acuerdo UFDSP00010172, dentro del acuerdo existente entre la UNAMAD y la Universidad de Florida.

LITERATURA CITADA

1. **Alves J, Conceição A, Oliveira S, Okumura R, Oliveira C, Bezerra F. 2018.** Water quality evaluation in water courses in the municipality of capitão poço-pa. *Nucleus* 15: 269-278. doi: 10.3738/1982.2278.2873
2. **[APHA] American Public Health Association. 2017.** Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Rice E, Baird R, Eaton A (eds). Washington DC: American Public Health Association.
3. **Araújo-Flores J. 2016.** Caracterización de la biodiversidad acuática en la cuenca andino-amazónica de Madre de Dios - Perú. Tesis Doctoral. Huelva: Univ. de Huelva. 262 p.
4. **Araújo-Flores J, Garate-Quispe J, García Molinos J, Pillaca-Ortiz J, Caballero-Espejo J, Ascorra C, Silman M, et al. 2021.** Seasonality and aquatic metacommunity assemblage in three abandoned gold mining ponds in the southwestern Amazon, Madre de Dios (Peru). *Ecol Indic* 125: 107455. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107455
5. **Araujo J, Cutipa L, Mesa V, Peralta J, López D, Asunción A, Hernan O, et al. 2014.** Biodiversidad de las masas de agua sometidas a diferente presión antrópica en el entorno de un área urbana de la amazonia peruana (Puerto Maldonado, Madre de Dios). *Biodivers Amaz* 4: 17-33.
6. **Blair MA, Ortiz P, Argueta M, Romero L. 2019.** Water quality in Honduras. In: Roldán G, Tundisi J, Jiménez B, Vammen K (eds). *Water quality in the Americas: risks and opportunities*. Mexico: IANAS. p 385-405.
7. **Boyd C. 2020.** Water quality. An introduction. 3rd ed. Auburn: Springer. 441 p.
8. **Chota-Macuyama W, Chu-Koo F, García-Dávila C, Castro-Ruiz D, Ismiño-Orbe R, García-Vásquez A, Sánchez-Ribeiro H, et al. 2014.** Calidad ambiental de los ríos Curaray, Arabela y Napo (Loreto, Perú). *Folia Amaz* 23: 157. doi: 10.24841/fa.v23i2.21
9. **Custodio M, Chanamé F. 2016.** Analysis of benthic macroinvertebrates biodiversity of Cunas river by means of environmental indicators, Junin-Peru. *Sci Agropecu* 7: 33-44. doi: 10.17268/sci.agropecu.2016.01.04
10. **Diringer S, Feingold B, Ortiz E, Gallis J, Araújo-Flores J, Berky A, Pan W, et al. 2015.** River transport of mercury from artisanal and small-scale gold mining and risks for dietary mercury exposure in Madre de Dios, Peru. *Environ Sci Process Impacts* 17: 478-487. doi: 10.1039/c4em00567h
11. **Effendi H, Romanto, Wardiatno Y. 2015.** Water quality status of Ciambulawung river, Banten province, based on

- pollution index and NSF-WQI. *Procedia Environ Sci* 24: 228-237. doi:10.1016/j.proenv.-2015.03.030
12. **Frena M, Santos A, Souza M, Carvalho S, Madureira L, Alexandre M. 2019.** Sterol biomarkers and fecal coliforms in a tropical estuary: seasonal distribution and sources. *Mar Pollut Bull* 139: 111-116. doi: 10.1016/j.marpolbul.-2018.12.007
 13. **Friberg N, Skriver J, Larsen S, Pedersen M, Buffagni A. 2010.** Stream macroinvertebrate occurrence along gradients in organic pollution and eutrophication. *Freshwater Biol* 55: 1405-1419. doi:10.1111/j.1365-2427.2008.-02164.x
 14. **Galarza E, Cabrera M, Espinosa R, Espitia E, Moulatlet GM, Capparelli M. 2021.** Assessing the quality of Amazon aquatic ecosystems with multiple lines of evidence: the case of the northeast andean foothills of Ecuador. *B Environ Contam Tox* 106: 3089. doi:10.1007/s00128-020-03089-0
 15. **Garate-Quispe J, Canahuire-Robles R, Surco-Huacachi O, Alarcón G. 2021.** Desarrollo estructural y composición florística arbórea en áreas afectadas por minería aurífera en la Amazonía peruana: a 20 años de su reforestación. *Rev Mex Biodivers* 92: e923437. doi: 10.22201/ib.20078706e.-2021.92.3437
 16. **Gutiérrez T. 2015.** Impactos mineros, agropecuarios y de la conservación en la calidad del agua y los sedimentos, cuenca Tambopata, Madre de Dios. Tesis de Ingeniero Forestal. Lima: Univ. Nacional Agraria La Molina. 122 p.
 17. **Herrera-R G, Oberdorff T, Anderson E, Brosse S, Renata F, Hidalgo M, Jézéquel C, et al. 2020.** The combined effects of climate change and river fragmentation on the distribution of Andean Amazon fishes. *Glob Chang Biol* 26: 5509-5523. doi: 10.1111/gcb.15285
 18. **[INEI] Instituto Nacional de Estadística e Informática. 2018.** Perú: Perfil sociodemográfico (Informe Nacional). Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática. 644 p. https://www.inei-gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/
 19. **Jerves-Cobo R, Forio MAE, Lock K, Van Butsel J, Pauta G, Cisneros F, Nopens I, et al. 2020.** Biological water quality in tropical rivers during dry and rainy seasons: a model-based analysis. *Ecol Indic* 108: 105769. doi:10.1016/j.ecolind.2019.105769
 20. **Karakus CB. 2020.** Evaluation of water quality of Kızılırmak river (Sivas/Turkey) using geo-statistical and multivariable statistical approaches. *Environ Dev Sustain* 22: 4735-4769. doi: 10.1007/s10668-019-00472-8
 21. **Langeland A, Hardin R, Neitzel R. 2017.** Mercury levels in human hair and farmed fish near artisanal and small-scale gold mining communities in the Madre de Dios River Basin, Peru. *Int J Environ Res Pu* 14: 302. doi: 10.3390/ijerph14030302
 22. **Lujan N, Roach K, Jacobsen D, Winemiller K, Vargas V, Rimarach V. 2013.** Aquatic community structure across an Andes-to-Amazon fluvial gradient. *J Biogeogr* 40: 1715-1728. doi: 10.1111/jbi.12131
 23. **Maco-García J. 2008.** Zonificación ecológica y económica del departamento de Madre de Dios. Puerto Maldonado. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP) y Gobierno Regional de Madre de Dios (GORE-MAD). [Internet]. Disponible en: http://terra.iiap.gob.pe/assets/files/macro/zee-madre-de-dios/05_Hidrografia_2008.pdf
 24. **Martinez G, McCord A, Driscoll T, Todorova S, Wu S, Araújo F, Vega C, et al. 2018.** Mercury contamination in riverine sediments and fish associated with artisanal and small-scale gold mining in Madre de Dios, Peru. *Int J Environ Res Pu* 15: 1-15. doi: 10.3390/ijerph-15081584
 25. **Meneses-Campo Y, Castro-Rebolledo M, Jaramillo-Londoño A. 2019.** Comparación de la calidad del agua en dos

- ríos altoandinos mediante el uso de los índices BMWP/COL y ABI. *Acta Biolo Colomb* 24: 299-310. doi: 10.15446/abc.v24n2.70716
26. [MINAM] *Ministerio del Ambiente*. 2017. Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias. El Peruano: 1529835-2. [Internet]. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
27. *Osores F, Rojas J, Lara C*. 2012. Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: un problema de salud pública. *Acta Med Per* 29: 38-42.
28. *Pascual G, Iannacone J, Alvaríño L*. 2019. Macroinvertebrados bentónicos y ensayos toxicológicos para evaluar la calidad del agua y del sedimento del río Rímac, Lima, Perú. *Rev Inv Vet Perú* 30: 1421-1442. doi: 10.15381/rivep.v30i4.17164
29. *R Core Team*. 2020. R: a language and environment for statistical computing. [Internet]. Available in: <http://www.R-project.org/>
30. *Rodríguez-Romero A, Rico-Sánchez A, Mendoza-Martínez E, Gómez-Ruiz A, Sedeño-Díaz J, López-López E*. 2018. Impact of changes of land use on water quality, from tropical forest to anthropogenic occupation: a multivariate approach. *Water* 10: 1518. doi: 10.3390/w10111518
31. *Rondón J, Ramos D, Vilca M, Salazar S, Mendoza Y, Gonzáles R*. 2020. Caracterización sanitaria e identificación de los puntos de descontaminación microbiológica en la cadena de comercialización pesquera en el puerto de Pucallpa, Ucayali, Perú. *Rev Inv Vet Perú* 31: e17539. doi: 10.15381/rivep.v31i1.17539
32. *Soto-Benavente M, Rodríguez-Achata L, Olivera M, Sanchez V, Nano C, Garate-Quispe J*. 2020. Health risks due to the presence of heavy metals in agricultural products cultivated in areas abandoned by gold mining in the Peruvian Amazon. *Sci Agropecu* 11: 49-59. doi:10.17268/sci.agropecu.2020-01.06
33. [UNMSM] *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. 2014. Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú. Lima: Departamento de Limnología e Ictiología de la UNMSM y Ministerio del Ambiente. 39 p.
34. *Villena J*. 2018. Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Rev Peru Med Exp Salud Pública* 35: 304-308. doi: 10.17843/rpmpesp.2018.352.3719
35. *Wasserman J, Damaceno V, Lima G, Wasserman M*. 2019. Spatial distribution of water quality in the Amazonian region: implications for drinking water treatment procedures. *J Water Health* 17: 749-761. doi: 10.2166/wh.2019.005
36. *Zhang X, Zhi X, Chen L, Shen Z*. 2020. Spatiotemporal variability and key influencing factors of river fecal coliform within a typical complex watershed. *Water Res* 178: 115835. doi: 10.1016/j.watres.2020.115835