



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE



TESIS

**USO DE MACRÓFITAS FLOTANTES EN LA REMOCIÓN DE
NITRÓGENO, FÓSFORO Y SULFATOS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE
PUNO**

PRESENTADA POR:

MANUEL ALFREDO CALLOHUANCA PARIAPAZA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE**

PUNO, PERÚ

2019



DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a la memoria de mis padres Manuel Pascual y Sebastiana, por el amor, apoyo incondicional en mis estudios de pre y post grado, ejemplo de fortaleza, sacrificio y responsabilidad para lograr mis aspiraciones.

Con mucho amor y cariño a María mi esposa, por su compañía, comprensión, tolerancia y apoyo en todo instante.

A mis dos tesoros, Dudley Alfredo y Mabel Lilibeth, que constituyen el aliento, esperanza y fuerza para afrontar todos los obstáculos y retos de mi vida.



AGRADECIMIENTOS

- A mi Alma Mater, la Universidad Nacional del Altiplano Puno, especialmente a la Escuela de Posgrado, Programa de Doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, por brindarme la oportunidad de alcanzar mi objetivo.
- Al Director de mi tesis Dr. Luis Alberto Jiménez Monroy y al M.Sc. René Alfaro Tapia, por sus sabios consejos, aliento, sugerencias y apoyo durante el desarrollo del proyecto.
- Al personal del Laboratorio de Calidad Ambiental del Instituto de Ecología, de la Universidad Nacional Mayor de San Andrés Bolivia, por su calidad de análisis.
- Al Señor Benito Fernández Calloapaza, técnico especialista del Laboratorio de Suelos y Aguas de la Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica de la UNA-Puno, por su colaboración y apoyo decidido en la toma de datos *in situ*.
- Al personal técnico y administrativo de la Escuela de Posgrado y del Programa de Doctorado, por las facilidades y apoyo que me brindaron.
- Al Jurado conformado por los Doctores: Eliseo Pelagio Fernández Ruelas, Javier Mamani Paredes y Alejandro Coloma Paxi, por su invaluable colaboración, sugerencias y revisión de la tesis.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1	Marco teórico	3
1.1.1	Características de las aguas residuales	3
1.1.1.1	Características físicas	4
1.1.1.2	Características químicas	5
1.1.1.3	Características biológicas	7
1.1.2	Macrófitas	8
1.1.2.1	Azolla filiculoides Lam. “Azolla”	9
1.1.2.2	Lemna gibba L. “Lemna” o “Lenteja de agua”	9
1.1.3	Tratamiento de aguas residuales con macrófitas	9
1.1.3.1	Remoción de nitrógeno	10
1.1.3.2	Remoción de fósforo	12
1.1.3.3	Remoción de azufre	13
1.1.4	Biomasa de macrófitas	14
1.1.5	Normas de calidad de las aguas residuales	15
1.2	Antecedentes	17

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Identificación del problema	24
2.2	Enunciados del problema	25
2.3	Justificación	26



2.4	Objetivos	27
2.4.1	Objetivo general	27
2.4.2	Objetivos específicos	27
2.5	Hipótesis	27
2.5.1	Hipótesis general	27
2.5.2	Hipótesis específicas	27

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Lugar de estudio	28
3.2	Población	29
3.3	Muestra	29
3.3.1	Muestreo de aguas residuales para análisis de laboratorio	29
3.3.2	Muestreo de material experimental	30
3.4	Método de investigación	30
3.4.1	Cultivo de macrófitas flotantes	30
3.4.2	Cosecha de biomasa	30
3.4.3	Determinación de parámetros físicos, químicos y biológicos	31
3.4.4	Eficiencia de remoción	31
3.4.5	Determinación de materia verde y materia seca	32
3.4.6	Eficiencia de producción de biomasa	32
3.4.7	Determinación de tasa de crecimiento de biomasa	33
3.5	Descripción de métodos por objetivos específicos	34
3.5.1	Descripción de variables analizadas	34
3.5.1.1	Variables dependientes o de respuesta	34
3.5.1.2	Variables independientes o predeterminadas.	34
3.5.3	Aplicación de prueba estadística inferencial	34

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Calidad ambiental de aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno, en épocas lluviosa y seca	36
4.2	Eficiencia de macrófitas flotantes en la remoción de nutrientes	38
4.2.1	Eficiencia de remoción de nitrógeno	38
4.2.2	Eficiencia de remoción de fósforo	42
4.2.3	Eficiencia de remoción de sulfatos	44



4.3 Eficiencia de producción de biomasa	46
CONCLUSIONES	50
RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS	59



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de PTAR	15
2. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental ECA Categoría 3 aguas para riego de vegetales de tallo alto y bajo.	16
3. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental ECA Categoría 4 conservación del ambiente acuático de lagos y lagunas.	17
4. Parámetros físicos, químicos y biológicos, métodos utilizados, unidad y límites de determinación, Puno Perú, 2019	31
5. Parámetros físicos, químicos y biológicos, en el sitio de vertido de aguas residuales a la bahía interior de Puno por épocas y estándares de calidad establecidos, Puno Perú 2019.	37
6. Eficiencia de macrófitas en la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfatos, por épocas (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019	39
7. Porcentaje de materia seca de macrofitas por épocas (Media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019	48
8. Tasa de crecimiento relativo ($\text{g}/\text{m}^2/\text{d}$) de biomasa verde de macrófitas por épocas (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019.	49



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Eficiencia de macrófitas en la remoción de nitrógeno total por épocas, Puno Perú 2019.	40
2. Eficiencia de macrófitas en la remoción de nitratos por épocas, Puno Perú 2019.	41
3. Eficiencia de macrófitas en la remoción de fosforo total por épocas, Puno Perú 2019.	43
4. Eficiencia de macrófitas en la remoción de sulfatos por épocas, Puno Perú 2019.	45
5. Eficiencia de macrófitas en la producción de biomasa por épocas, Puno Perú 2019.	47

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Precipitación pluvial (mm) y temperaturas (°C) del periodo experimental, Puno Perú 2019	60
2. Matriz de correlaciones Pearson de parámetros físico químicos y biológicos, en el sitio de vertido de aguas residuales a la bahía interior de Puno, Perú 2019	61
3. Resultados de análisis de laboratorio de cantidades de N, P, sulfatos y otros parámetros, al inicio y final del cultivo de macrófitas en época lluviosa (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019	62
4. Resultados de análisis de laboratorio de cantidades de N, P, sulfatos y otros parámetros, al inicio y final del cultivo de macrófitas en época seca (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019	63
5. ANOVA de efectos de épocas y macrófitas en la remoción de nitrógeno total, Puno Perú 2019	64
6. ANOVA de efectos de épocas y macrófitas en la remoción de nitratos, Puno Perú 2019	64
7. ANOVA de efectos de épocas y macrófitas en la remoción de fósforo total, Puno Perú 2019	64
8. ANOVA de efectos de macrófitas en la remoción de sulfatos en época lluviosa, Puno Perú 2019	65
9. Peso inicial y final de biomasa verde de macrófitas en época lluviosa (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019	65
10. Peso inicial y final de biomasa verde de macrófitas en época seca (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019	65
11. ANOVA de efectos de épocas y macrófitas en la eficiencia de producción de biomasa, Puno Perú 2019	66
12. Porcentaje de materia seca de macrófitas por épocas, Puno Perú 2019	66
13. Informe de ensayo de aguas	67

RESUMEN

El volumen de las aguas residuales urbanas aumenta constantemente, por el crecimiento de la población urbana, evacuándose estos efluentes con niveles de tratamientos deficientes a los cuerpos receptores. En caso de los efluentes de la ciudad de Puno, vertidos a la bahía interior del lago Titicaca, están generando acelerada eutrofización y contaminación; las plantas acuáticas constituyen una alternativa viable y sostenible, como tratamiento complementario en remover nutrientes y contaminantes. El presente trabajo tuvo como objetivo, evaluar los parámetros ambientales de las aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno en dos épocas, y estimar la eficiencia de las macrófitas flotantes en la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfatos, y producción de biomasa. El estudio se realizó en épocas lluviosa y seca, del año 2019, utilizando macrófitas *Azolla filiculoides* Lam y *Lemna gibba* L; cultivados en contenedores 50x40x20 cm, área de 0.20 m², volumen 30 litros, con tiempo de retención hidráulica de 8 días; los efectos de épocas y de macrófitas en la remoción de nitrógeno, fósforo, sulfatos y la producción de la biomasa, se determinaron a través de análisis de varianza de dos factores, con ayuda del software estadístico SPSS Versión 23. Obteniendo los siguientes resultados: Los valores de los parámetros de aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno, exceden los estándares de calidad ambiental establecidos y confirman su potencial eutrofizante, se incrementan en época seca, empeorando su calidad. En época lluviosa, se obtienen significativamente mayores eficiencias de remoción, *Lemna gibba* L con 73.08% de eficiencia fue superior en remover nitrógeno total y *Azolla filiculoides* Lam con 81.83% de eficiencia fue mejor en remover fósforo total; la eficiencia de remoción de sulfatos no fue significativa, se ha expresado en incrementos de sulfatos. Mayor eficiencia de producción de biomasa se obtiene en la época lluviosa, 72.52% con *Lemna* y 50.74% con *Azolla*.

Palabras clave: aguas residuales, *Azolla filiculoides*, biomasa, eutrofización, lago Titicaca, *Lemna gibba*, remoción de nutrientes

ABSTRACT

The volume of urban wastewater is constantly increasing, due to the growth of the urban population, these effluents are evacuated with poor treatment levels to the recipient bodies. In the case of the effluents of the city of Puno, discharged into the inner bay of Lake Titicaca, they are generating accelerated eutrophication and pollution; Aquatic plants constitute a viable and sustainable alternative, as a complementary treatment to remove nutrients and contaminants. The objective of this work was to evaluate the environmental parameters of the wastewater discharged to the inner bay of Puno at two times, and estimate the efficiency of floating macrophytes in the removal of nitrogen, phosphorus and sulfates, and production of biomass. The study was carried out in rainy and dry seasons, of the year 2019, using macrophytes *Azolla filiculoides* Lam and *Lemna gibba* L; grown in containers 50x40x20 cm, area of 0.20 m², volume 30 liters, with hydraulic retention time of 8 days; The effects of epochs and macrophytes on the removal of nitrogen, phosphorus, sulfates and biomass production were determined through analysis of variance of two factors, with the help of the statistical software SPSS Version 23. Obtaining the following results: The values of the parameters of wastewater discharged to the inner bay of Puno, exceed the established environmental quality standards and confirm their eutrophizing potential, increasing significantly in dry season, worsening its quality. In the rainy season, significantly higher removal efficiencies are obtained, *Lemna gibba* L with 73.08% efficiency was superior in removing total nitrogen and *Azolla filiculoides* Lam with 81.83% efficiency was better in removing total phosphorus; Sulfate removal efficiency was not significant, it has been expressed in sulfate increases. Greater efficiency of biomass production was obtained in the rainy season, 72.52% with *Lemna* and 50.74% with *Azolla*.

Keywords: *Azolla filiculoides*, biomass, eutrophication, *Lemna gibba*, Nutrient removal, Titicaca Lake and wastewater.

INTRODUCCIÓN

La aguda escasez de recursos de agua dulce y creciente volumen de aguas residuales a nivel global, han convertido en un imperativo conservar el agua, abordar los problemas de escasez de agua y disposición adecuada de aguas residuales (Arora y Saxena, 2005). Las aguas residuales, por su contenido de diversos nutrientes, materia orgánica, compuestos químicos, grasas, aceites, fármacos, metales pesados y microorganismos patógeno, generalmente sobrepasan los Límites Máximos Permisibles establecidos por el Ministerio del Ambiente (Cruz *et al.*, 2016).

La bahía interior de lago Titicaca, sufre un proceso de eutrofización acelerada, debido al mal manejo de las aguas residuales de la ciudad de Puno (Canales, 2010). Frente a este problema, los tratamientos de aguas residuales que involucran a macrófitas flotantes, han demostrado ser eficientes en la remediación de aguas con contenidos de nutrientes, materia orgánica, sustancias tóxicas como Arsénico, Zinc, Cobre, Plomo, Cromo y Mercurio (Martelo y Lara, 2012). Aprovechar la capacidad de estas plantas para la fitorremediación de compuestos orgánicos e inorgánicos, metales radioactivos y compuestos derivados del petróleo, representa una alternativa sustentable y de bajo costo, para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminantes naturales y antropogénicos (Delgadillo *et al.*, 2011).

Beltrán *et al.* (2015) y Fontúrbel (2005) indican que la proliferación de macrófitas acuáticas flotantes como *Lemna gibba* y *Azolla sp* en la bahía interior de Puno, es una evidencia clara de la eutrofización localizada. Canales (2010) considera que los planes de exterminación de *Lemna gibba* no dieron resultados positivos, en su lugar plantea un manejo sostenible para disminuir el proceso de eutrofización del lago Titicaca, proponiendo estrategias de manejo en el plano social, económico y ambiental.

La utilización de plantas acuáticas, fue desarrollado como un tratamiento secundario o terciario de aguas residuales, que dependen de la temperatura del ambiente principalmente, pues ellas en la época de invierno pueden ser afectadas seriamente en su rendimiento, por cuanto los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben operar todo el año (Hidalgo *et al.*, 2005).

El presente estudio, tuvo la finalidad de evaluar los parámetros ambientales de las aguas residuales, que son vertidos a la bahía interior de Puno en las diferentes épocas del año y



la eficiencia de las macrófitas flotantes en la remoción de nutrientes y la producción de biomasa.

Estableciendo como objetivos específicos: a) Determinar el nivel de calidad ambiental de los parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno en las diferentes estaciones climáticas. b) Evaluar la eficiencia de las macrófitas flotante en la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfatos de las aguas residuales, en las estaciones climáticas de Puno. c) Estimar la eficiencia de las macrófitas en la producción de biomasa, en las estaciones climáticas de Puno.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico

1.1.1 Características de las aguas residuales

MINAM (2016) considera la contaminación del agua, como la acumulación de sustancias tóxicas y derrame de fluidos en un sistema hídrico (rio, mar, cuenca, etc.) alterando la calidad del agua; asimismo, a las sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un curso de agua, al ser excedidos causan daños a la salud y al ambiente. Su cumplimiento de los estándares de calidad establecidos para cada tipo de uso de agua, es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente.

La calidad del agua y los valores límites de ciertas sustancias depende del tipo de usos: consumo humano, industria, riego, abastecimiento, recreación, etc.; las aguas residuales son producto de la utilización del agua en las diferentes actividades humanas, cuyas características originales han sido modificadas (Valencia, 2016).

Las aguas residuales por su calidad requieren un tratamiento previo antes de ser reusadas y vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado; las aguas residuales se pueden clasificar en : a) aguas residuales industriales; b) aguas residuales domésticas, provenientes de la actividad humana, de las viviendas, residencias, edificios comerciales e institucionales y c) aguas residuales municipales; son aguas residuales domésticas que pueden estar mezclados con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial

previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado (OEFA, 2014 y Romero, 2010).

Por otra parte, Lazcano (2016) agrega: a) Aguas residuales agropecuarias o agroindustriales, refiriéndose a las escorrentías que provienen de la actividad agrícola, de los mataderos, establos, granjas, etc., que generan gran cantidad de materia orgánica, purines de animales; además se debe considerar los residuos tóxicos de pesticidas y fertilizantes, residuos farmacéuticos de uso veterinario; b) Aguas residuales de origen minero-metalúrgico, efluentes procedentes de las minas, que se consideran más contaminantes y de mayor riesgo, debido a que están constituidos por metales pesados y metaloides.

El tratamiento y disposición apropiada de las aguas residuales supone el conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas, y de sus efectos principales sobre la fuente receptora (Romero, 2010).

1.1.1.1 Características físicas

Sólidos totales (ST), la determinación de los sólidos totales permite estimar los contenidos de materias disueltas y suspendidas presentes en un agua, pero el resultado está condicionado por la temperatura y la duración de la desecación (Severiche *et al.*, 2013).

Sólidos suspendidos totales (SST), son aquellos que quedan después de filtrar el agua residual, a través de un filtro de fibra de vidrio de 1.2 μm de tamaño de poro (Lazcano, 2016). La diferencia entre sólidos totales en las muestras no filtradas y filtradas es una medida de los sólidos suspendidos presentes (Miranda, 2012).

Temperatura, la temperatura de las aguas residuales siempre es mayor que la temperatura del agua de la red potable, especialmente en los meses fríos, la temperatura influye en la biodegradabilidad de la materia orgánica, ya que contribuye a los procesos cinéticos químicos y biológicos; temperaturas muy altas contribuyen a la reducción del oxígeno disuelto en el agua, pueden contribuir al crecimiento de hongos y plantas; en lugares muy fríos con aguas residuales a temperaturas menores de 10°C, los tiempos de retención en las PTAR tendrán que ser mayores, debido a que

las tasas de crecimiento de los microorganismos son más largas (Lazcano, 2016).

La temperatura, es un parámetro físico que afecta mediciones de otros como pH, alcalinidad o conductividad; temperaturas elevadas resultantes de descargas de agua caliente, pueden tener un impacto ecológico significativo, por lo que la medición de la temperatura del cuerpo receptor, resulta útil para evaluar los efectos sobre éste (Severiche *et al.*, 2013).

Turbiedad, es una medida de calidad de las aguas, está directamente relacionada por la presencia de material suspendido y coloidal, como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos; su medida a nivel de laboratorio está relacionada con la luz dispersa en la muestra; el equipo utilizado para medir este parámetro se llama turbidímetro y el método nefelómetro que se basa en la preparación de un patrón a partir de un polímero de formazina y se compara con la intensidad de la luz dispersada de la muestra con la solución patrón; la turbiedad se mide en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT) (Severiche *et al.*, 2013).

Para tener una idea de magnitud de este parámetro se puede citar los límites máximos permisibles de turbiedad de agua para consumo humano en Perú es de 5 UNT (MINSa, 2011).

1.1.1.2 Características químicas

pH, es un parámetro que mide la concentración de iones hidrógeno presentes en el agua, mide el grado de acidez o alcalinidad del agua, el pH debe ser controlado en desagües y tratamiento de desechos industriales en que se emplee procesos biológicos (Miranda, 2012).

Los valores de pH oscilan entre 0 y 14; el intervalo de pH para la existencia de vida acuática es entre 5 y 9; por tanto, las aguas residuales que se encuentren fuera de estos valores son de tratamiento muy difícil, será necesario ajustar las aguas residuales que ingresan a las PTAR a los valores de pH indicados; el pH alcalino incrementa el amoníaco (NH_3), que resulta tóxico para los seres vivos acuáticos, especialmente los peces (Lazcano,

2016). Desde el punto de vista de la disponibilidad de nutrientes para las plantas, debe mantenerse en un rango ligeramente ácido de 5.5 a 6.5 (Prieto, 2017).

Conductividad Eléctrica (CE), mide la concentración total de sales disueltas en el agua, esta medida depende directamente de la temperatura del agua; la CE se expresa en microSiemens por cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o en miliSiemens por cm (mS/cm), es un indicador de salinidad del agua; para cultivo en agua se recomienda, en invierno la CE de la solución de entrada no sea mayor a 2.0 mS/cm y en verano no sea mayor a 1.5 mS/cm (Rodríguez y Chang, 2011).

Oxígeno Disuelto (OD), la cantidad de oxígeno en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) determinan sus condiciones aerobias, microaerófilas, anóxicas y anaeróbicas para los procesos biológicos; el OD permite la respiración de las bacterias aeróbicas y facultativas, así como de todos los organismos presentes en el ecosistema acuático; algunos peces indicadores comienzan a morir en ambientes con bajas concentraciones de OD (Lazcano, 2016).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), se define como la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para la oxidación de la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. La determinación de DBO se realiza en el laboratorio a 20°C , el ensayo estándar se realiza a cinco días de incubación, la DBO se calcula por la diferencia entre el OD inicial y el OD final (cinco días) y se expresa en $\text{mg}/\text{L} - \text{O}_2$ (Valencia, 2016).

Demanda Química de Oxígeno (DQO), es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica químicamente, mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), en un medio ácido y a alta temperatura; para la oxidación de ciertos compuestos orgánicos resistentes se requiere la ayuda de un catalizador como el sulfato de plata; compuestos orgánicos que interfieren con el ensayo, como los cloruros, pueden causar resultados erróneos de DQO, lo que se elimina agregando sulfato mercuríco (Romero, 2010).

Usualmente se debe tener una relación DBO/DQO con el propósito de conocer el grado de tratamiento requerido de aguas residuales, para aguas residuales domésticas se pueden tener relaciones de DBO/DQO entre 0.4 y 0.8 (Valencia, 2016).

Nitrógeno (N), nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas; las formas de nitrógeno en las aguas residuales son el nitrógeno amoniacal en sus formas no ionizada (NH_3) o ionizada NH_4^+ , según la temperatura y el pH, otras formas de nitrógeno son nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), óxido nitroso (N_2O), nitrógeno elemental (N_2) y nitrógeno orgánico formado principalmente por aminoácido, urea y ácido úrico (Reyes *et al.*, 2003).

Se denomina NTK al nitrógeno total Kjeldhal, que constituye el nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal; para evaluar el tratamiento biológico de las aguas residuales, son necesarios los datos de nitrógeno; en otros casos, cuando se exige control de eutrofización de las fuentes receptoras (Romero, 2010).

Fósforo (P), es un nutriente esencial en el metabolismo de las plantas y su presencia en aguas residuales es una de las causas de la eutrofización; el fósforo en el agua residual se encuentra comúnmente en forma soluble formando ortofosfatos (P-PO_4); otras formas orgánicas se pueden presentar en materiales orgánicos disueltos o lodos de residuos domésticos; el fósforo total está compuesto por la fracción disuelta y la fracción particulada asociada a sólidos en suspensión (Lazcano, 2016).

Sulfatos, los sulfatos tienen gran importancia en desagües y desechos industriales, porque ellos son los indirectamente responsables de dos serios problemas: olores y corrosión de desagües; el olor característico, desagradable es producido por ácido sulfhídrico (H_2S), que proviene de la descomposición anaeróbica de los sulfatos a sulfuros (Miranda, 2012).

1.1.1.3 Características biológicas

Coliformes, en las aguas residuales, se presentan una gran variedad de organismos vivos, los organismos patógenos que pueden existir en las

aguas residuales son generalmente difíciles de aislar e identificar; por esa razón, se prefiere utilizar a los coliformes como organismo indicador de contaminación; las bacterias coliformes, son bacilos gram-negativos, aerobio y facultativos anaerobios, no formadores de esporas, que fermentan la lactosa con producción de gas en 48 ± 3 h a 35 o 37°C; el grupo de coliformes totales, grupo coliaerogenes, incluye los géneros *Escherichia* y *Aerobacter*, en general, se considera el género *Escherichia*, especie *E. coli*, como la población de bacterias coliformes más representativa de contaminación fecal (Romero, 2010).

1.1.2 Macrófitas

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías, que reducen *in-situ* o *ex-situ* la concentración de diversos compuestos, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas (Delgadillo *et al.*, 2011).

Se consideran hidrófitas o macrófitos acuáticos, a las plantas que crecen en ecosistemas acuáticos, se clasifican en tres grupos: emergentes, flotantes y sumergidas: a) macrófitos flotantes, no se encuentran adheridos a ningún sustrato, b) macrófitos emergentes, sus raíces se adhieren a un sustrato sumergido y sus hojas flotan en la superficie del agua y c) macrófitos sumergidos, especies enraizadas al sustrato, tienen todas sus estructuras sumergidas en el agua (García *et al.*, 2009).

Las plantas acuáticas son un componente fundamental en los ecosistemas acuáticos, proveen los siguientes bienes y servicios: a) oxigenan las aguas, b) fijan CO₂ atmosférico, c) reciclan y absorben los nutrientes, d) regulan los efectos de la temperatura, luz y transporte de sedimentos, e) constituyen una protección contra el efecto erosivo de corrientes y flujos de agua, f) son el soporte trófico y el alimento para los consumidores primarios de la mayor parte de los ecosistemas acuáticos naturales, g) forma parte del hábitat de numerosas especies de invertebrados, peces, anfibios y otros animales acuáticos (Palta y Morales, 2013).

Las macrófitas flotantes comprenden un amplio y variado grupo de plantas, en las que destacan el Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia*

strartiotes) (Qin *et al.*, 2016). La salvinia (*Salvinia Spp.*), la redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), y algunas especies de lentejas de agua (*Lemna Spp.*, *Spirodella Spp.*)(Martelo y Lara, 2012). Fontúrbel (2005) reporta sobre la proliferación de macrófitas acuáticas flotantes principalmente *Lemna gibba* y *Azolla sp* en la parte peruana del lago Titicaca.

1.1.2.1 Azolla filiculoides Lam. “Azolla”

Azolla filiculoides Lam pertenece a la familia *Salvinaceae*, para su crecimiento prefiere lugares sombreados (León y Lucero, 2015). Es un helecho acuático flotante, de pequeño tamaño; está formado por un tallito ramificado, del que parten raicillas, cubierto por numerosas y diminutas hojas escumiformes de color verde al rojo; se reproduce sexualmente mediante esporas (García *et al.*, 2009). La temperatura mínima de crecimiento, se estima en 0.1°C, la *Azolla* es capaz de sobrevivir a temperaturas de -5°C, presenta pobre tolerancia a altas temperaturas, la temperatura óptima para su crecimiento se considera de 21.5°C (Heide *et al.*, 2005). Alberga una bacteria azul verdosa conocida como *Anabaena azollae* Strasburger, que le confiere capacidad para fijar nitrógeno atmosférico (Kitoh *et al.*, 1993).

1.1.2.2 Lemna gibba L. “Lemna” o “Lenteja de agua”

Es una planta angiosperma (plantas con flores), monocotiledónea, pertenece a la familia *Lemnaceae*; su habitat es en aguas estancadas ricas en nutrientes; es una pequeña planta acuática, sus hojas tienen la forma de lenteja que flota en el agua, el envés de la hoja suele tener una forma convexa muy característica, raramente florece y normalmente se reproduce de forma vegetativa (García *et al.*, 2009). La temperatura óptima para el crecimiento de *Lemna gibba* es de 23°C (Demirezen *et al.*, 2006).

1.1.3 Tratamiento de aguas residuales con macrófitas

El tratamiento de aguas residuales con macrófitas flotantes, es un proceso de oxidación y reducción, anabolismo y catabolismo, transformaciones de compuestos inorgánicos en orgánicos y de compuestos orgánicos a inorgánicos,

cambios que ocurren y se explican dentro de los ciclos biogeoquímicos (Manahan, 2011).

Hidalgo *et al.* (2005) indica que se utilizan en todo el mundo, especialmente en Europa, plantas acuáticas que fueron desarrolladas como tratamiento secundario o terciario alternativo de aguas residuales y demostraron ser eficientes en la remoción de una amplia gama de sustancias orgánicas, nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, fierro, sulfatos y carbono; además pueden remover metales pesados, tienen la propiedad de inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces, que favorece el desarrollo de microorganismos asociados a ella, coadyuvando la acción depuradora de las plantas acuáticas.

1.1.3.1 Remoción de nitrógeno

El nitrógeno se encuentra en forma prominente en todas las esferas del ambiente, aunque constituye una parte mucho menor de la biomasa que el carbono y el oxígeno, es un constituyente esencial de las proteínas, se fija por procesos bioquímicos mediados por los microorganismos (Manahan, 2011). La fijación biológica del nitrógeno consiste en la transformación de N_2 en amoníaco (NH_3) que es ionizado a NH_4^+ , bajo dos formas, fijación simbiótica a través de bacterias del género *Rhizobium* y otras relacionadas, y fijación no simbiótica realizada por bacterias de los géneros *Azotobacter*, *Beijerinckia* y otras, y algunas cianobacterias del género *Anabaena*, ambas catalizadas por la enzima nitrogenasa (Lara *et al.*, 2007).

La nitrificación es un proceso aerobio realizado por microorganismos, involucra la transformación de amonio a nitrato, la que se realiza en dos etapas y por bacterias diferentes, la primera etapa corresponde a la oxidación de amonio a hidroxilamina (NH_2OH), que posteriormente se oxida a nitrito (NO_2^-), con el consumo de oxígeno y liberación de iones hidrógeno, propiciando un descenso de pH. La segunda etapa, es la oxidación de nitrito (NO_2^-) a nitrato (NO_3^-) (Cervantes *et al.*, 2000). El proceso ANAMMOX (oxidación anaeróbica de amonio) es la formación

de N_2 , a partir de amonio en presencia de nitrito, bajo condiciones anaerobias (Reyes *et al.*, 2003).

Desnitrificación es el proceso por el cual el nitrato (NO_3^-) es reducido hasta nitrógeno atmosférico (N_2), en condiciones anóxicas o respiración anaerobia por medio de bacterias aerobias autótrofos o heterótrofos, siendo la secuencia de reacciones el siguiente:



Las enzimas que intervienen en el proceso son: 1) nitrato reductasa. 2) nitrito reductasa, 3) óxido nítrico reductasa y 4) óxido nitroso reductasa; esta última enzima puede ser inhibida por la presencia de oxígeno, por lo que en el tratamiento de aguas residuales debe evitarse la desnitrificación incompleta, debido a que puede formarse el óxido nitroso que es contaminante (Lazcano, 2016).

Otra forma de reducción del nitrato es la denominada reducción disimilatoria de nitrato a amonio (RDNA), catalizado por la enzima nitrato reductasa no asociada a membrana, que emplea nicotinamida adenina dinucleótido (NADH) como dadores de electrones; es un proceso de remoción de nitrato, que impide la reducción de nitrato a N_2 ; valores bajos C/N, favorece la desnitrificación y valores altos de C/N favorece la RDNA (Cervantes *et al.*, 2000).

Nitrógeno (N), es absorbido por las plantas en forma de iones nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+), la relación amonio:nitrato ($NH_4^+:NO_3^-$) en soluciones nutritivas en verano debe ser 1:3-4 y en invierno 1:4-8 (Resh, 2001). Sin embargo, Clostre y Suni (2007) recomiendan para el caso de *Lemna gibba* proporciones 1:1 de amonio y nitrato.

Chaux *et al.* (2013) en el tratamiento de efluentes piscícolas con *Azolla pinnata*, reportaron remociones de 28% N-NTK, -108% de N- NH_4 , 64% de PT, 56% de DBO_5 y 49% de DQO. Domínguez (2001) al evaluar la depuración de las aguas residuales provenientes de laguna de estabilización, con *Eichhornia crassipes* obtuvo una reducción de 78% en DBO, 80% en DQO, 40% en SST y del 64% de NTK.

1.1.3.2 Remoción de fósforo

El fósforo es nutriente limitante en los ecosistemas; en la geósfera el fósforo es retenido principalmente en rocas metamórficas y en minerales poco solubles, como la hidroxiapatita, un sal de calcio, cuyos depósitos constituyen la mayor reserva de fosfato ambiental; algunas bacterias solubilizan el fósforo insoluble, produciendo ácidos orgánicos (succínico, oxálico, sulfúrico), CO_2 y H_2S (Brack y Mendiola, 2012).

El fósforo soluble de los minerales de fosfato y de otras fuentes, como los fertilizantes, es asimilado por los microorganismos y las plantas e incorporado a los ácidos nucleicos (ADN, ARN), componente de adenosina trifosfato (ATP) y fosfolípidos en las membranas celulares; la mineralización de la biomasa por la descomposición microbiana devuelve el fósforo a la forma de ortofosfato, de la que puede precipitar como materia mineral (Manahan, 2011).

Fósforo es absorbido por las plantas en forma de H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} o PO_4^{3-} , la forma iónica disponible ocurre entre pH 2.0 a 8.0 (Prieto, 2017).

Qin *et al.* (2016) reportaron que el Jacinto de agua *Eichhornia crassipes*, exhibió una capacidad de absorción de nitrógeno de 58.64% de las reducciones totales y 43.13% de eficiencia de remoción de fósforo, mientras la lechuga de agua *Pistia stratiotes* L. mostró 39.05% de eficiencia de remoción de N y mayor capacidad de remoción de P 45.35%; asimismo, la lechuga de agua alcanzó mayores eficiencias de remoción de algas 96.36% y clorofila 96.65%.

Martelo y Lara (2012) indican que *Azolla* alcanzó entre 60% y 52.4% de eficiencia remoción de PT y NT respectivamente. Macrófita *Azolla* es exigente a la presencia de fósforo en aguas residuales, en cambio la deficiencia de N en tratamiento de aguas residuales, podría aliviarse con el uso de *Azolla*, debido a su capacidad simbiótica con la bacteria *Anabaena azollae* para fijar nitrógeno atmosférico (Kitoh *et al.*, 1993).

1.1.3.3 Remoción de azufre

El mayor depósito de azufre se encuentra en la litósfera, en los sedimentos y en menor medida en la atmósfera; el ciclo de azufre es relativamente complejo, porque involucra varias especies gaseosas, minerales poco solubles y varias especies en disolución, siendo el sulfato (SO_4) la forma principal de azufre, que es aprovechado por los autótrofos, formando el sulfato orgánico (Chen *et al.*, 2016).

Por acción de las bacterias y hongos, el azufre orgánico sufre un proceso de reducción disimilatoria y degradación de proteínas en condiciones anaeróbicas, se forma el sulfuro de hidrógeno (H_2S) gaseoso, sulfuro (S^{2-}) y dimetil sulfuro (CH_3) $_2\text{S}$, que son liberados a la atmósfera por procesos biológicos, otros se precipitan como sulfuros y sulfatos minerales (Pérez y Villa, 2005).

En condiciones óxicas, los sulfuros se oxidan en azufre elemental (S^0), óxido de azufre (SO_2), sulfito (SO_3^{2-}), tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), tetrionato ($\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$) y sulfato (SO_4^{2-}); los gases de azufre se oxidan y vuelven de la atmósfera lavados por la lluvia o como lluvia ácida. (Pacheco *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2013).

El azufre es requerido por las plantas en concentraciones similares al fósforo, siendo absorbido por las raíces en forma de iones sulfato (SO_4^-); el azufre también puede ser absorbido de la atmósfera a través de las hojas en áreas ricas en compuestos de azufre; forma parte de los aminoácidos cistina, cisteína y metionina, y de las proteínas que los contienen (Prieto, 2017).

Verma y Suthar (2014) utilizando *Lemna gibba* Lam en el tratamiento de aguas residuales, obtuvieron una disminución de pH (9-13%), CE (13-26%), $\text{NO}_3\text{-N}$ (42-64%), SO_4^{2-} (35-82%), fósforo total (37-54%), entre otros parámetros y considera que la reducción disimilatoria microbiana de sulfato, es una transformación muy importante en humedales construidos, la baja remoción de sulfato con macrófitas en invierno, fue resultado de la baja temperatura y la transferencia de oxígeno mediada por la planta, que

aumentó el potencial redox e inhibió la actividad de las bacterias reductoras de nitrógeno.

Además, los molestosos olores característicos que emiten las aguas residuales, se deben principalmente a los gases sulfuro de hidrógeno (H_2S); las bacterias fotosintéticas pueden convertir el sulfuro de hidrógeno a azufre elemental o a sulfato (Pérez y Villa, 2005).

1.1.4 Biomasa de macrófitas

Las plantas utilizadas en los sistemas de fitorremediación acuática, deben cumplir con los requisitos de alta producción de biomasa, crecimiento rápido y alta acumulación de nutrientes (Qin *et al.*, 2016; Sooknah y Wilkie, 2004). Las plantas son organismos autotróficos, producen sustancias orgánicas complejas a partir de sustancias inorgánicas simples, como el agua, CO_2 y algunos elementos químicos, mediante el proceso de fotosíntesis utilizando la energía luminosa y clorofila (Prieto, 2017).

Una serie de factores bióticos y abióticos, tales como la temperatura, la composición del medio de crecimiento, la intensidad de luz y la densidad de la fronda o planta, ejercen una influencia significativa en el crecimiento de las macrófitas flotantes (Monette *et al.*, 2006).

La cosecha de biomasa de macrófitas flotantes puede ser potencialmente utilizado para el compostaje, enmiendas del suelo, digestión anaeróbica con producción de metano, y procesamiento para la alimentación animal (Sooknah y Wilkie, 2004). En caso de *Azolla*, además de su alta productividad de biomasa, alberga la bacteria *Anabaena azollae* fijadora de N, que se puede utilizar como bio-fertilizante nitrogenado (Arora y Saxena, 2005). Asimismo, la biomasa verde es un medio de cosecha de carbono y puede contribuir en la lucha contra el cambio climático y el efecto invernadero, por cuanto el 45% de la biomasa seca corresponde a carbono (Arévalo *et al.*, 2003).

Las macrófitas flotantes por su eficiencia en la depuración de contaminantes y nutrientes de las aguas residuales, es una alternativa viable, para implementar sistemas de tratamiento en humedales artificiales, debido a su bajo costo de construcción, de operación y mantenimiento, que se puede implementar en

núcleos sociales con bajos recursos económicos, los cuales no tienen acceso a tratamientos más avanzados (Arroyave, 2004; Rodríguez *et al.*, 2010).

1.1.5 Normas de calidad de las aguas residuales

La disposición de aguas residuales sin tratamiento alguno y las aguas residuales tratadas inadecuadamente contaminan los cuerpos de agua natural, convirtiéndose en focos infecciosos para la salud de las poblaciones, así como para la flora y fauna del lugar; la sobrecarga de aguas residuales en las plantas de tratamiento cuya infraestructura es insuficiente, originan efluentes tratados que exceden los límites máximos permisibles (LMP), y no se cumplen con los estándares de calidad ambiental (ECA) (OEFA, 2014).

Los parámetros para efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), fueron establecidos mediante el D.S. N°003-2010-MINAM, donde se fijan los Límites Máximos Permisibles (LMP), que es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente (Normas Legales, 2010).

Tabla 1
Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de PTAR

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de aguas
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	10 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	Unidad	6.5 – 8.5
Sólido Totales en Suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: Norma Legales, El Peruano 2010.

En cumplimiento de sus funciones específicas el Ministerio del Ambiente (MINAM), elaboró los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, las que fueron aprobadas a través de los D.S. 002-2008-MINAM y su modificatoria D.S. 015-2015-MINAM, que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el

agua en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente (Normas Legales, 2015).

En el estudio de estado de calidad ambiental realizado en la cuenca del Titicaca y de la bahía interior de Puno, por la Comisión Multisectorial para la Prevención y Recuperación Ambiental del Lago Titicaca (2014), los diversos parámetros ambientales analizados, fueron cotejados con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental Categoría 4 de conservación de ambiente acuático de lagunas y lagos, de esta manera se ha establecido el creciente proceso de eutrofización y contaminación especialmente de la bahía interior de Puno.

Tabla 2

Estándares Nacionales de Calidad Ambiental ECA Categoría 3 aguas para riego de vegetales de tallo alto y bajo.

Parámetro	Unidad	Parámetros para riego de vegetales
Físicos – Químicos		
Aceites y grasas	mg/L	5
Bicarbonatos	mg/L	518
Cianuro Wad	mg/L	0.1
Cloruros	mg/L	500
Color (b)	Escala Pt/Co	100(a)
Conductividad	μS/cm	2500
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	15
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0.2
Fenoles	mg/L	0.002
Fluoruros	mg/L	1
Nitratos + Nitritos	mg/L	100
Nitritos	mg/L	10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad pH	6.5-8.5
Sulfatos	mg/L	1000
Temperatura	°C	Δ3
Microbiológicos y Parasitológicos		
Coliformes Totales (35-37°C)	NMP/100 ml	1000
Coliformes Termotolerantes (44.5°C)	NMP/100 ml	1000
Enterococos intestinalis	NMP/100 ml	20
Escherichia coli	NMP/100 ml	100
Huevos y larvas de helmintos	Huevos/L	<1

(a) para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural)

(b) Después de filtración simple

Fuente: Normas Legales, El Peruano, 2015

Otra norma que permite vislumbrar la posibilidad de utilizar macrófitas en tratamiento complementario, son los Estándares de Calidad Ambiental de

Categoría 3 aguas para riego de vegetales de tallo alto y bajo (Normas Legales, 2015).

Tabla 3

Estándares Nacionales de Calidad Ambiental ECA Categoría 4 conservación del ambiente acuático de lagos y lagunas.

Parámetro	Unidad	Lagunas y Lagos
Físicos – Químicos		
Aceites y grasas (MEH)	mg/L	5
Cianuro Total	mg/L	0.0052
Color (b)	Escala Pt/Co	20 (a)
Clorofila A	mg/L	0.008
Conductividad	μS/cm	1000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5
Fenoles	mg/L	2.56
Fosforo Total	mg/L	0.035
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	13
Amoniaco	mg/L	1.9
Nitrógeno Total	mg/L	0.315
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad pH	6.5-9.0
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	≤ 25
Sulfuros	mg/L	0.002
Temperatura	°C	Δ3
Microbiológicos		
Coliformes Termotolerantes (44.5°C)	NMP/100 ml	1000

(a) para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural)

(b) Después de filtración simple

Fuente: Normas Legales, El Peruano, 2015

1.2 Antecedentes

Manahan (2011) considera que a las cuatro esferas ambientales: hidrósfera, atmósfera, geósfera y biósfera, debe agregarse una quinta esfera la antropósfera, para abordar integralmente los temas ambientales, debido a que las actividades humanas son las principales fuentes perturbadoras, que causan contaminación y sus efectos adversos. El crecimiento constante de la población mundial y la acentuada concentración en grandes ciudades, agudizan el problema de la contaminación ambiental, generando grandes cantidades de aguas residuales domésticas, que según las estimaciones de la UNESCO (2012) más del 80% de las aguas utilizadas en todo el planeta no se recoge ni se trata, con la consiguiente amenaza a la salud humana y al medio ambiente.

Generalmente las aguas residuales son vertidas a los cuerpos de aguas limpias, tal como ocurre en la región Puno, son vertidas a los ríos de la cuenca del Titicaca y al Lago Titicaca, que según MINAM (2013) el 83% de estas aguas servidas se vierten sin ningún tratamiento y sólo el 17 % de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, cumplen con las regulaciones y procedimientos operacionales básicos y disposición final. Similar situación ocurre con la bahía interior de Puno, al recibir aguas residuales sin tratamiento alguno y de deficiente tratamiento en las lagunas de oxidación, causando creciente eutrofización (Canales, 2010; Fontúrbel, 2005).

En la actualidad existen diversidad de tratamientos físicos, químicos y biológicos; por los bajos costos de implementación, operación y mantenimiento, los procesos biológicos usando las plantas acuáticas en tratamientos secundarios y terciarios en aguas residuales, han demostrado ser eficientes, en la remoción de sustancias orgánicas, nutrientes y metales pesados (Hidalgo et al., 2005). Las plantas acuáticas flotantes, debido a su alta productividad, facilidad de almacenamiento y recolección son adecuados para los humedades de fitorremediación (Amare *et al.*, 2018).

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas. (Delgadillo *et al.*, 2011)

Manahan (2011) considera que a las cuatro esferas ambientales: hidrósfera, atmósfera, geósfera y biósfera, debe agregarse una quinta esfera la antropósfera, para abordar integralmente los temas ambientales, debido a que las actividades humanas son las principales fuentes perturbadoras, que causan contaminación y sus efectos adversos. El crecimiento constante de la población mundial y la acentuada concentración en grandes ciudades, agudizan el problema de la contaminación ambiental, generando grandes cantidades de aguas residuales domésticas, que según las estimaciones de la UNESCO (2012) más del 80% de las aguas utilizadas en todo el planeta no se recoge ni se trata, con la consiguiente amenaza a la salud humana y al medio ambiente.

Generalmente las aguas residuales son vertidas a los cuerpos de aguas limpias, tal como ocurre en la región Puno, son vertidas a los ríos de la cuenca del Titicaca y al Lago Titicaca, que según MINAM (2013) el 83% de estas aguas servidas se vierten sin ningún tratamiento y sólo el 17 % de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, cumplen con las regulaciones y procedimientos operacionales básicos y disposición final. Similar

situación ocurre con la bahía interior de Puno, al recibir aguas residuales sin tratamiento alguno y de deficiente tratamiento en las lagunas de oxidación, causando creciente eutrofización (Canales, 2010; Fontúrbel, 2005).

En la actualidad existen diversidad de tratamientos físicos, químicos y biológicos; por los bajos costos de implementación, operación y mantenimiento, los procesos biológicos usando las plantas acuáticas en tratamientos secundarios y terciarios en aguas residuales, han demostrado ser eficientes, en la remoción de sustancias orgánicas, nutrientes y metales pesados (Hidalgo *et al.*, 2005). Las plantas acuáticas flotantes, debido a su alta productividad, facilidad de almacenamiento y recolección son adecuados para los humedades de fitorremediación (Amare *et al.*, 2018).

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas (Delgadillo *et al.*, 2011; Núñez, 2004). Las plantas utilizadas para la fitorremediación deben cumplir con los requisitos, tales como alta producción de biomasa, crecimiento rápido y alta acumulación de nutrientes (Qin *et al.*, 2016).

Las macrófitas flotantes comprenden un amplio y variado grupo de plantas, en las que destacan el Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) (Qin *et al.*, 2016). La salvinia (*Salvinia Spp.*), la redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), y algunas especies de lentejas de agua (*Lemna Spp.*, *Spirodella Spp.*) (Martelo y Lara, 2012). Las especies del género *Azolla sp.* (García *et al.*, 2009). Fontúrbel (2005) reporta sobre la proliferación de macrófitas acuáticas flotantes principalmente *Lemna gibba* y *Azolla sp* en la parte peruana del Lago Titicaca.

Hammouda (1995) al evaluar la eficiencia de tratamiento de aguas residuales contaminadas utilizando *Lemna gibba* reporta eficiencia de remoción de fósforo entre 60 y 92.2 % y de nitratos entre 95.3 y 99.4%. Asimismo, Verma y Suthar (2014) utilizando *Lemna gibba* en el tratamiento de aguas residuales en la India, obtuvieron una disminución de pH (9-13%), CE (13-26%), NO₃-N (42-64%), SO₄⁻² (35-82%), fósforo total (37-54%), entre otros parámetros y la conversión de nutrientes de aguas residuales en biomasa rica en proteínas y carbohidratos, sugiriendo que este macrófito puede ser utilizado de manera efectiva en el tratamiento de aguas residuales y recolección de biomasa.

En estudios realizados por Arora y Saxena (2005) sobre la producción de biomasa de *Azolla microphylla* en aguas residuales municipales en Delhi-India como tratamiento secundario, indica que en las cuatro estaciones del año se puede producir biomasa, pero en la estación de invierno bajo condiciones climáticas del norte de la India, la producción de biomasa puede disminuir hasta en 50%, el tiempo de duplicación de producción de biomasa más cortos ocurre en los meses de verano; pudiendo influir en la tasa de crecimiento de *Azolla* la densidad de planta, la temperatura, composición de nutrientes y la radiación solar.

El crecimiento y la fijación de nitrógeno de *Azolla filiculoides* Lam, fueron investigados por Kitoh *et al.* (1993), manifestando que la presencia de amonio en el agua residual limitaba el crecimiento de *Azolla*, la fijación de nitrógeno y la reducción de la actividad de acetileno (ARA), la presencia de amonio puede ser tolerado hasta 5 μM ; sin embargo, las plantas acuáticas para su crecimiento normal absorben nitrógeno y fósforo a una relación molar de aproximadamente 10:1, por lo que en el estanque de agua en estudio las disminuciones de crecimiento y la fijación de nitrógeno, se deben principalmente a la deficiencia de fósforo; indican que el nitrato fue el causante del desprendimiento de raíz de *Azolla*.

Correa-Torres *et al.* (2015) evaluaron en Colombia la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros en aguas residuales domésticas, utilizando *Phragmites australis* en bioreactores, obteniendo 60-90% de remoción de fósforo, 13 % de nitrógeno y sulfuros fueron removidos en 20%, mayores remociones se obtuvieron en reactores flujo de pistón.

Singh y Schwan (2011) indican que el azufre es uno de los principales nutrientes para las plantas junto con el nitrógeno, fósforo y el potasio; el azufre está implicado en varias funciones fisiológicas de las plantas, en la síntesis de aminoácidos, proteínas y metabolitos secundarios; las plantas, bacterias, algas y hongos tienen la capacidad de absorber el azufre inorgánico e integrarlo en compuestos orgánicos, el azufre se absorbe principalmente como sulfato a través del sistema de raíces de las plantas.

Wu, *et al.* (2013), al explicar la transformación de azufre en humedales construidos CWs (Constructed Wetlands) para tratamiento de aguas residuales, señalan que es necesario comprender el ciclo de azufre y las interacciones con los ciclos de carbono, nitrógeno y fósforo, los procesos biótico y abióticos, así como la oxidación/reducción y la desproporción que puede ocurrir en la zona de raíces en CWs, esta comprensión puede

ayudar a proponer diseños de CWs más sostenibles para el tratamiento de aguas residuales.

Canales (2010) al evaluar la densidad de la biomasa de *Lemna gibba* en la bahía interior de la ciudad de Puno, reporta alta rendimiento de biomasa de 6.94 kg/m², además considera que lejos de considerar a la *Lemna* como un problema, se debe implementar su manejo y que puede ser una alternativa para disminuir el proceso de eutrofización.

Las plantas utilizadas para la fitorremediación deben cumplir con los requisitos, tales como alta producción de biomasa, crecimiento rápido y alta acumulación de nutrientes (Qin *et al.*, 2016).

Las macrófitas flotantes comprenden un amplio y variado grupo de plantas, en las que destacan el Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) (Qin *et al.*, 2016). La salvinia (*Salvinia Spp.*), la redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), y algunas especies de lentejas de agua (*Lemna Spp.*, *Spirodella Spp.*) (Martelo y Lara, 2012). Las especies del género *Azolla* sp. (García *et al.*, 2009). Fontúrbel (2005) reporta sobre la proliferación de macrófitas acuáticas flotantes principalmente *Lemna gibba* y *Azolla sp* en la parte peruana del Lago Titicaca.

Hammouda (1995) al evaluar la eficiencia de tratamiento de aguas residuales contaminadas utilizando *Lemna gibba* reporta eficiencia de remoción de fósforo entre 60 y 92.2 % y de nitratos entre 95.3 y 99.4%. Asimismo, Verma y Suthar (2014) utilizando *Lemna gibba* en el tratamiento de aguas residuales en la India, obtuvieron una disminución de pH (9-13%), CE (13-26%), NO₃-N (42-64%), SO₄⁻² (35-82%), fósforo total (37-54%), entre otros parámetros y la conversión de nutrientes de aguas residuales en biomasa rica en proteínas y carbohidratos, sugiriendo que este macrófito puede ser utilizado de manera efectiva en el tratamiento de aguas residuales y recolección de biomasa.

En estudios realizados por Arora y Saxena (2005) sobre la producción de biomasa de *Azolla microphylla* en aguas residuales municipales en Delhi-India como tratamiento secundario, indica que en las cuatro estaciones del año se puede producir biomasa, pero en la estación de invierno bajo condiciones climáticas del norte de la India, la producción de biomasa puede disminuir hasta en 50%, el tiempo de duplicación de producción de biomasa más cortos ocurre en los meses de verano; pudiendo influir en la tasa de

crecimiento de *Azolla* la densidad de planta, la temperatura, composición de nutrientes y la radiación solar.

El crecimiento y la fijación de nitrógeno de *Azolla filiculoides* Lam, fueron investigados por Kitoh *et al.* (1993), manifestando que la presencia de amonio en el agua residual limitaba el crecimiento de *Azolla*, la fijación de nitrógeno y la reducción de la actividad de acetileno (ARA), la presencia de amonio puede ser tolerado hasta 5 μM ; sin embargo, las plantas acuáticas para su crecimiento normal absorben nitrógeno y fósforo a una relación molar de aproximadamente 10:1, por lo que en el estanque de agua en estudio las disminuciones de crecimiento y la fijación de nitrógeno, se deben principalmente a la deficiencia de fósforo; indican que el nitrito fue el causante del desprendimiento de raíz de *Azolla*.

Correa-Torres *et al.* (2015) evaluaron en Colombia la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros en aguas residuales domésticas, utilizando *Phragmites australis* en bioreactores, obteniendo 60-90% de remoción de fósforo, 13 % de nitrógeno y sulfuros fueron removidos en 20%, mayores remociones se obtuvieron en reactores flujo de pistón.

Singh y Schwan (2011) indican que el azufre es uno de los principales nutrientes para las plantas junto con el nitrógeno, fósforo y el potasio; el azufre está implicado en varios funciones fisiológicas de las plantas, en la síntesis de aminoácidos, proteínas y metabolitos secundarios; las plantas, bacterias, algas y hongos tienen la capacidad de absorber el azufre inorgánico e integrarlo en compuestos orgánicos, el azufre se absorbe principalmente como sulfato a través del sistema de raíces de las plantas.

Wu *et al.* (2013) al explicar la transformación de azufre en humedales construidos CWs (Constructed Wetlands) para tratamiento de aguas residuales, señalan que es necesario comprender el ciclo de azufre y las interacciones con los ciclos de carbono, nitrógeno y fósforo, los procesos biótico y abióticos, así como la oxidación/reducción y la desproporción que puede ocurrir en la zona de raíces en CWs, esta comprensión puede ayudar a proponer diseños de CWs más sostenibles para el tratamiento de aguas residuales.

Canales (2010) al evaluar la densidad de la biomasa de *Lemna gibba* en la bahía interior de la ciudad de Puno, reporta alta rendimiento de biomasa de 6.94 kg/m^2 , además



considera que lejos de considerar a la *Lemma* como un problema, se debe implementar su manejo y que puede ser una alternativa para disminuir el proceso de eutrofización.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

El creciente desarrollo de la humanidad, asociado a la continua industrialización, urbanización y empleo de motores de todo tipo, ha devenido en el incremento de la contaminación ambiental; algunos de los problemas más graves son las lluvias ácidas, efecto invernadero y el envenenamiento de las aguas y los suelos a través del vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales (Pérez y Villa, 2005).

Los centros urbanos en la región Puno, vierten las aguas residuales domésticas a los ríos que drenan al lago Titicaca, de ellos, solamente seis sistemas de tratamiento (17%) cumplen con las regulaciones y procedimientos operacionales básicos y disposición final de las aguas residuales; que incluyen la limpieza de los componentes y mantenimiento del sistema, en el resto 83% no se realizan; siendo los mayores contribuyentes las ciudades de Juliaca y Puno con 40.59 y 23.54% de la carga orgánica anual, respectivamente (MINAM, 2013).

Las aguas residuales generadas de la ciudad de Puno, son evacuados a lagunas de estabilización de “El Espinar”, siendo la cobertura del servicio de alcantarilla de 61%, el resto 39% de la población, dispone las aguas residuales directamente al Lago (EMSA-PUNO, 2011).

Según informe de análisis de 15 puntos monitoreado por la Comisión Multisectorial para la Prevención y Recuperación Ambiental del lago Titicaca, (2014), el cuerpo de agua de la bahía interior de Puno, no son aptas para la conservación acuática de lagos y lagunas, la calidad de este cuerpo de agua está fuertemente influenciada por vertimientos de origen

doméstico, industrial y agrícola, siendo la variable de mayor incidencia los patógenos, por lo que, es un ambiente acuático altamente perturbado y eutrófico, producto del ingreso de aguas residuales sin el tratamiento adecuado, de la laguna de oxidación de “El Espinar” y de efluentes clandestinos.

Frecuentemente se considera a la proliferación de macrófitas flotantes como *Lemna gibba*, un claro indicador del avance de proceso eutrófico, responsable de la reducción de la diversidad y la heterogeneidad de las especies (Fontúrbel, 2005). Sin embargo, la presencia vigorosa de las macrófitas no es la causa sino el efecto eutrófico; las macrófitas flotantes, debido a su alta productividad, facilidad de almacenamiento y recolección, son adecuados para las humedades de fitorremediación (Amare *et al.*, 2018).

Las macrófitas flotantes demostraron ser eficientes, en la remoción de sustancias orgánicas, nutrientes y metales pesados, en tratamientos secundarios y terciarios de aguas residuales; que dependen principalmente de la temperatura del ambiente, pues estas varían de acuerdo al ciclo estacional, que puede afectar seriamente su rendimiento, en sistemas de tratamiento de aguas residuales que deben operar todo el año (Hidalgo *et al.*, 2005).

2.2 Enunciados del problema

Por los argumentos expuestos, el presente trabajo de investigación, propone responder a las siguientes preguntas:

- ¿La eutrofización de la bahía interior de Puno por las aguas residuales que son vertidos en las diferentes épocas del año, puede mitigarse con el uso de macrófitas flotantes, por su alta eficiencia en la remoción nutrientes y producción biomasa?
- ¿Con qué nivel de calidad de los parámetros físicos, químicos y biológicos, son vertidos las aguas residuales a la bahía interior de Puno, en las diferentes estaciones climáticas?
- ¿Cuánto es la eficiencia de las macrófitas flotantes en la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfatos, en estaciones climáticas de Puno?
- ¿Cuánto es la eficiencia de las macrófitas flotantes en la producción de biomasa, en diferentes estaciones climáticas de Puno?

2.3 Justificación

El ecosistema de la bahía interior de Puno, producto del ingreso de aguas residuales de la ciudad, sin el tratamiento adecuado, vertidos tanto de las lagunas de estabilización de *El Espinar* y efluentes clandestinos, está convirtiéndose paulatinamente en un ambiente acuático altamente perturbado y eutrófico; situación que puede mitigarse aprovechando la capacidad de las macrófitas flotantes en depurar contaminantes y nutrientes, mediante un manejo complementario en humedales artificiales.

Por la eficiencia demostrada de las macrófitas flotantes, en la remoción de contaminantes y nutrientes, Ran *et al.* (2004) proponen la tecnología de humedales construidos conocidos con el acrónimo CWs (Constructed Wetlands), que son estanques superficiales alimentados con agua residual, en ellas se instala cierta densidad de macrófitas, que luego de un periodo de tiempo corto se realiza la cosecha, teniendo como resultado aguas aptas para reutilizar en riego de áreas verdes, en la producción de plantas ornamentales y otros.

En la actualidad, existen diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales, que requieren el uso de reactivos y equipos complejos, con elevados montos de inversión; en cambio, los sistemas de tratamiento biológicos como las macrófitas, son más accesibles, tienen bajo costo, son de fácil instalación, manejo y mantenimiento (Sooknah y Welkie, 2004). Adecuada para poblaciones urbanas de menor tamaño de población (Arroyave, 2004). Por lo que, la depuración de contaminantes con macrófitas, puede constituir una alternativa atractiva de tratamiento de aguas residuales, en municipios distritales y centros poblados de la región Puno.

Las macrófitas flotantes por su capacidad de propagarse exponencialmente en ambientes eutróficos, producen gran cantidad de biomasa o materia orgánica, pudiendo ser potencialmente utilizado para el compostaje, enmienda del suelo, digestión anaeróbica con producción de metano y procesamiento para la alimentación animal (Sooknah y Welkie, 2004).

Como sub producto de tratamiento de aguas residuales, la biomasa pos-cosecha de las macrófitas, además constituyen un suplemento nutritivo para la alimentación animal, debido a su alto contenido de proteínas que van desde 15% a 45% (Xu y Shen, 2011).

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Evaluar los parámetros ambientales de las aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno en las diferentes épocas del año y la eficiencia de las macrófitas flotantes en la remoción de nutrientes y la producción de biomasa.

2.4.2 Objetivos específicos

- a) Valorar el nivel de calidad ambiental de los parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno, en las diferentes estaciones climáticas.
- b) Evaluar la eficiencia de las macrófitas flotantes en la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfatos de las aguas residuales, por estaciones climáticas.
- c) Estimar la eficiencia de la macrófitas en la producción de biomasa por épocas climáticas.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

La baja calidad ambiental de las aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno en las diferentes épocas del año, es la causa principal de la eutrofización, esta situación se puede mitigar con el uso de macrófitas flotantes por su alta eficiencia en la remoción de nutrientes y producción de biomasa.

2.5.2 Hipótesis específicas

- i. El nivel de calidad ambiental de los parámetros físicos, químicos y biológicos de las aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno son deficientes y varían con las estaciones climáticas del año.
- ii. Las macrófitas flotantes muestran alta eficiencia en la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfatos de las aguas residuales, según épocas climáticas.
- iii. Las eficiencias de macrófitas flotantes en la producción de biomasa varían de acuerdo a las estaciones climáticas.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

Las muestras de aguas residuales se tomaron de la bahía interior de Puno del sector isla “El Espinar”, en las dos épocas: El primer punto de muestreo fue el sitio de la descarga final de las lagunas de estabilización de “El Espinar”, cuyas coordenadas UTM son: 0393083 E y 8247062 N. El segundo punto de muestreo para cultivo de macrófitas flotantes, se estableció aproximadamente a 100 metros del punto de vertido lago adentro, en el mismo sector de isla “El Espinar”, cuyas coordenadas UTM son: 0393390 E y 8247390 N. El cultivo de macrófitas se instaló bajo un cobertizo ubicado en las coordenadas UTM: 0390868 E y 8250437 N a 3 833 msnm en la Ciudad Universitaria, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano Puno.

Las condiciones climáticas e hidrográficas corresponden a la meseta del Collao o Altiplano descrito por Brack y Mendiola (2012) que considera dentro de la región natural puna y los altos andes, desde los 3 800 msnm hasta por encima de los 5 200 msnm, se caracteriza por presentar precipitaciones promedio de 700 mm anuales y clima frígido; los veranos (diciembre a marzo) son lluviosos y nubosos, y los inviernos (junio a agosto) son secos y con heladas nocturnas continuas.

El periodo de máximas precipitaciones se presenta entre los meses de diciembre a febrero (temporada húmeda), donde se registran más del 55% de la precipitación pluvial total anual; en tanto que en la temporada seca comprendida entre los meses de junio a agosto, sólo se registra el 5% de la precipitación pluvial total anual; en relación a la temporada de bajas temperaturas, las temperaturas mínimas más extremas registradas corresponden

a -16°C , que ocurre en invierno, mientras que para el verano (temporada de lluvias) las temperaturas mínimas varían entre los 0°C y 6°C (Díaz, 2013).

Anexo 1 muestra el registro de precipitaciones pluviales y temperaturas, correspondientes a los meses de ejecución del presente estudio, se registraron precipitaciones pluviales de 78.7 mm en febrero y 2.2 mm en el mes de junio; las temperaturas máximas no tuvieron mayor variación entre las épocas 16°C y 15.6°C en febrero y junio, las temperaturas mínimas en junio fueron en promedio 0.7°C y en febrero 7°C , confirmando el comportamiento característico del clima en época lluviosa y seca de la zona.

3.2 Población

Para el presente estudio la unidad de población, se ha considerado el cuerpo receptor de aguas residuales de la ciudad de Puno, ubicado en la bahía interior del Lago Titicaca, conocida como “Bahía Interior de la ciudad de Puno”.

Referente a la población de las macrófitas o plantas acuáticas, existe una amplia gama de estas especies: especies enraizadas al substrato sumergidas en el agua, macrófitas enraizadas flotantes cuando sus hojas flotan en la superficie del agua, y macrófitas flotantes cuando no se encuentran adheridos a ningún substrato. Para fines del presente trabajo se ha considera únicamente a la población de macrófitas flotantes.

3.3 Muestra

3.3.1 Muestreo de aguas residuales para análisis de laboratorio

Siguiendo los procedimientos recomendados por Fernández (2011), con fines de monitoreo de aguas en las dos épocas, fueron identificados las ubicaciones con una referencia física, registrando sus coordenadas UTM, los muestreos de aguas residuales se realizaron en época lluviosa el 03 de febrero 2019 y en época seca el 19 junio 2019; los muestreos al final del cultivo se efectuaron después 8 días de cada contenedor y por especie macrófita, de la misma manera en cada época.

La muestra para determinar coliformes, se recogió en frascos de vidrio ámbar previamente estilizados, directamente sin enjuagar, sumergiendo la botella boca abajo a una profundidad de 20 cm, de manera que la boca apunte hacia la corriente y dejando espacio en el recipiente sin llenar (1/4 de frasco).

Para análisis de sustancias inorgánicas, se enjuagó el frasco de plástico con el agua a ser recolectada, la muestra se tomó en contracorriente a una profundidad de 20 cm a partir de la superficie.

Para análisis de parámetros orgánicos, se utilizó frascos de plástico de boca ancha con capacidad de aproximadamente un litro, se llenó completamente de agua residual sin burbujas de aire, la toma de muestra se realizó en dirección opuesta al flujo de agua. Las muestras se tomaron aproximadamente a las 7 de la mañana.

3.3.2 Muestreo de material experimental

Por su adaptabilidad y presencia en la zona, fueron utilizados dos especies de macrófitas flotantes, *Lemna gibba* L “Lemna” y *Azolla filiculoides* Lam. “Azolla”, ambas fueron recolectadas del cuerpo local de agua ubicado en “Malecón Ecoturístico Bahía de los Incas Puno”. Fue necesario determinar previamente para ambas plantas acuáticas la densidad inicial, para un periodo de residencia hidráulica de 8 días, estableciéndose para *Azolla filiculoides* 500 g/m² y para *Lemna gibba* 325 g/m², estas densidades iniciales se emplearon en ambas épocas.

3.4 Método de investigación

3.4.1 Cultivo de macrófitas flotantes

Como reactores fueron elaborados contenedores de madera de 0.50 m largo x 0.40 m de ancho x 0.20 m de altura, forrados por su interior con plástico negro para evitar la proliferación de algas, con una profundidad de trabajo de 0.15 m, una superficie o área de 0.20 m² cada contenedor, similares a los utilizados por Monette *et al.* (2006); los macrófitos se cultivaron con tres repeticiones, en un volumen de agua residual de 0.03 m³ o 30 litros por contenedor. El tiempo de residencia hidráulica fue de 8 días, periodo de tiempo similar utilizado por Adhikari *et al.* (2014). Durante el periodo de cultivo, fue oxigenado una vez por día por dos minutos cada contenedor, empleando un aireador de pecera.

3.4.2 Cosecha de biomasa

Al final de 8 días de tiempo de residencia hidráulica, tanto en época lluviosa como en época seca, fue cosechado la biomasa, extrayendo con un colador de plástico por cada contenedor y para cada especie macrófita, dejando drenar el agua por 5

minutos sobre un papel secante, luego determinar el peso fresco total por cada unidad experimental y muestrear para determinar el peso seco de cada especie con sus respectivas repeticiones.

3.4.3 Determinación de parámetros físicos, químicos y biológicos

Los parámetros temperatura del agua residual, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y pH, fueron tomados *in situ* al momento de recoger las muestras respectivas.

Las muestras recogidas para fines de análisis y determinación de componentes físicos, químicos y biológicos, debidamente etiquetados y conservados en caja *ice pack*, fueron analizados en el Laboratorio de Calidad Ambiental del Instituto de Ecología, Facultad de Ciencias Puras y Naturales de la Universidad Mayor de San Andrés en la Paz - Bolivia.

Tabla 4

Parámetros físicos, químicos y biológicos, métodos utilizados, unidad y límites de determinación, Puno Perú, 2019

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10
Temperatura	Termómetro	°C	
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0.10
pH	pHmetro digital	Unidades	
C.E.	Conductímetro	mS/cm	
OD	Oxímetro	mg/l	
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0.20
DQO	SM 5220-C	mg/l	5.0
Nitrógeno Total	EPA 351.1	mg/l	0.30
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0.30
Fósforo total	EPA 365.2	mg P-PO ₄ /l	0.010
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1.0
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100ml	2.0

SM = Standard Methods (For the Examination of water and Wastewater)

EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Fuente: Laboratorio de Calidad Ambiental del Instituto de Ecología, UMSA, Bolivia

3.4.4 Eficiencia de remoción

Considerando en *stricto sensu* la remoción, puede resultar en una disminución o un aumento de un elemento o compuesto, que dependerá de las condiciones físicas

y químicos donde ocurren los procesos de oxidación y reducción; estos cambios ocurren dentro de los ciclos biogeoquímicos y no significa eliminación del contaminante.

La eficiencia de remoción, que se refiere a la proporción de la reducción de un contaminante, se calculó por la ecuación utilizada por Palta y Morales (2013).

$$\% \text{ remoción} = \frac{VPi - VPf}{VPi} \times 100 \quad [1]$$

Donde: VPi = Valor de parámetro inicial, VPf = Valor de parámetro final.

Para los casos en que la remoción resulta en incrementos del parámetro, se utilizó la ecuación propuesta por Torres-Degró (2011) como tasa de crecimiento aritmético o lineal.

$$\% \text{ incremento} = \left(\frac{Pf - Pi}{Pi} \right) \times 100 \quad [2]$$

Donde: Pf = Valor de parámetro final, Pi = Valor de parámetro inicial.

3.4.5 Determinación de materia verde y materia seca

La materia fresca, fue obtenido por el peso de la biomasa verde al inicio y final del periodo de residencia hidráulica, por cada contenedor y por especie de macrófita, siguiendo similar procedimiento en cada época. Para determinar la materia seca de la biomasa, fue muestreada la materia fresca de *Azolla* y de *Lemna*, con sus respectivas repeticiones en una luna reloj, determinando el peso de muestra y el peso de luna reloj vacío. Posteriormente se llevó al horno a temperatura de 65°C durante 48 horas, hasta obtener peso constante. La materia seca fue determinada en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNA-Puno.

3.4.6 Eficiencia de producción de biomasa

Desde el punto de vista económico, se distinguen la eficiencia técnica o física y eficiencia económica, ambos aluden a máximos cantidades de producto total que se puede obtener, el primero con una cantidad determinada mínima de insumo y el segundo referido a un costo mínimo y máximo beneficio (Parkin y Loría, 2010).

La eficiencia de producción de biomasa, debe expresar la proporción del incremento real de la biomasa en el periodo de residencia hidráulica, tomando como base la densidad inicial, por lo que, fue pertinente utilizar la ecuación propuesta por Torres (2011) conocida como tasa de crecimiento aritmético o lineal, que representa el incremento porcentual de biomasa o eficiencia de producción de biomasa ($\Delta\%B$) en un determinado periodo de tiempo.

$$\text{Eficiencia de producción biomasa} = \left(\frac{P_f - P_i}{P_i} \right) \times 100 \quad [3]$$

Donde: P_f = Peso final de la biomasa, P_i = Peso inicial de la biomasa

3.4.7 Determinación de tasa de crecimiento de biomasa

Considerando la multiplicación rápida por gemación de las macrófitas flotantes en estudio, capaces de duplicar su población en dos a tres días. Situación que se asemeja a un modelo exponencial o geométrico, y se ajusta al modelo de interés compuesto siguiente (Diéguez *et al.*, 2003; Torres, 2011):

$$r = [(P_f/P_i)^{1/t} - 1] \times 100 \quad [4]$$

Dónde: r = tasa de crecimiento porcentual por día, P_f = Peso final de la biomasa, P_i = Peso inicial de la biomasa, t = Tiempo de residencia hidráulica

Sin embargo, los reportes sobre producción de biomasa de macrófitas, utilizan como indicador de productividad de diferentes configuraciones experimentales, la cantidad total de la biomasa cosechada después de un periodo de tiempo en una determinada superficie, denominado como tasa de crecimiento relativo (TCR), calculándose mediante la ecuación propuesta por Verma y Suthar (2014) de la siguiente manera:

$$\text{TCR} = \frac{TB/N}{A} \quad [5]$$

Donde: TCR = Tasa de crecimiento relativo ($\text{g/m}^2/\text{d}$), TB = Biomasa total cosechada al final del periodo, N = número de días del periodo y A = superficie del agua.

3.5 Descripción de métodos por objetivos específicos

3.5.1 Descripción de variables analizadas

3.5.1.1 Variables dependientes o de respuesta

- a) Parámetros físicos, químicos y biológicos considerados en el punto de vertido de las lagunas de estabilización “El Espinar “por épocas.
- b) Eficiencia de las macrófitas en la remoción de Nitrógeno, fósforo y sulfatos, por épocas.
- c) Eficiencia de macrófitas en la producción de biomasa por épocas en materia verde y porcentaje de materia seca.

3.5.1.2 Variables independientes o predeterminadas.

- a) Épocas: Lluviosa y Seca
- b) Macrófitas flotantes: *Azolla filiculoides* Lam. “*Azolla*” y *Lemna gibba* L. “*Lemna*”.

3.5.2 Materiales y equipos utilizados

Durante el desarrollo de la investigación, fueron utilizados los siguientes materiales y equipos: Una embarcación o lancha pequeña, recipientes de polietileno cada uno con 5 galones de capacidad para muestras de las aguas residuales con fines de cultivo, ficha de registro de campo, etiquetas para identificación de frascos, papel secante (Tissue), cinta adhesiva, plumón indeleble, frasco de polietileno (primer uso), frascos de vidrio ambar, guantes de nitrilo descartables y botas de jebe, GPS map 625 GARMIN , cámara fotográfica, chaleco salvavidas, coolers grande (*ice pack*), conductímetro CE portátil HACH Conductivity/TDS Meter y pH-metro digital HANNA HI-98130, medidor de oxígeno disuelto PDO 408, balanza AND Fx-3000i máx 3200g d=0.01g.

3.5.3 Aplicación de prueba estadística inferencial

Para determinar las diferencias estadísticas de los parámetros de las aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno, entre época lluviosa y seca, fueron considerados los parámetros: pH, turbidez, sólidos totales, DBO₅, DQO, PT y SO₄;

por la alta dispersión observada entre los datos, fueron estandarizados a logaritmo natural, luego a través de la prueba de *t* de *Student* para muestras emparejadas, se determinó las diferencias estadísticas significativas entre épocas.

La calidad ambiental y la factibilidad de uso de efluentes vertidos en cultivo de macrófitas flotantes, se determinó mediante cotejo los parámetros con los Límites Máximos Permisibles establecidos para efluentes de PTAR y con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental categoría 3 y categoría 4. Para establecer el grado de eutrofización, se consideran los indicadores de eutrofización propuestos por Fontúrbel (2005), mediante correlaciones Pearson significativas entre los parámetros.

Los efectos de épocas y de las macrófitas flotantes en la remoción de nitrógeno total, nitratos, fósforo total y sulfatos, y en el rendimiento de la biomasa, se determinaron a través de análisis de varianza (ANOVA) de dos factores fijos, ajustando a un modelo estadístico irrestrictamente al azar con estructura factorial 2x2 con tres repeticiones. Para proceder con el ANOVA, previamente los datos porcentuales de eficiencia, por su semejanza a una distribución binomial, fueron transformados a arco seno $\sqrt{\text{porcentaje}}$; y luego de verificar el cumplimiento de los requisitos de normalidad y homogeneidad de varianzas, mediante las pruebas de *Shapiro-Wilk* y prueba de *Levene* respectivamente.

Las diferencias significativas con prueba *F* entre épocas y macrófitas, en el análisis de varianza respectivo, fueron suficientes para determinar mediante la media mayor el mejor tratamiento, debido a que fueron considerados dos tratamientos en épocas y en plantas acuáticas. Se realizó la prueba de significancia de Duncan ($p = 0.05$) en casos de diferencias significativas en la interacción. El procesamiento de datos se realizó con el software estadístico IBM SPSS Statistics Versión 23.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Calidad ambiental de aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno, en épocas lluviosa y seca

Las aguas residuales, antes de ser vertidas a los cuerpos receptores de agua, deben ser tratadas de tal forma reúnan los requisitos de calidad ambiental, en este caso las normas para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (PTAR), establecidos como Límites Máximos Permisibles (Normas Legales, 2010). Además, por tratarse de la preservación sustentable de ecosistemas acuáticos como la bahía interior de Puno, debe cumplir los estándares de calidad ambiental (ECA) categoría 4 y categoría 3 en caso de pretender su reuso con fines de riego (Normas Legales, 2015).

Los resultados de análisis de los parámetros ambientales de las aguas residuales vertidas a la bahía interior de Puno, tanto en época lluviosa como en época seca de la Tabla 5, indican que, los valores de los parámetros sólidos totales (ST), turbidez, fósforo total (PT), sulfatos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) y conductividad eléctrica (CE), son significativamente mayores en época seca en relación a la época lluviosa, al contrastar con la prueba de *t* de *Student* para muestras dependientes o emparejadas ($t_c = -3.387$, $p\text{-valor} = 0.015$, $df = 6+6$).

En época lluviosa los valores de los parámetros indicados son bajos, por la presencia de mayor precipitación pluvial, que diluyeron su concentración, tanto en alcantarilla como en las lagunas de oxidación; mientras en época seca, la calidad de aguas residuales vertidos incrementa sus parámetros por la baja precipitación pluvial, medio ambiente seco y frío; las temperaturas mínimas del ambiente externo en época seca, son próximos a cero; sin embargo, la temperatura del efluente se mantiene por encima de 12.6°C .

En relación a los límites máximos permisible establecidos para efluentes de PTAR, los valores de demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno exceden los límites máximos permisibles en época seca (Tabla 5). Cotejando los valores de efluentes vertidos, con los estándares nacionales de calidad ambiental (ECAs) para agua categoría 4 establecidos para conservación del ambiente acuático de lagunas y lagos, se aprecia que la conductividad eléctrica (CE), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), fósforo total (PT) y nitrógeno total (NT), exceden los ECAs de esta categoría, tanto en época lluviosa como en época seca. Asimismo, los valores obtenidos de DBO₅ y DQO para ambas épocas, exceden ampliamente a los ECAs establecidos para categoría 3 aguas para riego; de igual manera, el oxígeno disuelto de 0.55 mg/L en época lluviosa y 0.75 mg/L en época seca, son muy bajos en relación a 4 mg/L como mínimo establecido.

Tabla 5

Parámetros físicos, químicos y biológicos, en el sitio de vertido de aguas residuales a la bahía interior de Puno por épocas y estándares de calidad establecidos, Puno Perú 2019.

Parámetro	Época lluviosa (1)	Época seca (1)	LMP efluentes PTAR (2)	ECAs categ. 4 Lagos (3)	ECAs categ. 3 Riego (3)
NT mg/L	105	65		0.315	
PT mg/L	2.4	9.4		0.035	
SO ₄ mg/L	166	812			1000
ST mg/L	1028	1234			
STS mg/L			150	≤ 25	
Turbidez UNT	59	165			
DBO ₅ mg/L	85	165	100	5	15
DQO mg/L	184	259	200		40
pH	8.2	8.1	6.5-8.5	6.5-9.0	6.5-8.5
CE mS/cm	1.74	2.32		1.00	2.50
OD mg/L	0.55	0.75		≥ 5	≥ 4
C. F. NMP/100 ml	430	1.1x10 ⁶			100

Fuente: (1) Laboratorio de Calidad Ambiental del Instituto de Ecología UMSA

(2) Normas Legales 2010 El Peruano

(3) Normas Legales 2015 El Peruano.

Referente al grado de eutrofización potencial de la aguas residuales vertidas a la bahía interior de Puno, fue determinado mediante correlaciones *Pearson* que muestra el Anexo 2, donde los parámetros considerados como indicadores fisicoquímicos de avance del proceso eutrófico por Fontúrbel (2005), como Turbidez, DBO₅, sólidos totales, fósforo total y sulfatos, presentan correlaciones significativas ($p=0.05$), y al exceder los estándares de calidad ambiental, confirman el potencial eutrofizante de estos efluentes.

En consecuencia, la calidad ambiental de las aguas residuales vertidas a la bahía interior de Puno, exceden los límites máximos permisibles establecidos para efluentes de PTAR, de la misma manera exceden los estándares de calidad ambiental para conservación de ecosistemas acuáticos de lagos y lagunas, y los estándares de aguas para riego de vegetales; situación que se agudiza significativamente en época seca, incrementando el proceso de eutrofización acelerada de esta parte del lago Titicaca y dificultan su tratamiento complementario con macrófitas.

4.2 Eficiencia de macrófitas flotantes en la remoción de nutrientes

Considerando la ecuación utilizada por Palta y Morales (2013), la eficiencia de remoción, se refiere a la capacidad de un macrófito de reducir una determinada proporción del contaminante respecto al valor inicial; sin embargo, remoción no necesariamente implica reducción, también puede dar como resultado un incremento respecto al valor inicial, por cuanto remover significa mover los contaminantes de un lugar a otro o modificar de un estado a otro, dentro de los ciclos biogeoquímicos (Manahan, 2011).

Los resultados de análisis de laboratorio del segundo punto de muestreo de aguas residuales, tomadas lago adentro para cultivo de macrófitas en ambas épocas al inicio del cultivo y al final en la cosecha, de los Anexos 3 y 4; calculadas sus eficiencias de remoción empleando la ecuación [1] y [2] de la metodología, conforme a la reducción o incremento observadas en los parámetros, cuyas eficiencias de remoción de nitrógeno, fósforo y sulfatos se muestra en la Tabla 6.

4.2.1 Eficiencia de remoción de nitrógeno

Los efectos de las macrófitas y las épocas, en la remoción de nitrógeno total, fue determinado mediante el análisis de varianza (ANOVA), previa estandarización de los porcentajes de remoción especificados en la metodología, cuyos resultados se muestran en el Anexo 5. Donde se observa diferencia significativa entre

macrófitas ($F_c = 6.55$, p -valor = 0.0337, $df = 1$); en cambio, entre épocas y para la interacción época*macrófita, no denota diferencias estadísticas significativas ($p=0.05$). En consecuencia, la macrófita *Lemna* presenta mayor eficiencia de remoción de nitrógeno total en ambas épocas.

Tabla 6

Eficiencia de macrófitas en la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfatos, por épocas (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019

Parámetro	Época lluviosa		Época seca	
	<i>Azolla</i>	<i>Lemna</i>	<i>Azolla</i>	<i>Lemna</i>
NT mg/L	70.94 \pm 3.23	73.08 \pm 5.12	61.39 \pm 8.82	76.87 \pm 5.48
NO ₃ mg/L	10.73 ⁺ \pm 0.98	10.73 ⁺ \pm 2.59	13.54 ⁺ \pm 0.90	1.56 ⁺ \pm 1.57
PT mg/L	81.83 \pm 12.25	10.00 \pm 10.00	14.29 \pm 0.00	14.29 \pm 0.00
SO ₄ mg/L	10.10 ⁺ \pm 1.33	13.26 ⁺ \pm 1.90	2.33 ⁺ \pm 0.63	1.23 \pm 7.2
Turbidez UNT	72.42 \pm 4.33	60.90 \pm 6.80	74.67 \pm 1.15	60.00 \pm 10.0
DBO ₅ mg/L	2.74 ⁺ \pm 11.70	423.08 ⁺ \pm 7.70	81.25 ⁺ \pm 87.50	135.42 ⁺ \pm 9.55
Temperatura °C	24.17 \pm 3.20	23.33 \pm 1.30	21.53 \pm 6.74	21.23 \pm 1.03
pH	20.94 \pm 0.48	6.89 \pm 0.48	14.19 ⁺ \pm 0.89	18.80 ⁺ \pm 7.43
CE mS/cm	11.40 \pm 3.95	5.09 \pm 1.10	5.49 ⁺ \pm 8.85	6.87 ⁺ \pm 0.89
OD mg/L	66.67 \pm 16.67	75.00 \pm 0.00	60.95 \pm 4.36	74.27 \pm 2.86

⁺ Parámetros que muestran % incremento en lugar de reducción

La Figura 1 exhibe las eficiencias de las macrófitas en la remoción de nitrógeno total (NT) en cada época, donde en época lluviosa bajo el cultivo *Azolla* fue removido hasta 70.94% de NT y con *Lemna* 73.08% de NT; mientras en época seca los porcentajes de remoción de NT son 61.39% con *Azolla* y 76.87% con *Lemna*. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos de tasa de remoción de NT reportados por Amare *et al.* (2018) de 65 a 94.6% para *Lemna* y en *Azolla* de 66 a 93.2%. Asimismo, Martelo y Lara (2012) reportaron con *Azolla* 60% y 52.4% de eficiencia remoción de PT y NT, respectivamente.

La remoción de NT con el cultivo de las macrófitas *Azolla* y *Lemna*, se atribuye a que el nitrógeno orgánico por acción de las bacterias del género *Bacillus*, *Clostridium* y otros, se remueve a NH₄⁺ por el proceso de amonificación (Lazcano, 2016); El amonio (NH₄⁺) puede seguir distintas vías: es asimilado por las macrófitas especialmente por *Lemna gibba* (Clostre y Suni, 2007); u oxidarse a través de proceso de nitrificación; en otros casos puede tomar la forma de amoniaco (NH₃) cuando el oxígeno disuelto (OD) es bajo, pH mayores a 8.5 y temperaturas altas; o también puede oxidarse anaeróbicamente a nitrógeno

elemental (N_2) en presencia de nitrito y a bajas concentraciones de materia orgánica (Cervantes *et al.*, 2000).

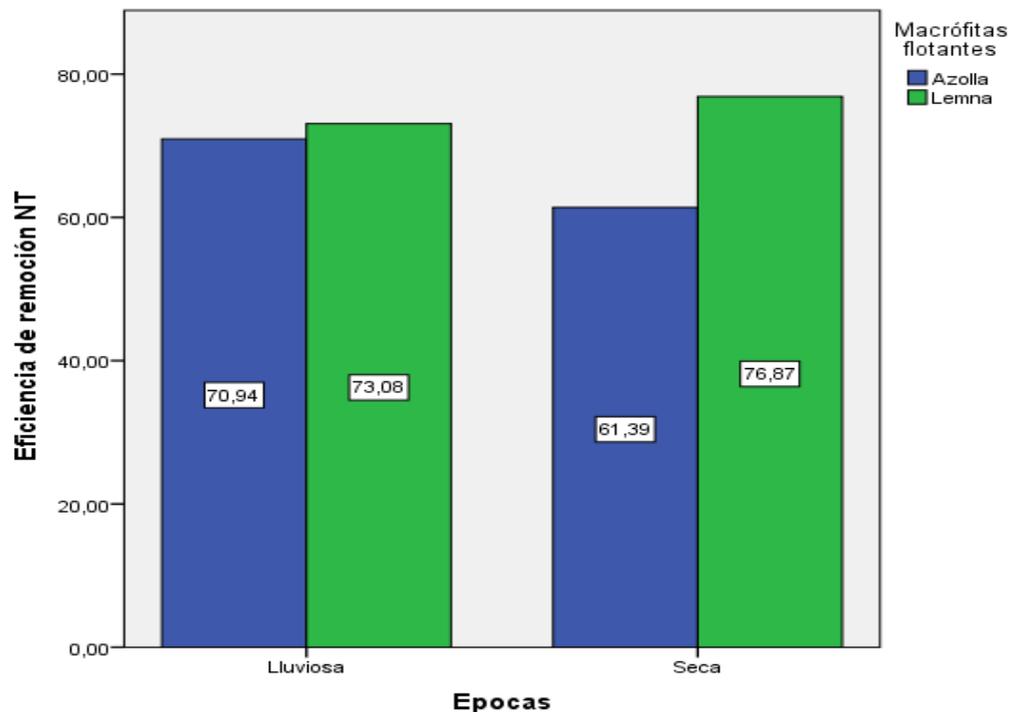


Figura 1. Eficiencia de macrófitas en la remoción de nitrógeno total por épocas, Puno Perú 2019.

La presencia de NH_3 inhibe la absorción de nitrógeno por las plantas debido a su toxicidad (Ran, 2004). Yao *et al.* (2018) indican que altas tasas de NH_4-N tiene efectos inhibidores crecientes sobre el crecimiento de *Azolla* y la fijación de nitrógeno; el pH bajo podría deprimir la transformación de NH_4 a NH_3 y disminuir la pérdida de NH_3 .

En condiciones del presente trabajo, en época lluviosa, el pH de 12.1 al inicio y OD bajo, favorecieron la remoción de NT a NH_3 , que es volátil a pH mayor a 8.5, la asimilación por las macrófitas y la nitrificación favorecido por el oxígeno en la rizósfera fueron las vías más importantes de remoción de NT, disminuyendo en consecuencia el pH (Cervantes *et al.*, 2000); mientras en época seca al incrementarse la carga orgánica, la baja actividad metabólica de las macrófitas por las bajas temperaturas del medio y bajo oxígeno disuelto, favorecieron los procesos de desnitrificación, aumentando el pH de 7.25 a mayores de 8 (Anexo 4), el porcentaje de remoción de NT vía nitrificación probablemente fue en menor proporción en ésta época.

Considerando que las plantas absorben nitrógeno en forma de nitrato en mayor proporción, fue evaluado la eficiencia de remoción de nitratos (NO_3) adicional a la remoción de nitrógeno total, empleando la ecuación [2] por observarse incremento de nitratos, realizando el tratamiento de datos indicado en la metodología, fue efectuado el ANOVA respectivo (Anexo 6), donde muestra que, entre épocas existe diferencia altamente significativa ($F_c = 14.68$, $p\text{-valor} = 0.005$, $df = 1$) registrando mayor incremento en época lluviosa, de igual manera entre macrófitas ($F_c = 35.83$, $p\text{-valor} = 0.0003$, $df = 1$) indica diferencia significativa mayor de *Azolla*, y diferencia altamente significativa para la interacción época*macrófita ($F_c = 35.16$, $p\text{-valor} = 0.0003$, $df = 1$) donde *Lemna* en época seca es inferior a los demás interacciones.

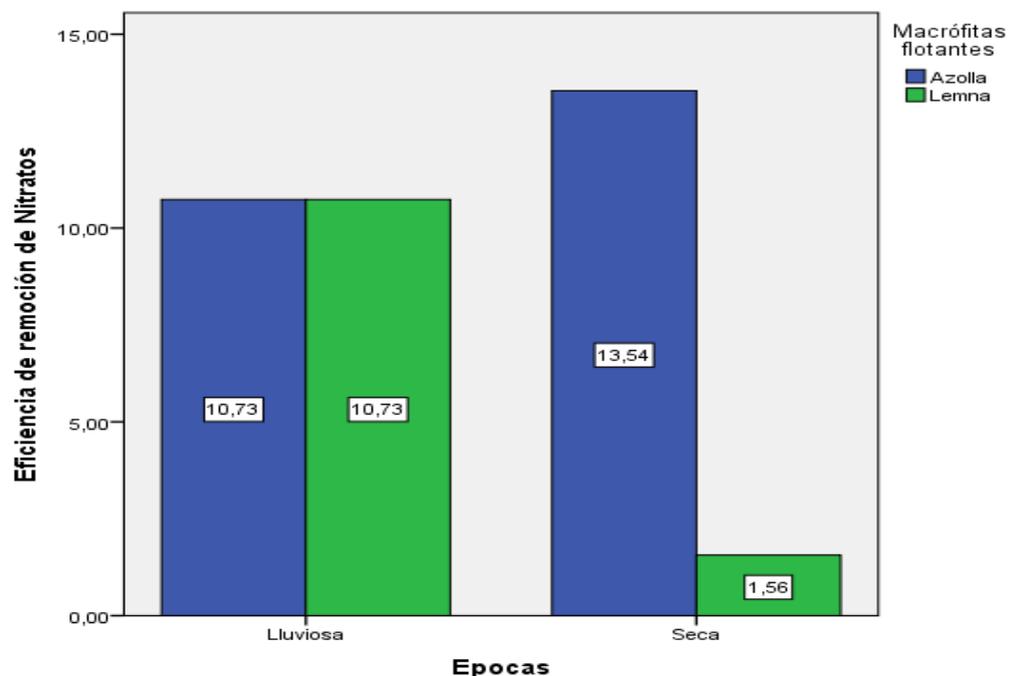


Figura 2. Eficiencia de macrófitas en la remoción de nitratos por épocas, Puno Perú 2019.

No obstante, los resultados de análisis de laboratorio de la cantidad de nitratos al inicio y final en ambas épocas, fue menor 1 mg/L (Anexos 3 y 4), sin embargo, no se observó reducción de nitratos, al contrario aunque en menor proporción se incrementó la cantidad de NO_3 .

La Figura 2 muestra, el porcentaje de incremento de NO_3 en la época lluviosa de 10.73% son similares en ambas macrófitas; mientras en época seca con *Azolla* el

porcentaje de incremento de NO_3 fue de 13.54% y 1.56% con *Lemna*. Resultados de eficiencias de remoción de nitratos habitualmente se refieren a reducciones de nitrato, por ejemplo Verma y Shutar (2014) indican reducciones de nitratos de 41.6 a 63.7% con *Lemna gibba*; Hammouda *et al.* (1995) reportaron tasa de remoción de nitratos de 99.4% con *Lemna*. Sin embargo, Xu y Shen (2011) afirma que la nitrificación fue la otra vía primaria para la remoción de amonio, que resultó en el aumento de la concentración de N-NO_3 de 62.3 a 85.8%.

Los incrementos de nitratos en el presente estudio, es consecuencia del proceso de nitrificación del NH_4 a NO_3 , con participación de bacterias aerobias, donde se consume gran cantidad de oxígeno, liberando hidrógeno por lo que baja el pH del medio (Cervantes *et al.*, 2000). Además, este proceso de oxidación fue favorecido por las macrófitas flotantes, por su capacidad de inyectar oxígeno a través de sus raíces, creando microzonas alrededor de las raíces, que incrementan el potencial redox, mejorando la actividad microbiana aerobia y las tasas de nitrificación (Domínguez, 2001; Hidalgo *et al.*, 2000).

4.2.2 Eficiencia de remoción de fósforo

Los resultados de las eficiencias de macrófitas en la remoción de fósforo expresada como fósforo total (PT) en ambas épocas, fueron obtenidos utilizando la ecuación [1], luego de estandarizar y verificar las condiciones normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos, fue sometido al respectivo análisis de varianza (Anexo 7), con el fin de determinar los efectos de las épocas y macrófitas en la remoción de PT. Que exhibe diferencias altamente significativas entre épocas ($F_c = 19.78$, $p\text{-valor} = 0.0021$, $df = 1$), entre macrófitas ($F_c = 33.06$, $p\text{-valor} = 0.0004$, $df = 1$) y para la interacción ($F_c = 33.06$, $p\text{-valor} = 0.0004$, $df = 1$).

La prueba de significancia de *Duncan* ($p = 0.05$) indica que, en época lluviosa la eficiencia de remoción de PT es significativamente mayor a la época seca; y la macrófita *Azolla* es significativamente superior en la eficiencia de remoción de PT a *Lemna*; referente a la interacción *Azolla* en época lluviosa, fue significativamente superior en remover PT, las demás interacciones son similares e inferiores en porcentaje de remoción de PT.

Las eficiencias de remoción de PT, que se presentan en la Tabla 6 y Figura 3, indican que la macrófita *Azolla* en época lluviosa remueve hasta 81.83% de PT y *Lemna* 10% de PT; en época seca la eficiencia de remoción para ambas macrófitas fue 14.29% de PT. Al respecto, Verma y Suthar (2014) reportan eficiencias de remoción de fósforo total de 36.5 a 54.3% con *Lemna gibba*. Hammouda *et al.* (1995) utilizando macrófita *Lemna gibba*, obtuvo eficiencia de remoción de PT 60 a 92.2%. Por su parte, Amare *et al.* (2018) obtuvieron eficiencias de remoción de PT de 75 a 98% con el cultivo de *Azolla filiculoides*.

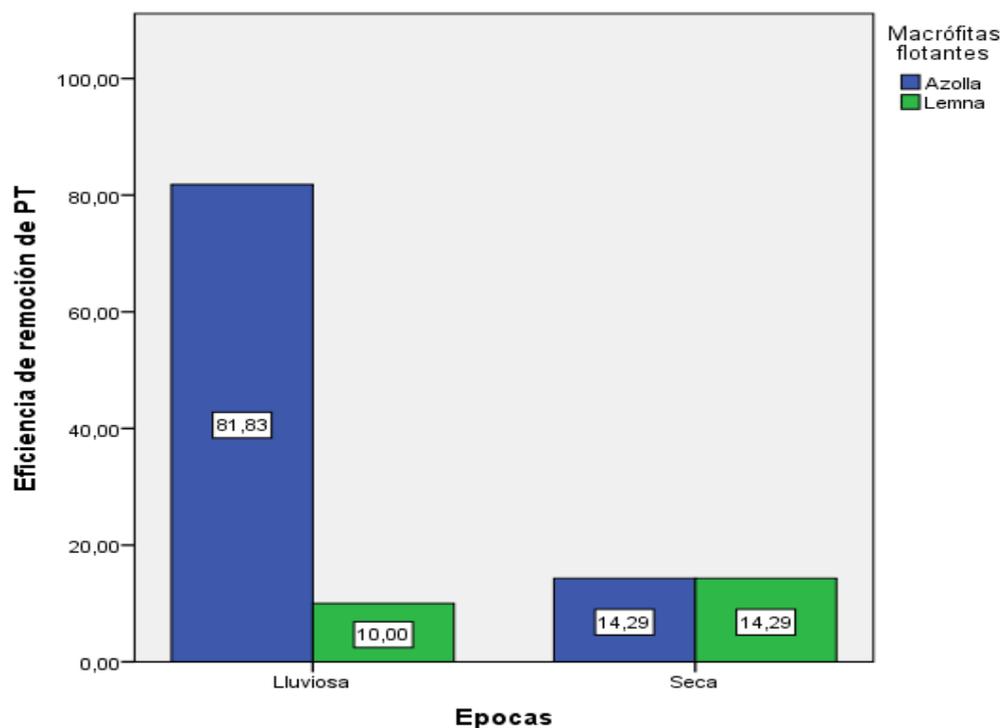


Figura 3. Eficiencia de macrófitas en la remoción de fosforo total por épocas, Puno Perú 2019.

El fósforo total incrementa en aguas residuales, por la materia orgánica en proceso de descomposición, que causan la mineralización y el aumento de concentraciones de PT; asimismo, el incremento de PT se atribuye al aumento de fósforo orgánico, en áreas cubiertas con macrófitas por la adición de materia orgánica al humedal por restos de estas plantas (Zhang *et al.*, 2016). Otras fuentes de fósforo son la meteorización, solubilización y contenido de detergentes en aguas residuales (Romero, 2010).

La remoción del fósforo total en el presente estudio, puede haber seguido diferentes vías; una de ellas es la sedimentación o precipitación con Ca y Mg cuando el pH es alcalino, otra parte de PT son acumulados como polifosfatos por ciertas bacterias especializadas, o puede ser asimilado por microorganismos y macrófitas (Lazcano, 2016). Esta última vía, es la principal forma de reducción de PT, debido a la absorción de fósforo (P) soluble, filtración de partículas a través de las raíces, adsorción y sedimentación favorecida por las macrófitas (Qin *et al.*, 2016; Verma y Suthar, 2014).

La macrófita *Azolla* muestra mayor eficiencia de remoción de PT en época lluviosa, mientras en época seca por las bajas temperaturas del ambiente y menor incidencia de energía solar, por la baja actividad metabólica de las macrófitas, la eficiencia de remoción es menor. Sin embargo, el fósforo no se considera contaminante, más es un nutriente limitante en los ecosistemas acuáticos (Manahan, 2011). Además, el fósforo es un nutriente esencial en el metabolismo de los seres vivos y de las plantas, su presencia es una causa de la eutrofización (Valencia, 2016).

4.2.3 Eficiencia de remoción de sulfatos

Los estudios sobre remoción de azufre por macrófitas son escasos, debido a que es un elemento inestable y puede transformarse en diferentes especies reactivas, en sus formas reducidas a sulfuros expelen molestos olores, gases causantes de la lluvia ácida y son altamente corrosivos (Pérez y Villa, 2005); en forma oxidada a sulfato (SO_4) no se considera contaminante y en esta forma es asimilado por las plantas como nutriente y elemento esencial (Prieto, 2017).

Las Tablas 11 y 12 del Anexo muestran resultados de análisis de laboratorio referente a sulfatos, cuyos valores expresan incrementos de cantidades de sulfatos en la época lluviosa para ambas macrófitas; en cambio en época seca solo incrementó sulfatos bajo cultivo de *Azolla* y hubo ligera reducción de sulfatos en el cultivo de *Lemna*; por lo que, se empleó la ecuación [2] de la metodología para obtener los porcentajes de incrementos y la ecuación [1] en casos de eficiencia de reducción.

Los índices de eficiencia de remoción de sulfatos obtenidos, solo posibilitaron realizar análisis de varianza para época lluviosa y determinar el efecto de las macrófitas en la eficiencia de remoción, como exhibe el Anexo 8, donde indica que, no hay diferencias significativas entre macrófitas en la eficiencia de remoción de sulfatos en época lluviosa ($F_c = 5.73$, $p\text{-valor} = 0.0749$, $df = 1$). La Figura 4, muestra que, en época lluviosa hubo incrementos de 10.10% y 13.26% de sulfatos con *Azolla* y *Lemna*, respectivamente; en época seca el porcentaje de incremento de sulfatos bajó a 2.47% en *Azolla* y *Lemna* mostró una ligera reducción de 1.23% de sulfatos.

En estudios realizados utilizando la macrófita *Azolla filiculoides* por Amare *et al.* (2018) reportan entre 49 a 92.8% de eficiencia de reducción de sulfatos; por otra parte Verma y Shutar (2014) obtuvieron porcentajes de reducción de sulfatos (SO_4) entre 35.2 a 81.5% con *Lemna gibba*. Los autores señalados indican disminución de cantidad de sulfatos, en cambio los resultados del presente estudio muestran aumentos en la cantidad de sulfatos.

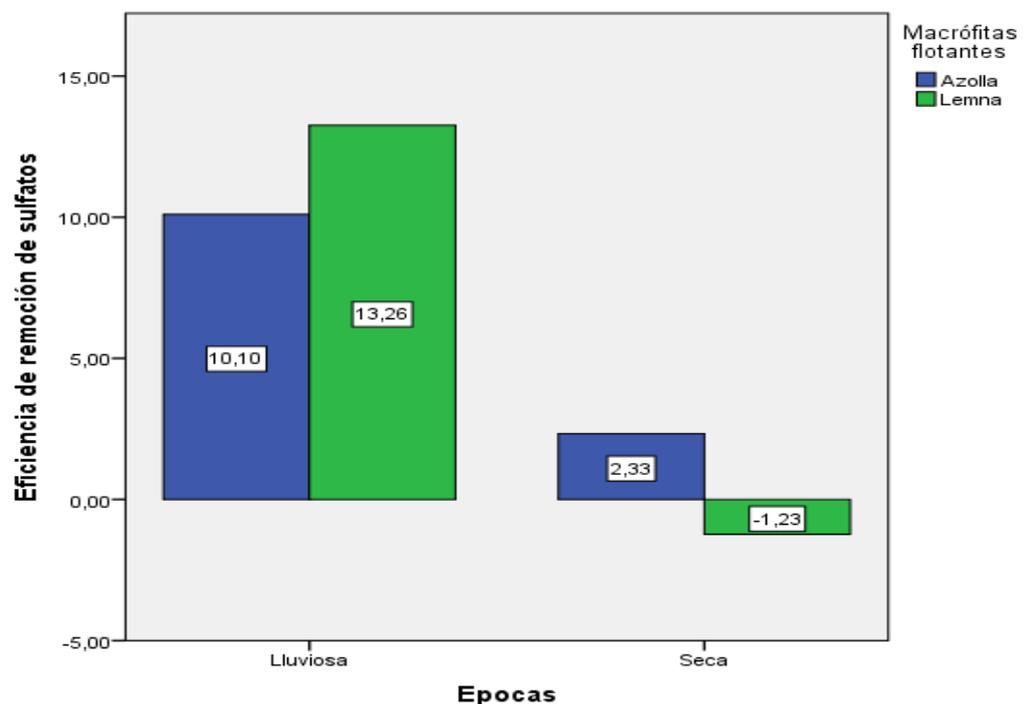


Figura 4. Eficiencia de macrófitas en la remoción de sulfatos por épocas, Puno Perú 2019.

No obstante que el azufre es un nutriente esencial para las plantas, solo un pequeño porcentaje puede ser aprovechado o asimilado; en estudios realizados por Winter

y Kickuth (1989) indican el 1% de azufre de entrada al humedal es absorbido por los brotes de las plantas por encima del suelo y 1-11% de azufre en la biomasa de las raíces y rizomas; siendo su mayor beneficio de uso de macrófitas la reoxidación de sulfuros a sulfatos.

El aumento de concentración de sulfatos en el presente estudio, se atribuye a la reoxidación de sulfuros favorecido por las raíces de las macrófitas y también el azufre reducido puede oxidarse por vía de oxidación anóxica por bacterias oxidantes de azufre (BOS) a sulfato (Chen *et al.*, 2016). Por otro lado la transferencia de oxígeno mediada por las raíces de la planta, inhibe la actividad de bacterias reductoras de sulfato (Singh y Schwan, 2011). Además, las temperaturas frías favorecieron la baja remoción de sulfato, con aumento del potencial redox mediada por las raíces de la planta (Wu *et al.*, 2013).

Sin embargo, el azufre en las aguas residuales se encuentra en constante dinámica de oxidación y reducción. El sulfato que se encuentra comúnmente en las aguas residuales, a través de la reducción disimilatoria de sulfato (RDS) es reducido a sulfuro por bacterias anaerobias favorecido por condiciones de alta carga orgánica y bajo oxígeno disuelto (Pacheco *et al.*, 2012; Perez y Villa, 2005). Reyes *et al.* (2003) afirman que la RDS es probablemente la vía dominante para la remoción de sulfatos.

4.3 Eficiencia de producción de biomasa

La cantidad de biomasa producida por las macrófitas, permite estimar sus usos potenciales como: abono orgánico o compost, uso en la producción de gas metano, para alimento de animales y otros; expresada en cantidad de materia verde o fresca y en cantidad de materia seca.

Los resultados obtenidos de producción de biomasa verde y sus respectivas eficiencias cuantificadas conforme a la ecuación [3] de la metodología, se presentan en los Anexos 9 y 10, tanto para la época lluviosa como para época seca, respectivamente. El análisis de varianza de los efectos de macrófitas y épocas en la eficiencia de producción de biomasa (Anexo 11), muestran diferencias altamente significativas entre épocas ($F_c = 71.57$, $p\text{-valor} = 0.001$, $df=1$) y entre macrófitas ($F_c = 33.62$, $p\text{-valor} = 0.0004$, $df = 1$). Es decir, en época lluviosa se obtiene significativamente mayor eficiencia de producción de

biomasa en ambas macrófitas; y *Lemna gibba* es significativamente superior en la producción de biomasa en ambas épocas.

La Figura 5 muestra los porcentajes de incremento de producción de biomasa fresca obtenidos en el presente trabajo, en época lluviosa las eficiencias de producción fueron de 72.52% con *Lemna* y 50.74% para *Azolla*; en tanto, en época seca bajó a 35.84% con *Lemna* y 5.55% en *Azolla*. Estos resultados se aproximan a los incrementos de producción de biomasa de *Lemna gibba* reportados por Verma y Suthar (2014) entre 24.6 a 52.8%. En estudios realizados por Arora y Saxena (2005) sobre la producción de biomasa de *Azolla*, manifiestan que en las cuatro estaciones del año se puede producir biomasa, pero en la estación de invierno, la producción de biomasa puede disminuir hasta en 50%.

En la producción de biomasa influyen diversos factores, Arora y Saxena (2005) mencionan a la densidad de planta, la temperatura, composición de físico químico del agua residual y la radiación solar. Vatta *et al.* (1994) agregan el fotoperiodo y la temporada o estación climática como factores importantes en la producción de biomasa. Por otra parte, Monette *et al.* (2006) consideran que la intensidad de la luz, la densidad inicial de la planta, también ejercen influencia en el crecimiento de las macrófitas. Además de los factores indicados, en la eficiencia de producción de biomasa en presente trabajo, influyó negativamente el pH alcalino del agua residual utilizada, afectando la disponibilidad de nutrientes, y en época seca las bajas temperaturas del medio, contribuyeron en disminuir la eficiencia de producción de biomasa.

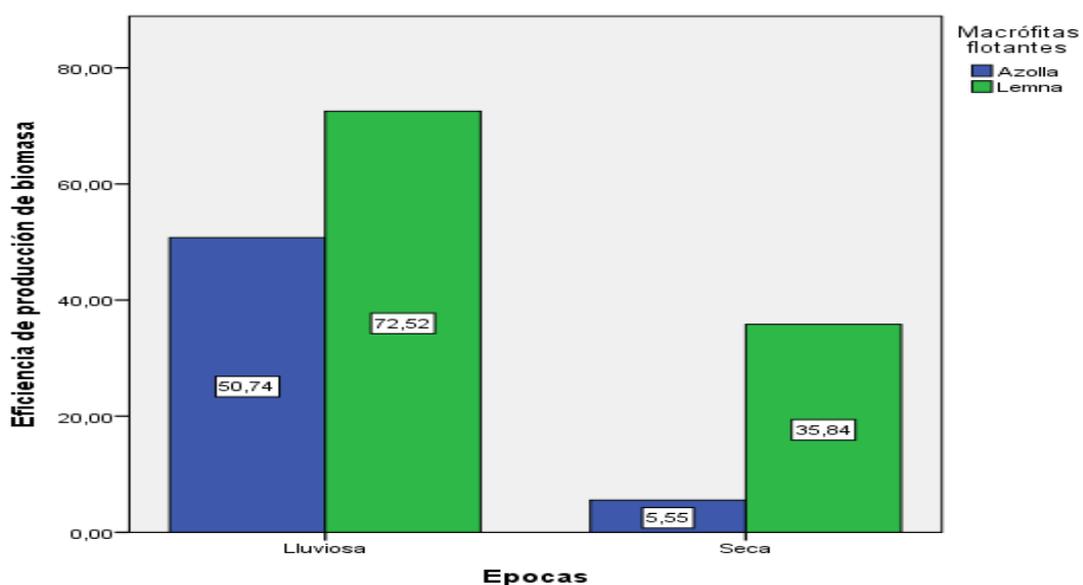


Figura 5. Eficiencia de macrófitas en la producción de biomasa por épocas, Puno Perú 2019.

Sin embargo, la eficiencia de producción tiene otro sentido desde el punto de vista económico, supone la máxima cantidad de producto obtenido, con una determinada cantidad de insumo, *ceteris paribus* (Parkin y Loría, 2010). Es decir, implica optimizar la producción de biomasa de macrófitas (Y), en relación a la variable de cantidad inicial de biomasa (X), para un determinado tiempo de residencia hidráulica; singular para cada lugar, calidad de efluente de agua residual y para cada época.

Referente al porcentaje de materia seca, la biomasa seca puede estar constituida por proteínas, almidones, celulosa y diversas sales (De la Roza *et al.*, 2002). La cantidad de materia seca da idea de valor nutritivo de un alimento, determinando la cuantía de la biomasa cosechada, posibilitará proyectar su aprovechamiento para alimentación animal y otros usos, por lo que, se determinó el porcentaje de materia seca de la biomasa verde de cada macrófita, tanto en época lluviosa como en época seca.

Tabla 7

Porcentaje de materia seca de macrófitas por épocas (Media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019

Macrófitas	Época lluviosa	Época seca
<i>Azolla</i>	7.84 \pm 0.12	6.46 \pm 0.43
<i>Lemna</i>	8.86 \pm 0.09	6.13 \pm 0.19

La Tabla 7 exhibe que, el porcentaje de materia seca en época lluviosa de la macrófita *Lemna* fue de 8.86% y en caso de *Azolla* 7.84%; mientras en época seca estos índices bajaron a 6.13% con *Lemna* y 6.46% para *Azolla*. Este comportamiento de la proporción de materia seca, se atribuye a la mayor actividad fotosintética y mejores condiciones ambientales externas para el crecimiento de las macrófitas en época lluviosa.

Resultados obtenidos en el presente estudio, son aproximados a los reportados por Clostre y Suni (2007) para *Lemna gibba* de 6.9 a 7.55% de materia seca. De la misma manera para el caso de *Azolla* el reporte de Méndez *et al.* (2017) de 6.5% de índice de materia seca.

Otro índice frecuentemente utilizado en el análisis de producción de biomasa de macrófitas, es la tasa de crecimiento relativo (TCR), entendida como la cantidad de producto total de la biomasa al final del tiempo de residencia hidráulica, expresada en gramos por metro cuadrado por día (Verma y Suthar (2014). Para obtener la TCR, fue

considerado el peso final (g/m^2) de cada macrófitas por épocas de los Anexos 9 y 10, ocho días de periodo de cultivo, conforme a la ecuación [5] de metodología.

Tabla 8

Tasa de crecimiento relativo ($\text{g/m}^2/\text{d}$) de biomasa verde de macrófitas por épocas (media \pm DE, $n=3$), Puno Perú 2019.

Época lluviosa		Época seca	
<i>Azolla</i>	<i>Lemna</i>	<i>Azolla</i>	<i>Lemna</i>
94.28	73.81	70.93	52.06
95.51	69.23	62.86	57.98
92.84	67.23	64.11	55.53
94.21 \pm 1.34	70.09 \pm 3.37	65.97 \pm 4.34	55.19 \pm 2.97

La Tabla 8 muestra las tasas de crecimiento relativo obtenidos, en época lluviosa con *Azolla* se alcanzó 94.21 $\text{g/m}^2/\text{d}$ y con *Lemna* 70.09 $\text{g/m}^2/\text{d}$ de biomasa verde, ambas macrófitas expresan mayores tasas de crecimiento relativo, en relación a la época seca, tanto *Azolla* como *Lemna*, disminuyen sus tasas de crecimiento relativo a 65.97 y 55.19 $\text{g/m}^2/\text{día}$ de biomasa verde, respectivamente.

Los reportes de Chaux *et al.* (2013) utilizando *Azolla* obtuvieron tasas de crecimiento relativo de 42.4 y 87.1 $\text{g/m}^2/\text{día}$ de biomasa fresca. En tanto Méndez (2017) obtuvo para *Azolla* una tasa de crecimiento relativo de 30.9 a 69.10 $\text{g/m}^2/\text{día}$ de biomasa verde. Con macrófita *Lemna*, Sánchez y Coral (2009) obtuvieron tasas de crecimiento relativo de 154 $\text{g/m}^2/\text{día}$ de biomasa fresca. De igual modo Verma y Suthar (2014) obtuvieron índice de biomasa, entre 132.62 a 200.95 $\text{g/m}^2/\text{día}$ de biomasa fresca de *Lemna*. Los índices superiores en relación a los obtenidos en el presente trabajo para el caso de *Lemna* y contradictorios a la eficiencia de producción de biomasa obtenida, debido a la ponderación de la cantidad inicial de la biomasa, al valorar su tasa de crecimiento relativo.

CONCLUSIONES

- Los valores de los parámetros de aguas residuales vertidos a la bahía interior de Puno, exceden los estándares de calidad ambiental establecidos y confirman su potencial eutrofizante, incrementa significativamente en época seca, empeorando su calidad.
- En época lluviosa, se obtienen significativamente mayores eficiencias de remoción, *Lemna gibba* L con 73.08% de eficiencia fue superior en remover nitrógeno total y *Azolla filiculoides* Lam con 81.83% de eficiencia fue mejor en remover fósforo total; la eficiencia de remoción de sulfatos no fue significativo, se ha expresado en incrementos de sulfatos.
- Mayor eficiencia de producción de biomasa se obtiene en la época lluviosa, 72.52% con *Lemna* y 50.74% con *Azolla*; mientras en época seca la eficiencia de producción de biomasa baja a 35.84% con *Lemna* y 5.55% con macrófita *Azolla*.

RECOMENDACIONES

- Mejorar los estándares de calidad ambiental de efluentes vertidos a la bahía interior de Puno, conforme a establecido para efluentes de PTAR y para conservación del ambiente acuático de lagos y lagunas; con fines de reducir la eutrofización y usar en tratamiento complementario macrófitas.
- Por la mayor eficiencia demostrada de *Lemna* en remover nitrógeno y de *Azolla* en remover fósforo, se recomienda realizar estudios de eficiencia de remoción con diferentes proporciones de asociación de estas macrófitas.
- Proponer la tecnología de tratamiento de aguas residuales con macrófitas a centros urbanos de la región Puno, previa evaluación de eficiencia de remoción y producción de biomasa.

BIBLIOGRAFÍA

- Adhikari, U., Harrigan, T. y Reinhold, D. M. (2014). Use of duckweed-based constructed wetlands for nutrient recovery and pollutant reduction from dairy wastewater. *Ecological Engineering*, 78, 6-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.05.024>
- Amare, E., Kebede, F. y Mulat, W. (2018). Wastewater treatment by *Lemna minor* and *Azolla filiculoides* in tropical semi-arid regions of Ethiopia. *Ecological Engineering*, 120, 464-473. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.005>
- Arévalo, L. A., Alegre, J. C., y Palm, Ch. (2003). Manual determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú. Centro Mundial de Agroforestería (ICRAF), CODESU, INIA. INRENA. Lima-Perú. 24 pp
- Arora, A. y Saxena, S. (2005). Cultivation of *Azolla microphylla* biomass son secondary-treated Delhi municipal effluents. *Revista Biomass y Bioenergy*, 29, 60-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.02.002>
- Arroyave, M. del P. (2004). La lenteja de agua (*Lemna Minor* L.): una planta acuática promisoría. *Revista EIA*, (1), 33-38. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372004000100004&lng=en&tlng=es.
- Arteta, M., Corrales, M., Dávalos, C., Delgado, A., Sinca, F., Hernani, L. y Bogórquez, J. (2006). Plantas vasculares de la bahía de Juli Lago Titicaca, Puno-Perú. *Ecología Aplicada*, 5(1,2), 29-36.
- Beltrán, D. F., Palomino, R. P., Moreno, E. G., Peralta, C. G. y Montesinos, 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. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v22i3.11440>.
- Brack, A. y Mendiola, C. (2012). *Ecología del Perú* (3ra ed.). Lima: Asociación Editorial Bruño.

- Canales, Á. (2010). Evaluación de la biomasa y manejo de *Lemna gibba* (Lenteja de agua) en la bahía interior del lago Titicaca, Puno. *Ecología Aplicada*, 9(2), 91-99.
- Cervantes, F., Pérez, J. y Gómez, J. (2000). Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. *Revista Asociación Latinoamericana de Microbiología*, 42, 73-82. Recuperado de: <https://www.medigraphic.com/pdf/lamicro/mi-2000/mi002e.pdf>
- Chaux, G., Caicedo, J. R., y Fernández, J. E. (2013). Tratamiento de efluentes piscícolas (Tilapia roja) en lagunas con *Azolla pinnata*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2), 46-56.
- Chen, Y., Wen, Y., Zhou, Q., Huang, J., Vymazal, J. y Kusch, P. (2016). Sulfate removal and sulfur transformation in constructed wetlands: The roles of filling material and plant biomass. *Water Research*, 102, 572-581.
- Clostre, G. y Suni, M. (2007). Efecto de nitrógeno, fósforo y potasio del medio de cultivo en el rendimiento y valor nutritivo de *Lemna gibba* L. (Lemnaceae). *Revista Peruana de Biología*, 13 (3), 231-253.
- Comisión Multisectorial para la Prevención y Recuperación Ambiental del Lago Titicaca y sus Afluentes. (2014). Estado de la Calidad Ambiental de la Cuenca del Lago Titicaca ámbito peruano. Comisión multisectorial para la prevención y recuperación ambiental del lago Titicaca y sus afluentes. R.S. N°0075-2013-PCM.
- Correa-Torres, S. N., Gamarra, Y., Salazar, A. A. y Pitta, N. M. (2015). Evaluación de la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros en agua residual doméstica, utilizando *Phragmites australis* en bioreactores. *Información tecnológica*, 26(6). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642015000600011>
- Cruz, M., Carbo, N., Linkolk, J. y Quispe, W. (2016). Tratamiento de las aguas de la Laguna “Mansión” mediante la especie *Eichhornia crassipes*, para el riego de áreas verdes en la Universidad Peruana Unión. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 9(8), 53-65.
- De la Roza, B., Martínez, A. y Argamentería, A. (2002). Determinación de materia seca en pastos y forrajes a partir de la temperatura de secado para análisis. *PASTOS*, 32, (1), 91-104. Retrieved from <http://polired.upm.es/index.php/pastos/article/view/1308>
- Demirezen, D., Aksoy, A. y Uruc, K. (2006). Effect of population density on growth, biomass and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae).

- Chemosphere, 66, 553-557. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.045>
- Delgadillo, A. E., Gonzalez, C. A., Prieto, F., Villagómez, J. R. y Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 597-612. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Díaz, R. D. (2013). Estudio de caracterización climática de la precipitación pluvial y la temperatura del aire para las cuencas de los ríos Coata e Ilave. Ministerio del Ambiente. Dirección Regional de SENAMHI-Puno. Dirección General de Meteorología. Puno, Perú.
- Diéguez, U., Barrio, M., Castedo, F., Ruíz, A. D., Álvarez, M. F., Álvarez, J. G. y Rojo, A. (2003). *Dendrometría*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Domínguez, A. L. (2001). Evaluación de la depuración de las aguas residuales provenientes de un sistema de tratamiento combinado de laguna de estabilización y laguna con Jacinto de agua. *Actual. Biol.*, 23(74), 75-82.
- EMSA-PUNO. (2011). Resumen descriptivo del sistema de tratamiento de agua residual en la ciudad de Puno-Perú. Puno: Gerencia de Operaciones. EMSA-PUNO S.A. 5 pp.
- Fernández, A. (2011). Protocolo nacional del monitoreo de la calidad del agua. Proyecto de modernización de la gestión de los recursos hídricos. Lima: Autoridad Nacional del Agua. Ministerio de Agricultura. Perú. Retrieved from http://www.alfilodelocutre.net/FONDOS/nuevos_piris.jpg.
- Fontúrbel, F. (2005). Indicadores físicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del lago Titikaka (Bolivia). *Ecología Aplicada*, 4 (1), 135-141.
- García, P., Fernández, R., Cirujano, S. y Chirino, M. (2009). *Macrófitos: habitantes del agua*. España: Agencia Andalucía del Agua. Consejería del Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- Hammouda, O., Gaber, A. y Abdel-Hameed M.S. (1995). Assessment of the effectiveness of treatment of wastewater-contaminated aquatic systems with *Lemna gibba*. *Enzyme and Microbial Technology*, 17, 317-323.
- Heide, T. V., Roijackers, R. M. M., Nes E. H. V. y Peeters, E. T. H. M. (2005). A simple equation for describing the temperature dependent growth of free-floating macrophytes. *Aquatic Botany*, 84, 171-175.

- Hidalgo, J. C., Montano, J. J. y Sandoval, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Revista Theoría*, 14 (1), 17-25.
- Kitoh, S., Shiomi, N. y Uheda, E. (1993). The growth and nitrogen fixation of *Azolla filiculoides* Lam. in polluted water. *Aquatic Botany*, 46, 129-139.
- Lara, C., Villalba, M. y Oviedo, L. E. (2007). Bacterias fijadoras asimbióticas de nitrógeno de la zona agrícola de San Carlos. Córdova, Colombia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, IX(2), 6-14.
- Lazcano, C. (2016). *Biotecnología ambiental de aguas y aguas residuales* (2da ed.). Bogotá: Ecoe Ediciones Ltda.
- León, M. y Lucero, A. M. (2009). Estudio de *Eichhornia crassipes*, *Lemna gibba* y *Azolla filiculoides* en el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas en el sistemas comunitarios y unifamiliares del cantón Cotacachi. (Tesis de maestría). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador. Retrieved from <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/102>
- Manahan, S. E. (2011). *Introducción a la química ambiental*. México: Reverté Ediciones, S.A. de C.V. Universidad Autónoma de México.
- Martelo, J. y Lara, J. A. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado de arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221-243. Recuperado de: www.redalyc.org
- Méndez, Y., Pérez, Y., Reyes, J. J. y Puente, V. D. (2017). *Azolla* sp., un alimento de alto valor nutricional para la acuicultura. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud, Biotecnia*, XX (1), 32-40. Retrieved from <https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/527/246>
- MINAM. (2013). *Línea base ambiental de la cuenca del lago Titicaca*. Lima: Vice-Ministerio de Gestión Ambiental. Dirección General de Calidad Ambiental. Ministerio del Ambiente Perú.
- MINAM. (2016). *Aprende a prevenir los efectos del mercurio. Módulo 3: Agua y alimento*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente, Dirección General de Educación Cultura y Ciudadanía Ambiental.
- MINSA. (2011). *Reglamento de la calidad del agua para consumo humano. DS-N°031-2010-SA*. Lima, Perú: Dirección General de Salud Ambiental. Ministerio de Salud.
- Miranda, N. (2012). *Tecnología de tratamiento de aguas y control de calidad*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

- Monette, F., Lasfar, S., Millette, L. y Azzouz, A. (2006). Comprehensive modeling of mat density effect on duckweed (*Lemna minor*) growth under controlled eutrophication. *Water Research*, 40, 2901-2910. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.026>
- Normas Legales. (2010). Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. D.S. N°003-2010-MINAM. Diario Oficial El Peruano. Perú.
- Normas Legales. (2015). Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación. D. S. N°015-2015-MINAM. Diario Oficial El Peruano. Perú.
- OEFA. (2014). Fiscalización ambiental para el cambio: la fiscalización ambiental en aguas residuales. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Ministerio del Ambiente. Perú.
- Pacheco, J. R., Maldonado, M. y Peña, J. J. (2012). Metabolismo del azufre de aislados bacterianos provenientes de un humedal artificial empleado para el tratamiento de la industria curtidora. *Rev. Int. Contam, Ambie.* 28 (3), 195-201. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v28n3/v28n3a2.pdf>
- Palta, H. G. y Morales, S. (2013). Fitodepuración de aguas residuales domésticas con Poaceas: *Brachiaria mutica*, *Pennisetum purpureum* y *Panicum maximun*, en el Municipio de Popayán, Cauca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2), 57-67.
- Parkin, M. y Loría, E. (2010). *Microeconomía. Versión para Latinoamérica* (9ma ed.). México: Pearson Educación de México S.A.
- Pérez, H. y Villa, P. (2005). Desulfuración biológica: una alternativa para el tratamiento de emisiones de gases a la atmósfera. *Agua Latino América*, 5(3), 17-20.
- Prieto, H. E. (2017). *Manual práctico de hidroponía* (3ra ed.). Brasil: Aprenda Fácil Editora.
- Qin, H., Zhang, Z., Liu, M., Liu, H., Wang, Y., Wen, X., Zhang, Y. y Yan, S. (2016). Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce. *Ecological Engineering*, 95, 753-762. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.022>
- Ran, N., Agami, M. y Oron, G. (2004). A pilot study of constructed wetlands using duckweed (*Lemna gibba* L.) for treatment of domestic primary effluent in Israel. *Water Research*, 38, 2241-2248. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2004.01.043>.

- Resh, H. M. (2001). Cultivos hidropónicos: nuevas técnicas de producción (5ta ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Reyes, J., Razo, E. y Gómez, J. (2003). Avances en la eliminación de nitrógeno, sulfuro y materia orgánica de aguas residuales. *Biotecnología*, 8(1), 23-34.
- Rodríguez, A. y Chang, M. (2011). Soluciones nutritivas en hidroponía: formulación y preparación. Lima: Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral. Departamento de Biología. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Rodríguez, J. P., Gómez, E., Garavito, L. y López, F. (2010). Estudio de comparación de tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 1 (1), 59-68.
- Romero, J. A. (2010). Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño (3ra ed.). Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sánchez, R. y Coral, Y. M. (2009). Evaluación del tratamiento de aguas residuales con *Lemna gibba* en estanques con régimen de flujo de pistón. *AFINIDAD*, LXVI (541), 238-242.
- Severiche, C. A., Castillo, M. E. y Acevedo, R. L. (2013). Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros físicoquímicos básicos en aguas. Cartagena de Indias, Colombia: Biblioteca virtual Eumed.net. Retrieved from <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1320/index.htm>
- Singh, S. P. y Schwan, A. L. (2011). Sulfur metabolism in plants and related biotechnologies. *Plant Systems*, 257-271
- Sooknah, R. D. y Wilkie, A. C. (2004). Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater. *Ecological Engineering*, 22, 27-42.
- Torres-Degró, A. (2011). Tasa de crecimiento poblacional: una mirada desde el modelo matemático lineal, geométrico y exponencial. *CIDE digital*, 2(1), 143-162. Retrieved from <https://revistas.upr.edu/index.php/cidedigital/article/download/11774/9736>
- UNESCO. 2012. The United Nations World Water Development .Managing Water Under Uncertainty and Risk. Report 4 Vol. 1 Disponible en: www.unwater.org
- Valencia, C. H. (2016). Aguas residuales: una visión integral. Colombia: Editorial UD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- Vatta G., Rota, R., Boniardi, N. y Nano, G. (1994). Dynamic modelling of waste-water treatment plants base on Lemna gibba. *The Chemical Engineering Journal*, 57, B37-B48.
- Verma, R. y Suthar, S. (2014). Synchronized urban wastewater treatment and biomass production using duckweed Lemna gibba L. *Ecological Engineering*. 64, 337-343. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.055>.
- Winter, M. y Kickuth, R. (1989). Elimination of sulphur compounds from wastewater by the root zone process-II. Mode of formation of sulphur deposits. *Wat. Res.*, 23(5), 547-560.
- Wu, S., Kusch, P., Wiessner, A., Müller, J., Saad, R. A. B. y Dong, R. (2013). Sulphur transformations in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 52, 275-289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.11.003>.
- Xu, J. y Shen, G. (2011). Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production. *Bioresource Technology*, 102, 848-853. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotech.2010.09.003>.
- Yao, Y., Zhang, M., Tian, Y., Zhao, M., Zeng, K., Zhang, B., Zhao, M. y Yin, B. (2018). Azolla biofertilizer for improving low nitrogen use efficiency in an intensive rice cropping system. *Field Crops Research*, 216, 158-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fer.2017.11.020>
- Zhang, H., Tian, Y., Cui, S., Zhang, L., Zhong, X. y Xiong, Y. (2016). Influence of macrophytes on phosphorus fractionation in Surface sediments in a constructed wetland: Insight from sediment. *Ecological Engineering*, 97, 400-409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.043>.



ANEXOS

Anexo 1. Precipitación pluvial (mm) y temperaturas (°C) del periodo experimental, Puno Perú 2019

Meses	Precipitación (mm)		Temperaturas 2019		
	2018	2019	Máxima	Mínima	Media
Enero	171.1	152.0	16.8	7.0	11.9
Febrero	152.1	78.7	16.0	7.0	11.5
Marzo	114.1	43.7	16.6	6.7	11.7
Abril	33.2	58.6	16.4	5.6	11.0
Mayo	7.8	21.7	15.6	3.4	9.5
Junio	12.9	2.2	15.6	0.7	8.2
Julio	3.1	7.6	15.0	0.5	7.8
Agosto	0.0				
Setiembre	3.6				
Octubre	45.5				
Noviembre	2.7				
Diciembre	89.8				

Fuente: SENAMHI, Estación CO. 110820 CP.100110 Puno (Julio 2019).

Anexo 2. Matriz de correlaciones Pearson de parámetros físico químicos y biológicos, en el sitio de vertido de aguas residuales a la bahía interior de Puno, Perú 2019

	NT	PT	SO ₄	DBO ₅	DQO	ST	Turbi -dez	pH	Colifor -mes
NT	1								
PT	-.952	1							
SO ₄	-.984	.991	1						
DBO ₅	-.972	.997*	.999*	1					
DQO	-.902	.991	.965	.978	1				
ST	-.985	.990	1.00**	.998*	.962	1			
Turbidez	-.956	1.00**	.993	.998*	.989	.992	1		
pH	.284	-.565	-.452	-.500	-.670	-.444	-.552	1	
Coliformes	-.998*	.930	.970	.456	.873	.973	.936	-.223	1

*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)

**La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral)

Anexo 3. Resultados de análisis de laboratorio de cantidades de N, P, sulfatos y otros parámetros, al inicio y final del cultivo de macrófitas en época lluviosa (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019

Parámetro	Cantidad	Cantidad final	Cantidad final
	inicial	<i>Azolla</i>	<i>Lemna</i>
NT mg/L	7.80	2.27 \pm 0.25	2.10 \pm 0.40
NO ₃ mg/L	0.59	0.65 \pm 0.01	0.65 \pm 0.02
PT mg/L	2.00	0.36 \pm 0.25	1.80 \pm 0.20
SO ₄ mg/l	264	290.67 \pm 3.51	299.00 \pm 5.00
ST mg/L	1274	1207.33 \pm 14.50	1217.67 \pm 8.50
Turbidez UNT	8.1	2.23 \pm 0.35	3.17 \pm 0.55
DBO ₅ mg/L	13	13.33 \pm 1.53	68.00 \pm 1.00
DQO mg/L	34	30.67 \pm 4.51	201.00 \pm 1.00
Temperatura. °C	16	12.13 \pm 0.51	12.27 \pm 0.21
pH	12.1	9.57 \pm 0.06	11.27 \pm 0.06
CE mS/cm	1.9	1.68 \pm 0.08	1.80 \pm 0.02
OD mg/L	0.12	0.04 \pm 0.02	0.03 \pm 0.00
C.f. NMP/100ml	1.1 x10 ⁶	117.33 \pm 114.02	< 2.00 \pm 0.00

Fuente: Laboratorio de Calidad Ambiental, Instituto de Ecología, UMSA, Bolivia.

Anexo 4. Resultados de análisis de laboratorio de cantidades de N, P, sulfatos y otros parámetros, al inicio y final del cultivo de macrófitas en época seca (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019

Nutriente	Cantidad inicial	Cantidad final	
		<i>Azolla</i>	<i>Lemna</i>
NT mg/L	4.2	1.60 \pm 0.40	0.97 \pm 0.23
N-NO ₃ mg/L	0.64	0.73 \pm 0.01	0.65 \pm 0.01
PT P-PO ₄ mg/L	1.40	1.20 \pm 0.00	1.20 \pm 0.00
Sulfatos mg/L	243	248.67 \pm 1.53	240.00 \pm 19.00
ST mg/L	1202	1198.00 \pm 30.00	1181.00 \pm 3.00
Turbidez UNT	5.0	1.27 \pm 0.06	2.00 \pm 0.50
DBO ₅ mg/L	16	29.00 \pm 14.00	37.67 \pm 1.53
DQO mg/L	49	60.67 \pm 6.51	53.00 \pm 6.00
Temperatura °C	11.13	8.73 \pm 0.75	8.77 \pm 0.12
pH	7.25	8.28 \pm 0.06	8.61 \pm 0.54
CE mS/cm	1.70	1.79 \pm 0.15	1.82 \pm 0.02
OD mg/L	0.35	0.14 \pm 0.02	0.09 \pm 0.01
C.f. NMP/100ml	< 2.0	< 2.00 \pm 0.00	< 2.00 \pm 0.00

Fuente: Laboratorio de Calidad Ambiental, Instituto de Ecología, UMSA, Bolivia.

Anexo 5. ANOVA de efectos de épocas y macrófitas en la remoción de nitrógeno total, Puno Perú 2019

F.V.	SC tipo III	gl	CM	F	p-valor
Modelo	151.68 ^a	3	50.56	3.58	0.0661
Epocas	7.76	1	7.76	0.55	0.4795
Macrófitas	92.46	1	92.46	6.55	0.0337
Épocas * Macrófitas	51.46	1	51.46	3.65	0.0926
Error	112.88	8	14.11		
Total	264.56	11			

^aR² = 0.57 R² Aj = 0.41 CV = 6.55

Anexo 6. ANOVA de efectos de épocas y macrófitas en la remoción de nitratos, Puno Perú 2019

F.V.	SC Tipo III	gl	CM	F	p-valor
Modelo	331.54 ^a	3	110.51	28.56	0.0001
Épocas	56.81	1	56.81	14.68	0.0050
Macrófitas	138.65	1	138.65	35.83	0.0003
Épocas * Macrófitas	136.08	1	136.08	35.16	0.0003
Error	30.96	8	3.87		
Total	362.50	11			

^aR² = 0.91 R² aj = 0.88 CV = 11.03

Anexo 7. ANOVA de efectos de épocas y macrófitas en la remoción de fósforo total, Puno Perú 2019

F.V.	SC tipo III	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4706.85 ^a	3	1568.95	28.63	0.0001
Epocas	1083.76	1	1083.76	19.78	0.0021
Macrófitas	1811.55	1	1811.55	33.06	0.0004
Épocas * Macrófitas	1811.55	1	1811.55	33.06	0.0004
Error	438.42	8	54.80		
Total	5145.27	11			

^aR² = 0.91 R² Aj = 0.88 CV = 22.75

Anexo 8. ANOVA de efectos de macrófitas en la remoción de sulfatos en época lluviosa, Puno Perú 2019

F.V.	SC tipo III	gl	CM	F	p-valor
Modelo	12.18 ^a	1	12.18	5.73	0.0749
Macrófitas	12.18	1	12.18	5.73	0.0749
Error	8.51	4	2.13		
Total	20.69	5			

^a $R^2 = 0.59$ $R^2 Aj = 0.49$ $CV = 7.32$

Anexo 9. Peso inicial y final de biomasa verde de macrófitas en época lluviosa (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019

<i>Azolla</i>			<i>Lemna</i>		
P. inicial g m ⁻²	P. final g m ⁻²	Eficiencia de producción	P. inicial g m ⁻²	P. final g m ⁻²	Eficiencia de producción
500	754.25	50.85	325	590.45	81.68
500	764.10	52.82	325	553.80	70.40
500	742.75	48.55	325	537.85	65.49
	753.70 \pm 10.69	50.74 \pm 2.14		560.70 \pm 26.97	72.52 \pm 8.30

Anexo 10. Peso inicial y final de biomasa verde de macrófitas en época seca (media \pm DE, n=3), Puno Perú 2019

<i>Azolla</i>			<i>Lemna</i>		
P. inicial g m ⁻²	P. final g m ⁻²	Eficiencia de producción	P. inicial g m ⁻²	P. final g m ⁻²	Eficiencia de producción
500	567.40	13.48	325	416.45	28.14
500	502.90	0.58	325	463.80	42.71
500	512.90	2.58	325	444.20	36.68
	527.73 \pm 34.71	5.55 \pm 6.94		441.48 \pm 23.79	35.84 \pm 7.32

Anexo 11. ANOVA de efectos de épocas y macrófitas en la eficiencia de producción de biomasa, Puno Perú 2019

F.V.	SC tipo III	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3511.02 ^a	3	1170.34	36.15	0.0001
Épocas	2317.41	1	2317.41	71.57	0.0001
Macrófitas	1088.71	1	1088.71	33.62	0.0004
Épocas * Macrófitas	104.90	1	104.90	3.24	0.1096
Error	259.03	8	32.38		
Total	3770.05	11			

^aR² = 0.93 R² Aj = 0.91 CV = 14.93

Anexo 12. Porcentaje de materia seca de macrófitas por épocas, Puno Perú 2019

Época lluviosa		Época seca	
<i>Azolla</i>	<i>Lemna</i>	<i>Azolla</i>	<i>Lemna</i>
7.97	8.77	6.94	5.94
7.80	8.86	6.13	6.13
7.74	8.94	6.31	6.31
7.84±0.12	8.86±0.09	6.46±0.43	6.13±0.19

Fuente: Laboratorio de Aguas y Suelos de FCA-UNA-Puno

Anexo 13. Informe de ensayo de aguas

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental

Salida de la Laguna de Chichani



Informe de Ensayo: A 01/19

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A01/19

Cliete: UNA -PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Bahía Interior L.T.
Punto de muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Responsable del muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo: 04 de febrero de 2019
Hora de muestreo: 08:00
Fecha de recepción de la muestra: 05 de febrero de 2018
Fecha de ejecución del ensayo: Del 05 al 18 de febrero, 2019
Caracterización de la muestra: Agua residual
Tipo de muestra: Simple
Envase: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LCA: I-1
Código original: LO-R1-PI-O

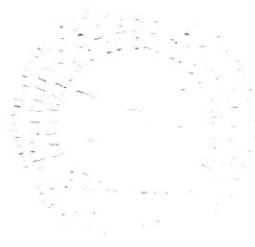
Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	LO-R1-PI-O 1-1
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	4,3x10 ²
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	85
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	184
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	2,4
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	1,1
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	105
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1028
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	166
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	59

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Febrero 27 de 2019



c.c.: Arch.
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental

a 100m de Laguna de Salicornia
BT-14



Informe de Ensayo: A 01/19

Página 2 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A01/19

Cliente: UNA - PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Punto de muestreo: Bahía Interior L.T.
Responsable del muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo: 04 de febrero de 2019
Hora de muestreo: 08:00
Fecha de recepción de la muestra: 05 de febrero de 2018
Fecha de ejecución del ensayo: Del 05 al 18 de febrero, 2019
Caracterización de la muestra: Agua residual
Tipo de muestra: Simple
Envase: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LCA: 1-2
Código original: EI-R1-PI-O

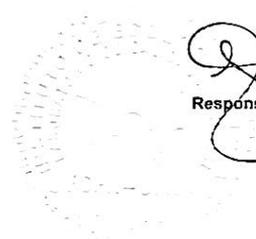
Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	EI-R1-PI-O 1-2
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	1,1x10 ⁶
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	13
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	34
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	2,00
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,59
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	7,8
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1274
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	264
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	8,1

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Febrero 27 de 2019



Ing. Jaime Chincheros Paniagua
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



c.c.: Arch.
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 10/19

Página 1 de 4

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A10/19

Ciente:	UNA -PUNO
Solicitante:	Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente:	UNA - PUNO
Procedencia de la muestra:	Perú - Puno
	Provincia: Puno
	Departamento: Puno
	Experimento
Punto de muestreo:	Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Responsable del muestreo:	12 de febrero de 2019
Fecha de muestreo:	12:00
Hora de muestreo:	13 de febrero de 2018
Fecha de recepción de la muestra:	Del 13 al 28 de febrero, 2019
Fecha de ejecución del ensayo:	Agua
Caracterización de la muestra:	Simple
Tipo de muestra:	Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Envase:	10-1
Código LCA:	EI-M1 Azolla
Código original :	

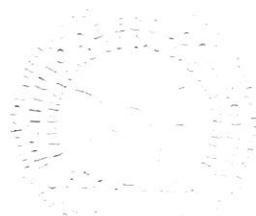
Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	EI-M1 Azolla 10-1
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	2,3x10 ²
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	12
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	35
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	0,12
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,65
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	2,5
Sólidos totales	EPA 180.3	mg/l	10	1193
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	294
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	2,6

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Febrero 28 de 2019



c.c.: Arch.
JCH/LCA



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 10/19

Página 2 de 4

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A10/19

Cliente:	UNA -PUNO
Solicitante:	Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente:	UNA - PUNO
Procedencia de la muestra:	Perú - Puno Provincia: Puno Departamento: Puno Experimento
Punto de muestreo:	Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Responsable del muestreo:	12 de febrero de 2019
Fecha de muestreo:	12:00
Hora de muestreo:	13 de febrero de 2018
Fecha de recepción de la muestra:	Del 13 al 28 de febrero, 2019
Fecha de ejecución del ensayo:	Agua
Caracterización de la muestra:	Simple
Tipo de muestra:	Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Envase:	10-2
Código LCA:	EI-M3 Azolla
Código original:	

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	EI-M3 Azolla 10-2
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	15
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	26
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	0,61
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,66
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	2,0
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1222
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	287
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	1,9

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Febrero 28 de 2019

c.c.: Arch.
JCH/LCA



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 10/19

Página 3 de 4

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A10/19

Cliente: UNA -PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Experimento:
Punto de muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Responsable del muestreo: 12 de febrero de 2019
Fecha de muestreo: 12:00
Hora de muestreo: 13 de febrero de 2019
Fecha de recepción de la muestra: Del 13 al 28 de febrero, 2019
Fecha de ejecución del ensayo: Agua
Caracterización c z: Simple
Tipo de muestra: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Envase: 10-3
Código LC A: El-M1 Lemna
Código original:

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	EI-M1 Lemna 10-3
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	1,5x10 ²
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	69
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	202
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	2,0
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,64
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	1,7
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1209
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	294
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	3,7

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Febrero 28 de 2019



c.c.: Arch
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 10/19

Página 4 de 4

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A10/19

Cliente:	UNA -PUNO
Solicitante:	Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente:	UNA - PUNO
Procedencia de la muestra:	Perú - Puno
	Provincia: Puno
	Departamento: Puno
Punto de muestreo:	Experimento
Responsable del muestreo:	Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo:	12 de febrero de 2019
Hora de muestreo:	12:00
Fecha de recepción de la muestra:	13 de febrero de 2019
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 13 al 28 de febrero, 2019
Caracterización c z	Agua
Tipo de muestra:	Simple
Envase:	Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LC A:	10-4
Código original:	EI-M3 Lemna

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	EI-M3 Lemna 10-4
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	67
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	200
Fósforo total	EPA 365.2	mg P-PO ₄ /l	0,010	1,6
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,67
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	2,5
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1226
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	304
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	2,6

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Febrero 28 de 2019



c.c. Arch
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 10/19

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A10/19

Cliente: UNA - PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Experimento:
Punto de muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Responsable del muestreo: 12 de febrero de 2019
Fecha de muestreo: 12:00
Hora de muestreo: 13 de febrero de 2019
Fecha de recepción de la muestra: Del 13 al 28 de febrero, 2019
Fecha de ejecución del ensayo: Agua
Caracterización c z: Simple
Tipo de muestra: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Envase: 10-5
Código LC A: El-M2 Azolla
Código original:

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	EI-M2 Azolla 10-5
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	1,2x10 ²
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	13
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	31
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	0,36
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,65
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	2,3
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1207
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	291
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	2,2

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Febrero 28 de 2019



cc: Arch
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 112/19

Página 1 de 6

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A112/19

Cliente: UNA - PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Lago Titicaca
Punto de muestreo:
Responsable del muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo: 02 de julio de 2019
Hora de muestreo: 08:10
Fecha de recepción de la muestra: 03 de julio de 2019
Fecha de ejecución del ensayo: Del 03 al 17 de julio, 2019
Caracterización c z: Agua residual
Tipo de muestra: Simple
Envase: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LCA: 112-1
Código original: P0

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	PO 112-1
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	1,1x10 ⁶
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	124
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	259
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	9,4
Nitratos	SM 4500-NO3-B	mg N-NO ₃ /l	0,30	2,4
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	65
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1234
Sulfatos	SM 4500-SO4=E	mg/l	1,0	812
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	165

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Julio 22 de 2019



c.c.: Arch.
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 112/19

Página 2 de 6

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A112/19

Cliete: UNA -PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Punto de muestreo: Lago Titicaca
Responsable del muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo: 02 de julio de 2019
Hora de muestreo: 08:10
Fecha de recepción de la muestra: 03 de julio de 2019
Fecha de ejecución del ensayo: Del 03 al 17 de julio, 2019
Caracterización c z: Agua residual
Tipo de muestra: Simple
Envase: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LC A: 112-2
Código original: P1

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	P1 112-2
• Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	16
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	49
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	1,40
Nitratos	SM 4500-NO3 -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,64
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	4,2
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1202
Sulfates	SM 4500-SO4=E	mg/l	1,0	243
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	5,0

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Julio 22 de 2019



c.c. Atch
JCHA/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 112/19

Página 3 de 6

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A112/19

Cliente: UNA -PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Lago Titicaca
Punto de muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Responsable del muestreo: 02 de julio de 2019
Fecha de muestreo: 08:10
Hora de muestreo: 03 de julio de 2019
Fecha de recepción de la muestra: Del 03 al 17 de julio, 2019
Fecha de ejecución del ensayo: Agua residual
Caracterización (Z): Simple
Tipo de muestra: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Envase: 112-3
Código LCA: PA1 (Azolla)
Código original:

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	PA1 (Azolla) 112-3
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	43
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	54
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	1,2
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,73
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	2,0
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1168
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	250
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	1,3

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Julio 22 de 2019



c.e.: Arch
JCM.LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 112/19

Página 4 de 6

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A112/19

Cliente: UNA - PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Punto de muestreo: Lago Titicaca
Responsable del muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo: 02 de julio de 2019
Hora de muestreo: 08:10
Fecha de recepción de la muestra: 03 de julio de 2019
Fecha de ejecución del ensayo: Del 03 al 17 de julio, 2019
Caracterización c z: Agua residual
Tipo de muestra: Simple
Envase: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LCA: 112-4
Código original: PA2 (Azolla)

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Limite de determinación	PA2 (Azolla) 112-4
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	15
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	67
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	1,2
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,72
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	1,2
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1228
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	247
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	1,2

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Julio 22 de 2019



c.c.: Arch.
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 112/19

Página 5 de 6

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A112/19

Cliente: UNA - PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Lago Titicaca
Punto de muestreo: Lago Titicaca
Responsable del muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo: 02 de julio de 2019
Hora de muestreo: 08:10
Fecha de recepción de la muestra: 03 de julio de 2019
Fecha de ejecución del ensayo: Del 03 al 17 de julio, 2019
Caracterización c z: Agua residual
Tipo de muestra: Simple
Envase: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LCA: 112-5
Código original: PL1 (Lemna)

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	PL1 (Lemna) 112-5
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	36
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	47
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	1,2
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,66
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	0,74
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1184
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	259
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	1,5

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Julio 22 de 2019

MANUEL ALFREDO CALLOHUANCA PARIAPAZA
INGENIERO EN CIENCIAS PURAS Y NATURALES
LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL



c.c.: Arch.
JCH4.CA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 112/19

Página 6 de 6

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A112/19

Cliente: UNA - PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Punto de muestreo: Lago Titicaca
Responsable del muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo: 02 de julio de 2019
Hora de muestreo: 08:10
Fecha de recepción de la muestra: 03 de julio de 2019
Fecha de ejecución del ensayo: Del 03 al 17 de julio, 2019
Caracterización c/z: Agua residual
Tipo de muestra: Simple
Envase: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LCA: 112-6
Código original: PL2 (Lemna)

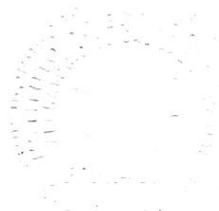
Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	PL2 (Lemna) 112-6
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	39
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	59
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	1,2
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,64
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	1,2
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1178
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	221
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	2,5

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Julio 22 de 2019



Ing. Jaime Chincheros Vaniagua
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



c.c.: Arch.
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 112/19

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A112/19

Cliente:	UNA -PUNO
Solicitante:	Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente:	UNA - PUNO
Procedencia de la muestra:	Perú - Puno
	Provincia: Puno
	Departamento: Puno
Punto de muestreo:	Lago Titicaca
Responsable del muestreo:	Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo:	02 de julio de 2019
Hora de muestreo:	08:10
Fecha de recepción de la muestra:	03 de julio de 2019
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 03 al 17 de julio, 2019
Caracterización c z	Agua residual
Tipo de muestra:	Simple
Envase:	Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LC A:	112-7
Código original:	PA3 (Azolla)

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	PA3 (Azolla) 112-7
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	29
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	61
Fósforo total	EPA 365.2	mg P-PO ₄ /l	0,010	1,2
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,73
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	1,6
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1198
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	249
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	1,3

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Julio 22 de 2019



c.c. Arch
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 112/19

Página 2 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUAS A112/19

Ciente: UNA - PUNO
Solicitante: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Dirección del cliente: UNA - PUNO
Procedencia de la muestra: Perú - Puno
Provincia: Puno
Departamento: Puno
Punto de muestreo: Lago Titicaca
Responsable del muestreo: Ing. Manuel Alfredo Callohuanca Pariapaza
Fecha de muestreo: 02 de julio de 2019
Hora de muestreo: 08:10
Fecha de recepción de la muestra: 03 de julio de 2019
Fecha de ejecución del ensayo: Del 03 al 17 de julio, 2019
Caracterización c z: Agua residual
Tipo de muestra: Simple
Envase: Dos botellas plásticas y un frasco de vidrio
Código LC A: 112-8
Código original: PL3 (Lemna)

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	PL3 (Lemna) 112-8
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	38
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	53
Fósforo total	EPA 365.2	mgP-PO ₄ /l	0,010	1,2
Nitratos	SM 4500-NO ₃ -B	mg N-NO ₃ /l	0,30	0,65
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0,30	0,97
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	1181
Sulfatos	SM 4500-SO ₄ =E	mg/l	1,0	240
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	2,0

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, Julio 22 de 2019



c.c.: Arch
JCHA.LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia