tierra

PROPUESTAS PARA SALVAR EL LAGO TITICACA

PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL LAGO MENOR

tierra

PROPUESTAS PARA SALVAR EL LAGO TITICACA

PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL LAGO MENOR

Xavier Lazzaro, Ph.D.
Especialista ambiental de la ALT

Esta investigación es posible gracias al apoyo de DIAKONÍA en el marco de la inciativa de TIERRA para la sensibilización e incidencia para encarar la crisis socio ambiental del Lago Titicaca.

TIERRA - Taller de Iniciativas en Estudios Rurales y Reforma Agraria

Xavier Lazzaro, Ph.D., Especialista ambiental de la ALT
Propuestas para salvar el Lago Titicaca
Problemática ambiental del Lago Menor
La Paz: Fundación TIERRA, 2025

DL: 4-1-4776-2025
ISBN: 978-9917-9749-4-9

LAGO TITICACA / CAMBIO CLIMÁTICO / CALENTAMIENTO GLOBAL MITIGACIÓN / CONTAMINACIÓN / INGENIERÍA AMBIENTAL ESTADO / INGIENERÍA ECOLÓGICA / REFORESTACIÓN / BOLIVIA

© TIERRA, julio de 2025
Editor: Fundación TIERRA
Telf: (591) 2 243 2263
Fax: (591) 2 211 1216
Email: tierra@ftierra.org
Sitio web: www.ftierra.org

Edición: Floriana Soria Galvarro
Fotografía de tapa: TIERRA
Diseño y diagramación: TIERRA
Impreso en Bolivia

Contenido

Presentación 7

Diagnóstico

1. Características únicas del lago Titicaca con énfasis en el sector boliviano del Lago Menor

1.1 Lago Titicaca 11
1.2. Lago Menor 12
1.3. Cuenca Katari 12
1.4. Propósito de este diagnóstico 13
1.5. Elección del área representativa para el diagnóstico 14

2. Contaminación antrópica y eutrofización

2.1. Fuentes contaminantes en la unidad hidrográfica Katari 17
2.2. Fuentes contaminantes en la unidad hidrográfica circunlacustre 20

3. Cambio Climático

3.1. Impactos del calentamiento global 25
3.2. Modelos que anticipan el futuro aumento de la temperatura 29
3.3. El calentamiento global y la contaminación magnifican la eutrofización 31

Propuestas

4. Propuestas de soluciones estructurales para controlar la contaminación y la eutrofización

4.1. Soluciones de ingeniería sanitaria (ingeniería ambiental) 35
4.2. Soluciones de ingeniería ecológica (basadas en la naturaleza).. 85

5. Propuestas de soluciones estructurales para mitigar y adaptarse a los efectos del cambio climático

5.1. Reforestación 95
5.2. Promover la cosecha de agua de lluvia a nivel de microcuencas.. 95
5.3. Explorar la recolección de agua de lluvia en el subsuelo superficial. 96
5.4. Construir embalses subterráneos para beneficiar la agricultura. 96
5.5. Sembrar las nubes 98

6. Acciones no estructurales para controlar la contaminación y eutrofización y adaptarse al cambio climático

6.1. Elevar la consciencia y la protección del medioambiente..... 101
6.2. Incluir la educación al medio ambiente y el cambio climático en el currículo escolar y universitario..... 102
6.3. Informar y educar vía los medios de comunicación..... 108
6.4. Promover el monitoreo ambiental participativo..... 108
6.5. Incluir un presupuesto para contribuir con los costos de tratamiento de agua y producción de agua potable en las tasas municipales mensuales de los hogares 109
6.6. La educación sobre el Cambio Climático (CC) 109
6.7. Priorizar temas para las investigaciones aplicadas 110
6.8. Incentivar un turismo ambiental-cultural responsable..... 111

7. Recomendaciones finales

7.1. Los puntos críticos en la cuenca Katari y el Lago Menor 113
7.2. Las acciones prioritarias 115

8. Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas 119

PRESENTACIÓN

El Lago Titicaca, el cuerpo de agua navegable más alto del planeta, atraviesa una crisis alarmante provocada por el cambio climático, la prolongada sequía y los altos niveles de contaminación. Esta situación afecta gravemente tanto a las comunidades rurales cercanas como al ecosistema de la región. La reducción de las precipitaciones, el vertido de aguas residuales y desechos sólidos, junto con la contaminación por metales pesados derivados de actividades mineras y urbanas, están deteriorando la calidad del agua y la salud del lago y de la cuenca en general. A esto se suman amenazas ambientales nacionales como la deforestación y los incendios forestales en las tierras bajas del país, que han alterado el ciclo natural de lluvias.

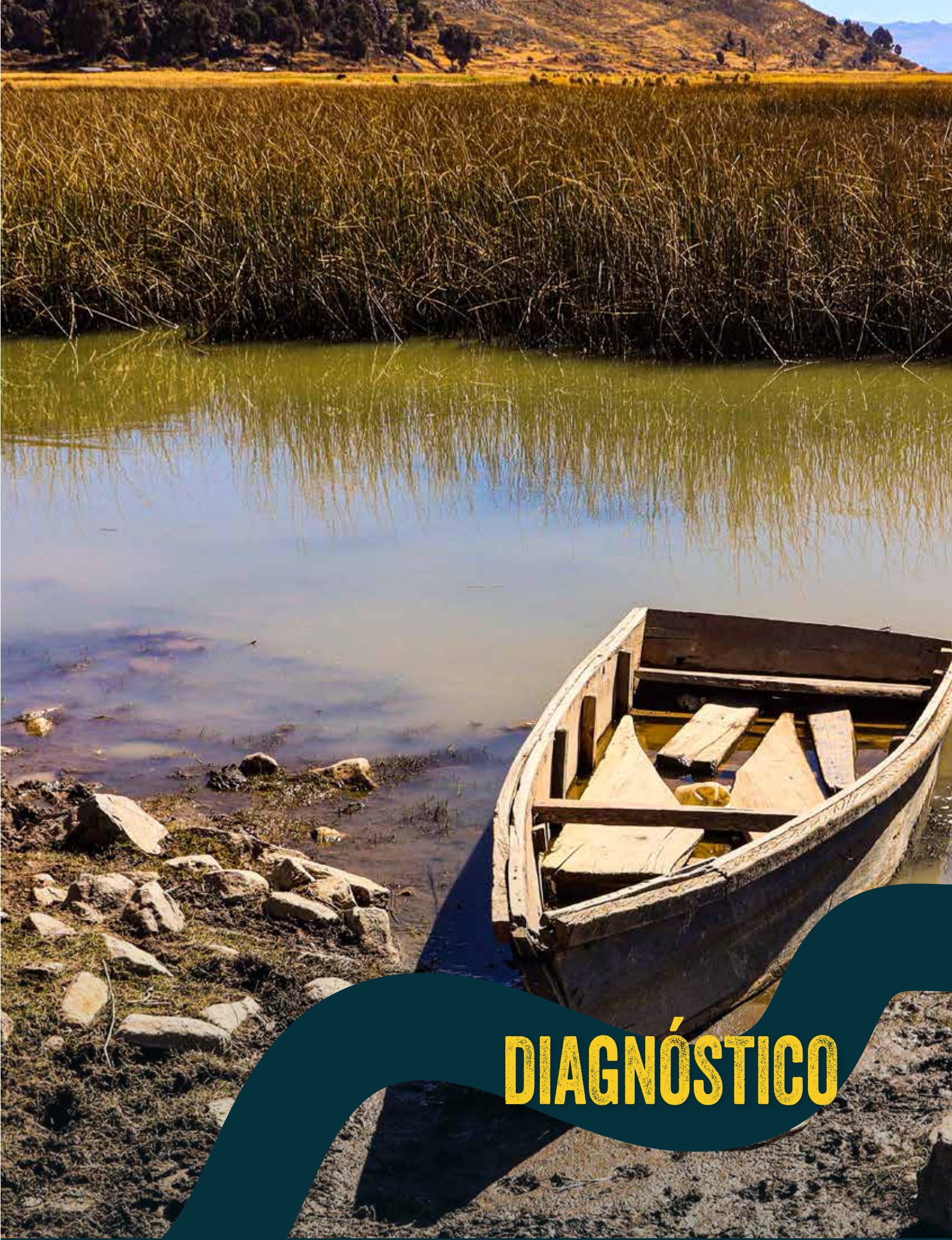
Ante esta situación crítica, es imprescindible una acción articulada entre gobiernos, organizaciones sociales y académicas para desarrollar un plan de restauración integral y sostenible. En este contexto, la Fundación TIERRA ha encargado a Xavier Lazzaro, uno de los mayores expertos en el tema en Bolivia, la elaboración del presente documento, enfocado en la formulación de propuestas concretas —tanto estructurales como no estructurales— orientadas al control de la contaminación, la restauración ecológica y la adaptación, en la medida de lo posible, a los efectos del cambio climático, y han sido diseñadas con un enfoque respetuoso de las realidades locales y de las poblaciones que habitan el territorio.

El documento se centra en las áreas más densamente pobladas y contaminadas del sector boliviano del Lago Menor del Titicaca, en particular las regiones norte (desde Huatajata hasta Puerto Pérez) y central (de Quehuaya a Chojasivi) del litoral. Se pone un énfasis especial en la Cuenca Katari —y en particular en los ríos Seke, Seco, Pallina y Katari— así como en su desembocadura en la Bahía de Cohana (entre Quehuaya, Isla Pariti, Cohana y Chojasivi). El objetivo es contribuir al diseño de estrategias integrales que mejoren la calidad del agua, la salud de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades. Para que las soluciones estructurales tengan un impacto real, deben ir acompañadas de procesos sostenidos de educación ambiental, participación ciudadana y una ética renovada de respeto hacia la naturaleza. Este proceso exige una firme voluntad política, financiamiento a largo plazo y compromisos que superen los ciclos de gobierno. Solo así será posible avanzar hacia una relación más equilibrada entre el desarrollo humano y la conservación del Lago Titicaca.

La situación expuesta en este documento debe motivarnos a actuar colectivamente, buscando soluciones eficaces y sostenibles que permitan recuperar y preservar este importante ecosistema, en diálogo constante con las comunidades campesinas e indígenas y con el medio ambiente.

Finalmente, es importante destacar que este estudio ha sido posible gracias al apoyo de Diakonía – Bolivia. Esperamos que el documento sea de utilidad e interés para todos los lectores.

Juan Pablo Chumacero Ruíz
Director Ejecutivo
Fundación TIERRA



DIAGNÓSTICO

1. Características únicas del lago Titicaca con énfasis en el sector boliviano del Lago Menor

1.1 Lago Titicaca

El lago Titicaca es el mayor cuerpo de agua dulce de Sudamérica, con una superficie de 8.372 km^2. Es, además, el más alto y navegable entre los Grandes Lagos del mundo (aquellos con más de 500 km2) ubicado a 3.809 m s.n.m. Este ecosistema posee características únicas que lo convierten en un *Hotspot*[1] de biodiversidad: alberga una gran variedad de especies, muchas de ellas endémicas –es decir, que no existen en ningún otro lugar del mundo–, y un número significativo de especies amenazadas o en peligro de extinción, entre aves, peces, ranas y plantas. Situado en una región de alta montaña, entre las dos Cordilleras de los Andes, el lago se encuentra próximo al límite altitudinal de crecimiento de los árboles (entre 3.800 y 4.500 m s.n.m), y es considerado el más alto de los lagos andinos. Sin embargo, debido a su ubicación tropical (16° S), no se congela como ocurre con otros lagos de altura en regiones templadas o alpinas, que permanecen cubiertos de hielo durante largos periodos.

El lago se alimenta principalmente del deshielo de los nevados y de las precipitaciones que caen sobre el Altiplano. La mayor parte de sus aguas se pierden por evaporación (95%) y, en menor medida, por infiltración en el subsuelo. Su cuenca hidrográfica, conocida como Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa (TDPS) es una cuenca endorreica (es decir, sin salida al mar); el agua fluye hacia el sur a través del río Desaguadero, su único emisario, hasta llegar a los lagos Uru Uru y Poopó, y finalmente desemboca en el Salar de Coipasa.

El entorno climático del lago es particularmente extremo. La presión parcial de oxígeno a esta altitud es un 30 % menor que al nivel del mar, mientras que la radiación solar, especialmente la ultravioleta dañina, es aproximadamente un 30 % más intensa. Además, la temperatura del aire presenta una gran amplitud diaria, con diferencias

1 Actualmente se reconocen 36 puntos críticos ('Hotspots') de biodiversidad en el mundo. Se trata de regiones terrestres excepcionalmente ricas en especies, pero también altamente amenazadas. Para ser considerada un *hotspot* de biodiversidad, un área debe cumplir con dos criterios estrictos: (1) Albergar al menos 1.500 especies de plantas vasculares endémicas. (2) Haber perdido al menos el 70% de su vegetación nativa primaria. Muchos de estos puntos críticos de biodiversidad superan ampliamente estos criterios. Por ejemplo, el *hotspot* de los Andes Tropicales cuenta con aproximadamente 15.000 especies endémicas de plantas. En algunos casos, la pérdida de vegetación ha alcanzado niveles alarmantes, llegando hasta el 95% (CEPF, 2025).

que superan los 20 ºC entre el día y la noche. Esta combinación de altitud y latitud hace que el calentamiento global en el área del Titicaca avance al doble de velocidad que el promedio mundial. Por lo que los organismos que habitan este ecosistema, tanto animales como plantas, viven cerca de sus límites fisiológicos y son especialmente vulnerables a cualquier perturbación ambiental.

1.2. Lago Menor

Al igual que la Bahía Interior de Puno (BIP), en el sector peruano del Lago Mayor, el Lago Menor es una zona del lago Titicaca especialmente vulnerable a la contaminación y al cambio climático. Esta doble presión genera una sinergia de impactos que amenaza seriamente el equilibrio ecológico del ecosistema. En el sector boliviano, esta vulnerabilidad se acentúa por su escasa profundidad: en la mayor parte del lago el agua no supera los 5 metros y solo en puntos aislados, como la Fosa de Chúa, se alcanzan hasta 40 metros. En este tipo de lagos no profundos los vientos térmicos las brisas del lago[2] desempeñan un papel clave en la dinámica de la mezcla vertical del agua. Esta mezcla remueve los sedimentos del fondo y favorece la redistribución de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, provenientes principalmente de aguas residuales, fertilizantes agrícolas y residuos urbanos. Esto estimula el crecimiento acelerado de microalgas, un fenómeno conocido como *eutrofización*. Cuando las algas proliferan en exceso, alteran la calidad del agua, al descomponerse cuando colapsan disminuyen el oxígeno disuelto y pueden provocar la muerte masiva de peces y otros organismos acuáticos.

La situación se vuelve más crítica con las alteraciones del clima: cambios en la frecuencia e intensidad de las lluvias, variaciones de temperatura y modificaciones en los patrones de viento afectan los ciclos hidrológicos del lago. Estos desajustes reducen la capacidad de renovación del agua y favorecen la concentración de contaminantes, cerrando un ciclo de retroalimentación que debilita progresivamente la resiliencia ecológica del Lago Menor.

1.3. Cuenca Katari

Entre las regiones norte y central del sector boliviano del Lago Menor, la cuenca Katari es una de las más densamente pobladas del país. Según el censo de 2020, alberga a más de 1.130.000 habitantes, es decir, aproximadamente el 10% de la población nacional. El municipio de El Alto concentra el 91% de esta población y presenta un crecimiento demográfico acelerado, que ha llegado hasta un 9% anual. Esta expansión urbana ejerce una fuerte presión sobre los ecosistemas de la cuenca y sobre el Lago Menor. Desde el inicio de su desarrollo urbano en 1989, la urbe alteña ha generado serios problemas ambientales y socio ecológicos. Los ríos Seke, Seco, Pallina y Katari –afluentes que drenan hacia el lago– se han visto severamente afectados por vertidos domésticos e industriales sin tratamiento adecuado.

2 Estas brisas ocurren cuando el agua del lago permanece más fría o más caliente que la tierra circundante. Esto provoca gradientes de temperatura que conducen a gradientes de presión atmosférica, impulsando el movimiento horizontal del aire. Durante el día, la tierra se calienta más rápido que el agua. El aire sobre la tierra se calienta y sube. El aire más frío del lago entra para sustituirlo provocando una brisa de tierra (del lago a tierra). Por la tarde, puede ocurrir lo contrario: brisa hacia el lago (de la tierra al lago).

La complejidad de esta problemática ha sido abordada en múltiples estudios orientados a su caracterización y remediación. Entre ellos se destacan los trabajos de Fonturbel Rada (2005, 2010) Ribera Arismendi (2008), BID (2016), Molina et al. (2017), MMAyA (2018), Revilla Herrero (2021, 2022, 2023), Lazzaro et al. (2023).

1.4. Propósito de este diagnóstico

Las causas, los mecanismos y los efectos del deterioro ambiental en los ríos de la cuenca Katari y en el litoral del Lago Menor, como resultado de la interacción entre la contaminación y el cambio climático, han sido ampliamente estudiados y documentados. Por ello, el presente diagnóstico no busca reiterar lo ya conocido, sino enfocarse en la formulación de propuestas concretas: tanto estructurales como no estructurales, orientadas al control de la contaminación, la restauración ecológica, y la adaptación –en medida de lo posible– a los efectos del cambio climático. Estas propuestas se sustentan en el marco normativo vigente y han sido diseñadas con un enfoque respetuoso de las realidades locales y de las poblaciones que habitan el territorio.

El análisis se concentra en las zonas más densamente pobladas y contaminadas del sector boliviano del Lago Menor: las regiones norte (de Huatajata a Puerto Pérez) y central (de Quehuaya a Chojasivi) del litoral del Lago Menor, con énfasis en la Cuenca Katari –particularmente los ríos Seke, Seco, Pallina y Katari– y su desembocadura en la Bahía de Cohana (entre Quehuaya, Isla Pariti, Cohana y Chojasivi) (ver Fig. 1).

Figura 1. Área de interés (delimitada por el puntillado blanco) entre la cuenca del río Katari y el litoral boliviano de las regiones norte y central del Lago Menor

Fuente: Elaboración propia en Google Earth ©.

El objetivo es contribuir al diseño de estrategias integrales que mejoren la calidad de agua, la salud de los ecosistemas y el bienestar de la población.

Sin embargo, para que las soluciones estructurales sean efectivas, deben estar acompañadas por procesos sostenidos de educación ambiental, participación ciudadana y una renovada ética de respeto a la naturaleza. Este camino requiere voluntad política firme, financiamiento de largo plazo y compromisos que trasciendan los ciclos de gobierno. Solo así será posible avanzar hacia una relación más armónica entre el desarrollo humano y la conservación del lago Titicaca.

1.5. Elección del área representativa para el diagnóstico

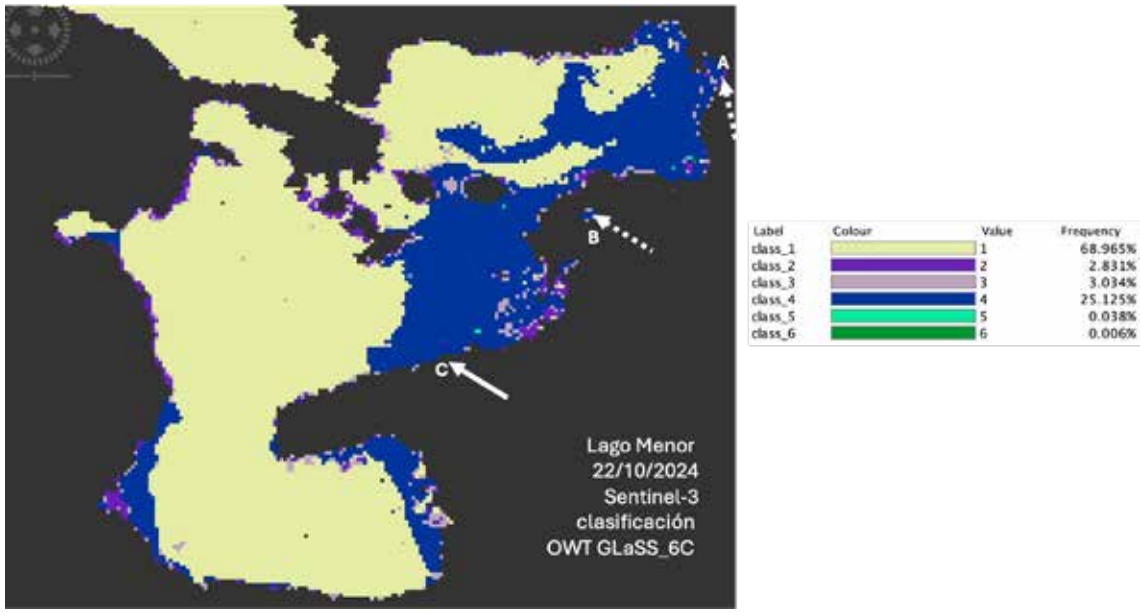
En la desembocadura de la Bahía de Cohana se concentra una extensa zona de eutrofización. Esta situación es el resultado de la llegada masiva de nutrientes provenientes de aguas residuales no tratadas, en su mayoría originadas en las ciudades de El Alto y Viacha. Los ríos de la cuenca Katari transportan estos residuos hasta el lago, donde alteran su equilibrio ecológico. Esta situación justifica que el presente diagnóstico se enfoque en las regiones norte y central del Lago Menor, en el sector boliviano.

Para respaldar esta decisión, se utilizaron imágenes satelitales del programa Sentinel-3, analizadas con la herramienta óptica automática OWT GLaSS_6C. Esta permite clasificar el estado trófico del agua con base en tres parámetros: clorofila-*a*, materia orgánica disuelta (CDOM) y sólidos en suspensión (TSM). La clasificación es compatible con el estándar de la OCDE[3] (1982) para evaluar la salud de ecosistemas acuáticos (ver Fig. 2). El 22 de octubre de 2024, los datos satelitales mostraron que el 69 % del Lago Menor se encontraba en buen estado (clase 1). Sin embargo, el 25 % del lago se ubicaba en la clase más degradada (clase 4), con valores altos de clorofila, materia orgánica y sólidos. Esta área afectada se extendía principalmente por el litoral boliviano, desde Huatajata y Puerto Pérez hasta la Bahía de Cohana y el inicio de la península de Taraco. También se identificaron zonas críticas en el sector peruano, como Zepita. Estos datos evidencian el impacto de las descargas contaminantes sobre el lago. Las áreas degradadas requieren vigilancia continua y acciones de restauración urgentes. El objetivo es recuperar condiciones similares a las observadas en la zona central del lago, donde el estado del agua aún es saludable.

El uso de herramientas satelitales permite anticipar eventos críticos, como proliferaciones de microalgas, que pueden afectar gravemente al ecosistema acuático. Contar con monitoreo constante es clave para prevenir crisis ambientales.

3 Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, fundada en Paris en 1961. Tiene como objetivos de contribuir a una sana expansión económica en los países miembros, así como no miembros, en vías de desarrollo económico. https://www.oecd.org/fr/about/news/press-releases/2022/06/global-plastic-waste-set-to-almost-triple-by-2060.html

Figura 2. Evaluación de la gran extensión de la eutrofización en el Lago Menor en base a una imagen Sentinel-3



Fuente: Sentinel-3 y OWTGLaSS_6C de ESA. Elaboración por Lic. Javier Maldonado (IIGEO/UMSA).

Nota: Imagen Sentinel-3 (programa Copernicus de la ESA; resolución espacial 200 m, paso diario) del 22/10/2024. Se le aplicó el algoritmo de la clasificación óptica OWT GLaSS_6C basada en la reflectancia de la clorofila-a (Cl-*a*), la materia orgánica colorida disuelta (CDOM) y la materia total en suspensión (TSM). Esta clasificación es compatible con el sistema *in situ* de clasificación abierta del estado trófico del OCDE (1982). Se observa que la mayor parte (69%) de la zona pelágica (central) se encuentra en buena salud en clase 1 (color beige; medianas: 1,6 μg Cl-*a* /L, 0,17 CDOM/m, 1,34 g TSM/m^3). En cuanto que la zona litoral (25%), principalmente de Huarina a Chojasivi se encuentra en las peores condiciones de salud de la clase 4 (color azul; medianas: 107 μg Cl-*a*/L, 4,20 CDOM/m, 37,65 g TSM/m^3). Los litorales de Tiwanaku y Guaqui (en Bolivia) y Zepita (en Perú) también son eutrofizados. Presenta las desembocaduras de los ríos más contaminados: A = río Batallas al sur de la isla Cojata; B = río Katari en Cohana antes del 2021; C = río Katari en Chojasivi a partir de 2021.

¿Qué hay que recordar?

CARACTERÍSTICAS ÚNICAS DEL LAGO TITICACA

Las dos áreas menos profundas del Lago Titicaca, la Bahía de Puno en Perú y el Lago Menor en Bolivia, son también las más densamente pobladas y contaminadas. Por lo tanto, son las más vulnerables a las perturbaciones ambientales, incluyendo un marcado proceso de eutrofización en sus zonas litorales. En apenas tres décadas, el aumento acelerado de vertidos domésticos e industriales asociado a la acelerada expansión demográfica, ha agravado esta situación. Se precisa urgentemente ampliar y optimizar los sistemas de tratamiento de aguas residuales, hasta ahora muy deficientes, mediante la combinación de estrategias estructurales y también no estructurales (concienciación y educación ambiental), para revertir esta desesperante posibilidad.

2. Contaminación antrópica y eutrofización[4]

Todas las fuentes de contaminación generan impactos negativos –directos e indirectos, y a veces irreversibles– sobre el funcionamiento ecológico del Lago Menor, que actúa como único cuerpo receptor. El efecto más evidente de más de tres décadas de activades humanas asociadas al crecimiento urbano y demográfico de El Alto es el cambio en el estado trófico de gran parte del lago. A fines de los años setenta, el Lago Menor era un sistema oligotrófico, es decir, con bajas concentraciones de nutrientes como nitrógeno y fósforo, escasa producción de algas, aguas claras y buena oxigenación, especialmente en zonas poco profundas (Lazzaro 1981, 1985). Actualmente presenta condiciones entre mesotróficas y eutróficas, lo que significa un aumento significativo de nutrientes, menor claridad del agua y mayor producción biológica particularmente en zonas litorales. Este proceso ha favorecido la aparición recurrente de proliferaciones masivas de microalgas que están asociadas a la mortandad masiva de peces, ranas e incluso aves acuáticas, como ocurrió en 2015 (Achá & Lazzaro, 2015; Molina et al., 2017; Lazzaro et al., 2023). Estos fenómenos ocurrieron en la década de 1960 en la Bahía Interior de Puno debido a las numerosas descargas de aguas residuales provenientes de los barrios de la ciudad de Puno. Estas se incrementaron por la deficiente recolección de aguas servidas y la ineficiencia de la planta de tratamiento de Espinar. En ambos casos la eutrofización fue acelerada por la eliminación del cordón litoral de vegetación acuática como los totorales, que actúan como filtros biológicos naturales capaces de retener contaminantes, exceso de nutrientes y materia orgánica (Northcote et al., 1991).

2.1. Fuentes contaminantes en la unidad hidrográfica Katari

2.1.1. Residuos sólidos

Los residuos sólidos provienen principalmente de los hogares y de la industria de la construcción. Entre ellos se encuentran bolsas y envases plásticos, tecnopor, madera, papel, tierra y otros materiales descartados. No existen datos precisos sobre los volúmenes anuales vertidos pero los impactos son visibles y generan preocupación entre los habitantes locales. Estos residuos, junto con los vertederos municipales –tanto oficiales como clandestinos–, contaminan los cauces de los ríos, las aguas subterráneas y los suelos agrícolas, afectando la salud ambiental de la región.

4 Para saber más sobre: 1) Las características de la eutrofización, los sistemas de clasificación de los estados tróficos, las técnicas y estrategias para controlar la eutrofización, el control de la contaminación, y la clasificación de los cuerpos de agua según sus usos deseados, ver Ryding & W. Rast (1989). 2) La ecología de los cuerpos de agua de gran altitud, ver Jacobsen & Dangles (2017). 3) Los principios y paradigmas de la limnología con la clasificación de los lagos, ver Jones & Smol (2023), una reedición del famoso libro de texto de Limnología de Wetzel (1975). 4) La ecología de los lagos poco profundos, ver Scheffer (1998).

2.1.2. Aguas residuales municipales

Las aguas residuales municipales provienen de poblaciones que cuentan con sistemas de agua potable y alcantarillado. Son la principal fuente de contaminación del agua ya que se vierten sin tratamiento o con un tratamiento deficiente. Los mayores volúmenes provienen de los municipios de El Alto y Viacha. El Alto descarga principalmente en el río Seco, mientras que Viacha y Laja lo hace en el río Pallina. Estas aguas conforman la red de contaminación principal de la Unidad Hidrográfica (UH) Katari, que desemboca finalmente en el río Katari, que es la mayor fuente de contaminación para la Bahía de Cohana y el Lago Menor. Para tratar estas aguas se construyó la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Puchukollo en 1998, ubicada en una zona donde el agua subterránea se encuentra apenas a 1,3 m de la superficie (PNUMA, 2011). Esta planta fue diseñada para tratar 0,43 m^3/s, lo que corresponde a una población de 400 mil habitantes (Castillo, 2019), actualmente recibe más de 13,6 hm^3/año de aguas residuales, lo que supera ampliamente su capacidad. Lastimosamente, esta planta de tratamiento está subdimensionada. Durante el período de lluvias, el río Seco transporta residuos urbanos diversos –plásticos, botellas, cartones, cenizas e incluso animales muertos– además de contaminantes químicos y emergentes. Según un informe de la *Ocola Salazar et al. (2022),*[5] en los seis municipios que conforman la UH Katari (El Alto, Viacha, Pucarani, Comanche, Laja y Colquencha) se identificaron 35 fuentes contaminantes. Las aguas residuales ocupan el primer lugar (14 fuentes), seguidas por actividades mineras (9), residuos sólidos (8) y residuos mineros (4).

2.1.3. Contaminación industrial

Los efluentes industriales presentan una gran variedad de contaminantes, especialmente compuestos químicos inorgánicos. La PTAR de Puchukollo no está diseñada para tratar estos elementos, ya que su función se limita a la materia orgánica y los nutrientes. Se estima que en El Alto operan más de 5.000 industrias, pero solo 1.920 cuentan con Registro Ambiental Industrial (RAI) (Castillo, 2019). De estas, únicamente 411 han sido identificadas como generadoras de residuos sólidos que van al alcantarillado o directamente a cuerpos de agua. No se conocen con certeza los volúmenes vertidos. Además, se calcula que entre 50 y 80 mataderos ilegales (de carácter familiar) operan principalmente en la zona de Ticuyo, municipio de Laja (SENASAG 2021). Sus efluentes contienen sangre, grasa, pelo y proteínas, con una alta carga de materia orgánica y nutrientes como nitrógeno y fósforo, que contribuyen significativamente a la contaminación.

2.1.4. Labores y pasivos mineros

Las principales actividades y pasivos mineros se concentran en la zona alta de Milluni, al pie del Huayna Potosí. Estos incluyen drenajes ácidos de mina, pozas abandonadas con aguas ácidas (con un pH de hasta 2,3 durante el periodo de lluvias), y relaves mineros sin tratamiento. También hay impactos por actividades pasadas, como campamentos abandonados.

5 Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Salar de Coipasa (conocida como ALT).

En la Unidad Hidrográfica Katari se han identificado 13 pasivos mineros que abarcan unas 777 hectáreas y contienen aproximadamente 2.174 toneladas de residuos. Aguas arriba de Milluni existen otros pasivos que cubren unas 81 hectáreas. A lo largo del río Pallina no se han registrado actividades ni residuos mineros. En época seca, las aguas de la Laguna Colorada de Milluni se desvían hacia el río Seke a través del Canal Alto Lima. Antes de ser vertidas, se tratan con cal para neutralizar su acidez y reducir la contaminación por metales pesados.

2.1.5. Contaminación medicinal

A lo largo de los ríos de la cuenca Katari, en los suelos y las aguas hasta la Bahía de Cohana y el Lago Titicaca, los trabajos pioneros de Archundia et al. (2017b, 2018, 2019) y Brienza et al. (2017) revelaron la presencia no solo de antibióticos, si no de sus productos de transformación. Estos provienen del uso humano y son arrastrados por las aguas residuales, tratadas o no. La presencia de estos contaminantes plantea un riesgo importante por el desarrollo de bacterias resistentes a los antibióticos, lo que podría generar graves problemas de salud pública. Pese a la magnitud del riesgo, la información disponible sobre este tipo de contaminación en el Altiplano boliviano es escasa. Por los riesgos para la salud su estudio debería priorizarse e incorporar tecnologías de eliminación en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

2.1.6. Ganadería

La ganadería en la cuenca Katari es mayoritariamente extensiva (aprovechamiento de pastos naturales), con algunos casos de manejo semi intensivo (uso de forrajes cultivados). Esta actividad es clave para la economía local: contribuye a la seguridad alimentaria (carne, leche, huevos, quesos), genera ingresos y empleos, y está profundamente ligada a la vida rural. Según datos del INE (2013), en la cuenca se contabilizan más de 470.000 animales, entre ellos vacas, ovejas, llamas, alpacas y gallinas. La presión de esta actividad económica sobre los recursos hídricos es significativa, tanto por el alto consumo de agua como por la generación de contaminantes. El estiércol y la orina de los animales aportan grandes cantidades de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, además de bacterias fecales, lo que afectaría la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Esta contaminación puede ser puntual, como ocurre cuando el ganado es amarrado cerca de las orillas, o difusa, cuando pasta libremente en la cuenca.

Un estudio de LIDEMA (2002) estimó la existencia de 25.000 bovinos en la zona, y con base en este dato, Luque (2013) calculó una producción diaria de 4,99 kg de estiércol por animal, equivalente a unas 125 toneladas al día y 45.534 toneladas al año. Aunque estas cifras corresponden a una población parcial en la región, ilustran el peso ambiental de los residuos ganaderos cuando no se gestionan adecuadamente. Durante la temporada de lluvias, parte de estos residuos llega a la Bahía de Cohana (las proporciones reales deben ser investigadas), donde se suman a la carga de nutrientes que alimenta el proceso de eutrofización. Sin embargo, esta gran cantidad de estiércol representa también un recurso valioso: podría usarse para fertilizar los suelos agrícolas, aprovechando su contenido estimado de 738 toneladas anuales de nitrógeno y 688 toneladas de fósforo.

Para transformar este problema en una oportunidad, es clave promover la capacitación de los productores en manejo sostenible de residuos. El tratamiento previo (como la fermentación del estiércol) permitiría reducir la contaminación y aprovechar sus beneficios como fertilizante natural.

2.1.7. Agricultura

La agricultura local produce papa, haba, quinua, oca, cebada y forrajes para el ganado (como cebada, avena forrajera y alfalfa). Estas cosechas abastecen tanto el autoconsumo como los mercados urbanos. Según datos del INE (2013), la cuenca Katari tiene una amplia superficie agrícola, donde predominan los pastos naturales (más de 76.000 ha), seguidos por la papa (12.016 ha), cebada forrajera (9.401 ha), alfalfa (4.096 ha), quinua (1.385 ha), haba verde (401 ha), avena forrajera (300 ha), entre otros cultivos. La mayoría de los agricultores trabaja en minifundios que van de 0,6 a 3 hectáreas por agricultor.

2.2. Fuentes contaminantes en la unidad hidrográfica circunlacustre

En el sector boliviano del Lago Titicaca, el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2022) identificó 62 fuentes contaminantes, entre ellas: 37 botaderos de residuos sólidos, 13 de labores mineras, 10 de vertimientos de aguas residuales municipales y 2 de residuos mineros.

2.2.1. Aguas residuales municipales

Fuera de la cuenca Katari, los mayores volúmenes de aguas residuales que desembocan en el Lago Menor provienen de Achacachi (a través del río Keka Jahuira), Copacabana y Desaguadero, que son las ciudades más pobladas. También se identifican aportes relevantes desde Batallas (río Chirapaca), Tiwanaku (río Tiwanaku) y Guaqui.

2.2.2. Residuos sólidos

En los alrededores del sector boliviano del Lago Menor existen 37 botaderos de residuos sólidos que no son manejados adecuadamente. Son generados por las poblaciones de los municipios de Carabuco (4), Ancoraimes (1), Achacachi (4), Tiwanacu (2), Taraco (1), Guaqui (3), Desaguadero (1) Pucarani (2), Batallas (2), Puerto Pérez (1), Huarina (1), Huatajata (1), Chúa Cocani (1), Tiquina (9), Copacabana (1), Tito Yupanqui (1) y Santiago de Huata (1). Los pobladores arrojan sus residuos en zonas aledañas a las ciudades, en los cauces de los ríos circundantes, eventualmente los entierran o queman.

2.2.3. Labores y pasivos mineros

Se identificaron 13 labores mineras y 2 botaderos de residuos mineros distribuidos en: Ancoraimes (2), Pucarani (1), Guanay (1), Batallas (3), Huarina (1), Copacabana (1), Laja (1), Tiwanaku (3), Guaqui (1) y Desaguadero (1). Aunque los impactos ambientales se consideran moderados, estas actividades se extienden por 21.364 hectáreas y representan un volumen de residuos estimado en 32.157 toneladas (SERGEOMIN, 2018).

2.2.4. Pesca artesanal[6]

En las décadas de 1970 y 1980, la pesca artesanal en el Lago Menor era una actividad de subsistencia. Se realizaba a bordo de botes de remo y los peces capturados se destinaban al consumo familiar. Actualmente, es una actividad comercial que utiliza embarcaciones motorizadas que se realiza en grupos de 20 a 30 botes y los productos se venden en mercados y ferias de El Alto y La Paz. Las principales zonas de pesca de *Orestias* y *Trichomycterus* son Puerto Pérez, Chúa Cocani, Huatajata y Huarina. Sin embargo, el uso de mallas que capturan peces pequeños –antes de que se reproduzcan– y el incumplimiento de los períodos de veda amenazan la sostenibilidad de estas especies nativas. Según información del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) de 2010, la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) es apenas de 4,2 kg/viaje en el Lago Menor, comparado con los 17,9, 13,7 y 11,5 kg/viaje en la zona sur del Lago Mayor, la Bahía de Puno, y la zona norte, respectivamente. Entre los daños que la actividad pesquera genera al medioambiente se incluyen: el abandono de bidones de aceite de motores fuera de borda en las orillas, las fugas de aceite y combustible, los humos tóxicos provenientes de motores mal afinados, y el abandono de redes de pesca usadas que continúan capturando peces de forma indiscriminada, contribuyendo así a la mortalidad de especies no objetivo.

2.2.5. Piscicultura

La piscicultura en el lago Titicaca cumple un doble papel: por un lado, contribuye a la seguridad alimentaria de las poblaciones ribereñas; por otro, representa una fuente importante de contaminación ambiental, especialmente cuando se lleva a cabo sin controles adecuados.

En el sector peruano del Lago Mayor, predomina la crianza intensiva de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en jaulas flotantes. Las áreas habilitadas para esta actividad son definidas por el Ministerio de Producción (PRODUCE) y el IMARPE, de acuerdo con el Reglamento de la Ley General de Acuicultura. Esta normativa exige que las concesiones estén separadas por al menos 100 metros, que la profundidad del agua (batimetría) no sea menor a 15 metros, y que se respeten condiciones adecuadas de tránsito, navegación, corrientes y calidad del agua, con el fin de evitar el deterioro del medio ambiente acuático.

En el Lago Menor, debido a su menor profundidad, la piscicultura en jaulas flotantes se practica a menor escala. En 2020, en la zona de Tiquina, se identificaron 543 jaulas flotantes en esta zona, que produjeron unas 1.659 toneladas anuales de trucha, utilizando aproximadamente 1.991 toneladas de alimento balanceado. Esta actividad generó alrededor de 159 toneladas de alimento no consumido, además de excretas con altas concentraciones de nutrientes y materia orgánica, que terminan en la columna de agua y en los sedimentos del fondo lacustre.

6 A lo largo de 31 años se elaboraron cuatro diagnósticos sobre la pesca en el sistema TDPS. El primero fue el Diagnóstico Pesquero del Área Circunlacustre del Lago Titicaca (sector peruano) elaborado por el Proyecto Especial Lago Titicaca (PELT) en 1993. Su información sirvió de base para el Diagnóstico y Estudios de Desarrollo Pesquero del Plan Director Global Binacional de la ALT. El tercer diagnóstico fue elaborado en 2008 para PROPESCA, y se basó en los resultados del Diagnóstico de la Pesca Artesanal en la cuenca del Titicaca, realizado por la DIREPRO el 2007. El cuarto es el Diagnóstico Binacional Pesquero y Acuícola en el Ámbito del Sistema Hídrico del TDPS (Ocola y otros, 2021a,b).

Esto contribuye significativamente a la eutrofización y altera las condiciones fisicoquímicas del ecosistema afectando a organismos bentónicos y a la vegetación acuática sumergida (Ocola Salazar et al., 2020). Entretanto, estos efectos no son estudiados por las autoridades competentes.

Por otra parte, según una encuesta de 2019 realizada por la Ocola et al. (2021) entre productores del sector peruano del Lago Mayor, solo un tercio de ellos lleva a cabo prácticas adecuadas para la gestión de residuos sólidos (como la quema, entierro o disposición en vertederos municipales) para las vísceras. Se observa un aumento en la mortalidad de los peces debido a factores poco conocidos, lo que sugiere un deterioro en el ambiente acuático, así como problemas sanitarios y de manejo.

Para garantizar una buena oxigenación de la columna de agua, aproximadamente un tercio de las jaulas y mallas de cultivo se limpian mediante diversos métodos, como golpear los paños con palos, colgar las mallas dentro del lago o utilizar lavado a presión. Sin embargo, la mayoría no cumple con la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) debido a la falta de conocimientos técnicos. El mantenimiento adecuado de las jaulas requiere una limpieza periódica para asegurar la oxigenación del agua, pero estos procesos suelen realizarse de manera informal.

Además, algunos productores emplean sal o antibióticos de manera empírica para tratar enfermedades, añadiéndolos al alimento balanceado. Parte de estas sustancias termina en el agua, aunque no existen estudios sobre su impacto ambiental en el sector boliviano del lago.

La piscicultura en jaulas flotantes comenzó en el Lago Menor con la creación del centro piscícola de Tiquina en 1988, con apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) al Centro de Investigación y Desarrollo Acuícola Boliviano (CIDAB). Desde entonces, la actividad se ha expandido a otras zonas, impulsada actualmente por la Institución Pública Desconcentrada de Pesca y Acuicultura (IPD PACU), dependiente del Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras.

2.2.6. Navegación de botes motorizados

La mayoría de las embarcaciones que circulan en el lago Titicaca son botes motorizados que utilizan combustibles fósiles. Los veleros han quedado reducidos a casos esporádicos. Aunque los motores fuera de borda generan un impacto directo menor, los envases de aceite y gasolina son frecuentemente abandonados en las orillas, lo que constituye una fuente significativa de contaminación.

Las embarcaciones de mayor tamaño –como las utilizadas para el turismo, por la Armada o en investigaciones científicas– emplean motores intraborda, que presentan un mayor riesgo de derrames de combustibles y aceites, además de emitir gases tóxicos. En las zonas costeras más frecuentadas, el fondeo aleatorio (anclaje sin regulación) sobre praderas de charas (plantas acuáticas) provoca la remoción de vegetación del fondo del lago debido al arrastre de las anclas. Para una navegación responsable, se recomienda utilizar boyas de fondeo fijas, que eviten la destrucción del lecho lacustre.

2.2.7. Desarrollo artificial del litoral

La artificialización del litoral –mediante el relleno de terrenos y la construcción de muros de contención– tiene un impacto directo en la destrucción del cordón litoral de macrófitas acuáticas, en particular los totorales. Esto genera efectos indirectos significativos, como la pérdida de zonas de cría y refugio para peces, la desaparición de sitios de nidificación de aves acuáticas y la disminución de la capacidad natural de la vegetación para filtrar contaminantes.

Este fenómeno es especialmente notorio en las zonas más urbanizadas. En Huatajata, por ejemplo, se intensificó tras la construcción de la doble vía entre El Alto y Tiquina, cuando la tierra excedente del terraplén fue utilizada por los pobladores para rellenar y nivelar áreas entre la carretera y la ribera del lago. De manera similar, varios hoteles y restaurantes han alterado sus litorales mediante la instalación de muros, pasarelas o embarcaderos de piedra para facilitar el atraque de embarcaciones.

Muchas de estas construcciones no cuentan con sistemas propios de tratamiento de aguas residuales, y en numerosos casos tampoco están conectadas a redes de alcantarillado –cuando existen–, lo que agrava aún más la contaminación.

¿Qué hay que recordar?

CONTAMINACIÓN ANTRÓPICA Y EUTROFIZACIÓN

Es fundamental destacar que la mejora de la calidad del agua en el Lago Menor –hacia un funcionamiento ecológico adecuado o un buen estado de salud– aún es posible, pero solo si se actúa con urgencia. Es necesario combinar la conciencia individual de cada ciudadana y ciudadano, cultivada desde el hogar y a través de la educación formal, con una voluntad política firme y una estrategia sostenible de financiamiento a largo plazo.

Para lograr este objetivo, no basta con fomentar la curiosidad por las innovaciones tecnológicas y medioambientales. Es imprescindible promover la sensibilización y el respeto por el medioambiente desde una edad temprana, lo que implica un cambio de paradigma profundo.

Hasta donde se tiene conocimiento, aún no se ha emprendido un diagnóstico ambiental de esta magnitud, acompañado de un conjunto amplio y articulado de propuestas para la recuperación del ecosistema.

3. Cambio Climático

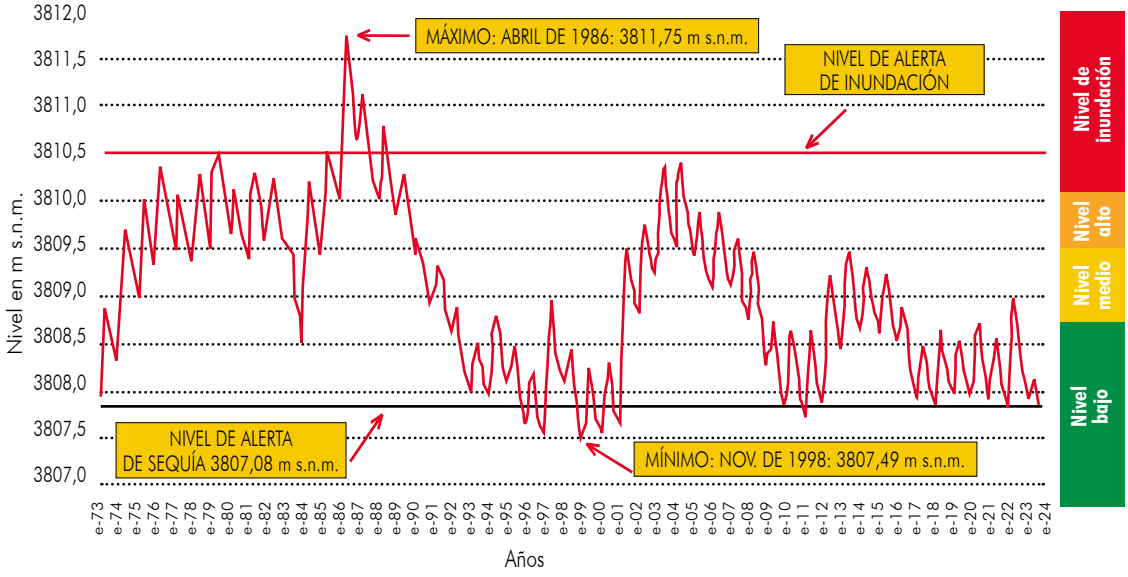
3.1. Impactos del calentamiento global

Los Grandes Lagos, como el Titicaca, son considerados indicadores del cambio climático al cual responden rápidamente y reflejan estos cambios en toda su cuenca (Adrian, O'Reilly, Zagarese, Baines, & otros, 2009). Estos ecosistemas están especialmente expuestos a factores de estrés climático y antropogénico, se degradan en pocas décadas, y requieren de grandes esfuerzos de restauración y gestión, con altos costos ecológicos y económicos para sostener aguas de buena/alta calidad.

En el Lago Titicaca y su cuenca hídrica, los efectos del cambio climático se manifiestan a través de distintos fenómenos. Entre ellos destacan las condiciones atmosféricas inestables, las variaciones extremas de temperatura fuera de época –incluso dentro del mismo día–, la pérdida de estacionalidad (particularmente del periodo lluvioso), el aumento de la variabilidad interanual, y la mayor imprevisibilidad y frecuencia de eventos extremos como inundaciones y sequías. Estos efectos, aunque comunes en otras regiones, se ven amplificados en el Titicaca por su altitud, su ubicación tropical y el proceso de eutrofización que atraviesa.

Una de las expresiones más claras de esta variabilidad es la notable fluctuación en el nivel del lago. En un periodo de apenas cuatro décadas, se registró una variación de 5,35 metros, desde el mínimo histórico de 3.806,40 m s.n.m. en 1943 hasta el máximo histórico de 3.811,75 m s.n.m. en 1986 (Ronchail et al., 2014). Posteriormente, entre 1986 y 1998, el nivel descendió 4,26 metros, llegando a 3.807,49 m s.n.m., según registros del Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN) de Bolivia. La Figura 3 ilustra esta evolución entre 1973 y 2023.

Figura 3. Limnigrama histórico del Lago Titicaca (estación de Guaquí) de los niveles medios diarios entre 1973 y 2023

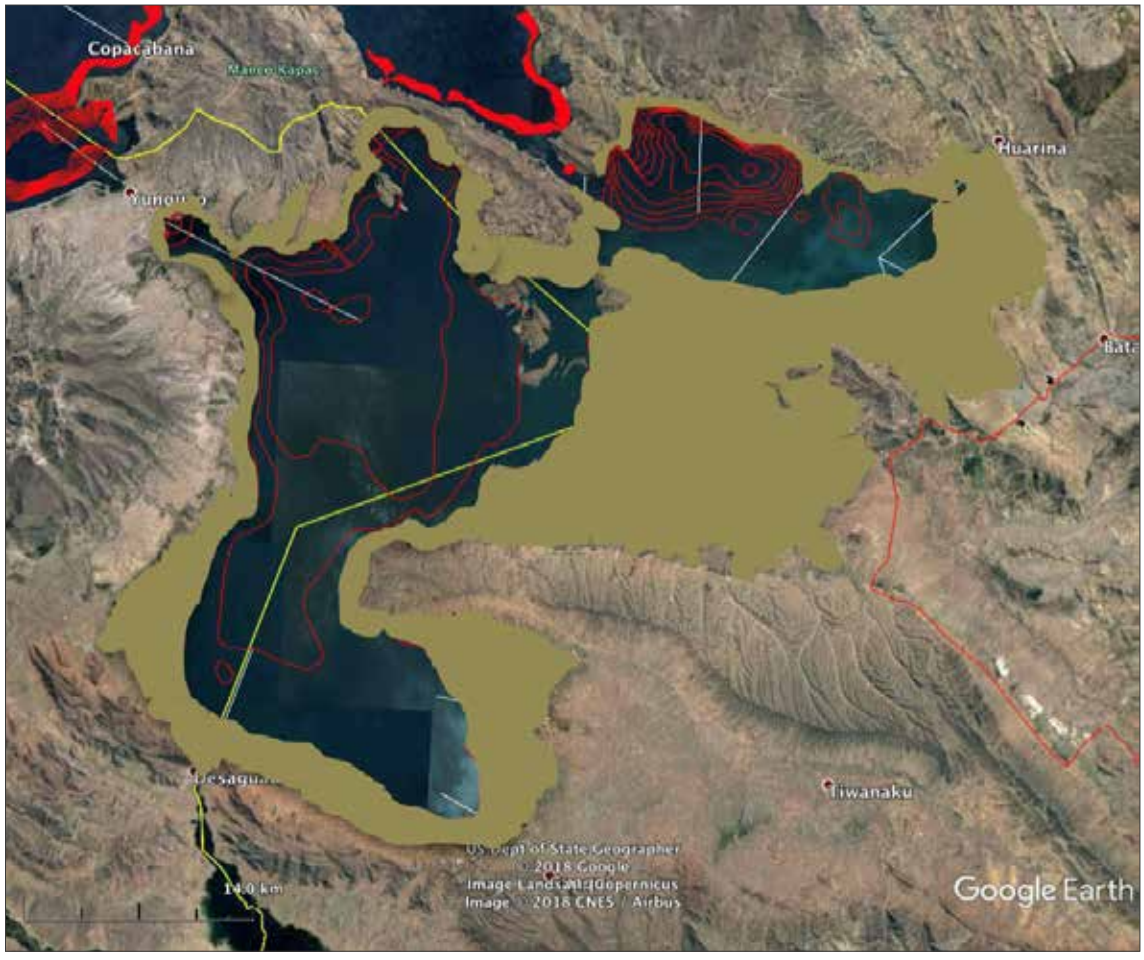


Fuente: Servicio Nacional de Hidrografía Naval (SNHN) de Bolivia, 24/07/2023.

Nota: El nivel medio se determina a 3.810 m s.n.m.

La escasa profundidad del Lago Menor en el sector boliviano lo hace especialmente vulnerable a las fluctuaciones del régimen de precipitaciones. Para visualizar esta fragilidad, puede considerarse un escenario hipotético –aunque poco probable en el corto plazo– en el que el nivel del lago descienda apenas 4 metros, lo cual bastaría para separar físicamente las regiones norte y central, dejando solo las islas como puntos de conexión (ver Fig. 4). Si bien este escenario es extremo, entre 1984 y 2024 ya se ha registrado una disminución real de aproximadamente 3 metros en el nivel del agua, lo que ha reducido significativamente la superficie lacustre y los totorales al sur de la Bahía de Cohana, además de haber conectado la isla de Quehuaya con el continente (ver Fig. 5). Cabe señalar que el nivel medio del Lago Titicaca se ha establecido oficialmente en 3.810 metros sobre el nivel del mar, según la cota peruana.

Figura 4. Consecuencias de un descenso en el nivel del Lago Menor de 4 m.



Fuente: Elaboración propia de X. Lazzaro en Google Earth ©.

Nota: En base a la digitalización de las isolíneas del mapa batimétrico al 100.000 de 1978 por los Servicios Hidrográficos Nacionales del Perú y de Bolivia. Cuidado: ¡No hay previsión para tal descenso! El objetivo de este mapa es únicamente ilustrar la poca profundidad del sector boliviano del Lago Menor y que con una reducción de 4 m de la profundidad, al nivel de las islas la región norte se separaría de la región central.

Figure 5. WWComparación del nivel del de agua del Lago Menor y de la extensión del totoral de la Bahía de Cohana

Diciembre 1984 (67,00 Km^2, 3.810,5 m)

Mayo 2024 (59,30 Km^2, 3.807,5 m)

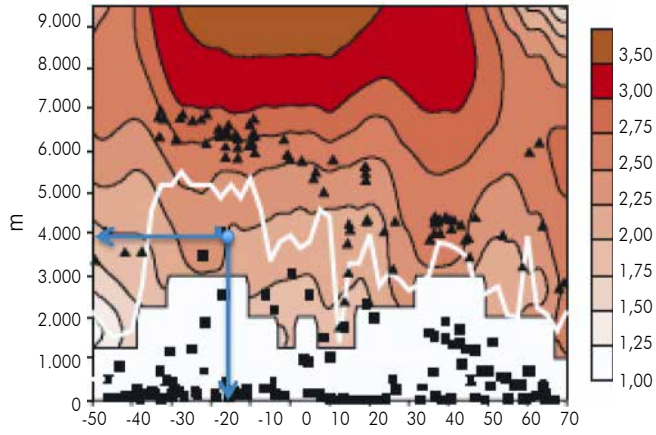
Fuente: proyección 3D de Google Earth ©.

3.2. Modelos que anticipan el futuro aumento de la temperatura

Según las proyecciones de los modelos de circulación general atmósfera-océano, los aumentos de temperatura previstos se acentúan con la altitud. En el hemisferio sur, hacia el año 2080 y en comparación con la época preindustrial, se estiman aumentos de más de 2,5 °C en la región montañosa comprendida entre los 10° S (Perú), pasando por Bolivia, hasta los 40° S (Chile/Argentina). Para el caso más pesimista (escenario RCP8.5),[7] se prevén aumentos de entre +2 °C y +4 °C en el Altiplano hacia el año 2050. Este incremento resulta preocupante, considerando el aumento acumulado en los últimos 60 a 70 años.

Aplicando un escenario donde se duplica el nivel actual de dióxido de carbono atmosférico en siete modelos de circulación general, Bradley *et al.* (2004) mostraron que, para un incremento promedio de temperatura global de +1,0 °C entre 2061 y 2080 (al nivel del mar), el Lago Titicaca (ubicado a 3.809 m s.n.m. y 16°S) y el Altiplano experimentarían un calentamiento de aproximadamente +2,25 °C en comparación con la época preindustrial (ver Fig. 6). Entretanto, la estimación más reciente del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) proyecta un incremento promedio global de +1,31 °C, lo que –aplicando el mismo factor de amplificación altiplánico– equivaldría a un aumento de +2,95 °C para el año 2080. Este nivel de calentamiento sería potencialmente letal para muchas especies animales y vegetales que ya habitan al límite de sus rangos fisiológicos óptimos, muchas de las cuales se encuentran en estado vulnerable, en peligro o en peligro crítico de extinción.

Figura 6. Cambio medio anual de la temperatura del aire libre

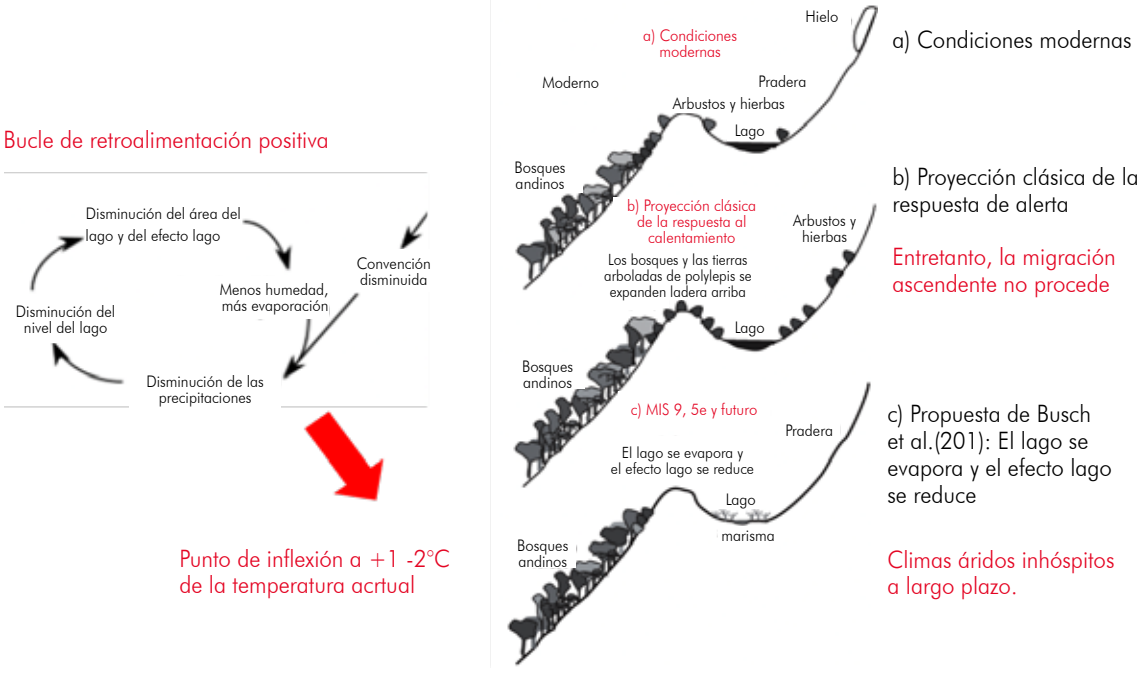


Fuente: Adaptado de Bradley et al. (2004).

7 El RCP8.5 (Representative Concentration Pathway 8.5) es un escenario climático desarrollado por el IPCC que proyecta una trayectoria de altas emisiones de gases de efecto invernadero, con fuerte dependencia de combustibles fósiles y sin políticas climáticas significativas. Bajo este escenario, se espera un aumento de la temperatura global de entre 4,3 y 5,4 °C hacia el año 2100 en comparación con niveles preindustriales, así como impactos severos sobre la biodiversidad, la seguridad alimentaria, la salud humana y los recursos hídricos. Aunque actualmente se considera un escenario menos probable bajo ciertas condiciones socioeconómicas, sigue siendo una referencia útil para evaluar los riesgos asociados a la inacción climática.

Nota: Cambio medio anual de la temperatura del aire libre, equivalente a la temperatura de superficie, generado por 2 x niveles de CO 2 en los 7 modelos GCM ('General Circulation Models'). La línea blanca continua conecta las elevaciones de las regiones más altas de cada cuadrícula. Los triángulos negros muestran algunos de los picos más altos de cada país a lo largo de las Cordilleras de América del Norte a América del Sur. Los pequeños triángulos negros representan las montañas de mayor altitud en los países a lo largo del transecto. El punto celeste indica la ubicación del Lago Titicaca (-16°S y 3.809 m s.n.m.), justo en la isolínea de +2,25 °C.

Figura 7. Mecanismo de retroalimentación y comparación de las previsiones de dos modelos generales



Fuente: Bush *et al.* (2010).

Nota: Izquierda: El mecanismo de retroalimentación positiva que se podría aplicar particularmente al Lago Menor poco profundo. Derecha: Comparación de las previsiones de dos modelos generales climáticos (GCM) aplicados a un corte transversal atravesando el pie de monte, el Altiplano y la Cordillera: (a) la situación actual, (b) el modelo clásico de migración ascendente, y (c) el modelo de retroalimentación positiva propuesto.

Bush *et al.* (2010) plantean un escenario aún más preocupante a partir del análisis de un registro paleo-ecológico de 370 mil años obtenido mediante un testigo de sedimento del fondo del Lago Titicaca. A diferencia de la noción común de que las especies vegetales migrarán gradualmente hacia mayores altitudes en respuesta al calentamiento global, los autores proponen que este modelo no es aplicable al Altiplano. Utilizando un modelo conceptual basado en mecanismos de retroalimentación positiva, sugieren que el incremento de temperatura podría desencadenar un proceso de desecación progresiva del lago, reduciendo gran parte de su cuenca a pantanos (ver Fig. 7). Según sus estimaciones, existiría un punto de inflexión crítico entre +1 y +2 °C por encima de las temperaturas actuales, a partir del cual las condiciones agrícolas relativamente favorables del norte del Altiplano serían reemplazadas por un clima árido e inhóspito.

Este colapso ecológico se explicaría por una cadena de retroalimentación: el aumento de la temperatura reduciría las precipitaciones, lo que bajaría el nivel del lago, disminuyendo su superficie y por tanto la humedad disponible; esto, a su vez, aumentaría la evaporación, acelerando aún más la pérdida de agua y profundizando el proceso de desecación (ver Fig. 7).

3.3. El calentamiento global y la contaminación magnifican la eutrofización

Los lagos poco profundos, así como las zonas litorales y áreas con menos de cinco metros de profundidad en lagos mayores, son especialmente vulnerables tanto al calentamiento como a la eutrofización. Esta susceptibilidad se debe a que reciben altos aportes de nutrientes, materia orgánica y contaminantes, se calientan más rápidamente por su escasa profundidad presentan mayor exposición a la radiación solar (lo que favorece el crecimiento de cianobacterias resistentes a la luz ultravioleta); y son fácilmente mezclados por el viento, lo que re-suspende nutrientes y microalgas en la zona eufótica, donde se produce la fotosíntesis. Por estas razones, estas zonas representan focos críticos para la eutrofización.

Diversos estudios han demostrado que el cambio climático agrava los síntomas de la eutrofización en cuerpos de agua, especialmente en los lagos poco profundos (Jeppesen et al. 2010; Moss *et al.* 2011) (Fig. 8). El calentamiento global provoca un incremento en los procesos fisiológicos de los organismos, como la reproducción de los peces forrajeros[8] (por ejemplo, *Orestias spp.* en el lago Titicaca), lo cual reduce el impacto de los peces piscívoros,[9] como la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y el pejerrey (*Odontesthes bonariensis*), especies exóticas introducidas cuyas poblaciones silvestres son escasas en el lago.

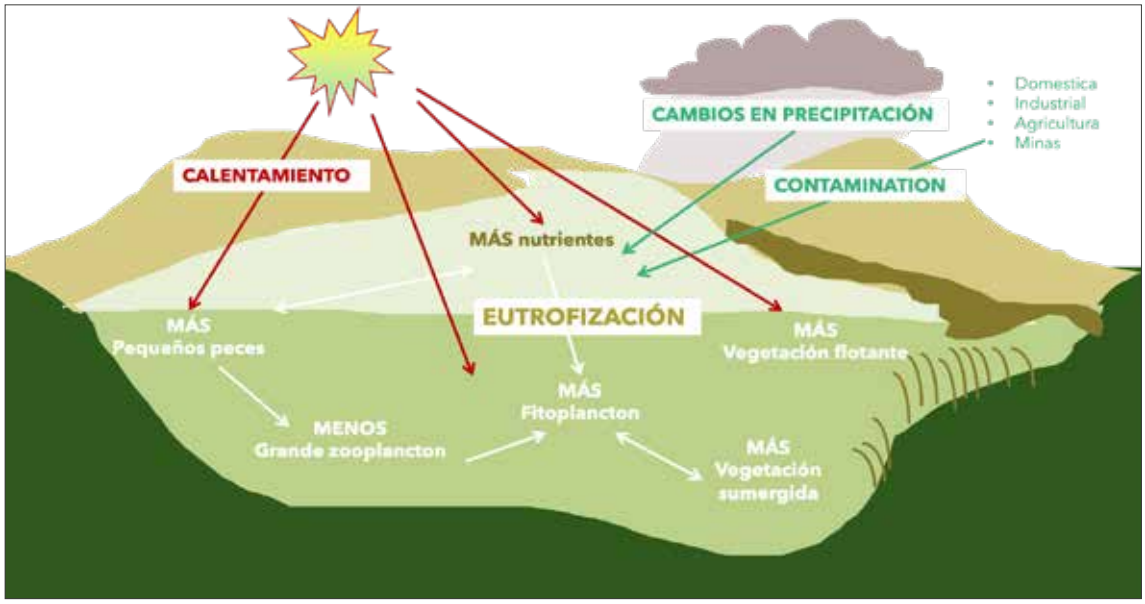
Además, las cianobacterias obtienen una ventaja competitiva frente a otras microalgas al tener un crecimiento óptimo a temperaturas más altas, incluso en condiciones de escasez de nutrientes, especialmente de nitrógeno. Al mismo tiempo, se incrementa la tasa de mineralización de la materia orgánica, lo que aumenta la disponibilidad de nutrientes. Los cambios en los patrones de precipitación también elevan el aporte de nutrientes a los cuerpos de agua.

Estas condiciones propician un mayor crecimiento y supervivencia de las macrófitas acuáticas, en especial las especies flotantes. Según Moss *et al.* (2011), como consecuencia de todos estos factores, se genera una mayor biomasa de microalgas dominada por cianobacterias. Esta proliferación se ve favorecida por la reducción del pastoreo del zooplancton herbívoro, debido al aumento en la depredación por parte de los peces forrajeros. Además, la competencia por nutrientes y luz entre cianobacterias y microalgas reduce la presencia de macrófitas sumergidas (como *Chara* sp. y *Potamogeton* sp. en el Lago Titicaca), en favor de las especies flotantes como *Lemna* y *Azolla* spp.

8 Los peces forrajeros son peces pequeños que se alimentan en la base de la cadena trófica, de fitoplancton, zooplancton, detritus, materia orgánica, y son consumidos por depredadores grandes que tienen una posición superior en las redes tróficas.

9 Los peces piscívoros son aquellos que se alimentan principalmente de peces, aunque comúnmente suelen consumir también otros tipos de alimentos.

Figura 8. Algunas relaciones ya establecidas que vinculan el cambio climático y los síntomas de eutrofización



Fuente: Moss *et al.* (2011).

¿Qué hay que recordar?

CAMBIO CLIMÁTICO

El Lago Titicaca, por su altitud y ubicación, vive condiciones climáticas muy intensas. Comparado con el nivel del mar, tiene un 30 % menos de presión atmosférica y oxígeno disuelto en el agua, y un 30 % más de radiación solar visible y ultravioleta. Además, la temperatura del aire puede variar hasta 20 °C entre el día y la noche. A esto se suma un calentamiento global acelerado: se estima que la temperatura del aire en la región está subiendo el doble que el promedio mundial, unos +0,7 °C por década. Si sigue este ritmo, hacia 2100 podría aumentar en casi 5 °C. También se prevé una mayor frecuencia de eventos extremos. Por todo esto, el Titicaca es considerado un "centinela" del cambio climático.

En los últimos seis años, el lago ha vivido una etapa de sequía, registrada por la Boya HydroMet de Bolivia (proyecto piloto OLT, PNUD/GEF, IRD-UMSA-ALT). Esta baja en el nivel del agua no parece estar relacionada directamente con fenómenos como El Niño o La Niña, y ya se acerca al mínimo histórico de 1998 (3.807,49 m s.n.m.). Esto ha dejado al descubierto grandes franjas del borde costero, especialmente en la Bahía de Cohana y la península de Quehuaya. Las consecuencias son graves: afectan la ganadería, la agricultura y la pesca, y empeoran las condiciones sociales, ecológicas y de salud de las comunidades rurales. Además, estas poblaciones enfrentan una presión adicional, ya que muchas de sus fuentes de agua (como pozos o embalses) están siendo redirigidas por EPSAS para abastecer a las ciudades.

PROPUESTAS

4. Propuestas de soluciones estructurales para controlar la contaminación y la eutrofización

Para maximizar las probabilidades de éxito en la restauración de los ecosistemas acuáticos deteriorados, se requiere la implementación de un programa integral que contemple una serie de acciones clave, las cuales deberán adaptarse a las condiciones locales y los objetivos específicos de restauración. A continuación, se presenta una lista de acciones recomendadas, que no pretende ser exhaustiva, pero que cubre aspectos fundamentales para la restauración efectiva:

4.1. Soluciones de ingeniería sanitaria (ingeniería ambiental)

¿Qué tecnología se utiliza actualmente para tratar las aguas residuales en El Alto?

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Puchukollo es, hasta ahora, la única planta en funcionamiento en la ciudad de El Alto (ver Fig. 9). Entró en operación en 1998 y descarga sus aguas tratadas en el río Seco. Se ubica en un terreno de aproximadamente 1,5 km² (1,7 km por 0,9 km).

Desde su diseño, la planta presentó deficiencias. Fue proyectada para una población de 400.000 habitantes, según datos del Censo de 1992, aunque para 1998 –año en que se puso en marcha– la ciudad ya superaba los 540.000 habitantes. Es decir, la planta nació con capacidad insuficiente. Además, su instalación generó conflictos sociales con las comunidades vecinas.

La planificación de una infraestructura sanitaria debe prever un horizonte poblacional de al menos 20 a 30 años. En este caso, la planta debió diseñarse para cerca de un millón de habitantes pero no se anticipó el ritmo acelerado de crecimiento urbano. Entre 2001 y 2012, El Alto pasó de 649.958 a 848.452 habitantes (+31 %), mientras que Viacha creció aún más: de 46.596 a 80.724 personas (+73 %). Estas cifras no reflejan completamente la realidad, ya que algunos residentes fueron censados en municipios rurales para maximizar la coparticipación tributaria.

Este crecimiento provocó un aumento proporcional en la generación de aguas residuales, sin que se acompañara de inversiones suficientes en agua y saneamiento.

Figura 9. Vista general de la PTAR de Puchuckollo desde el Noroeste hacia el Sureste

Fuente: Fotografía de X. Lazzaro.

Ineficiencias y problemas de calidad

Al comparar los niveles de pH y las concentraciones de metales antes y después del tratamiento, se observa que la PTAR no altera significativamente estos parámetros. Se detectaron concentraciones excesivas de metales como arsénico (asociado al dragado del río), zinc (presente en baterías y pinturas), manganeso (lubricantes, pinturas) y hierro (actividades mineras y arcillas), que superan los límites permitidos. Esto, junto con los malos olores, evidencia un grave problema de contaminación desde los inicios de operación.

Hasta enero de 2007, Aguas del Illimani S.A. (AISA) administraba el sistema de agua y alcantarillado en La Paz y El Alto. Desde entonces, la gestión pasó a la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento (EPSAS S.A.), una empresa pública bajo derecho privado, con el Estado boliviano como único propietario.

En 2010, la Etapa 1 de la PTAR fue ampliada con una inversión de 6 millones de dólares. Se construyeron tres filtros percoladores (que no funcionaron hasta 2014), estaciones de bombeo y una subestación eléctrica. Sin embargo, AISA no cumplió con la remoción de nutrientes como fósforo, nitrógeno y amoníaco, lo que demuestra la baja eficiencia del tratamiento. La planta solo trata aguas residuales provenientes de seis de los nueve distritos urbanos. El resto de las aguas se vierten directamente o de manera clandestina a los ríos y terminan contaminando la Bahía de Cohana, en el Lago Menor. Además, la planta no trata residuos industriales y sus descargas no cumplen con la normativa ambiental vigente ((Revilla 2021) (Figs. 10-11).

Figura 10. Vista área de la unión del canal del efluente con los dos canales perimetrales de la PTAR de Puchuckollo, y su descarga en el río Seco

Fuente: Fotografía de X. Lazzaro.

Figura 11. Vista satelital de la zona de descarga de la PTAR de Puchuckollo

Fuente: Google Earth ©.

Durante la temporada de lluvias, el sistema colapsa y el exceso de aguas residuales es evacuado sin tratamiento por canales perimetrales, deteriorando aún más la calidad del agua del río Seco.

Capacidad actual y expansión

Actualmente, la PTAR solo trata el 45 % del caudal de aguas servidas que recibe (ver Fig. 12). Utiliza un sistema de tratamiento con 12 lagunas (anaerobias, facultativas, de maduración y pulimento) distribuidas en 44 hectáreas. Su tratamiento es primario (sedimentación) y secundario (lodos activados). El caudal promedio tratado aumentó de 263–272 L/s en 2008 a 359–388 L/s en 2013.

Figura 12. Evolución de las infraestructuras de la PTAR de Puchuckollo entre 2009 y 2024

Fuente: Imágenes Google Earth ©.

La ampliación busca incorporar las aguas del Distrito 8, sumando un total de 8 distritos beneficiados (1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 y 14). Para la Etapa 1-A se optó por lagunas de oxidación con filtros percoladores, y se centralizó la recolección de aguas residuales del centro de la ciudad y del Distrito 8, con un horizonte hasta 2035.

El proyecto de ampliación se dividió en cuatro etapas:

Etapa 1 (2009–2013): para 714.904 habitantes. Incluyó tres filtros percoladores, estaciones de bombeo, tuberías e interconexiones.

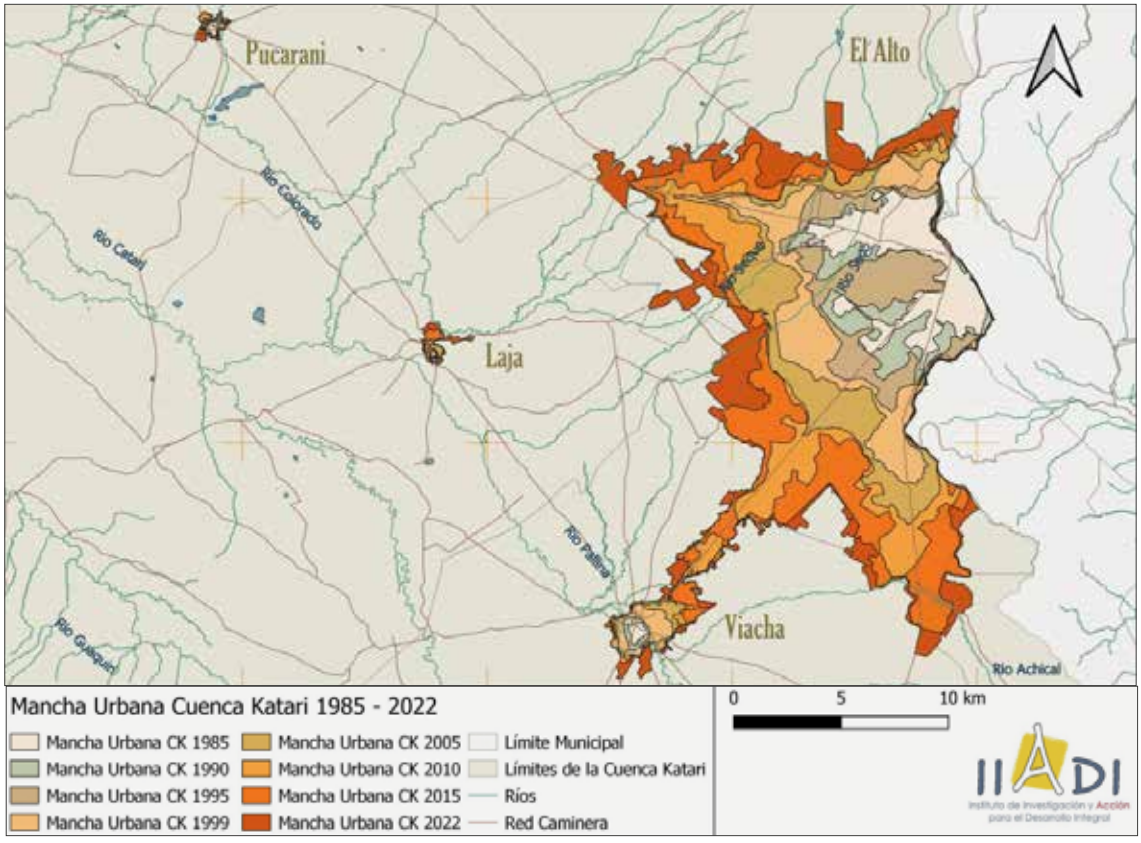
Etapa 2 (2013–2017): para 973.423 habitantes. Se añadieron dos filtros más, una laguna anaeróbica, rejillas autolimpiables, canales de entrada, medidores Parshall y desinfección.

Etapa 3 (2017–2027): para 1.307.874 habitantes. Se planificaron dos filtros adicionales, bombas, rejillas, colector de salida y más lagunas.

Etapa 4 (2027–2035): para 1.896.996 habitantes. Incluye cuatro filtros percoladores, más bombas, lagunas y canales.

La inversión total estimada entre junio de 2020 y julio de 2024 fue de 36 millones de dólares.

Figura 13. Expansión de la mancha urbana de El Alto entre 1985 y 2022



Fuente: IIADI (2023).

Nota: Se observan los tres ejes principales: Pucarani, Laja y Viacha.

Un problema nacional: falta de monitoreo y control

Esta situación no es única. En Bolivia, la mayoría de las PTAR presentan bajos niveles de eficiencia. Además, pocas Entidades Prestadoras de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (EPSA) monitorean adecuadamente sus efluentes, que muchas veces superan los límites legales. Para abordar esta deficiencia, la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (AAPS) publicó en 2019 una guía técnica para evaluar el funcionamiento y operación de las plantas de tratamiento.

Auditoría de la Contraloría General del Estado

El 12 de diciembre de 2014, la Contraloría General del Estado presentó el informe de auditoría ambiental K2/AP05/J13, evaluando el tratamiento de aguas residuales en la cuenca del río Katari y la Bahía de Cohana. El informe evidenció graves deficiencias en las acciones de mitigación de impactos ambientales por parte de las instituciones competentes, lo que ha tenido consecuencias reales sobre el medio ambiente y ha generado riesgos potenciales para la salud pública y los ecosistemas.

Principales hallazgos: fuentes de contaminación

La auditoría identificó como principal causa de la contaminación el vertido de aguas residuales –tanto domésticas como industriales– y residuos sólidos, mineros y ganaderos, a lo largo de toda la cuenca, especialmente en las zonas más pobladas, en las nacientes de los ríos y en las cercanías del lago, debido a la actividad ganadera.

Las aguas residuales incluyen:

- Domésticas o "negras": heces, orina, aguas de aseo personal, cocina y limpieza, cargadas de materia orgánica, microorganismos, grasas, detergentes y jabones.
- Aguas "blancas": originadas por lluvias, nieve, riego o limpieza de calles.
- Industriales: con presencia de aceites, detergentes, antibióticos, ácidos, grasas y otras sustancias químicas de origen mineral, vegetal o animal.

Los residuos sólidos comprenden:

- Contaminantes físicos (sedimentos, sólidos suspendidos).
- Contaminantes químicos inorgánicos (ácidos, sales, metales pesados).
- Compuestos orgánicos (plásticos, detergentes, disolventes, plaguicidas).
- Contaminantes biológicos (bacterias, virus, protozoos, agentes transmisores de cólera, hepatitis, tifus, gastroenteritis).
- Desechos orgánicos derivados de actividades humanas.
- Lixiviados, es decir, líquidos resultantes de la descomposición de residuos sólidos.

A esto se suman los residuos mineros, como desmontes y colas, que son pasivos ambientales generadores de drenaje ácido de mina (DAM), y los residuos ganaderos, constituidos principalmente por estiércol y restos de alimentos, fitosanitarios y antibióticos. En este contexto, el estiércol bovino es el desecho dominante en los agroecosistemas.

Evaluación del accionar institucional (2008–2013)

La Contraloría identificó las siguientes omisiones y fallas institucionales:

1. Falta de gestión ambiental sobre pasivos mineros: ni el MMAyA, ni el Ministerio de Minería y Metalurgia, ni el GADLP realizaron acciones para restaurar el medio ambiente afectado por los pasivos de Milluni. Solo el GAMEA desarrolló gestiones limitadas.

2. Débil regulación ambiental industrial: muchas industrias no contaban con licencia ambiental, y ni el GAMEA ni los municipios de El Alto y Viacha fiscalizaron adecuadamente esta situación.
3. Falta de control desde EPSAS: no se encontraron registros de planes u operaciones de EPSAS relacionados con el control de industrias que vierten sus aguas al alcantarillado.
4. Acumulación de residuos sólidos: se estimó que aproximadamente 800 toneladas por año se depositan en cuerpos de agua de la cuenca Katari y son arrastradas hacia la Bahía de Cohana, reflejo de la ineficiencia en la recolección de residuos en El Alto, Viacha y Pucarani.
5. Supervisión ineficaz de EMALT: la Empresa Municipal de Aseo de El Alto no logró hacer cumplir los contratos de gestión ni prevenir la contaminación de los cuerpos de agua.
6. Descoordinación institucional para el manejo de residuos ganaderos: no se destinaron recursos ni se establecieron proyectos para un manejo adecuado, a pesar de la normativa vigente.
7. Tratamiento ineficaz de aguas residuales: los municipios de El Alto, Viacha, Laja y Pucarani no garantizaron el tratamiento adecuado de sus aguas residuales, incumpliendo los estándares ambientales.
8. Gestión ineficiente y atrasada: los impactos ambientales sobre la Bahía de Cohana resultaron de una ejecución tardía y poco efectiva de estudios, planes y proyectos, sin coordinación institucional suficiente.

Asimismo, la Contraloría emitió 75 recomendaciones, pero ninguna fue implementada.

Situación actual (2023–2024): promesas de solución

El 21 de agosto de 2023 la Agencia Boliviana de Información (ABI),[10] publicó una nota sobre un avance físico del 82 % de la Etapa 2 de la PTAR Puchukollo, donde informa que "la obra incluye la ampliación de la actual planta, con el tratamiento preliminar, el tratamiento primario, el tratamiento biológico (secundario) y el tratamiento terciario, según el MMAyA (2017) la obra está proyectada a 30 años para recibir un caudal máximo de hasta 2.000 litros por segundo y beneficiará a 765.497 habitantes de 9 Distritos de El Alto, el Distrito 2 de Laja, los Distritos 8 y 9 de Alto Achocalla y a 3 Distritos de El Alto, dando una solución estructural a esta problemática de saneamiento y contaminación de la cuenca".

Entretanto, en su último comunicado del 27 de febrero de 2024, EPSAS[11] informó que el MMAyA había comunicado un avance físico mayor al 90 % en la ampliación y modernización, logrado mediante un préstamo de 35 millones de dólares del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), se informa que "…

10 https://abi.bo/index.php/sociedad2/40865-ampliacion-de-la-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-puchukollo-tiene-avance-del-82

11 https://www.epsas.com.bo/web/el-alto-estrenara-la-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-mas-moderna-del-pais/

La capacidad de tratamiento será elevada a 1.300 litros por segundo y beneficiará a más de 1 millón de habitantes de El Alto, volviéndose la más moderna del país". En un podcast[12] del 22/02/2024, el GAMEA[13] informó que la obra "… beneficiará a casi 1 M de habitantes". El 01 de marzo de 2024, en una entrevista a El Diario,[14] el Ministro de Medio Ambiente y Agua declaró: "… Este colector va a servir para evacuar todas las aguas residuales que se tienen en El Alto. Van a ir a la planta y allí se van a tratar y emitir aguas con parámetros de estándar y reutilizables; agua apta para riego, para el consumo animal y producción. Así se evitará la contaminación de ríos y del Lago Titicaca".

Dado que su sistema de tratamiento primario está basado en lagunas, la PTAR solo puede remover imperfectamente los nutrientes y la materia orgánica de las aguas residuales, y no los contaminantes emergentes, industriales, ni farmacéuticos. Es el tratamiento secundario el que utiliza bacterias para eliminar los contaminantes, forzando a las aguas residuales, las bacterias y el oxígeno a mezclarse. Sin embargo, en Puchukollo, la PTAR más alta del mundo (3.918 m s.n.m.), la presión atmosférica representa solo 61,49 % de la presión atmosférica al nivel del mar, lo que reduce el oxígeno disuelto en el agua en la misma proporción. Esto perjudica la actividad biológica de las bacterias, y finalmente el rendimiento del tratamiento secundario. Asimismo, solo el tratamiento terciario elimina el fósforo y el nitrógeno disueltos y los contaminantes no biodegradables. Según nuestro conocimiento, esta información no es compartida públicamente. No se conoce la eficiencia de remoción de los patógenos microbiológicos, los farmacéuticos, ni los microplásticos. En caso de que la calidad de agua lo permita (de acuerdo con las normas en vigor), se podría reusar los efluentes para el riego de vegetales de tallo alto y el consumo animal.

En su Informe de Rendición Pública de Cuentas Final 2023,[15] EPSAS menciona un proyecto de mejoramiento y ampliación de la PTAR Puchukollo por un monto de 34 millones de dólares, con puesta en marcha prevista para el 30 de julio de 2024. Esta fue interrumpida en diciembre 2023 debido a problemas con el material grueso y daños a equipos, hasta la incorporación de una unidad denominada 'Pozo de Gruesos'. No se comentó más nada sobre el cumplimiento de las etapas 2 (2013-2017) y 3 (2017-2027) previstas para atender una población de 1.307.874 habitantes en 2027. Tampoco se informó sobre el estado actual de operación de la PTAR de Tacachira, todavía en construcción según la imagen actual de Google Earth.

¿Y después de 10 años?

El 29 de noviembre de 2024 se realizó el "Primer Encuentro Técnico Interinstitucional del Cumplimiento a las Recomendaciones de la Auditoría Ambiental sobre la Contaminación Hídrica de la Cuenca del Río Katari y la Bahía de Cohana", sin que en el comunicado se hiciera mención del informe original de la Contraloría de 2014. Diez años después, no se han observado mejoras sustanciales en la calidad de las aguas de los ríos de la

12 https://www.facebook.com/watch/?v=1555467905297998
13 Gobierno Autónomo Municipal de El Alto.
14 https://www.eldiario.net/portal/2024/03/01/entregan-planta-Puchukollo-para-tratamiento-de-aguas-residuales/
15 https://www.epsas.com.bo/web/wp-content/uploads/2024/02/INFORME-DE-TRANSPARENCIA-RCP.pdf

cuenca ni de la bahía, y los problemas de salud humana y animal se han agravado, con una creciente migración rural hacia El Alto y La Paz.

La próxima auditoría prevista para 2025 genera expectativas moderadas: si no se implementan soluciones estructurales con base en la realidad técnica, institucional y financiera del país, los problemas persistirán. Para la remoción de los contaminantes químicos diversos,[16] una solución posible sería reubicar y agrupar las industrias grandes en parques industriales con PTAR propias, obligar a las pequeñas industrias a instalar miniplantas, y controlar las actividades industriales clandestinas. Sin embargo, dada la complejidad de este escenario, estas medidas son difíciles de implementar incluso a mediano plazo, lo que implica que la contaminación residual probablemente continuará afectando la cuenca.

PTAR de Tacachira

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Tacachira fue adjudicada en 2014 con el objetivo de tratar las aguas del Distrito 7 de El Alto y descargar los efluentes tratados en el río Seke. Sin embargo, en 2015 surgió una fuerte oposición por parte de los vecinos de la zona, quienes temían sufrir efectos similares a los reportados por los habitantes cercanos a la PTAR de Puchukollo, como problemas de salud en personas y animales. Esta resistencia social impidió el funcionamiento adecuado de la planta. Como resultado, la purificación de las aguas residuales nunca se puso en marcha, los malos olores comenzaron a extenderse varios kilómetros a la redonda y, finalmente, la obra quedó inconclusa (ver Figs. 14-15).

16 Por ejemplo, los metales pesados provenientes de pasivos mineros; el alto contenido de materia orgánica, sólidos, sales, grasas y contaminantes específicos tales como el cromo, sulfuro y amoniaco de los efluentes de las curtiembres.

Figura 14. PTAR de Tacachira sobre el río Seke

Fuente: Google Earth ©.

Ubicada a menos de 3 km al noroeste de Puchukollo, al borde del río Seke, ocupa un área aproximada de 0,08 km². El proyecto, con financiamiento e inicio de obras en 2011, fue diseñado para realizar un tratamiento primario mediante tanques Imhoff y tanques ecualizadores, seguido por la implementación de 2 filtros percoladores, 2 decantadores secundarios y una unidad de desinfección para su posterior descarga en el río Seke. Este sistema tenía como finalidad tratar las aguas residuales generadas por el Distrito 7 y parte del Distrito 14 de El Alto. Actualmente, estos distritos vierten sus aguas negras en pozos sépticos y/o directamente en los cuerpos de agua más cercanos, siendo el más afectado el río Seke. Ambos distritos cuentan con una baja cobertura de agua potable, deficiencia que fue parcialmente mejorada mediante los programas MIAGUA II y MIAGUA III. No existe aún un aporte significativo de aguas residuales de estos distritos que afecte a los cuerpos de agua de la zona, particularmente al río Seke.

Figura 15. Ubicaciones respectivas de las PTARs Puchuckollo y Tacachira, en un radio menor a 3 km

Fuente: Google Earth ©.

El 31 de marzo de 2022, el GAMEA comunicó que:

> *"… la PTAR de Tacachira tiene la finalidad de prever que las aguas residuales que se generan en El Alto, contaminadas por los drenajes domiciliarios, por aguas contaminadas por los hospitales, por mataderos, por la industria y por otras actividades productivas que generan contaminación, que van a los ríos y esa agua, si no tienen un tratamiento previo, obviamente, desembocan en la Bahía de Cohana, que es parte del lago Titicaca y la contaminan".*

Esta planta beneficiaría directamente a más de 271 mil habitantes de los Distritos 7, 9, 11 y 14, que vierten sus aguas en todo este sector, es decir, prácticamente todas las viviendas ubicadas a lo largo del río Seke.

Leyes, gastos y objetivos incumplidos

La Constitución Política del Estado (CPE) establece que "todas las personas tienen derecho a un medio ambiente saludable, protegido y equilibrado". Además, la Ley de Derechos de la Madre Tierra establece que "es un principio de obligatorio cumplimiento la garantía de regeneración de la Madre Tierra". Esto quiere decir que "el Estado y la sociedad, en armonía con el interés común, deben garantizar las condiciones necesarias para que los diversos sistemas de vida de la Madre Tierra puedan absorber daños, adaptarse a las perturbaciones y regenerarse sin alterar significativamente sus características de estructura y funcionalidad". Entretanto, reconoce que "los sistemas de vida tienen límites en su capacidad de regenerarse, y que la humanidad tiene límites en su capacidad de revertir sus acciones".

Esto puede parecer una utopía porque, en la práctica, es evidente que nada de eso se cumple. Es por eso que los pobladores del sector de la Bahía de Cohana manifiestan su cansancio y descontento ya que no se observa ninguna reducción en la contaminación de la Cuenca Katari y su desembocadura en la bahía, a pesar de décadas de investigaciones, sucesivos planes de manejo anunciados y dada la magnitud de los gastos.

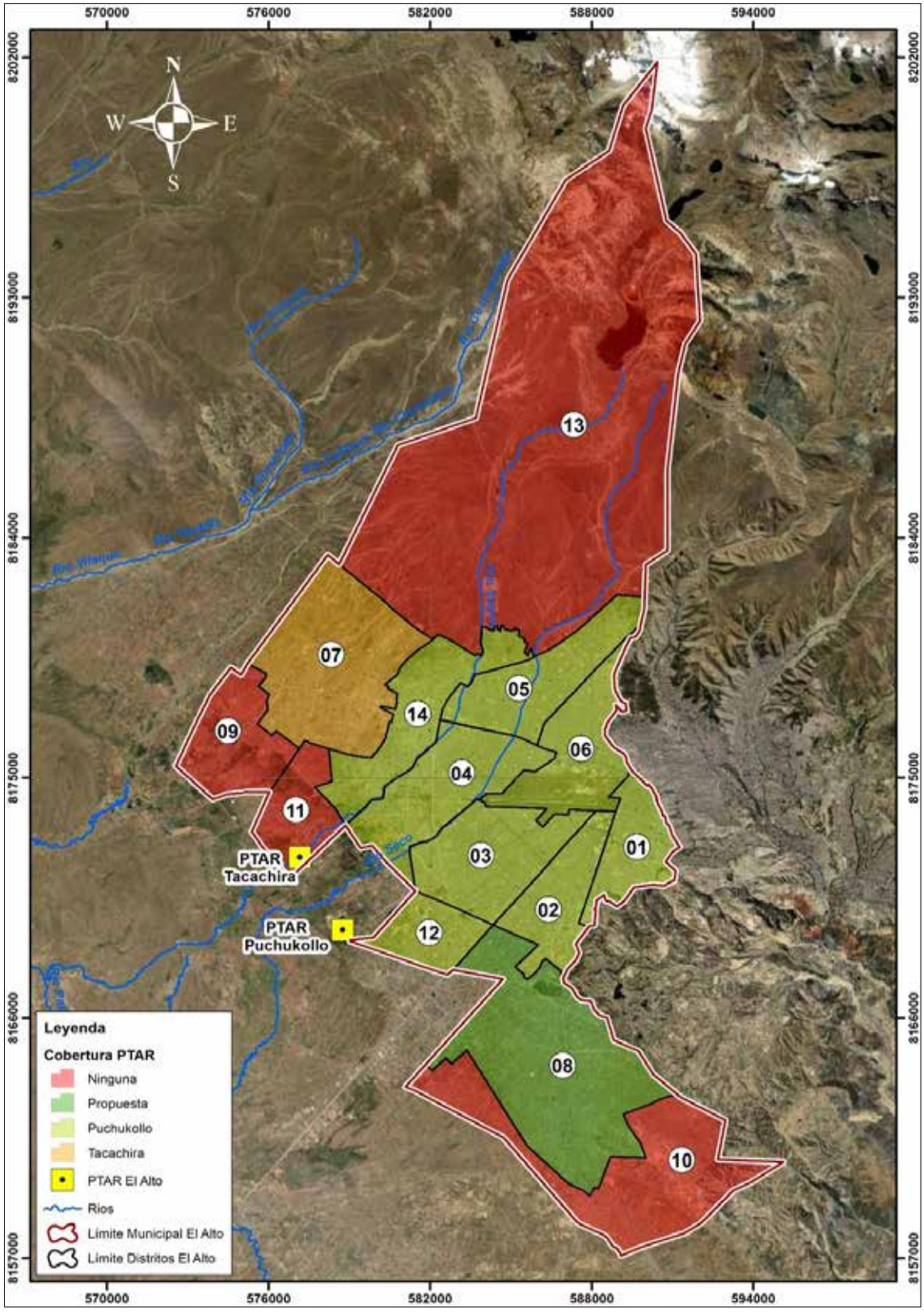
Desde 2017 se gastó más del 90 % de 86 millones de dólares en créditos del BID y la Unión Europea (UE) en ampliar y modernizar la PTAR de Puchukollo, sin cumplir este objetivo. *"No acreditan más en avances y trabajos realizados, ni en una revelación del Gobierno en 2025, mediante el MMAyA, ya que se desconocen los resultados, que los recursos se agotaron y que varios proyectos no se cumplieron"*, afirma Mendoza Reyes (2024).

Para entender mejor el estado actual del tratamiento de aguas residuales en la ciudad de El Alto, nada mejor que mapear los distritos que cuentan –y los que no– con conexiones de alcantarillado a la PTAR de Puchukollo, la única en operación. Como se mencionó, la construcción de la PTAR de Tacachira no está finalizada. En la Fig. 16 se observa que más del 50 % de la superficie de El Alto (los Distritos 7, 8, 9, 10, 11 y 13), aun si tienen alcantarillado sanitario, no cuentan con tratamiento de sus aguas residuales por la PTAR.

A grandes rasgos, si se considera el área total de todos los distritos, se podría estimar que: 1) solo la mitad central (50 % de los Distritos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 y 14) está conectada al alcantarillado, y 2) la PTAR de Puchukollo solo puede tratar en promedio el 45 % de las aguas residuales que recibe mediante su colector. Entonces, en el mejor de los casos, el tratamiento sería de 50 % × 45 % = 22 % de las aguas residuales generadas por El Alto.

Sin embargo, este cálculo es erróneo, ya que: 1) la densidad poblacional varía entre distritos e incluso dentro de cada uno, y 2) posiblemente no todos los hogares de un distrito están conectados. Por ejemplo, gran parte del Distrito 13 no tiene población. Por tanto, esta estimación basada en superficie no es válida; la población efectivamente conectada y tratada sería subestimada.

Figura 16. Mapa de los Distritos de El Alto



Fuentes: Datos geográficos de Espinoza (2011) proyectados en Google Earth ©.

Nota: Mapa de los Distritos de El Alto cuyas aguas residuales son efectivamente tratadas por la PTAR de Puchukollo (en verde claro: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 14); esta propuesto ampliar al Distrito 8 (en verde oscuro). La PTAR de Tacachira todavía está en construcción, por lo que las aguas del Distrito 7 todavía no son tratadas. Se resalta que la gran área (más del 50% de la ciudad de El Alto) de los Distritos 7, 8, 9, 10, 11 y 13 no cuenta con ningún servicio de tratamiento de aguas residuales, mismo si cuentan con el alcantarillado. Resulta que otras PTARs son imprescindibles más allá de Puchukollo y Tacachira.

Surge entonces la pregunta clave: ¿Qué pasa con las aguas residuales de los distritos que no tienen alcantarillado conectado a la PTAR? Parte se evacúa en fosas sépticas y el resto se descarga en los ríos Seco y Seke, directamente o a través de una red de alcantarillado incompleta.

Para una estimación más precisa se debería contar con el número de viviendas o de conexiones existentes, pero esta información no está disponible. Solo se cuenta con El *Atlas de El Alto* publicado en 2011 (Espinoza 2011), que indica el número de habitantes de cada uno de los 13 distritos (en esa época el Distrito 14 no se había separado del Distrito 7). No existe una proyección hasta 2024. Así, la Tabla 1 (datos de Espinoza 2011) muestra que, para 2011, la población de los 7 distritos que cuentan con tratamiento en la PTAR de Puchukollo representaba el 91 % de la población total de El Alto. Por tanto, una nueva estimación sería: 91 % × 45 % = 41 % de las aguas residuales de El Alto serían tratadas. Esta vez, podría estar sobreestimada si no todas las viviendas de estos distritos cuentan con alcantarillado o conexión a la PTAR. Tampoco se dispone de estadísticas de 2024.

Tabla 1. Población por Distrito de El Alto

Distritos	Población	PTAR
1	156.927	Puchukollo
2	113.566	Puchukollo
3	198.110	Puchukollo
4	137.591	Puchukollo
5	134.168	Puchukollo
6	155.460	Puchukollo
7	27.978	No-Tacachira
8	50.829	No-Puchukollo
9	2.260	No
10	2.426	No
11	889	No
12	3.702	Puchukollo
13	5.656	No
14	n/a	Puchukollo
	989.562	Total El Alto
	899.524	Total Puchukollo
	91%	% Puchukollo

Fuente: Espinoza (2011). Los Distritos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 y 14 (en verde claro, también en la Fig. 16) tienen sus aguas residuales efectivamente tratadas por la PTAR de Puchukollo. Corresponde a 899.524 habitantes, de un total de 989.562 habitantes que contaba la ciudad de El Alto en 2011. Pero ¿serán todos los hogares atendidos?

En conclusión, la PTAR de Puchukollo debe representar una fuente importante de contaminación para el río Seco, y el saneamiento básico de toda la ciudad de El Alto dista mucho de estar resuelto, especialmente porque la ciudad continúa creciendo en al menos tres direcciones principales: Pucarani, Laja y Viacha (ver Fig. 13 en la Pág. 43).

Ante esto, se vuelve evidente que urge implementar otras soluciones. Con la experiencia de casi 30 años de operación de la PTAR de Puchukollo –que todavía no ha generado mejorías en la calidad de los ríos de la Cuenca Katari ni del litoral del Lago Menor– pensar en nuevas PTAR del mismo tipo no ofrece garantía.

Queda entonces la opción de combinar infraestructuras descentralizadas como mini-PTARs y PTARs compactas, implementadas por barrios y comunidades rurales, con la ingeniería ecológica basada en la naturaleza (ver abajo). No obstante, estas soluciones estructurales tampoco prosperarán si no se cuenta, además de financiamiento permanente (mediante los usuarios) para su mantenimiento, con un cambio de paradigma en toda la sociedad civil hacia el respeto, la conciencia y la educación ambiental.

Transparencia de información pública

Los comunicados de prensa emitidos hasta ahora se redactan casi exclusivamente en tiempo futuro, presentando previsiones que, en muchos casos, resultan incluso contradictorias entre sí. No se evidencia una mejora concreta en las descargas de la PTAR de Puchukollo. Buscar información precisa en Internet sobre el funcionamiento de esta planta se convierte en una auténtica labor forense: los datos disponibles son escasos, fragmentados y, en muchos casos, desactualizados. Como consecuencia, resulta extremadamente difícil conocer con exactitud la capacidad operativa actual de la PTAR, la regularidad de su funcionamiento o, aún más crítico, la calidad real de su efluente tratado.

¿Qué hay que recordar?

PTARs DE PUCHUKOLLO Y TACACHIRA

En conclusión, entre 2008 y 2013 –y esta situación se mantiene en la actualidad–, no todas las aguas residuales vertidas a los cuerpos de agua son tratadas. Muchas de ellas son procesadas de manera incompleta o con una eficiencia deficiente. Las acciones implementadas por las entidades responsables han resultado ineficaces para asegurar que el tratamiento de aguas residuales de los municipios de El Alto, Viacha, Laja y Pucarani cumpla con los estándares establecidos por la normativa ambiental vigente. A pesar de la construcción de infraestructuras como las plantas de tratamiento de Puchukollo y Tacachira, no se ha registrado una mejora significativa en la calidad del agua de los ríos ni del litoral del Lago Menor. Las disposiciones legales actualmente vigentes –incluidas la Constitución Política del Estado y la Declaratoria de Muerte Técnica de cuerpos de agua– no se cumplen, debido a la ausencia de metas ambientales claras y prioritarias, la falta de voluntad política sostenida a largo plazo y la inexistencia de líneas de financiamiento estables y sostenibles. Frente a este panorama, es fundamental que la sociedad civil esté informada de manera oficial, transparente y comprensible sobre los avances, los retrocesos, y la visión y proyecciones de la política estatal de gestión ambiental y sanitaria en lo relativo al tratamiento de aguas residuales. Para materializar una visión coherente a corto, mediano y largo plazo, se hace urgente fomentar una lluvia de ideas y un debate abierto sobre las opciones viables. Este proceso debe involucrar a miembros informados de la sociedad civil, profesionales con experiencia en áreas clave como antropología, urbanismo, saneamiento, salud pública y ecología, así como a representantes del Estado en todos sus niveles.

4.1.1. Ampliar y mejorar el sistema de alcantarillado para beneficiar a la mayor parte de la población de El Alto

Actualmente, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Puchukollo solo puede tratar, en promedio, el 45 % de las aguas residuales que recibe a través de su emisario. Durante la temporada de lluvias, los caudales excedentes deben ser evacuados sin tratamiento mediante dos canales perimetrales que desembocan en el canal del efluente general de la planta. Estas aguas contaminadas incrementan la polución del efluente tratado que se vierte al río Seco. Ocho de los catorce distritos que conforman la ciudad de El Alto (los distritos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 y 14) están conectados al sistema de alcantarillado vinculado a esta planta, lo que representa aproximadamente el 60 % de la población alteña. Es importante destacar que la PTAR de Puchukollo, con su sistema de lagunas para tratamiento primario y secundario, solo puede remover de forma parcial los nutrientes y la materia orgánica presentes en las aguas residuales, sin capacidad para eliminar contaminantes industriales, agrícolas o farmacéuticos.

Esta situación evidencia la urgencia de lograr la conexión al 100 % de las viviendas mediante las siguientes acciones: a) concluir las etapas 2 (con fecha de vencimiento en 2017, actualmente retrasada) y 3 (con vencimiento en 2027) de ampliación y modernización de la PTAR de Puchukollo; b) finalizar la construcción de la PTAR de Tacachira, ubicada a menos

de 3 km, que tratará las aguas residuales del Distrito 7, las cuales serán descargadas al río Seke; y c) eliminar todas las descargas clandestinas de aguas residuales sin tratar. Estas medidas permitirán avanzar progresivamente en la descontaminación –aunque de forma parcial– de los ríos Seco y Seke, y, finalmente, del litoral del Lago Menor, en la zona de Chojasivi, donde actualmente desemboca el río Katari.

¿Qué hay que recordar?

SISTEMA DE ALCANTARILLADO

Eliminar por completo la contaminación de aguas residuales domésticas y agropecuarias en El Alto no es posible en el corto o mediano plazo, incluso si las plantas de tratamiento de Puchukollo y Tacachira estuvieran modernizadas y funcionando a la perfección. Muchas zonas aún no están conectadas al alcantarillado, y las plantas no tienen la capacidad suficiente para tratar todo el caudal. Además, no existen soluciones efectivas para tratar la contaminación industrial y minera, y los contaminantes acumulados en los sedimentos de ríos y del lago seguirán afectando el ecosistema durante décadas. Por eso, es urgente combinar obras estructurales con otras soluciones complementarias y planificar con visión de futuro, algo que faltó desde el inicio del proyecto de Puchukollo.

4.1.2. Descentralizar el tratamiento con mini-PTARs y PTARs-compactas en áreas urbanas y rurales

Mini-PTARs (m-PTARs)

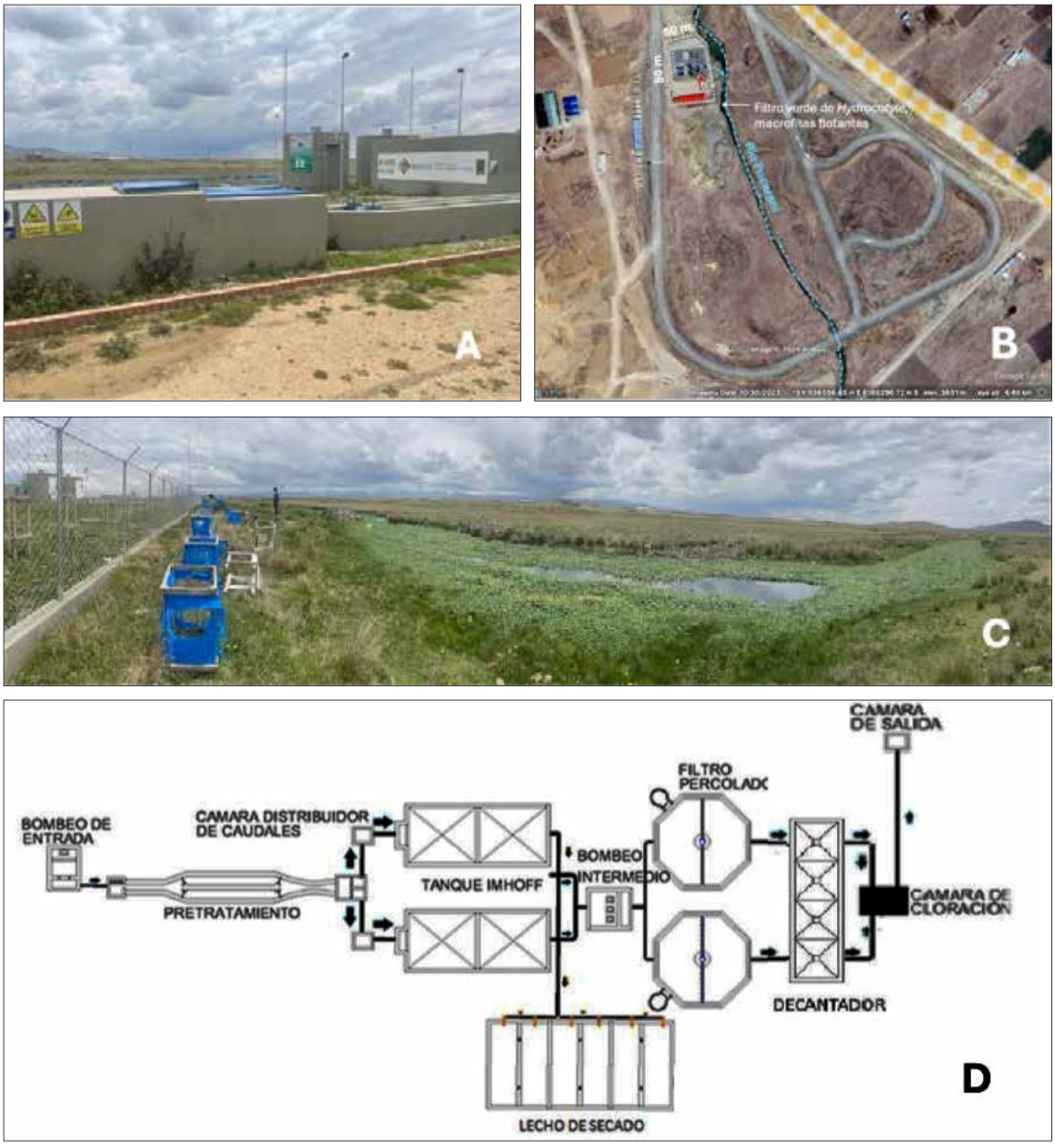
Además de Puchukollo y Tacachira, 14 mini-PTARs planificadas por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) están actualmente en construcción, y unas tres ya se encuentran en funcionamiento, en el entorno del Lago Menor. Siete de ellas están ubicadas en la cuenca Katari: Puerto Pérez, Pucarani, Laja, Batallas, Calamarca, Comanche y Viacha. Las restantes se encuentran en Tito Yupanqui, Tiwanaku, San Pedro de Tiquina, San Pablo de Tiquina, Achacachi, Desaguadero y Achocalla. En la mayoría de los casos, se desconoce el estado de avance de estos proyectos.

Mini-PTAR de Pucarani

Instalada entre las pistas del Autódromo de Pucarani, esta planta ocupa un área compacta de cuatro hectáreas (Fig. 17). Fue implementada en el ámbito de la Unidad Coordinadora del Programa de Agua y Alcantarillado Periurbano (UCP-PAAP), financiada por el MMAyA con un costo total de apenas 942.964 dólares para beneficiar a 2.056 habitantes (o sea 459 dólares por usuario), fue inaugurada en 2023. Esta planta cuenta con los siguientes componentes: en el pretratamiento, una cámara de rejas, desarenador, desengrasador y canal Parshall; en el tratamiento primario, dos tanques Imhoff; en el tratamiento secundario, un filtro percolador y un decantador secundario. Además, incluye un lecho de secado, un cárcamo de bombeo de lodos, un área de seguridad y una descarga final hacia el río Pucarani a través de un filtro verde con *Hydrocotyle* (macrófitas flotantes). Solo se requiere un profesional (exfuncionario de

SAMAPA) para su mantenimiento. Pudimos observar el agua clara y transparente de su emisario y la ausencia de malos olores. Este proyecto, deseado por la comunidad, tiene un caudal promedio de 261 m³/día y un máximo de 538 m³/día. Es remarcable que se sustente gracias al pago mensual de Bs 40 por cada consumidor. Demuestra que, para una población de unos 2.000 habitantes este diseño es operacional y efectivo.

Figura 17. PTAR de Pucarani



Fuente: Mamani Layme (2023).

Nota: (A) Entrada con el canal de pretratamiento y los tanques Imhoff (al fondo); (B) Sitio de la PTAR con 50 m x 80 m y descarga de las aguas tratadas en el filtro verde con Hydrocotyle en el río Pucarani; (C) Detalle del filtro verde de Hydrocotyle; (D) Esquema de recirculación.

Mini-PTARs de Puerto Pérez y Batallas

El mismo diseño de mini-PTAR para aguas residuales domésticas, desarrollado por el Ing. Mamani Layme (2023) de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSA, se utiliza tanto en Batallas como en Puerto Pérez. En Batallas, la planta tiene una capacidad para 2.670 habitantes, con un caudal promedio de 374 m^3/día y un máximo de 813 m^3/día. En Puerto Pérez, la capacidad es para 955 habitantes, con un caudal promedio de 121 m^3/día y un máximo de 241 m^3/día. La mini-PTAR de Batallas incluye una etapa final adicional de cloración antes de la descarga en un humedal construido. A diferencia de Pucarani, en Batallas el costo de mantenimiento está cubierto por el gobierno municipal.

Figura 18. PTAR AGUATUYA para condominios, urbanizaciones, municipios, fábricas y empresas con procesos industriales.

Fuente: AGUATUYA, https://aguatuya.org/ingenieria/tratamiento-de-aguas-residuales

Entre otras opciones de mini-PTARs están las que ofrece AGUATUYA,[17] una ONG boliviana ubicada en Cochabamba, financiada por la Cooperación Sueca (Fig. 18). Esta organización promueve iniciativas en agua y saneamiento básico aplicando soluciones participativas, innovadoras y sostenibles que responden a necesidades de agua y saneamiento de municipios, cooperativas, urbanizaciones, condominios y comunidades, hasta casas individuales en un hábitat rural disperso. Ofrece mini-PTARs como una solución innovadora para asegurar un saneamiento eficiente, ecológico y accesible en proyectos de cualquier tamaño. Las aguas residuales pasan por un proceso de pretratamiento, donde se retiran sólidos y residuos grandes. Luego, pasan por un tratamiento biológico donde los microorganismos descomponen la materia orgánica disuelta, eliminando impurezas y reduciendo significativamente la carga contaminante.

17 https://aguatuya.org/ingenieria/tratamiento-de-aguas-residuales

Finalmente, el agua tratada pasa por una etapa de clarificación y, eventualmente, desinfección, para cumplir con las normas ambientales. AGUATUYA también promueve el cierre de ciclo de nutrientes y la recuperación de recursos como el reúso de aguas y lodos tratados, aportando a la economía circular.

Una vez tratadas adecuadamente, las aguas residuales depuradas pueden convertirse en un recurso valioso, ya que permiten diversos usos beneficiosos:[18]

- Riego agrícola: pueden utilizarse para nutrir los suelos y facilitar la siembra y el cultivo.
- Uso industrial: sirven para enfriar depósitos, tanques y calderas.
- Riego de zonas verdes: al igual que en el riego agrícola, pueden emplearse en campos de golf, parques o bosques urbanos.
- Recargar acuíferos: ayudan a reabastecer las reservas subterráneas de agua, contribuyendo a la estabilidad del suelo.
- Otros usos: como el apagado de incendios, el lavado de vehículos o la limpieza de calles, entre otros.

PTAR compactas transportables (PTARCs)

Las plantas de tratamiento de gran capacidad, como Puchukollo, diseñadas para atender a más de un millón de habitantes, procesan las aguas residuales de centros urbanos recolectadas mediante redes de alcantarillado. Su construcción y operación implican costos elevados que pueden variar desde algunos hasta decenas de millones de dólares. Existen dos factores principales que determinan el costo de un sistema de tratamiento de aguas residuales:

1. **La calidad del efluente**: es decir, los niveles de contaminantes que se deben eliminar, en función de los límites máximos y promedios mensuales de vertido permitidos por la normativa ambiental local.
2. **La cantidad máxima de agua a tratar**: medida en m^3/min, L/s o galones por minuto (GPM), y la velocidad a la que debe procesarse diariamente.

Por ejemplo, para una PTAR con una capacidad diez veces menor que la de Puchukollo –es decir, entre 378 y 1.892 litros por minuto (6–32 L/s o 100–500 GPM)– el costo puede oscilar entre 200.000 y 700.000 dólares dependiendo del nivel de contaminantes a remover y su relación con la normativa local de vertidos.

Ahora bien, este tipo de plantas centralizadas no resulta adecuado para todos los contextos. En zonas rurales dispersas, como en la parte baja de la cuenca Katari, los hogares se encuentran a varios kilómetros de distancia entre sí, lo que hace inviable la instalación de redes de alcantarillado extensas. Incluso en áreas urbanas como El Alto, se enfrentan diversas limitaciones: dificultades técnicas y financieras para extender la red hasta ciertos distritos, problemas con la expropiación de terrenos para construir nuevas plantas, rechazo de vecinos por posibles molestias, y la necesidad de soluciones

18 https://golatam.veoliawatertechnologies.com/es/blog/aguas-residuales-como-se-reutilizan-y-cual-es-su-importancia

temporales antes de que entren en operación nuevas instalaciones (por ejemplo, antes de que se concluyan las obras de una nueva PTAR).

Frente a estas condiciones, las PTAR compactas y transportables (PTARCs) representan una alternativa viable. Estas unidades ofrecen una solución de menor escala y menor costo en comparación con las mini-PTARs, y son especialmente útiles en contextos que requieren flexibilidad, rápida implementación y bajo impacto territorial y social.

Son unidades (eventualmente) transportables del tamaño de uno o varios contenedores marítimos de 40 pies, por lo que ocupan un espacio reducido en el suelo. Sus dimensiones exteriores son: longitud 12,19 m, anchura 2,43 m y altura 2,89 m, lo que equivale a solo 30 m^2 de superficie ocupada. Se fabrican principalmente en Europa, Norteamérica, Sudamérica y China. No requieren lagunas de decantación, ni generan molestias visuales u olfativas. No es necesario expropiar tierras a propietarios agrícolas o urbanos. Sus costos de adquisición y operación son reducidos, variando aproximadamente entre 10.000 y 100.000 dólares por unidad (sin incluir el coste del transporte desde el fabricante), según la capacidad requerida. El consumo eléctrico es bajo y puede cubrirse mediante energía solar y/o eólica. Tienen varias ventajas: pueden tratar las aguas residuales de entre 100 y 1.000 hogares, tanto en zonas rurales (comunidades) como urbanas (barrios, distritos), lo que permite conexiones de alcantarillado cortas y simples. Los costos de mantenimiento también son reducidos. Es necesario capacitar y contratar a un técnico especialista en saneamiento, sea a tiempo completo o parcial.

El proceso de depuración de estas PTARCs se basa en distintos métodos (Fig. 19):

1. Ultrafiltración (UF) con biorreactores de membrana (MBR). La ultrafiltración separa contaminantes mediante membranas con poros diminutos (0,05 micras), reteniendo solutos macromoleculares. La empresa china HINADA desarrolló una unidad móvil equipada con tanques anaeróbicos y aeróbicos, filtros MBR y sistema de control automatizado. Trata hasta 200 m^3/día y produce agua apta para reúso o descarga, con bajo consumo eléctrico (10 kW/h).
2. Filtración combinada y desinfección UV. Tecnologías que integran sedimentación, microfiltración, ultrafiltración y luz ultravioleta logran eliminar partículas, bacterias y virus. La unidad móvil BLUE ULTRA (IDRO GROUP, Italia) puede purificar hasta 2 m^3/h de agua proveniente de fuentes superficiales, con consumo energético reducido (1–1,5 kW/h), ideal para energías renovables.
3. Filtración con arena, carbón activo y desinfección. La unidad BLUE TWINS (IDRO GROUP) filtra partículas y compuestos orgánicos, produciendo agua potable a partir de aguas residuales sin contaminantes industriales. Montada en un remolque pequeño, no requiere electricidad salvo para la bomba, pudiendo operar con energía solar o diésel. Tiene capacidad de 4 m^3/h y almacena el agua tratada en compartimentos flexibles.
4. Tratamiento biológico multifase. La empresa FILTOMAT WATER SYSTEMS desarrolló una unidad contenedorizada para efluentes industriales y cloacales en pequeñas comunidades. Integra separación sólido-líquido, clarificación, concentración de lodos, filtración terciaria y desinfección. Puede incorporar aireación extendida, MBRs u ósmosis inversa, facilitando el reúso del agua para riego.

5. Oxidación avanzada: oxígeno, ozono y luz UV. El sistema OXIPLUS™ (DELLEPERE ENTERPRISES, EE.UU.) combina microburbujas de oxígeno y ozono con radiación UV. Reduce la carga orgánica, microalgas (incluidas cianobacterias), bacterias y metales pesados. Se ofrece en dos formatos:
   - Scavenger Vessel™: barco descontaminante de alta capacidad (hasta 76 m^3/min), operativo 24/7 y de bajo costo (0,06–0,10 USD/m^3).
   - Planta estacionaria flotante: unidad compacta (4,3 × 2,1 m), adecuada para desembocaduras de ríos en el Lago Menor.
6. Oxidación con Agua Supercrítica (SCWO). Una tecnología limpia que convierte residuos orgánicos en CO_2, agua y sales, usando agua a altas temperaturas y presiones. El sistema AirSCWO™ (374Water Inc., EE.UU.) es modular y transportable: puede tratar de 6 a 30 toneladas diarias de biosólidos y residuos orgánicos, generando energía durante el proceso. Contribuye a los ODS como solución sostenible de última generación.

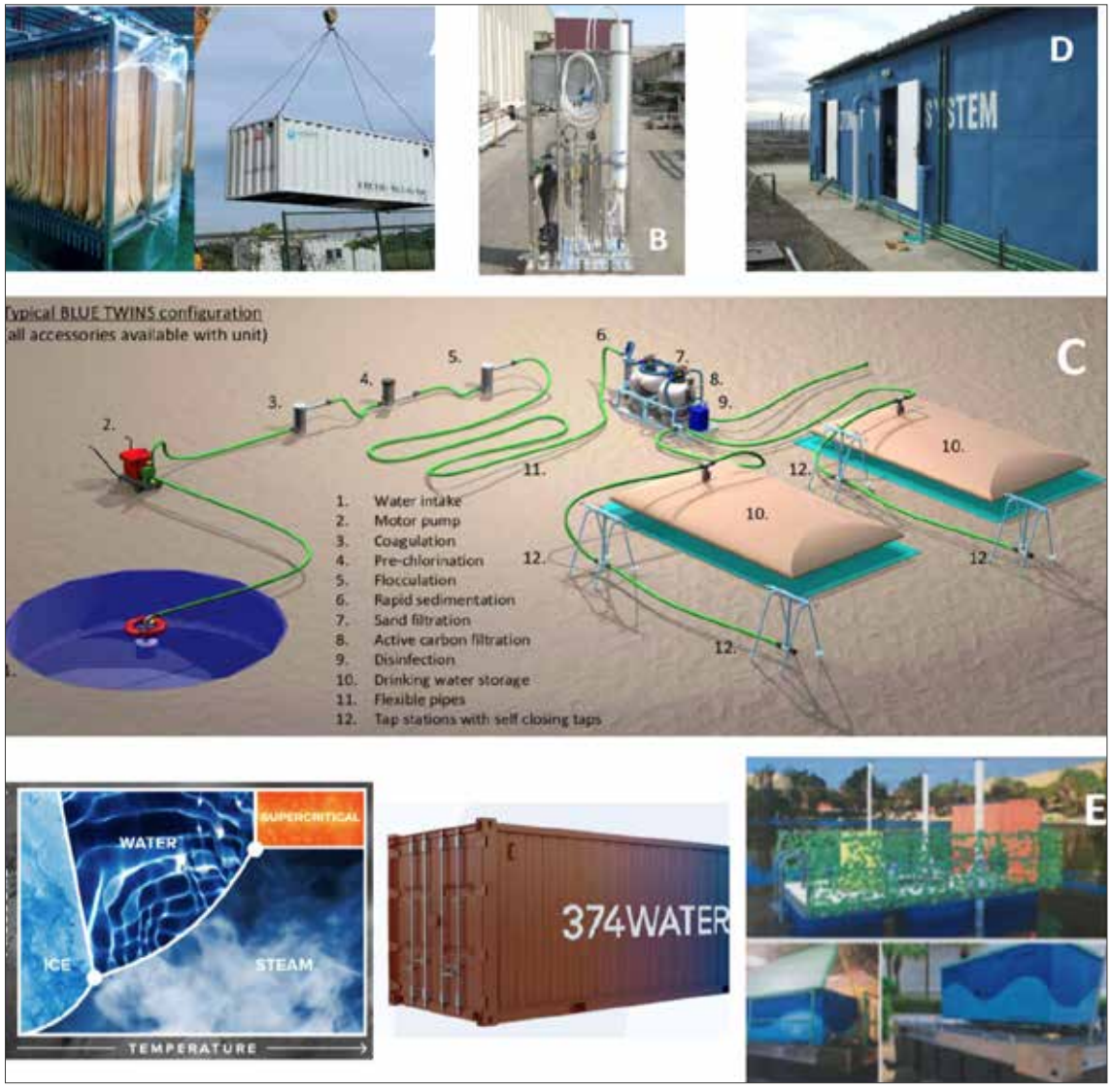
Ventajas del tratamiento descentralizado frente al tratamiento centralizado

Con el tratamiento centralizado convencional uno de los mayores costos es la construcción de alcantarillados para dar servicio a las zonas periféricas. Las PTARs ubicadas exactamente donde se necesitan reducen el costo de la prestación de servicios en estas zonas. Además, gracias a los avances tecnológicos, las plantas pequeñas ahora pueden operar de forma eficiente y rentable sin necesidad de depender de grandes volúmenes para reducir costos. Por ejemplo, en China, la mejor solución encontrada para el tratamiento de efluentes en áreas de servicio espaciadas cada 50 km a lo largo de una red de carreteras –que atraviesa principalmente zonas rurales, agrícolas y de ecoturismo– fue el uso del tratamiento descentralizado mediante la implementación de 80 PTARs compactas, lo cual ofrece un ahorro significativo en comparación con el costo de transportar los efluentes a una sola estación central. Como los efluentes tratados cumplen con la normativa ambiental, pueden ser vertidos localmente, favoreciendo a los agricultores locales y a las atracciones turísticas, entre otros.

Las PTAR compactas se entregan empaquetadas en contenedores marítimos, lo que permite su transporte rápido y puesta en marcha inmediata en cualquier lugar. En caso necesario, su capacidad puede ampliarse fácilmente mediante la adición de más unidades. Si las condiciones cambian, pueden reubicarse o incluso venderse. Su tamaño reducido, bajo nivel de ruido y ausencia de olores las hacen adecuadas tanto para barrios urbanos como para zonas rurales o paisajes naturales donde se requiere una estética ambiental cuidada. Gracias a su bajo consumo energético, pueden funcionar con paneles solares. Además, requieren poco mantenimiento, están automatizadas y permiten supervisión remota. Los proyectos a pequeña escala evitan negociaciones políticas complejas y favorecen el control comunitario del sistema de tratamiento. Esta estrategia de procesamiento descentralizado también es aplicable a empresas individuales. El tratamiento descentralizado representa el enfoque del futuro, y la ciencia y la ingeniería ya están dando respuesta a esta necesidad.[19]

19 https://aguasresiduales.info/revista/blog/beneficios-del-tratamiento-descentralizado-de-las-aguas

Figura 19. Los diferentes tipos de PTARs compactas



Fuente: Elaboración propia.

Nota: (A) HIDANA Water Treatment Tech CO LTD: membrane bioreactor o MBR (a izquierda) y unidad compacta en un contenedor de 40 pies. (B) IDRO GROUP unidad móvil BLUE ULTRA. (C) IDRO GROUP unidad móvil BLUE TWINS. (D) FILTOMAT WATER SYSTEMS unidad compacta en contenedor de 40 pies. (E) DELLEPERE ENTERPRISES Planta Estacionaria OXYPLUS™. (F) 374WATER Inc.: Proceso de Oxidación del Agua Supercrítica cuando el agua está por encima de su punto crítico (374°C y 221 bar; a izquierda) y unidad móvil en contenedor de 40 pies.

¿Qué hay que recordar?

MINI-PTARs Y PTARs COMPACTAS

Para aglomeraciones rurales de aproximadamente 2.000 habitantes, el diseño de las mini-PTARs, como los modelos implementados en Pucarani y Batallas, resulta adecuado, eficiente, compacto y de bajo costo, tanto en construcción como en operación. Estas plantas no requieren lagunas ni generan malos olores, y combinan principios de ingeniería sanitaria con soluciones ecológicas basadas en la naturaleza, lo que contribuye significativamente a reducir la eutrofización. Por su parte, las PTARs compactas y transportables (PTARCs) ofrecen soluciones accesibles y eficientes para pequeñas comunidades rurales y barrios o distritos urbanos donde el espacio es limitado. Pueden instalarse junto a ríos, en desembocaduras hacia el Lago Menor, o en derivación antes de llegar a humedales construidos, que emplean macrófitas acuáticas como parte de una estrategia de ingeniería ecológica. Dada la variedad de ventajas que presentan frente al tratamiento centralizado convencional, el enfoque descentralizado representa la estrategia más adecuada tanto para los distritos de El Alto como para las comunidades rurales de la cuenca Katari y del litoral del lago Titicaca.

4.1.3. Inventariar las industrias clandestinas (familiares) y encontrar soluciones viables para limpiar sus descargas liquidas

En El Alto existen miles de industrias legales y otras tantas clandestinas –como curtiembres, fábricas de pinturas, alimentarias, farmacéuticas, mataderos, plásticos, e insumos para la construcción, entre otras– que no se adecúan a las normas ambientales. Las pequeñas industrias familiares, muchas veces instaladas en viviendas, no son inventariadas ni localizadas; además, algunas de ellas pueden ser móviles. Estas industrias no cuentan con políticas de responsabilidad social ni abordan temas ambientales. Sus propietarios carecen del conocimiento técnico necesario y, en muchos casos, no tienen ingresos suficientes para invertir en sistemas de tratamiento de residuos sólidos y líquidos, los cuales suelen ser vertidos sin tratamiento alguno al alcantarillado o directamente a los ríos.

Una política de fiscalización basada únicamente en multas no tendría efectos positivos, ya que se trata de un problema tanto estructural como no estructural, derivado de la falta de recursos financieros y de educación, respectivamente. Para enfrentar esta situación, es fundamental facilitar el acceso de estas familias a microcréditos, incentivar su agrupamiento en asociaciones por actividad económica y relocalizar estas industrias en zonas adecuadas, como parques industriales (ver más abajo), donde se puedan mutualizar los recursos necesarios para implementar sistemas de tratamiento. También es importante difundir y capacitar sobre las soluciones existentes, enseñar las consecuencias negativas –incluso dramáticas– de no tratar ni reciclar los residuos, y explicar los beneficios concretos de hacerlo.

Apoyar el tránsito de una actividad informal a una actividad formal, organizada y respetuosa de los derechos de los demás y del entorno natural, incluso en contextos urbanos, representaría un gran avance. En este proceso, las ONG y fundaciones ambientalistas desempeñan un rol clave. Además, la educación formal en ciudadanía y medio ambiente

dirigida a niños, niñas y adolescentes en escuelas y colegios es fundamental para prevenir y revertir este tipo de situaciones (ver acciones no estructurales más abajo).

4.1.4. Relocalizar industrias en parques que cuenten con PTARs especializadas

En El Alto, tanto las industrias legales como las clandestinas se encuentran dispersas por la ciudad, generando una gran diversidad de contaminantes. Una solución a este problema es reubicar estas industrias en parques equipados con una PTAR centralizada y especializada. Debido a la falta de planificación urbana, esto no se ha concretado; actualmente, se requeriría expropiar terrenos para liberar áreas urbanas donde construir dichos parques, o bien ubicarlos fuera de la ciudad.

Las aguas residuales provenientes de las industrias contienen productos peligrosos que deben ser tratados de forma adecuada. Este tipo de tratamiento debe ser realizado por empresas especializadas en parques industriales, que cuenten con personal calificado para ello.[20] Reunir las industrias en un parque permite además mutualizar los esfuerzos y los procesos, lo cual reduce costos y elimina fuentes contaminantes que actualmente no son tratadas.

Estos parques presentan varias ventajas: 1) ayudan a reducir los contaminantes del medio ambiente; 2) disminuyen el consumo global de agua y energía, e incluso pueden servir para producir energía (por ejemplo, mediante la quema de metano para generar electricidad); 3) generan un ahorro global en los costos de tratamiento; 4) reducen la huella de carbono; 5) ofrecen una amplia gama de oportunidades de empleo, aportan innovación y progreso, y contribuyen al crecimiento económico de las comunidades locales; 6) permiten cumplir con los requisitos legales establecidos en las normas; y 7) facilitan la integración con los mercados globales, impulsando la competitividad del país en la escena mundial.

Por todas estas razones, la ubicación en parques industriales se está consolidando como una opción cada vez más idónea para las empresas. Existen ejemplos muy ilustrativos en países como Filipinas,[21] donde el tratamiento de aguas residuales dentro de estos parques no solo garantiza un funcionamiento óptimo de las operaciones, sino que también permite reutilizar el agua tratada para diversos fines, como el riego de áreas verdes o su uso en procesos industriales que no requieren agua potable, como el enfriamiento de maquinaria. Asimismo, el agua tratada de estos parques, ya sea de origen subterráneo o residual, puede emplearse tanto como materia prima como para para el lavado de maquinaria o de productos.

A pesar de todos estos beneficios, esta discusión sobre la creación de parques industriales y el tratamiento adecuado de sus aguas está prácticamente ausente en la gestión urbana de El Alto. Lamentablemente, no constituye una prioridad política. Es posible que no se tomen acciones concretas hasta que ocurra una crisis grave de contaminación o un problema serio de salud pública.

20 https://grupobeta.es/como-se-tratan-las-aguas-residuales-en-parques-industriales/
21 https://sciencepark.com.ph/blog/transform-local-communities/

4.1.5. Aprovechar parte de los efluentes de aguas residuales para forestar las riberas

En la cuenca Katari, la pendiente suave del terreno da lugar a ríos de flujo lento que forman meandros. En los bordes externos de estos meandros, la corriente se acelera, lo que provoca erosión, desprendimiento de las riberas y profundización del cauce. En cambio, en los bordes internos, el flujo es más lento y poco profundo, lo que favorece la deposición de sedimentos.

A partir de estas condiciones, es posible proponer medidas de restauración ecológica que aprovechen el propio funcionamiento del sistema fluvial. Por ejemplo, aguas abajo de Puchukollo Alto (Fig. 20), se podría frenar la erosión y, al mismo tiempo, crear un corredor verde mediante la plantación de árboles nativos –como la queñoa (*Polylepis* spp.), el árbol que crece a mayor altitud en el mundo (≥ 4.500 m s.n.m.)– en los terraplenes a lo largo de las riberas del río Seco. Para estabilizar previamente los suelos, sería recomendable sembrar una planta rastrera, suculenta, cosmopolita e invasora: la hierba del cuchillo o uña de gato (*Carpobrotus* sp.), utilizada como enmienda en obras públicas para asentar taludes. Esta especie, que ya coexiste en la región, contribuye a retener el suelo frente a la erosión provocada por las crecidas del río (Fig. 21). Si bien se le atribuyen efectos negativos, como el desplazamiento de flora nativa y la alteración de comunidades microbianas, estos no son relevantes en este caso, debido al alto nivel de perturbación ya existente en las riberas de la cuenca Katari.

Sobre esta base, una alternativa viable sería aprovechar parte del caudal del efluente tratado de la PTAR de Puchukollo para regar las plantas y los árboles establecidos en las riberas. Esta estrategia tendría varias ventajas: 1) reducir el caudal del río y, por tanto, las descargas contaminadas en el Lago Menor; 2) disminuir la cantidad de nutrientes, contaminantes, escombros y sedimentos transportados por el río desde los terraplenes; 3) reducir la erosión y los derrumbes; y, a la vez, 4) favorecer el secuestro de estos elementos, incluido el dióxido de carbono, en los suelos, contribuyendo a mitigar el cambio climático; 5) eliminar malos olores; 6) aumentar la producción de oxígeno; 7) mejorar el paisaje y la calidad de vida de los habitantes; e 8) incrementar la biodiversidad vegetal y animal en el entorno.

No obstante, esta propuesta debe analizarse con cautela. La calidad del agua en la cuenca Katari no parece apta para ningún tipo de uso, ni como agua potable para humanos o ganado, ni para riego. Su aplicación podría implicar riesgos asociados a la presencia de contaminantes emergentes que podrían acumularse en los suelos de las riberas o infiltrarse hacia las aguas subterráneas durante el riego con aguas del río Seco o con el efluente tratado de la PTAR de Puchukollo.

Figura 20. Los meandros del río Seco en Alto Puchukollo, a lo largo de la PTAR

Fuente: Elaboración propria en una imagen Google Earth ©.

Nota: Los meandros del río Seco en Alto Puchukollo, a lo largo de la PTAR, favorecen la biodiversidad vegetal y animal. Sin embargo, como las riberas son arenosas, en épocas lluviosas los fuertes caudales aceleran su erosión, los desprendimientos, las crecidas y la formación de zonas húmedas.

Figura 21. Frenar la erosión, consolidar los terraplenes del río Seco, y transformarles en corredor verde

Fuentes: Fotos de X. Lazzaro.

Nota: (A) La uña de gato en flor (*Carpobrotus* sp.); (B) La queñoa (*Polylepis tarapacana*), el árbol que crece a mayor altitud en el mundo (≥ 4.500 m s.n.m.); (C) a (F) Aguas debajo de Alto Puchukollo, al nivel del desagüe del efluente de la PTAR de Puchukollo, los terraplenes se derrumban, llevando las casas e industrias, debido a la erosión causada por las crecidas del río en épocas lluviosas.

4.1.6. Reencauzar los ríos para ralentizar el caudal y aumenta la biodiversidad

El relieve de la cuenca Katari aguas abajo de El Alto es muy plano, lo que favorece la formación natural de meandros fluviales –curvas en forma de "U"– que reducen la velocidad del agua. Sin embargo, en su trayecto por la ciudad de El Alto, muchos ríos han sido enderezados, sus meandros cortados y canalizados, e incluso se han construido escalones para disipar la energía del agua. Estas intervenciones buscaron impedir los movimientos del lecho fluvial, así como ganar terrenos para cultivos, viviendas, edificios y carreteras.

Actualmente, en el sector urbano ya no es posible modificar el cauce de los ríos, pues estos están completamente canalizados y empedrados, convirtiéndose en sistemas artificiales. Al igual que en otros sectores del piedemonte cordillerano, la expansión urbana ha ocupado las zonas donde antes los ríos se desbordaban naturalmente. Como consecuencia, durante episodios de tormenta, los ríos encauzados generan crecidas violentas, desbordamientos e incluso olas pulsantes capaces de arrasar con todo a su paso. Más abajo, cuando los ríos recuperan su cauce natural, la alta velocidad del flujo erosiona las orillas impidiendo el establecimiento de vegetación acuática. Esto afecta directamente la capacidad del ecosistema para actuar como filtro biológico de nutrientes y contaminantes. Por ello, se justifica la necesidad de volver a encauzar los cursos de agua de forma que se generen zonas –como las áreas internas de los meandros– donde el caudal disminuya y la vegetación pueda asentarse.

La descontaminación que se logra con este tipo de intervención mejora el estado general del ecosistema ya que el agua que llega al Lago Menor está menos contaminada.

Figura 22. Ejemplo de río antes de la re-meandrización de su cauce (a izquierda) y después (a derecha)

Fuente: https://www.nwrm.eu/measure/re-meandering

El reencauzamiento de los ríos consiste en crear un nuevo curso con forma de meandro, o en reconectar meandros que fueron cortados en el pasado, lo cual ayuda a ralentizar la velocidad del agua. Esta nueva forma del cauce genera condiciones distintas de flujo y con frecuencia tiene efectos positivos en la sedimentación y en la biodiversidad. Los meandros recién creados o restaurados también ofrecen hábitats adecuados para una gran variedad de especies acuáticas y terrestres, tanto de plantas como de animales (Fig. 22).

4.1.7. Remover los residuos sólidos del litoral del Lago y de las orillas de los ríos

Por supuesto, las campañas de limpieza en las riberas de los ríos, el litoral del lago, alrededores de rellenos sanitarios e incluso en zonas urbanas tienen un valor educativo y de concienciación sobre el respeto a la naturaleza y el medioambiente. Sin embargo, son actividades interminables y costosas que no resuelven en absoluto el origen del problema. Además, encontrar un destino adecuado para los residuos recolectados es, en sí mismo, otro reto medioambiental. El simple enterramiento en rellenos sanitarios –sean oficiales o no– no puede considerarse una solución sostenible.

La prioridad debe estar en la clasificación de los residuos sólidos y su posterior reciclaje (papel, plástico, vidrio, metal), así como en el compostaje de la materia orgánica (hojas, cáscaras, yerba, restos de poda, etc.). El compostaje ayuda a reducir considerablemente la cantidad de residuos que llegan a los rellenos sanitarios y puede realizarse tanto a nivel domiciliario como en huertos urbanos comunitarios, evitando la saturación de los contenedores.

Una experiencia destacable impulsada por el Instituto de Investigación y Acción para el Desarrollo Integral (IIADI) en 2023 fue la implementación de una biobarda[22] en el río Pallina (Fig. 23), como sistema de retención y extracción de residuos sólidos. Esta barrera flotante, construida artesanalmente con cuerda de alta resistencia, malla de pesca y botellas PET, fue diseñada para frenar la acumulación de plásticos arrastrados por el caudal y el viento desde zonas urbanas densas aguas arriba, como la ciudad de El Alto. El diseño tiene origen en Guatemala y se ha adaptado a las condiciones de la cuenca baja del Katari.

22 Las biobardas son estructuras artesanales o caseras diseñadas para retener desechos sólidos livianos flotantes en los ríos. El término 'bio' no quiere decir que comprende un componente biológico, sino que es benéfica para el medioambiente.

Figura 23. La remoción de la acumulación de botellas plásticas y otros residuos sólidos

Fuente: IIADI (2023).

Nota: La remoción de la acumulación de botellas plásticas y otros residuos sólidos es un gran desafío para las campañas de limpieza que implican un enorme esfuerzo humano, en tiempo, con elevados costos; mientras tanto no solucionan definitivamente este problema ambiental. A izquierda: 7 kilómetros de botellas plásticas en el río Ajllita Jahuira, en el municipio de Pucarani, donde desembocan las aguas que llegan de los ríos Seke y Seco de El Alto y del río Pallina de Viacha (imagen tomada por dron). A derecha: Biobarda instalada en el río Pallina, capturando varias toneladas de botellas plásticas.

La biobarda permite detener botellas y otros residuos plásticos antes de que lleguen al lago, convirtiendo un problema ambiental en una oportunidad económica para las comunidades locales. Tras su recolección, los desechos plásticos se trasladan a un punto de acopio donde se seleccionan, lavan, clasifican y trituran. Solo así pueden venderse a empresas recicladoras como EMPACAR S.A., Recicla La Paz y Reciplast, que operan en el municipio de La Paz. También existen compradores de otros materiales como plastoformo y llantas.

Para que las botellas PET sean aceptadas, deben estar limpias, sin etiquetas ni tapas (fabricadas con otro tipo de plástico), y no deben estar aplastadas. Algunas empresas también se encargan de reciclar etiquetas, bolsas y otros plásticos de menor calidad. Una vez trituradas, las botellas se funden nuevamente para fabricar nuevos envases. En países vecinos como Perú estas botellas recicladas se compran a buen precio, lo que demuestra el potencial de esta tecnología para escalar como solución ambiental y económica.

Otra experiencia también impulsada por IIADI en 2023 fue la implementación de un sistema de descontaminación de agua en la comunidad de Machacamarca Baja, utilizando biochar o biocarbón, un material poroso de origen vegetal con capacidad para absorber contaminantes. Esta tecnología de bajo costo fue aplicada en el río Pallina, en el marco de una prueba piloto orientada al tratamiento de agua para usos agropecuarios.

El biocarbón se elabora mediante un proceso llamado pirólisis, que consiste en calentar residuos vegetales secos –como restos de poda o cultivos– a temperaturas entre 500 y 700 °C, en ausencia de oxígeno. Para ello se utilizan macetas, bidones metálicos o incluso hoyos cónicos en el suelo. El resultado es un material liviano, aireado y fibroso, capaz de retener compuestos nocivos presentes en el agua.

El sistema construido por IIADI consta de dos tanques conectados a un turril que contiene el biocarbón producido (Fig. 24). El primer tanque, lleno de grava, recibe el agua contaminada del río. Luego, esta fluye hacia el turril donde atraviesa una combinación de capas filtrantes: fibra, arena, grava y biochar. Finalmente, el agua filtrada llega al segundo tanque, desde donde puede ser recolectada.

Figura 24. Tecnología de descontaminación del agua por medio de biocarbón

Fuente: IIADI (2023).

Nota: A izquierda, el turril purificador conteniendo el biochar. A derecha, el sistema completo con los dos tanques conectados al turril enterrado, con la diferencia entre el agua residual (antes) y el agua filtrada (después).

El dispositivo ha demostrado una disminución significativa de la turbidez y del olor fétido, dos indicadores de contaminación. Si bien se recomienda realizar análisis de calidad del agua para validar su uso, esta tecnología ha permitido obtener agua apta para el consumo animal y el riego. Esta tecnología tiene una capacidad de filtrado de 2.000 litros diarios, suficientes para abastecer a 36 vacas por día.

4.1.8. Generalizar la segregación domiciliaria, los contenedores selectivos de basura y el reciclaje

Una gestión adecuada de los residuos sólidos requiere que la Municipalidad de El Alto –ya sea directamente o a través de una empresa privada– asuma su responsabilidad, implementando un sistema de recolección selectiva mediante contenedores diferenciados instalados en calles y plazas. Estos contenedores deberían permitir la separación de materiales reciclables como papel y cartón, plásticos, metales y vidrios (solo los rotos). Idealmente, los envases plásticos (como botellas de agua o gaseosa) y los de vidrio deberían ser retornados por los consumidores a los puntos de venta –supermercados o tiendas–, donde las empresas productoras podrían recuperarlos y reciclarlos (ver el sistema de consigna más abajo). Asimismo, es fundamental facilitar la recuperación de estos materiales de los contenedores por los recolectores informales quienes contribuyen de manera significativa al reciclaje y dependen económicamente de esta actividad (Fig. 25).

Figura 25. Recolección municipal de residuos sólidos en La Paz

Fuente: Fotos de X. Lazzaro.

Nota: A izquierda: dos contenedores indiscriminados (de color negro) donde los usuarios botan 'todo y cualquier cosa', inclusive los residuos orgánicos que podrían ser compostados, sin darse la pena de separar lo que podría ir en el contenedor selectivo 'Isla Verde' (de color verde): envases plásticos, envases diversos. A derecha: el camión de un recolector privado que lleva papel y cartón a la empresa de reciclaje.

Los residuos orgánicos (como cáscaras de frutas y restos de verduras) no deberían mezclarse con los residuos sólidos convencionales, sino que tendrían que recuperarse de manera separada, ya sea a nivel domiciliario o por barrios, para su compostaje en huertos comunitarios y su aprovechamiento en la producción vegetal. Estas medidas –que pueden extenderse a todos los municipios urbanos y comunidades rurales– permitirían reducir considerablemente la cantidad de residuos que terminan en los rellenos sanitarios, los cuales representan más un problema que una solución, debido a la contaminación superficial y subterránea que generan, además del riesgo de deslizamientos (mazamorras).

Con sistemas de reciclaje y compostaje eficientes, será posible eliminar progresivamente los contenedores indiscriminados que actualmente incentivan la mezcla de residuos y su entierro directo en los rellenos sanitarios. En ese contexto, los camiones volquetas con brazo elevador dejarían de ser necesarios, ya que el sistema de recolección debería adaptarse a contenedores domiciliarios de menor tamaño y de colores diferenciados, que permitan la separación de residuos directamente en el hogar (Fig. 26). Para ello, se recomienda adoptar una política de solidaridad social que incluya la subvención de estos contenedores domiciliarios por parte de los gobiernos municipales o mediante patrocinios privados, especialmente para familias de bajos ingresos. Como los nuevos contenedores serían más pequeños que los municipales actuales, será necesario adaptar el sistema de carga de los camiones recolectores, incorporando mecanismos adecuados para levantar y vaciar estos recipientes desde la parte trasera. Finalmente, para que este servicio sea sostenible, su costo debería ser facturado mensualmente por la municipalidad.

Figura 26. Contenedores domiciliares de basura

Fuente: Internet.

Nota: Contenedores domiciliares de basura para la recogida selectiva de metal (rojo), papel (celeste), vidrio (verde), gris (papel) y amarillo (plástico), utilizados en los hogares franceses, y dispuestos en las aceras en los días semanales específicos de acopio, en los cuales los camiones municipales recolectores los recogen.

4.1.9. Regular las actividades de las canteras (areneros y extractores de áridos)

Los productores de agregados (arena, piedra, grava y arenilla) juegan un papel fundamental en suministrar materias primas para la industria de la construcción civil (viviendas, infraestructuras, carreteras). Sin embargo, al recorrer la carretera hacia el Lago, es evidente que las actividades de extracción en los ríos Seco y Seke provocan grandes alteraciones en sus cauces (Fig. 27).

Durante la temporada de lluvias, la desaparición de zonas naturales y la reducción del ancho de los cauces pueden favorecer desbordamientos en los canales urbanos. Además, la extracción intensiva libera sedimentos finos que se acumulan en la parte baja de la cuenca provocando el colmatado progresivo de la Bahía de Cohana. Año tras año, esta acumulación disminuye la profundidad del cuerpo de agua, cubre las macrófitas sumergidas (*Chara*) y afecta el enraizamiento de las macrófitas emergentes como la *Totora* (Fig. 28), que ya no pueden cumplir su función como filtros biológicos naturales.

Figura 27. En el río Seco, hacia la zona de Mercedario (El Alto, colindante con Puchukollo)

Fuente: Foto de Malkya Tudela (CEDLA – Centro de Estudios para el Desarrollo Laboral y Agrario).

Nota: En el río Seco, hacia la zona de Mercedario (El Alto, colindante con Puchukollo), extracción de áridos por los comunarios.

Figura 28. Cuando el río Katari desembocaba en Cohana

Fuentes: Foto y mapa de X. Lazzaro, con ubicaciones en Google Earth ©.

Nota: Cuando el río Katari desembocaba en Cohana, entre las islas de Pariti y Quehuaya (hasta el 2021), a cada estación de lluvias se depositaba un abundante sedimento anóxico fino sobre las macrófitas sumergidas (*Chara* sp.), hasta afuera de la bahía de Cohana, frente a la isla de Suriqui. A izquierda: los sedimentos finos depositados sobre las *Chara*, y afectando también el enraizamiento de las Totora, frente a la isla (península) de Quehuaya. A derecha: mapa del avance de la deposición de sedimento fino entre diciembre 2018 y enero 2019.

A esto se suma la destrucción de zonas clave para el desove de peces y la nidificación de aves acuáticas. Por todo ello, resulta urgente regular de forma más estricta esta actividad, a fin de reducir su impacto ambiental sobre los ríos y los ecosistemas del Lago Menor.

4.1.10. Implantar un sistema de consigna generalizado para las botellas de vidrio y plástico

Producir cada vez más bebidas (agua, gaseosas, cervezas, vinos, licores) en botellas de vidrio o plástico, para que luego estos envases terminen enterrados durante siglos o milenios en rellenos sanitarios –que contaminan las aguas subterráneas– o dispersos en ríos y lagos –donde generan microplásticos–, en lugar de ser reciclados, constituye una gran incoherencia e irresponsabilidad de nuestra sociedad. Es un comportamiento absurdo. Aunque las soluciones no siempre resulten económicamente rentables a corto plazo, es indispensable romper este círculo vicioso que vuelve insostenibles nuestras ciudades.

Botellas de plástico. Es más barato fabricar botellas de plástico nuevas que reciclar las usadas, porque el petróleo es barato y resulta más fácil extraer un recurso natural de la tierra que procesar plástico reciclado. Este razonamiento puramente económico nos está llevando a la perdición. De hecho, el petróleo es un recurso no renovable que, además de su extracción, contribuye al efecto invernadero y al cambio climático. La mayoría de los plásticos actuales se fabrican a partir de productos petroquímicos, esencialmente petróleo y gas natural, y la mayoría no se reciclan. El único plástico que se recicla en una proporción relativamente significativa (un 27 % en EE.UU., en 2008) es el fabricado con tereftalato de polietileno (PET), el material utilizado en la fabricación de botellas de bebidas (agua, refrescos). El plástico PET tiene un valor residual y puede reciclarse para fabricar desde ropa de lana sintética hasta nuevos envases. La mayoría de los plásticos (sin incluir los bioplásticos[23]) son derivados del petróleo, lo que los convierte en materiales no renovables ni sostenibles. Una alternativa es el PEAD (polietileno de alta densidad, Fig. 29), elaborado a partir de biorresina derivada de cultivos renovables como la caña de azúcar, y 100 % reciclable. Este polietileno fue sintetizado en 1953 por el químico alemán y Premio Nobel Karl Ziegler. Se utiliza en sistemas de tuberías para la distribución de agua potable, envases y la construcción de embarcaciones y canoas. También existen opciones respetuosas con el planeta como el PET reciclado posconsumo (PCR) y el PEAD PCR.

23 El término bioplástico suele utilizarse como estrategia de marketing, pero es ambiguo: no todo bioplástico proviene íntegramente de fuentes vegetales, ni todos son biodegradables o compostables. Para ser considerado verdaderamente sostenible, un bioplástico debería descomponerse por acción de microorganismos, lo que solo ocurre en instalaciones de compostaje industrial con altas temperaturas. A su vez, un plástico de origen biológico (bio-sourced) se fabrica a partir de biomasa vegetal (como caña de azúcar o almidón de maíz), pero su composición no garantiza compostabilidad. Además, muchos bioplásticos incluyen derivados del petróleo. Su coste de producción es más alto que el del plástico convencional, sin asegurar menor impacto ambiental.

Figura 29. Embaces de platico de polietileno de alta densidwad

Fuente: CLCV - Asociación nacional para la defensa de los consumidores y usuarios, Francia, https://www.clcv.org/prevention-des-dechets/emballages-en-plastique-biosources-et-compostables-est-ce-la-solution

Nota: (A) Bioplástico, PEAD, o polietileno de alta densidad; (B) Plástico de origen biológico; (C) Envases de plástico de origen biológico y compostables.

Entretanto, un problema clave es aislar el material para reciclarlo, ya que el PET suele estar mezclado con residuos (aditivos) que dificultan su reutilización. Clasificar y separar correctamente el material reciclable requiere mucho trabajo y resulta costoso. Desde el punto de vista de los fabricantes, el uso de petróleo sigue siendo una opción más segura y rentable. Otro obstáculo es la percepción del consumidor: no siempre está dispuesto a beber agua envasada en botellas de plástico reciclado. Sin embargo, el plástico puede reciclarse a nivel molecular para obtener un producto perfectamente limpio. Aunque esta tecnología es más cara, ya existe y ha sido adoptada en otros países mediante subvenciones estatales.

Desde una perspectiva ambiental y de salud pública, vale la pena hacer este esfuerzo. Para los embotelladores y grandes marcas millonarias de agua mineral y refrescos, reducir mínimamente sus márgenes de ganancia para reciclar PET a través de esta tecnología avanzada no afectará su viabilidad comercial. Al contrario, fortalecerá su imagen como marcas responsables ante consumidores cada vez más conscientes del medioambiente.

En Bolivia, este tipo de iniciativas debería incentivarse. Coca-Cola, a través de su embotellador EMBOL –la segunda empresa más rentable del país–, es la marca de bebida número uno en consumo nacional y uno de los mayores contribuyentes fiscales. Resulta tanto más viable como simbólicamente valioso que Coca-Cola haya reportado la recuperación y reciclaje de aproximadamente 3.080 toneladas de PET en 2022 y 3.500 toneladas en 2023. La empresa cuenta con cinco plantas de producción (La Paz, Santa Cruz, Cochabamba, Trinidad y Tarija) y 15 centros de distribución, que operan con 494 camiones para abastecer a 128.000 puntos de venta. A través de la iniciativa Bolivia Recicla, busca aumentar las tasas de reciclaje, organizar el acopio en sus contenedores *Vital* y colaborar con recolectores locales y aliados estratégicos.

Este mismo razonamiento aplica a otras marcas de bebidas, tanto nacionales como transnacionales. Promover este modelo no solo contribuye a la protección del medio ambiente y la salud pública, sino que también puede generar nuevos empleos y formalizar la labor de muchas familias recolectoras, actualmente insertas en la economía informal.

Para maximizar la devolución de envases vacíos, los consumidores podrían retornarlos a las tiendas o supermercados donde realizaron sus compras. Esta práctica, además de fomentar el reciclaje, podría generar empleos formales. Los camiones de reparto, al realizar nuevas entregas, podrían recoger los envases devueltos en un compartimento reservado para tal fin (por ejemplo, un quinto del volumen del remolque) y transportarlos de regreso a la fábrica sin incurrir en costos adicionales. De esta manera, las empresas recicladoras tendrían más facilidad para abastecerse de materia prima directamente desde estos puntos de acopio.

Botellas de vidrio. El reciclaje de botellas de vidrio ahorra energía, reduce la contaminación y favorece una economía circular al minimizar la necesidad de extraer nuevas materias primas.[24] El vidrio reciclado se utiliza en diversas aplicaciones, como nuevos envases, áridos para la construcción de carreteras (en sustitución de la grava), aislamiento de habitaciones mediante fibra de vidrio, filtración de agua y materiales decorativos. El uso de vidrio reciclado o "casco" requiere menos energía durante la fabricación ya que se funde a una temperatura inferior a la de las materias primas, lo que reduce los costos de producción (hasta un 30% de ahorro energético) y minimiza la huella de carbono, la contaminación y los residuos. Al disminuir la cantidad de vidrio en los rellenos sanitarios, se conserva el espacio necesario para la disposición de residuos y se mitigan los riesgos ambientales asociados. El reciclaje de vidrio contribuye a una economía circular, disminuye nuestra dependencia de materias primas y reduce el impacto ambiental de la minería y el procesamiento de materiales. Las instalaciones de reciclaje pueden gestionar envases de bebidas como zumos, vinos y licores.

A través de puntos de consigna o centros de acopio específicos, los consumidores pueden recuperar el valor del depósito devolviendo los envases de vidrio, lo que incentiva y garantiza una amplia participación. El reciclaje de vidrio reduce la contaminación del aire en un 20% y la del agua en un 50% en comparación con la producción de vidrio nuevo a partir de materias primas vírgenes. Esta eficiencia energética se traduce en menos emisiones de carbono y menor degradación ambiental. El proceso de reciclaje del vidrio comprende la clasificación mecánica por colores, la trituración en trozos pequeños, el fundido de la mezcla en hornos a temperaturas muy altas, y el moldeado o soplado del vidrio fundido en nuevas botellas y tarros.

Las ventajas del plástico. Como ya se mencionó, fabricar una botella de plástico es más barato que fabricar una de vidrio. El vidrio, además de ser más costoso como material, requiere un proceso de producción más caro y de mayor consumo energético. También es mucho más pesado que el plástico, lo que incrementa significativamente los costos de transporte. El tiempo de producción de una botella de vidrio es más largo, y, a diferencia del vidrio, las botellas de plástico no se rompen, lo que reduce la cantidad de residuos y riesgos asociados al manejo y distribución.

Las ventajas del vidrio. Se fabrica a partir de materias primas naturales (arena de sílice, carbonato sódico y piedra caliza), es duradero y reciclable de forma indefinida.

---

24 North Hill Bottle Depot, Calgary, Canada. Effective Recycling of Glass Bottles: A Comprehensive Guide. https://northhillbottledepot.ca/effective-recycling-of-glass-bottles-a-comprehensive-guide/

Cuando se abandona en el medioambiente, es menos probable que cause contaminación en comparación con el plástico. A diferencia del plástico, que se fragmenta en microplásticos capaces de filtrarse en el suelo y el agua, el vidrio no es tóxico.

El vidrio se considera una alternativa "más segura" y sostenible para el envasado de alimentos y bebidas, y actualmente está resurgiendo. Los consumidores valoran cada vez más los envases de vidrio por su calidad inerte, al tratarse de un material estable, puro y no poroso. Es una barrera impenetrable contra agentes externos, garantiza una conservación óptima y soporta altas temperaturas, permitiendo la esterilización.

Además, es un material inodoro que conserva las propiedades organolépticas de los alimentos, es decir, mantiene su aroma, sabor, color y textura.[25]

En los contenedores selectivos de La Paz, como debe ocurrir en los de El Alto, las botellas de vidrio que se rompen al caer dentro son enviadas a los rellenos sanitarios para su entierro, lo cual carece de sentido. Esto representa un doble desperdicio: por un lado, se desaprovecha el esfuerzo de selección realizado por los usuarios, y por otro, se pierde una materia prima valiosa que, además, contribuye a obstruir y saturar los rellenos sanitarios. En su lugar, la empresa municipal a cargo de los contenedores selectivos debería dar la oportunidad a las empresas recicladoras y las embotelladoras de tener acceso a estos vidrios para recuperar esta materia prima valiosa (Fig. 30).

Figura 30. Embaces de vidrio

Fuente: PAPREC, Líder francés en reciclaje, https://www.paprec.com/fr/solutions/les-matieres-que-nous-valorisons/verre/

Nota: El vidrio es una mezcla de 3 elementos: arena, carbonato sódico y piedra caliza, calentados en hornos gigantes a una temperatura comprendida entre 1300°C y 1550°C. Es el único material de envasado que puede reciclarse indefinidamente. Sin reciclaje, tardaría 3 o 4 milenios en descomponerse en la naturaleza. Sólo pueden reciclarse los envases de vidrio, es decir, botellas, tarros y frascos (principalmente de vidrio sodocálcico). No se reciclan todas las vajillas de «cristal» (platos y fuentes transparentes, cerámica transparente o vitrocerámica) que tienen un punto de fusión superior al del vidrio. La porcelana, la cerámica y la loza tampoco, porque los fabricantes inyectan sustancias químicas que hacen imposible su reciclaje. Por ej., en Francia, el vidrío es reciclado desde 1974; más de la mitad de los envases domésticos de vidrio consumidos se reciclan, lo que representa 2 millones de toneladas desviadas de los rellenos sanitarios, ahorrando otras tantas materias primas.

25 https://thefoodtech.com/insumos-para-empaque/5-ventajas-de-los-envases-de-vidrio-frente-a-los-del-plastico/

El incentivo de las consignas. Tal como se hacía décadas atrás y como aún se implementa en algunos países, la consigna es un sistema de depósito-reembolso, que fomenta el reciclaje mediante un incentivo económico. Cuando los consumidores compran bebidas, pagan un pequeño depósito adicional que se les reembolsa al devolver los envases vacíos en puntos de acopio designados.

Este proceso puede ser manual o automatizado, mediante máquinas que utilizan escáneres ópticos para diferenciar los tipos de botellas y realizar la devolución del depósito (Fig. 31). Las empresas recicladoras pueden abastecerse directamente desde estos puntos de recolección, que pueden estar ubicados en supermercados, tiendas u otros espacios accesibles.

Figura 31. La consigna automática

Fuente: Télé Matin, France 2, https://www.youtube.com/watch?v=NKDY1KHLrr0

Nota: La consigna automática (no es nueva, existía ½ siglo atrás): una forma de reciclar las botellas de plástico, en un parqueo de supermercado en Étampes, suburbio de Paris, Francia: "¡Bebe Clasifica Gana!", "¡El gesto ecológico premiado!". La máquina devuelve dos céntimos de euro por botella, en vale de compra en el supermercado.

4.1.11. Prohibir los plásticos de un solo uso

Décadas atrás, era habitual ir al mercado con una cesta de mimbre.[26] Los productos –incluidos la harina, el azúcar y la carne– se entregaban envueltos en papel de periódico o de impresora. Hoy, recuperar ese paradigma respetuoso con el medioambiente resulta urgente. En supermercados, tiendas de alimentación y otros comercios, debería reemplazarse el uso de bolsas plásticas por alternativas reutilizables, como bolsas o cajas de cartón, y eliminar o restringir los envases individuales, latas, botellas –especialmente las pequeñas de 33,5 cL– y bolsitas de un solo uso, cuyo empaque resulta desproporcionado frente al volumen de contenido.

Una alternativa sostenible es promover la venta de productos a granel, en establecimientos donde los consumidores lleven sus propios envases. Estos comercios deberían ser incentivados y subvencionados por políticas públicas. En Europa, por ejemplo,

26 Se obtiene de un arbusto de la familia de los sauces (género Salix) y se teje para fabricar muebles, cestas y otros objetos útiles. Existen varios fabricantes en Bolivia, donde su materia prima es importada de Argentina y el resto del Chapare.

varios supermercados ofrecen grandes bolsas de lona a un precio simbólico, y las reemplazan gratuitamente cuando se desgastan. Este tipo de estrategias se complementan con medidas regulatorias y educación al consumidor. Desde julio de 2021, una directiva europea prohíbe la comercialización de pajitas, platos y cubiertos de plástico de un solo uso (Fig. 32), e impulsa un mejor sistema de reciclaje de botellas.

El problema es global. Según la OCDE,[27] la producción mundial de plásticos pasó de 2 millones de toneladas en 1950 a 460 millones en 2019 –es decir, se multiplicó por 230 en apenas 70 años–, y podría alcanzar los 736 millones de toneladas para 2040 si no se aplican políticas más estrictas. Los residuos plásticos, que pueden tardar siglos en degradarse, provocan una grave contaminación ambiental. La UNESCO estima que más de un millón de aves marinas y 100.000 mamíferos marinos mueren cada año a causa de los plásticos. En las playas de la Unión Europea, los productos plásticos de un solo uso representan el 50% de los residuos; entre ellos, las botellas, filtros de cigarrillos y bastoncillos de algodón ocupan los primeros lugares.

Figura 32. Productos de plástico

Nota: A la izquierda: La Comisión Europea quiere prohibir cinco productos de plástico para 2025, https://www.actu-environnement.com/ae/news/projet-directive-interdiction-produits-plastique-usage-unique-31351.php4. A la derecha: Hacia el fin de todos los envases de plástico de un solo uso para 2040. Sindicato Mixto de Tratamiento de Residuos Domésticos (smitom), https://www.smitom-nord77.fr/actualite/vers-la-fin-de-tous-les-emballages-en-plastique-a-usage-unique-dici-2040/

Las proyecciones son preocupantes: sin políticas audaces, el consumo mundial de plástico aumentará de 460 Mt en 2019 a 1.231 Mt en 2060, con un crecimiento más acelerado en países en desarrollo de África y Asia. En el mismo periodo, la cantidad de plástico vertido en lagos, ríos y océanos se triplicará, pasando de 353 Mt a 1.014 Mt; mientras que la contaminación plástica directa al ambiente se duplicará hasta alcanzar 44 Mt anuales. A escala global, solo el 17% del plástico será reciclado en 2060 (frente al 9% en 2019); el resto se incinerará (20%) o terminará en vertederos (50%).[28]

27 Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, fundada en Paris en 1961. Tiene como objetivos de contribuir a una sana expansión económica en los países miembros, así como no miembros, en vías de desarrollo económico. https://www.oecd.org/fr/about/news/press-releases/2022/06/global-plastic-waste-set-to-almost-triple-by-2060.html

28 Ver: Global Plastics Outlook, OCDE (2022): https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_de747aef-en

4.1.12. Prohibir los detergentes con fosfatos para reducir la eutrofización

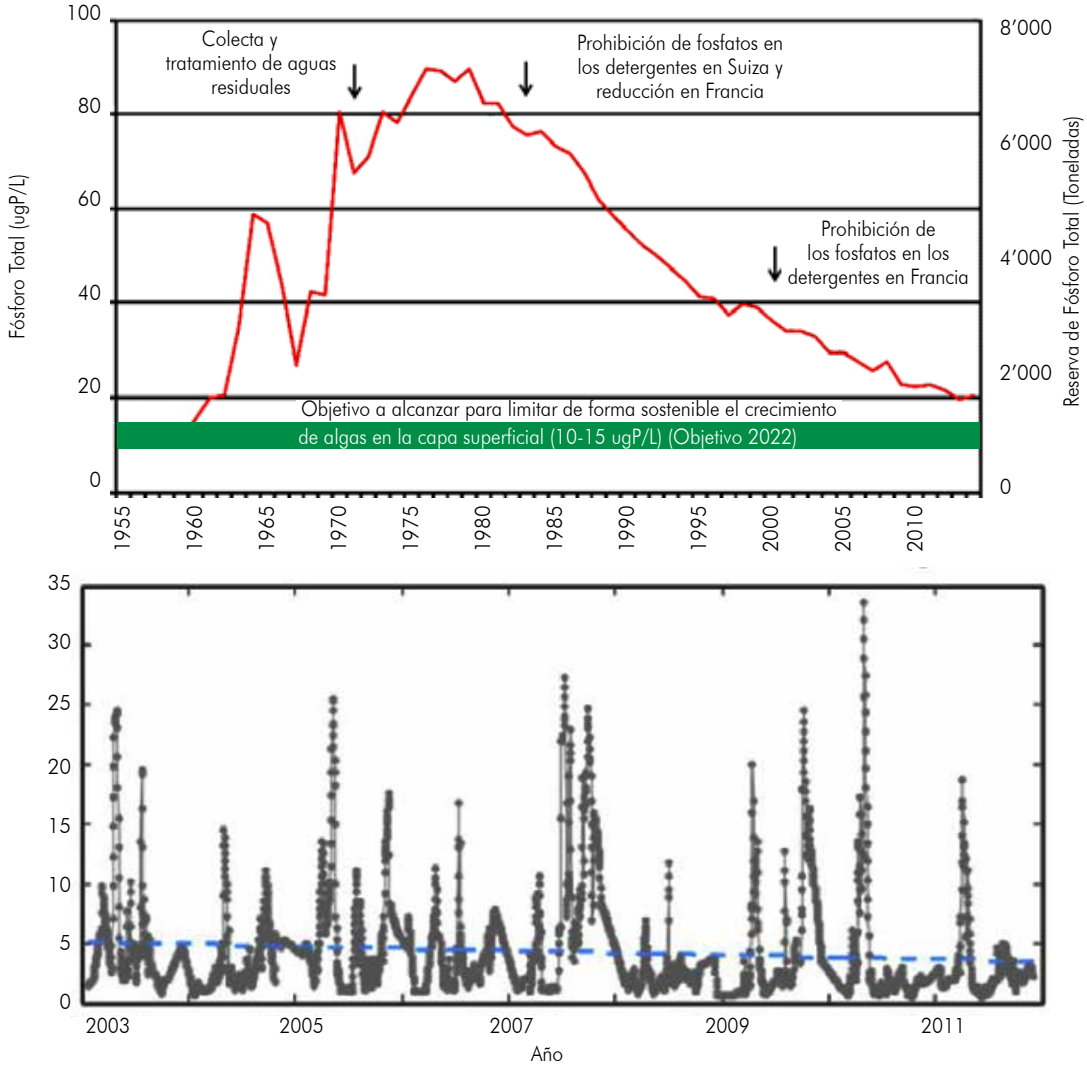
La eutrofización es una forma de contaminación de los cuerpos de agua provocada por el exceso de nutrientes, especialmente el fósforo. Este exceso desorganiza las estructuras ecológicas de los lagos, afectando sus funciones y usos, como la producción pesquera, el reciclaje de nutrientes, y el abastecimiento de agua potable. Aunque el fósforo generalmente proviene de la cuenca, las actividades humanas, como el aumento de las aguas residuales domésticas debido a la urbanización, el crecimiento poblacional y el uso de detergentes con fosfatos, incrementan significativamente las descargas de este nutriente.

Los fosfatos en algunos detergentes y productos lavavajillas ayudan a evitar la formación de depósitos calcáreos en la ropa y vajilla, sin consecuencias para la salud. Sin embargo, su acumulación en los cuerpos de agua puede generar una serie de efectos negativos. Para controlar los flujos de fósforo, es esencial mejorar el tratamiento de las aguas residuales en las PTARs y, sobre todo, prohibir el uso de fosfatos en detergentes. Esta medida ha generado un impacto muy significativo en apenas dos o tres décadas (concentraciones en ortofosfatos (PO4) y clorofila-a) demostrando ser eficaz en la reducción de la eutrofización en los lagos alpinos desde 1986 en Suiza y 2007 en Francia. En 2012, la Unión Europea restringió oficialmente el uso de fosfatos en detergentes, y en 1991, la Directiva Europea obligó a los Estados miembros a desfosforar las aguas residuales. El Consejo Federal Suizo también decretó su prohibición en 1986, lo que mejoró considerablemente la calidad del agua de los lagos alpinos.

Sin embargo, esta medida sigue siendo insuficiente debido al aumento en el uso de detergentes para lavavajillas, que en su mayoría contienen fosfatos. A pesar de la disminución de la concentración de clorofila, se observan picos esporádicos y un cambio en la composición del fitoplancton hacia especies características de condiciones oligotróficas (Fig. 33).

Sorprendentemente, en países como Bolivia y Perú, no se prohíben los fosfatos en los detergentes ni se exige a los fabricantes que indiquen su concentración en los envases. En ambas regiones, especialmente en áreas como la bahía interior de Puno (Perú) y el sector boliviano del Lago Menor, las PTARs son deficientes y la eutrofización ha aumentado en las últimas dos décadas. A partir de esta experiencia internacional, prohibir los fosfatos en los detergentes debería ser una medida prioritaria para controlar la eutrofización en estos ecosistemas.

Figura 33. Evolución de la concentración media ponderada en fosforo total en el Lago Leman (Ginebra) entre 1956 y 2006, y la concentración en clorofila-*a* entre enero de 2003 y diciembre de 2011



Fuentes: https://www.encyclopedie-environnement.org/en/water/phosphorus-and-eutrophication/ y Kiefer et al. (2015).

Nota: Arriba. Evolución de la concentración media ponderada en fosforo total (µg P/L) en el Lago Leman (Ginebra) entre 1956 y 2018. En 1971: Puesta en marcha del tratamiento de fosfatos en las PTARs. En 1985: Prohibición de los fosfatos en los detergentes en Suiza y reducción gradual de los niveles en Francia. En 2000: Prohibición de los fosfatos en los detergentes en Francia. Objetivo para alcanzar para limitar de forma sostenible el crecimiento de algas en la capa superficial 10-15 µg P/L (objetivo 2020). Abajo: En consecuencia, entre enero de 2003 y diciembre de 2011, la concentración en clorofila-a (Cl-*a*, en µg/L) en el punto central (SHL2, profundidad máxima 309 m, muestras entre 0 y 30 m), a pesar de picos esporádicos de hasta 30 µg Cl-*a*/L, disminuyó en promedio 1,5 µg Cl-*a*/L (0,2 µg Cl-*a*/L/año), de 5,5 a 4,0 µg Cl-*a*/L, en la superficie del lago, lo que corresponde a una disminución de ~27% en una década. Hoy en día, gracias a todas las medidas adoptadas en torno al Lago Leman en los últimos 50 años, la concentración de fósforo total alcanzó los 19 µg P/L en 2015. Sin embargo, ¡esto no siempre ha sido así! La eutrofización del Lago Leman ha sido un tema clave para la CIPEL (Comisión Internacional para la Protección de las Aguas

del Lago Lemán) desde su fundación en 1962, y ha sido durante mucho tiempo motivo de preocupación para el lago y para quienes trabajan en sus orillas. Los niveles de fósforo, causa de esta eutrofización, pasaron de menos de 15 µg/L antes de los años 60 a más de 80 µg P/L en los 70, con un pico de 89,5 µg P/L en 1979. Ante esta situación, todas las partes interesadas en el agua de la cuenca del Lago Lemán actuaron paralelamente en varios frentes, entre ellos:

- Un gran esfuerzo para mejorar el tratamiento de las aguas residuales, en particular mediante la construcción de un gran número de plantas de tratamiento de aguas residuales, lo que ha mejorado la calidad del agua, incluida la calidad bacteriológica, y significa que el Lago Lemán sigue siendo una importante fuente de agua potable para casi 900.000 personas.
- La prohibición de los fosfatos en los detergentes en Suiza (1986) y Francia (2007 en los detergentes domésticos, 2012 para usos industriales).
- La sensibilización del público en general, los representantes electos, la comunidad agrícola y las partes interesadas en el agua en toda la región. Fuente: L'historique du Léman: https://www.cipel.org/le-leman/presentation-du-leman/

4.1.13. Sustancias, microorganismos y partículas indeseables

Sustancias químicas eternas: las perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS)

Producidas desde principios de la década de 1950, las PFAS son hoy omnipresentes en el medio ambiente. Gracias a sus propiedades antiadherentes, termorresistentes e impermeables, estas moléculas se utilizan en diversos sectores como la industria automotriz, textil, envasado de alimentos, utensilios de cocina antiadherentes, cosméticos y productos electrónicos.

Los PFAS son solubles en agua, altamente móviles en los suelos, poseen una vida útil muy prolongada y no son metabolizados por los organismos. Estas características les permiten dispersarse ampliamente y no permanecer necesariamente en el lugar donde fueron liberados. Además, tienen la capacidad de bioacumularse en los organismos vivos, afectando sus sistemas hormonal e inmunológico, así como funciones cerebrales relacionadas con el aprendizaje y la memoria. Se han detectado PFAS en huevos de aves, peces y reptiles, así como en fetos de mamíferos, donde pueden causar retrasos en el desarrollo, abortos espontáneos tardíos, malformaciones congénitas y bajo peso al nacer. En cuanto a la salud humana, en 2019 la Unión Europea los clasificó como probables carcinógenos, implicados en el desarrollo de diversos tipos de cáncer, incluyendo los de hígado, glándulas mamarias, riñones y testículos.

La contaminación ambiental por PFAS representa una seria preocupación. Las técnicas convencionales de remediación, como los métodos físicos o químicos, no siempre son adecuadas debido a su alto costo y al riesgo de liberar otras sustancias nocivas. En cambio, la fitorremediación –el uso de plantas para degradar, estabilizar o eliminar contaminantes del suelo–, aunque es un proceso lento, se considera la opción más económica y sostenible.[29]

En 2023, la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA) propuso prohibir o restringir severamente el uso de los PFAS a partir de 2025.[30] Para más información, puede

29 https://ecotoxicologie.fr/pfas-risque-environnement

30 https://echa.europa.eu/documents/10162/67348133/pfas_status_update_report_en.pdf/fc30b694-cfb1-e9ed-7897-d9f3e4ef9ab7?t=1732088416751

consultarse el *Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes* (POP, por su sigla en inglés), un acuerdo internacional adoptado en 2001.[31] También es relevante la *Información básica sobre PFAS* publicada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).[32]

En cuanto a su eliminación del agua potable, en EE.UU. ya se emplean las mejores tecnologías disponibles, como el carbón activado granular y las resinas de intercambio iónico (Fig. 34). Hasta donde sabemos, en Bolivia y Perú aún no se han desarrollado estudios ni soluciones específicas sobre esta problemática.

Figura 34. Eliminación de PFAS en agua

Fuentes: https://www.xylem.com/es-bo/making-waves/water-utilities-news/combatting-pfas-through-proven-water-technologies/ y https://www.evoqua.com/en/markets/applications/PFAS-PFOA-PFOS-Remediation/?srsltid=AfmBOoqlnnDJ2k8DImsOV9y0huc4PgkDxAa1AvMyx0x7GsTT-5cpdfN4

Nota: Eliminación de PFAS en agua potable - Sobre la base de la nueva propuesta de la EPA 'PFAS Reglamento Nacional Primario de Agua Potable' ('PFAS National Primary Drinking Water Regulation' en inglés), MitiGATOR™, el sistema móvil de EVOQUA, así como sus sistemas permanentes, es capaz de cumplir con la normativa actualizada. Además, el aviso de prepublicación de la EPA nombra al Carbón Activado Granular (GAC en inglés) y a la resina de intercambio iónico como Mejores Tecnologías Disponibles (MTD) para el tratamiento de las PFAS. En los EE. UU., esta tecnología está siendo utilizada de manera pionera en: Stratmoor Hills Water & Sanitation District (SHWSD), en el sur de Colorado Springs; Orange County Water District (OCWD), en California; Kennebunkport & Wells Water District (KKWWD), en Maine.

Superbacterias. En términos generales, las superbacterias pueden ser bacterias, virus, parásitos u hongos que han desarrollado resistencia a múltiples tipos de medicamentos antimicrobianos. Estas cepas altamente resistentes proliferan en el medio ambiente y, en muchos casos, tienen su origen en los excrementos humanos.[33] Las superbacterias no responden a los antibióticos que normalmente se utilizan como primera línea de tratamiento, lo que dificulta el control de las infecciones que provocan.

31 https://pfas-1.itrcweb.org/wp-content/uploads/2023/03/HistoryandUse_2020Aug_Final_Spanish.pdf
32https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-pfas#:~:text=en%20la%20salud%3F-,Existe%20evidencia%20de%20que%20la%20exposición%20a%20las%20PFAS%20puede,el%20cuerpo%20humano%20largo%20tiempo
33 https://www.futura-sciences.com/

Como resultado, estas infecciones pueden derivar en mayores tasas de mortalidad por enfermedades que, de otro modo, serían tratables. En los Estados Unidos, se estima que más de 2 millones de personas se infectan cada año causando al menos 23.000 muertes.

Las superbacterias[34] cuentan por ejemplo con cepas de:

Bacterias:

- *Acinetobacter spp.*: Algunas cepas pueden causar infecciones difíciles de tratar en las vías urinarias, el torrente sanguíneo o heridas.
- *Neisseria gonorrhoeae*: Responsable de la gonorrea, puede generar complicaciones graves durante el embarazo.
- *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (MRSA): Puede causar infecciones postquirúrgicas, neumonía o septicemia.
- Cepas resistentes de *Mycobacterium tuberculosis* y otras bacterias causantes de enfermedades comunes como la gonorrea y las infecciones por estafilococos también representan una amenaza creciente.

Además, el uso excesivo de antibióticos en la ganadería, tanto para prevenir enfermedades como para estimular el crecimiento, contribuye a la diseminación de estos microorganismos en el ambiente. Las plantas de tratamiento de aguas residuales se consideran puntos críticos ("puntos calientes") para la propagación de superbacterias. Estudios han demostrado que la presencia de bacterias resistentes se correlaciona con un bacteriófago específico que solo se encuentra en excrementos humanos y no se desarrolla fuera del intestino.

Virus:

- *VIH (virus de la inmunodeficiencia humana)*: Algunas cepas han desarrollado resistencia a los antirretrovirales, dificultando el tratamiento y aumentando las tasas de complicaciones y mortalidad.

Parásitos:

- *Plasmodium spp.*: Responsable de la malaria, algunas cepas resistentes a los medicamentos pueden provocar formas más graves de la enfermedad y una mayor propagación.

Hongos:

- *Candida auris*: Este hongo emergente puede causar infecciones graves en el torrente sanguíneo, especialmente en personas inmunocomprometidas.

34 https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/infectious-diseases/expert-answers/superbugs/faq-20129283

El abuso de antibióticos y desinfectantes favorece la resistencia bacteriana[35]

Un hecho poco conocido es que el uso de desinfectantes como la lavandina también contribuye al desarrollo de resistencias bacterianas, fenómeno conocido como antibioresistencia. Podríamos estar entrando en una era "posantibióticos", en la cual una simple herida o una infección común podrían volverse potencialmente mortales. Actualmente, la antibioresistencia causa alrededor de 700.000 muertes al año en todo el mundo y, si las tendencias actuales continúan, esta cifra podría alcanzar los 10 millones de muertes anuales para 2050 (INSERM, 2018[36]). Las principales causas de esta problemática incluyen: la prescripción excesiva o inadecuada de antibióticos, como la interrupción prematura del tratamiento o su uso innecesario, especialmente en casos de infecciones virales; y el uso generalizado de productos biocidas, como pesticidas, conservantes antibacterianos, antisépticos y desinfectantes.

Estos productos tienen una acción biocida, es decir, contienen sustancias activas destinadas a destruir, repeler o neutralizar organismos nocivos como bacterias, virus, hongos o insectos. Mediante un fenómeno llamado resistencia cruzada, una bacteria que se vuelve resistente a un desinfectante puede también desarrollar resistencia a otros biocidas, incluidos antibióticos. Las bacterias resistentes pueden transmitir sus genes de resistencia a miles de millones de descendientes durante la reproducción. Además, este material genético puede transferirse a otras bacterias, incluso de especies diferentes, por simple contacto. Esta transferencia horizontal es más frecuente cuando las bacterias están expuestas a productos biocidas.

Paradójicamente, los hogares y hospitales no son ambientes propicios para el desarrollo de estas resistencias, ya que en estos entornos se utilizan concentraciones de desinfectantes muy superiores a las que las bacterias pueden tolerar. Sin embargo, una vez vertidos en las aguas residuales, estos productos se diluyen y mezclan con otros residuos químicos –como restos de antibióticos y antisépticos– creando un entorno ideal para la persistencia y evolución de bacterias resistentes. Cuando estas bacterias llegan al medio natural, pueden contaminar animales o humanos, quienes a su vez pueden diseminarlas, propagando así los genes de resistencia.

Dado este riesgo, la antibioresistencia debería ser considerada en la vigilancia ambiental, tal como lo plantea la Directiva Marco del Agua[37] de la Unión Europea. También se ha comenzado a cuestionar el impacto del uso de cloro en la potabilización del agua, ya que esta no es completamente estéril: algunas bacterias resistentes al cloro pueden sobrevivir y mantenerse activas.

Por lo tanto, además de promover un uso racional de los antibióticos, es fundamental reducir el uso innecesario de otros productos biocidas, especialmente en los ámbitos

35 https://ecotoxicologie.fr/desinfectants-bacteries-resistantes

36 Resistencia a los antibióticos: un fenómeno masivo y preocupante: https://www.inserm.fr/dossier/resistance-antibiotiques/

37 Conferencia sobre la resistencia a los antibióticos (2019): https://sante.gouv.fr/actualites/presse/communiques-de-presse/article/antibioresistance-une-nouvelle-strategie-interministerielle-ambitieuse-a-10-ans

doméstico e industrial. Las mejores formas de frenar la aparición de nuevas superbacterias incluyen el uso responsable de los antibióticos, la prevención de infecciones mediante prácticas de higiene como el lavado de manos y la desinfección de los alimentos, la reducción de riesgos de contagio a través del distanciamiento cuando sea necesario, la vacunación según las recomendaciones médicas, y el uso exclusivo de medicamentos prescritos por profesionales de la salud. Solo mediante estas acciones coordinadas podremos proteger la eficacia de los tratamientos actuales y prevenir una crisis sanitaria de gran escala.

Polución silenciosa de los microplásticos

Cuando no se desechan ni reciclan adecuadamente, los plásticos terminan en el medioambiente, donde pueden persistir durante siglos, degradándose en partículas cada vez más pequeñas. Estas partículas, conocidas como microplásticos, tienen generalmente un tamaño inferior a 5 mm y consisten en una mezcla de polímeros, aditivos e impurezas.

La mayoría de los microplásticos se produce de forma involuntaria a partir de objetos plásticos de gran tamaño que se degradan con el uso o tras ser desechados, como utensilios, carcasas de equipos electrónicos, componentes de vehículos, neumáticos, cables y textiles sintéticos. También existen microplásticos primarios, fabricados intencionalmente como pequeñas partículas que se incorporan a productos con usos específicos, tales como fertilizantes, productos fitosanitarios, cosméticos, detergentes, pinturas, productos de limpieza industrial y doméstica, materiales utilizados en las industrias del petróleo y gas, e incluso en rellenos para campos deportivos de césped artificial (ECHA – European Chemicals Agency)[38]. Solo en los países de la Unión Europea y del Espacio Económico Europeo, se estima que se utilizan aproximadamente 145.000 toneladas de microplásticos al año, de las cuales unas 0,27 toneladas por cada 50 toneladas empleadas terminan vertidas en el medioambiente.

Altas concentraciones de microplásticos pueden provocar daños físicos en organismos vivos, además de inducir procesos de inflamación y estrés. Sin embargo, el grado de contaminación por microplásticos sigue siendo desconocido en muchas regiones del mundo, debido a la falta de estudios y a las limitaciones de los métodos de medición actuales. Esto se acentúa aún más en el caso de los nanoplásticos (≤ 0,001 mm), que son particularmente difíciles de detectar y evaluar.[39] Existen grandes incertidumbres en torno a los riesgos ecológicos y sanitarios de esta contaminación, aunque se prevé que podrían generarse impactos ambientales significativos en las próximas décadas. Hasta la fecha, no se han realizado estudios a gran escala que evalúen los riesgos para la salud humana. Por ello, en 2019, la Comisión Europea publicó un informe científico titulado *"Environmental and Health Risks of Microplastic Pollution"*, donde compila el estado actual del conocimiento sobre este problema.[40]

38 https://echa.europa.eu/es/hot-topics/microplastics#:~:text=Los%20microplásticos%20son%20partículas%20sólidas,También%20pueden%20contener%20impurezas%20residuales

39 https://scientificadvice.eu/advice/a-scientific-perspective-on-microplastics-in-nature-and-society/

40 https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f235d1e3-7c4d-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en

En el entorno del Lago Titicaca el plástico se ha apoderado del espacio rural, por lo que no hay dudas que los microplásticos están presentes tanto en ambientes terrestres como acuáticos. Este fenómeno es especialmente visible a lo largo de los ríos de la Cuenca Katari, particularmente en Chojasivi y en las zonas cercanas a la desembocadura del río Katari en el Lago Menor[41]. Sin embargo, hay una flagrante falta de estudios. El desarrollo turístico contribuye en revelar la omnipresencia de la polución plástica. De hecho, el turismo reclama un paisaje libre de plástico, mientras que los turistas y el turismo son uno de los factores responsables de su acumulación. Esta paradoja fue documentada con una visión antropológica en la isla de Amantaní[42] (frente a la Bahía de Puno, Perú) por Gascon (2022), quien apunta que el discurso aparentemente medioambientalista apenas oculta una mera preocupación sobre la estética del paisaje.

Recientemente, la academia ha comenzado a interesarse en caracterizar y cuantificar la contaminación por microplásticos en el Lago Titicaca. Aunque los estudios aún son escasos y preliminares, ya se han obtenido hallazgos relevantes. Por ejemplo, Paredes-Zavala *et al.* (2017) investigaron la presencia de microplásticos tanto en la columna de agua como en los tejidos de peces como el carachi amarillo (*Orestias luteus*) y el pejerrey argentino (*Odontesthes bonariensis*), en zonas con alta afluencia turística y actividad pesquera. Detectaron un promedio de 176 partículas/L en aguas superficiales, 23 partículas/L en la columna de agua, y entre 25 y 33 partículas por individuo en los peces analizados.

En el único estudio registrado en la Web of Science, Loayza *et al.* (2022) evaluaron la presencia de microplásticos en el agua superficial y en los estómagos de cuatro especies de peces comerciales en el Lago Menor del Titicaca (*Orestias luteus*, *O. agassizii*, *Trichomycterus dispar* y *Odontesthes bonariensis*), y relacionaron los resultados con los gremios tróficos y las zonas de pesca. Aunque observaron bajas tasas de ingestión en general, las mayores concentraciones se detectaron en las aguas del sur del lago (103 partículas/L).

Por su parte, Chambi Huaman & Yanes Martínez (2023) estudiaron playas como Chifrón, Chatuma y Juli, recolectando muestras en arena, sedimentos (tamizado entre 1 y 5 mm) y aguas superficiales (malla de 200 µm). Encontraron polímeros como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno de alta densidad (HDPE) y tereftalato de polietileno (PET).

Más recientemente, Riveros Urbina (2024) analizó microplásticos en peces nativos del género *Orestias spp*, destinados al consumo humano. Su estudio reveló que la mayor abundancia de microplásticos se encontraba en el músculo de *O. ispi*, superando los niveles detectados en O. *luteus*.

41 https://www.la-razon.com/sociedad/2022/07/12/los-plasticos-causan-danos-y-muerte-en-el-titicaca/
42 https://www.albasud.org/noticia/es/1481/plasticos-en-el-lago-titicaca-turismo-y-residuos-no-biodegradables-en-los-andes-peruanos

4.1.14. Reemplazar progresivamente los rellenos sanitarios por centros municipales de acopio selectivo de residuos - Puntos de entrega voluntaria

En los rellenos sanitarios de zonas urbanas se entierran los residuos mezclados de todo tipo, recolectados en contenedores no selectivos. Los residuos recolectados en contenedores selectivos (papel-cartón, plásticos, metales, vidrios) deben enviarse a centros de reciclaje. Los residuos domésticos orgánicos (como restos de frutas y hortalizas) deben enviarse a centros de compostaje o ser compostados en los hogares o en huertos urbanos comunitarios. Así, al eliminar la recolección indiscriminada y reemplazarla por recolección selectiva, los rellenos sanitarios se volverán progresivamente innecesarios, ya que representan un riesgo para el medioambiente y la salud pública.

De hecho, según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), todos los rellenos sanitarios municipales acabarán generando filtraciones al medio ambiente. A pesar de todas las precauciones, los revestimientos se degradan y las bombas dejan de funcionar. Los análisis de aguas subterráneas detectan estas fugas, pero poco se puede hacer, ya que los rellenos no pueden equiparse con nuevos revestimientos. Incluso cuando funcionan "correctamente", pueden causar graves problemas. El principal es la emisión de metano (CH_4), producto de la descomposición de la materia orgánica, un potente gas de efecto invernadero que, durante un periodo de 100 años, puede ser hasta 36 veces más eficaz que el dióxido de carbono en atrapar calor en la atmósfera. La forma más eficaz de eliminar progresivamente los rellenos sanitarios es evitar la generación de residuos. Según la Alianza Internacional Residuo Cero (ZWIA), el concepto de residuo cero aplica a todo tipo de residuos y forma parte de un movimiento más amplio hacia una economía circular, que busca mantener los materiales en uso y fuera de los rellenos sanitarios.

Una alternativa es implementar centros municipales o intermunicipales de acopio selectivo de residuos como puntos de entrega voluntaria (Fig. 35), los cuales deben convertirse en nuevas fuentes de materia prima para las empresas recicladoras. Estos centros pueden ser accesibles en vehículos particulares y el costo del servicio puede calcularse según la cantidad de residuos entregados. Los centros más modernos también aceptan objetos voluminosos (madera, metales, materiales de construcción, ramas, etc.) y productos tóxicos (como pilas y baterías), e incluso algunos funcionan de forma totalmente automatizada.

Por todo lo anterior, se justifica una revisión profunda de las políticas en materia de residuos sólidos en Bolivia.

Figura 35. Dos tipos de Centros Municipales de Acopio Selectivo de Residuos

Fuentes: https://www.castelnau-le-lez.fr/environnement/collecte-des-dechets/le-point-proprete-decheterie-de-montpellier-mediterranee-metropole/ y https://www.atacamanoticias.cl/2021/07/09/seremi-del-medio-ambiente-valoro-implementacion-de-8-puntos-limpios-en-atacama-para-fomentar-el-reciclaje/

Nota: Dos tipos de Centros Municipales de Acopio Selectivo de Residuos. A izquierda: en Castelnau-le-Lez, Hérault, Francia. A derecha: en Atacama, Chile.

4.1.15. Constituir programas de recojo de basura en municipios rurales

El tratamiento de aguas residuales municipales y la gestión de residuos sólidos también deben abarcar a las comunidades de los municipios rurales, y no limitarse únicamente al área metropolitana de El Alto-Viacha. Estas comunidades deberían contar con un servicio mínimo de acopio de residuos, preferentemente clasificados, en un área cercana, y con una recolección semanal mediante camiones de basura hacia centros de clasificación selectiva ubicados en zonas urbanas. Para que este sistema sea sostenible es necesario establecer una tarifa razonable y diferenciada por usuario, por ejemplo, según su nivel de ingresos. Asimismo, y con el fin de reducir o eliminar comportamientos irresponsables hacia el medioambiente, las autoridades competentes deben implementar programas de sensibilización y educación ambiental, comenzando por las unidades educativas y los núcleos familiares (ver soluciones no estructurales). Este cambio de actitudes y de paradigma, basado en ciudadanos convencidos de que sus acciones cuentan, es lo que generará la transformación más profunda y rápida; no la simple promulgación de nuevas normas, ni la espera de que el Estado actúe. Todos somos responsables y parte de la solución.

¿Qué hay que recordar?

OTRAS MEDIDAS ESTRUCTURALES POSIBLES

Es fundamental considerar la amplia contaminación por metales, metaloides y antibióticos de uso farmacéutico presentes en aguas residuales, tratadas o no, así como sus productos de transformación. Estos han sido detectados por Archundia *et al.* (2017a, b; 2018; 2019; 2021) y Brienza *et al.* (2017) en las aguas de los ríos de la cuenca Katari, los suelos, las aguas subterráneas y el Lago Titicaca. La aparición de genes de resistencia a las sulfonamidas en cuerpos de agua (aunque no en suelos) podría conducir al desarrollo de superbacterias resistentes a múltiples antibióticos comúnmente utilizados para tratar infecciones humanas y animales. Además, se debería comprobar la presencia de sustancias químicas persistentes (PFAS) y microplásticos en las aguas residuales, debido a los riesgos que representan para la salud humana y animal.

Descentralizar el tratamiento de aguas residuales mediante mini-PTARs y PTARs compactas constituye, sin duda, la estrategia más eficiente y económica, tanto en zonas urbanas como rurales, complementando a las PTAR convencionales de Puchukollo y Tacachira.

Por otro lado, el cierre progresivo de los rellenos sanitarios debe acompañarse de un fuerte incentivo al reciclaje selectivo de la mayoría de los residuos sólidos (plásticos, vidrio, papel y cartón), la prohibición de envases plásticos de un solo uso, la separación domiciliaria de residuos, un sistema generalizado de devolución de botellas plásticas y de vidrio, así como la relocalización progresiva de industrias en parques industriales equipados con sus propias PTAR especializadas.

4.2. Soluciones de ingeniería ecológica (basadas en la naturaleza)

La **ingeniería ambiental** es un campo que se consolidó en las universidades a partir de los años 60, inicialmente conocido como **ingeniería sanitaria**. Aunque los ingenieros ambientales aplican principios científicos, su formación suele enfocarse en el uso de tecnologías como tanques de sedimentación, depuradores, filtros de arena y tanques de floculación. Es importante no confundir esta disciplina con la bioingeniería y la biotecnología. La **bioingeniería** implica la manipulación de la estructura genética[43] de las células para producir variedades y organismos capaces de cumplir funciones específicas. Por su parte, la **biotecnología** también actúa a nivel celular o microcelular, y aunque ofrece importantes aplicaciones, genera enormes costes y preocupaciones éticas y ambientales.

En contraste, la **ingeniería ecológica** o **ecotecnología** es profundamente distinta. Es definida como el diseño de ecosistemas que beneficien tanto a la naturaleza como a las sociedades humanas. En lugar de dominar o transformar la naturaleza, busca que las actividades humanas se alineen con los procesos ecológicos, reconociendo los múltiples valores de los ecosistemas, conservándolos y restaurándolos. La ingeniería ecológica se inspira en el funcionamiento natural de los ecosistemas, evitando la introducción de elementos artificiales o no compatibles con los entornos locales.

43 Las 10 Principales Empresas Líderes a Nivel Mundial en el Mercado de la Biotecnología en 2024: https://www.emergenresearch.com/es/blog/top-10-empresas-en-el-mercado-de-biotecnología; también existen empresas de biotecnología en Bolivia, como por ej.: https://www.biotem.com.bo/quienes-somos/

Figura 36. Humedal experimental para la purificación biológica natural

Fuentes: https://senr.osu.edu/research/schiermeier-olentangy-river-wetland-research-park, https://www.dispatch.com/story/news/technology/2012/09/30/biologist-bill-mitsch-spent-career/23707108007/, Mitsch (2005) y Mitsch W.J. (2012) 'En recuperación de ecosistemas, la más sabia es la Madre Naturaleza', https://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/03/120308_humedales_naturales_am

Nota: El humedal experimental pionero para la purificación biológica natural de las aguas del río Olentangy, Schiermeier Olentangy River Wetland Research Park, 352 West Dodridge Street, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.

Uno de los pioneros de esta disciplina es el Prof. William J. Mitsch, discípulo del reconocido ecólogo estadounidense Prof. Howard T. Odum[44], experto en ecología de ecosistemas acuáticos. Mitsch desarrolló el campo de la ingeniería ecológica y fue autor del primer libro especializado sobre el tema. En 1992 fundó y fue editor en jefe de la revista científica *Ecological Engineering*. Durante 26 años trabajó como profesor en la Universidad Estatal de Ohio (OSU), donde creó el Parque de Investigación de Humedales del río Olentangy: un laboratorio de 20 hectáreas diseñado para tratar biológicamente las aguas del río mediante lagunas con macrófitas acuáticas (Fig. 36).[45] Hoy, este parque es reconocido como un Humedal de Importancia Internacional bajo la Convención Ramsar.

44 Prof. Howard T. Odum, pionero en la ecología funcional de complejos ecosistemas; ver bibliografía en: https://www.oxfordbibliographies.com/display/document/obo-9780199830060/obo-9780199830060-0190.xml

45 Mitsch también realizó importantes contribuciones a la ecología de humedales, siendo autor principal del manual *Wetlands*, cuya quinta edición sigue siendo referencia internacional en la enseñanza del tema. Cerró su carrera como director del Everglades Wetland Research Park, en la Florida Gulf Coast University, en Naples, Florida. Junto a Jørgensen, presentó los principios de la ecotecnología en su influyente obra Ecological Engineering (Mitsch & Jørgensen, 1989), que ha tenido varias ediciones posteriores.

4.2.1. Implementar humedales construidos con macrófitas acuáticas (corredores verdes)

Los Grandes Lagos del mundo están siendo degradados por la sobreexplotación de recursos, el calentamiento acelerado, la destrucción de hábitats y ecosistemas, la pérdida de especies y el aumento de la contaminación (Jenny *et al.*, 2020). Para restaurar la calidad del agua en lagos poco profundos, una alternativa efectiva, rentable y respetuosa con el medio ambiente es la **fitorremediación**.[46] Para el control de los nutrientes y los sedimentos desde fuentes puntuales y difusas, las macrófitas acuáticas flotantes, sumergidas y emergentes, así como los humedales, tanto los naturales como los construidos, ofrecen óptimas posibilidades de aplicar la ingeniería ecológica.

Los humedales, en general, son ecosistemas de transición entre sistemas terrestres y acuáticos, donde el agua está muy próxima a la superficie o cubre el suelo con poca profundidad. A diferencia de los humedales naturales, los humedales construidos se diseñan con precisión, optimizando el flujo hidráulico, el tiempo de retención y la selección de especies de macrófitas para maximizar su eficacia en la depuración del agua (Fonder & Headley 2010; Mitsch & Gosselink 2000). Por estas razones, suelen ser más eficientes para el tratamiento de aguas residuales que los humedales naturales, los cuales pueden ser difíciles de mantener y de resultados bastante impredecibles.

Las macrófitas acuáticas aportan numerosos beneficios al funcionamiento de estos sistemas. Por un lado, remueven nutrientes y contaminantes presentes en el agua, por lo que tienen que ser cosechadas periódicamente. Además, oxigenan ambientes con baja concentración de oxígeno (anóxicos), y sus tallos y raíces proveen sustratos para bacterias adheridas, excretan compuestos antibacterianos, además de reducir la influencia del viento permitiendo la sedimentación de sólidos en suspensión y por consecuencia aumentando la transparencia del agua.

Durante la década de 1990, la tecnología de los humedales construidos (o artificiales) se extendió a todos los continentes. En los años 2000, se volvieron un método certificado de tratamiento de aguas residuales en muchos países del mundo. En algunos países, como China, el número de humedales artificiales supera los cien mil. También crece su construcción en Sudamérica, especialmente en Colombia, Argentina y Chile. Donde se utilizan eficazmente en las ciudades para tratar las aguas residuales, las aguas grises, los desbordamientos de aguas pluviales y la escorrentía, incluso para reciclar el agua dentro de las ciudades, y forman parte de los sistemas de drenaje urbano sostenible.

En Bolivia, la **limnología aplicada** –en particular la **ecología acuática experimental**– está aún poco desarrollada. Hasta la fecha, se han realizado pocos experimentos para determinar la eficacia de las macrófitas acuáticas (sumergidas, flotantes y emergentes) en la remoción de nutrientes y la mitigación de la eutrofización en lagos del país.

Con el fin de evaluar el potencial de los humedales construidos para tratar aguas residuales en el lago Titicaca, Michiels (2019) hizo un experimento en la Bahía de

46 El uso de plantas para la extracción, inmovilización, contención o degradación de contaminantes, nutrientes y/o materia orgánica.

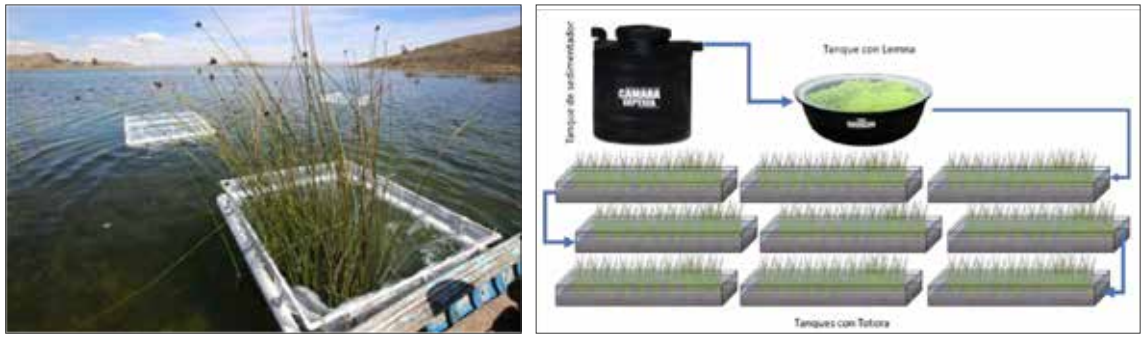
Cohana. Instaló 15 "recintos" *in situ* (pequeños espacios cerrados dentro del lago, llamados '**mesocosmos**') y colocó diferentes combinaciones de plantas acuáticas nativas: unas veces solo una especie, otras veces varias juntas, y también un grupo sin plantas, como control.

A todos los recintos les añadió un poco de agua muy contaminada del río Katari, con nutrientes, materia orgánica y bacterias. Durante cuatro semanas, midió cómo cambiaban la calidad del agua y la presencia de microorganismos.

Los resultados fueron variados, pero mostraron que en general las plantas ayudaban a reducir los fosfatos (hasta un 95 %), los nitratos y las bacterias fecales. También aumentaron las microalgas verdes y el zooplancton. Aunque no se vio una diferencia clara entre los distintos tipos de plantas, la presencia de vegetación tuvo efectos positivos. Esto sugiere que vale la pena seguir investigando para entender mejor cómo funcionan estos sistemas y cómo usarlos para tratar aguas contaminadas.

En el marco del proyecto piloto 03-B-03 PNUD/GEF GIRH TDPS[47], Achá (2022) analizó experimentalmente los efectos de la fitorremediación con Totora, tanto enraizada como sobre soportes flotantes, en el control de nutrientes y la eutrofización. Para la Totora enraizada, utilizó un diseño experimental factorial sin réplica, compuesto por un tanque alimentado con agua contaminada del río Katari, que drenaba hacia un tanque con *Lemna* (una macrófita flotante), y luego hacia una sucesión de nueve tanques (bebederos) con Totora cultivada *in vitro*, instalados al aire libre en el campus de la UMSA en Cota Cota (Fig. 37). Este tipo de fitorremediación no está concebido para sustituir el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales en las PTAR de ciudades como El Alto, Viacha o Laja. Más bien, está pensado para tratar fuentes de contaminación dispersa que no pueden ser atendidas por una PTAR, o como complemento al tratamiento primario y/o secundario de estas plantas. En zonas rurales, donde este sistema resulta más adecuado, el uso de herbicidas representa un riesgo para las Totoras. No obstante, su implementación es mucho más económica, especialmente como complemento de una mini-PTAR.

Figura 37. Enfoques distintos para comprobar el papel de la Totora en humedales



Nota: Dos enfoques distintos para comprobar el papel de la Totora en humedales construidos en el tratamiento de las aguas residuales vertidas por el río Katari al lago Titicaca: (a) en recintos de polietileno transparente in situ ('enclosures' en inglés) de 1,5 m x 1,5 m x 1,2 m de profundidad con 2,2 m3 de volumen (Michiels 2019, a izquierda): y (b) en tanques de PVC (bebederos) de unos 2 m de largo fuera del suelo (Achá 2022, a derecha).

47 Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo/Fundo Mundial para el Medioambiente, Gestión Integral de Recursos Hídricos, sistema hídrico Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa (2019-2022).

Los experimentos demostraron que la Totora tiene la capacidad de secuestrar nutrientes (nitrógeno y fósforo) de manera significativa. El siguiente paso es verificar la eficacia y viabilidad de este tipo de sistemas a escala real en condiciones de campo.

En Bolivia y en el Perú se han realizado numerosos estudios descriptivos y algunos experimentos empíricos para evaluar el rol de la Totora en el control de la contaminación y la eutrofización. Sin embargo, estos han sido puntuales y no alcanzan la escala necesaria de humedales construidos de mayor tamaño. Por ejemplo, se pueden citar los abundantes trabajos realizados desde los años 1980 para demostrar la gran eficiencia de la Totora como filtro biológico natural en la remoción de nutrientes y contaminantes metálicos para el tratamiento de aguas residuales, como los de Álvarez (1987), Arze (1983,1984), Arze & Álvarez (1987, 1990), Arze et al. (1989), Salt *et al.* (1998), Costantini *et al.* (2004), Núñez-López *et al.* (2004), Calcina Rondan (2009), Huanacuni Ajrota (2012) y Blanco (2019); ver síntesis en Bocángel (2003). Actualmente, se reinician investigaciones que ignoran los resultados obtenidos hace varias décadas y que serían útiles para emprender experimentos a escala real. Asimismo, se revelo que se implementó una laguna de 0,8 ha con totora integrada en la planta purificadora (PTAR) de Puchukollo (Guerra, 2000). Inicialmente, eliminó 68-93% de la carga orgánica, luego no superó los 30% debido a la alta carga orgánica en el afluente que no puede pasar los 150 kg BOD/ha/día para sistemas con flujo subsuperficial horizontal. Sin embargo, la remoción de nutrientes fue siempre muy baja, posiblemente debido al pH constantemente alcalino, las bajas temperaturas (~12º C), y las altas concentraciones de sulfuros en el afluente, que no se reducían en la laguna. Finalmente, la laguna se volvió anaeróbica con altas cargas orgánicas, por lo que las plantas de totora empezaron a morir y esta iniciativa fue abandonada. Este fracaso demostró que especialistas en ingeniería ecológica eran indispensables para trasplantar, cosechar y podar tallos, así como controlar el caudal y las características del afluente. La revista científica *Ecological Engineering* representa una fuente esencial de conocimientos y experiencias en relación con el diseño eficaz y el rendimiento de los humedales con macrófitas acuáticas.

4.2.2. Implementar jardines flotantes con macrófitas acuáticas

Los humedales construidos están diseñados para imitar la función natural de los humedales en la depuración de aguas residuales mediante procesos físicos, químicos y biológicos. En la década de 1950, en Alemania, se descubrió que las macrófitas acuáticas eran capaces de eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos, lo que llevó a la implementación del primer humedal construido en 1974 en ese país. Desde entonces, esta tecnología ha sido reconocida como una tecnología eficaz y viable para el tratamiento de aguas residuales, tanto en países desarrollados como en desarrollo (Wood 1995, Vymazal 2005, Babatunde *et al.,* 2008).

A partir del análisis de los humedales construidos en China durante las tres últimas décadas, Zhang *et al.* (2021) identificaron casos representativos de aplicación de humedales construidos tradicionales, sistemas de estanques y sistemas combinados de estanques y humedales. Su estudio evidenció una mejora en el nivel de investigación en esta área, así como el reconocimiento de esta tecnología como una solución efectiva y de bajo costo

para el control de la contaminación del agua en China. También destacaron una tendencia creciente hacia el uso de humedales construidos de gran escala (>100.000 m^3/día). No obstante, señalaron que el desarrollo de estos sistemas estaba limitado por factores socioeconómicos y condiciones climáticas. En el caso de los humedales construidos destinados a la protección de fuentes de agua potable, concluyeron que se requiere investigar enfoques de tratamiento intensivo en el futuro.

Los **humedales flotantes** son una herramienta de la ingeniería ecológica y constituyen una variante de los humedales construidos. Inicialmente fueron desarrollados en China para absorber el exceso de nutrientes descargados de forma difusa en los ríos, producto de la agricultura intensiva y/o de aguas residuales. También se han utilizado en lagunas y lagos para reducir la eutrofización. Generalmente, emplean macrófitas emergentes que crecen sobre una plataforma flotante y absorben nutrientes como fósforo y nitrógeno directamente del agua a través de sus raíces. La cosecha de la biomasa aérea (la parte de la planta que crece sobre el agua) permite retirar del sistema los nutrientes que han sido absorbidos. Estos humedales también ayudan a disminuir la fuerza de las olas, lo que favorece la sedimentación de partículas y el enterramiento de nutrientes. Además, al dar sombra al agua, reducen la temperatura y la entrada de luz solar, lo que limita el crecimiento de microalgas en la columna de agua (Pavlineri *et al.,* 2017). Gracias a estas ventajas, y a su bajo costo de implementación y mantenimiento, los humedales flotantes se han vuelto una opción cada vez más popular para mitigar la eutrofización (Colares *et al.,* 2020).

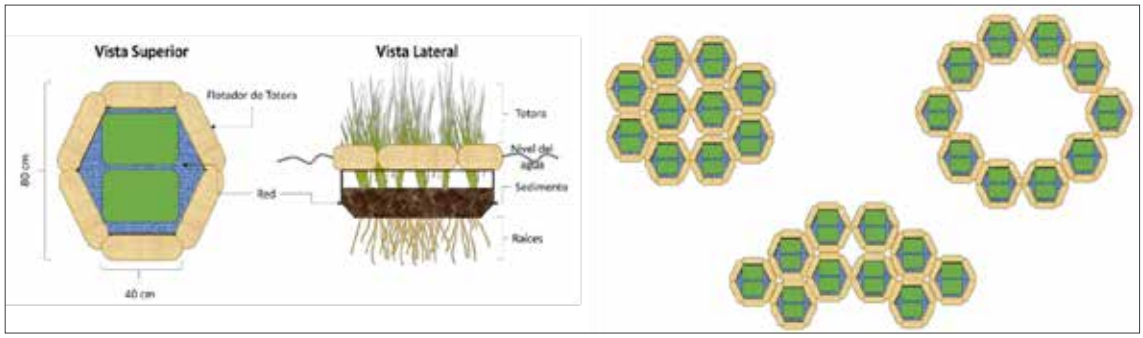
Aunque los humedales flotantes se usan en muchas partes del mundo, la mayoría de los estudios aún se hacen en laboratorios o a pequeña escala. Uno de estos estudios fue realizado por Karstens *et al.* (2021) en lagunas costeras del sur del mar Báltico. Allí instalaron dos humedales flotantes con forma de isla (de 3,5 metros de diámetro), donde plantaron diferentes especies como *Typha*, *Juncus*, *Iris* y otras. En lugar de usar materiales plásticos, usaron una estructura de metal rellena con tallos secos de caña local (*Phragmites australis*). Gracias a la variedad de raíces que se formó, las islas lograron limpiar el agua al reducir los nutrientes contaminantes, y al mismo tiempo sirvieron como refugio para peces y otros animales acuáticos. En resumen, estos humedales flotantes funcionaron como filtros naturales y como hábitats con mucha vida.

Otro estudio, hecho por Laabassi *et al.* (2015) en una región tropical seca, usó tanques pequeños de 75 litros con agua residual doméstica. Probaron dos plantas acuáticas: una flotante (*Salvinia*) y otra de tallo largo (*Phragmites*), tanto por separado como juntas. El mejor resultado fue cuando las pusieron combinadas, porque lograron eliminar hasta el 97 % de la materia orgánica y gran parte del nitrógeno y fósforo del agua. Esto demostró que usar plantas acuáticas mezcladas puede ser una solución simple y barata para limpiar aguas contaminadas, sobre todo en zonas donde no hay sistemas de tratamiento.

Achá (2022), en su estudio mencionado anteriormente, también llevó a cabo el primer experimento con un sistema flotante utilizando flotadores hechos de Totora seca, donde la planta crecía con gran parte de sus raíces expuestas en la columna de agua (Fig. 38). En el altiplano boliviano, aparte de este experimento, se conoce la propuesta del MMAyA (2017) para una planta piloto con filtros de macrófitas flotantes (Totora) en la isla de

Suriqui (Fig. 39). Sin embargo, hasta donde se sabe, este piloto no fue implementado ni evaluado en campo a escala real, y no se han encontrado resultados disponibles. La propuesta sugería desarrollar un prototipo de 330 m², con capacidad para fitorremediar 300 litros de agua por día, y soportar hasta 300 kg de peso.

Figura 38. Experimentos en escala reducida sobre humedales construidos flotantes



Fuente: Achá (2022).

Nota: Experimentos en escala reducida sobre humedales construidos flotantes para tratar aguas residuales del Lago Titicaca con Totora. A izquierda: Esquema general del diseño de las unidades flotante con Totora (diámetro de uno 0,5 m). A derecha: Diseño modular del sistema en tres ejemplos de disposiciones.

Figura 39. Restos abandonados de los módulos de humedales construidos flotantes con Totora de la propuesta MMAyA (2017)

Fuentes: Fotos de X. Lazzaro.

Nota: Restos encontrados en la bahía de la isla Quehuaya, frente a la isla Suriqui, en julio 2021. Fueron construidos por los comunarios de Quehuaya. Encontramos 4 módulos. No hay evidencias que los elementos de Totora flotantes hayan sido concluidos.

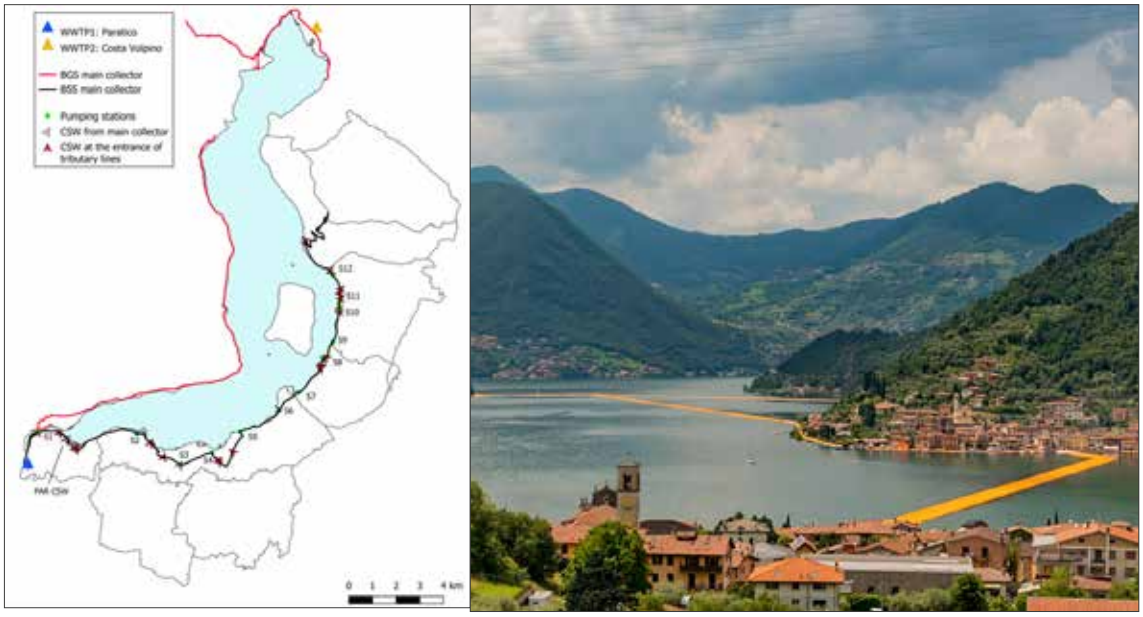
4.2.3. ¿Implementar un colector circunlacustre de alcantarillado combinado de aguas residuales y pluviales, con tratamiento previo a su descarga al Lago Menor?

Eliminar todas las descargas de aguas residuales a un lago eutrofizado es una condición clave para su recuperación. Sin embargo, instalar plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en los ríos afluentes puede no ser suficiente, especialmente si estas plantas no operan con la eficacia necesaria. Es el caso de la cuenca Katari, cuyas aguas residuales siguen vertiéndose en el litoral sur (Chojasivi) de la Bahía de Cohana, pese a contar con infraestructura de tratamiento.

En este contexto, algunas experiencias internacionales han optado por soluciones más integrales. Una de ellas consiste en instalar un colector de alcantarillado que rodee el lago para interceptar todas las descargas de aguas residuales antes de que lleguen al cuerpo de agua. Este tipo de medida fue implementada en 1962 en el Lago de Annecy, en los Alpes franceses, y permitió una rápida recuperación ecológica (re-oligotrofización[48]). En otros lagos como el Lago Lemán (o Lago de Ginebra) y el Lago del Bourget, también en Francia, se aplicaron estrategias similares, aunque con mejoras más lentas (Montuelle & Clémens, 2015). Un caso más complejo es el del Lago Erie, el menos profundo de los Grandes Lagos norteamericanos. Rodeado por zonas industrializadas y urbanas desde el siglo pasado, sufre hoy una creciente eutrofización debida principalmente a la contaminación difusa de nutrientes y agrotóxicos procedentes de la agricultura intensiva. En este caso, el U.S. Corps of Engineers (1982) recomendó implementar un colector costero que recoja tanto aguas residuales como escorrentías urbanas, a fin de reducir la carga contaminante.

Otro ejemplo relevante es el del Lago Iseo, en el norte de Italia (Fig. 40), donde se implementó un sistema de alcantarillado combinado alrededor del lago.

Figura 40. Lago Iseo, norte de Italia



Fuente: Pilotti *et al.* (2021).

Nota: A izquierda: Detalles de los colectores principales del alcantarillado Brescia (BSS, línea continua negra) y del alcantarillado Bergamo (BGS, línea continua roja) con la ubicación de las estaciones de bombeo, los aliviaderos y las PTARs de Brescia BSS (WWTP1 Paratico y WWTP2 Costa Volpino). A derecha: Vista del lago cerca de Monte Isola.

48 Es decir, una situación de reducción de nutrientes, con un nuevo desequilibrio entre el nitrógeno y el fósforo, que reduce la biomasa del fitoplancton (aunque no siempre de forma muy marcada) y provoca un cambio en la composición de su comunidad, con predominancia de microalgas características de un estado oligotrófico, como Chrysophyceae y Dinophyceae.

En el mundo, la mayoría de los sistemas de alcantarillado existentes son combinados, ya que la separación de las aguas pluviales y las aguas residuales es muy compleja desde el punto de vista económico y técnico. Las aguas pluviales (o de tormenta) urbanas son conocidas como fuentes de contaminación. Sin embargo, paradójicamente, se supone que las aguas de tormenta diluyen los contaminantes de las aguas residuales. Debido a estos supuestos, se ha subestimado el impacto ambiental de los desbordamientos en los lagos.

En muchas ciudades antiguas de Europa que están cerca de lagos, el sistema de alcantarillado fue diseñado para mezclar las aguas residuales (del baño, cocina, etc.) con el agua de lluvia. Este tipo de sistema se llama **alcantarillado combinado**. Estas aguas se recogen en tuberías que vienen de distintas zonas pequeñas y luego se conectan a una tubería más grande, llamada colector principal, que va bordeando el lago. Esta tubería principal recoge toda esa mezcla de aguas y la lleva a plantas de tratamiento ubicadas en los extremos del lago. Allí, el agua se limpia y, si es posible, se descarga fuera del lago para no seguir contaminándolo. Pero cuando llueve mucho, el sistema se llena más allá de su capacidad. Entonces, esa mezcla de agua sucia y lluvia no tratada termina desbordándose y va directamente al lago. A esto se le llama *desbordamiento de alcantarillado combinado*. Este problema también ocurre en los Grandes Lagos de Norteamérica. Para controlarlo, algunas ciudades han tenido que construir enormes túneles subterráneos para almacenar el agua durante las lluvias fuertes, como lo hicieron en Milwaukee o Chicago. Estas obras son muy costosas, pero necesarias para evitar que los lagos sigan contaminándose.

Nos parece que una medida similar de un alcantarillado combinado circunlacustre de aguas residuales y pluviales podría implementarse a lo largo del litoral boliviano norte y central del Lago Menor, en particular entre Puerto Pérez y Chojasivi, para reducir substancialmente la carga contaminante al lago. Este colector debería ser conectado a sus extremos con mini-PTARs equipadas de humedales construidos (filtros verdes), previo a la descarga de estas aguas finalmente tratadas al lago.

4.2.4. Implementar corredores verdes a lo largo de los ríos en la ciudad

Durante la gestión 2023, la Red Binacional de Jóvenes Promotores de los Derechos del Lago Titikaka, los Jóvenes Educadores de Acción (JODA), la Fundación COMPA, y el IIADI diseñaron el proyecto participativo "Espacio público, ecológico y cultural en el río Seke, de la ciudad de El Alto". Socializaron la maqueta con la Junta Escolar, el plantel de docentes, las madres y padres de familia de la unidad educativa Juancito Pinto del Distrito 14. Este proyecto busca recuperar y fortalecer el vínculo socioafectivo de la población con este río y el Lago Titicaca por medio de un corredor verde que cumple las funciones de regeneración, sensibilización y cohesión social. A diseño final, el proyecto comprende espacios para la arborización, el compostaje, la descontaminación y el tratamiento de aguas (Fig. 41).

Figura 41. Corredor verde del Distrito 14 de El Alto

Fuente: IIADI (2023).

Nota: Corredor verde del Distrito 14 de El Alto, planeado a lo largo del río Seke, en el ámbito del proyecto participativo "Espacio público, ecológico y cultural en el río Seke, de la ciudad de El Alto" (#CorredorVerdeRíoSeke). Cumple las funciones de regeneración, sensibilización y cohesión social, contribuyendo a la arborización, compostaje y descontaminación y tratamiento de aguas.

¿Qué hay que recordar?

SOLUCIONES DE INGENIERÍA ECOLÓGICA

Es imprescindible promover la ingeniería ecológica (basada en la naturaleza) como complemento de la ingeniería sanitaria, con el fin de tratar eficientemente las aguas residuales. En este sentido, se debe fomentar el uso de humedales construidos y jardines flotantes, respaldados por experimentación a escala real.

La implementación de un colector circunlacustre de alcantarillado combinado –que integre aguas residuales y pluviales–, equipado con mini-PTARs o PTARs compactas, permitirá reducir significativamente la carga contaminante sobre el Lago Menor y, en consecuencia, su proceso de eutrofización. En los tramos urbanos de los ríos de la cuenca Katari, la creación de corredores verdes contribuirá a disminuir la contaminación de manera económica, al mismo tiempo que mejora el paisaje urbano.

5. Propuestas de soluciones estructurales para mitigar y adaptarse a los efectos del cambio climático

5.1. Reforestación

El proceso de **forestación** o **reforestación** demora décadas en generar beneficios que mitiguen el calentamiento global, debido al crecimiento lento de los árboles. Por ello, su contribución es principalmente a largo plazo. Utilizar árboles nativos –como la kiswara (*Buddleja coriacea*) y la queñua (*Polylepis* sp.)– es lo más recomendable, ya que están adaptados a las condiciones climáticas extremas del Altiplano.

Idealmente, para generar un efecto global beneficioso, cada comunidad o municipio debería contar con su propio vivero y producir plantines de manera continua. Actualmente, esta actividad es puntual y de magnitud limitada. Por ejemplo, en noviembre de 2022, en el marco del Plan Director de la Cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca (PDCKyLMT), el MMAyA realizó una campaña de forestación en el municipio de Tiwanaku con 1.000 plantines forestales de diferentes especies priorizadas. En noviembre de 2023, el Gobierno nacional entregó herramientas a Huatajata y a 24 municipios de la cuenca para tareas de forestación y limpieza.[49] En diciembre de 2023, los municipios de Laja, Tiwanaku y Palca recibieron 11.400 plantines nativos por parte del MMAyA.[50]

5.2. Promover la cosecha de agua de lluvia a nivel de las microcuencas

Se puede aprovechar el agua de lluvia recibiéndola desde los techos de las viviendas y almacenándola en tanques vaciados de cemento (más baratos y de rápida construcción), turriles metálicos, bidones de plástico, depósitos de PVC, entre otros. El agua de lluvia se utiliza principalmente como fuente de agua potable en zonas rurales. Su ventaja es que está libre de contaminantes, sales, minerales y otros agentes naturales o artificiales. La Unidad de Gestión de la Cuenca Katari, del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, benefició a unas 400 familias en la Bahía de Cohana (MMAyA 2016, 2017).

49 https://abi.bo/index.php/sociedad2/44514-gobierno-entrega-herramientas-e-inicia-campana-de-reforestacion-y-limpieza-en-huatajata

50 https://lapatria.bo/2023/12/13/municipios-de-laja-tiwanaku-y-palca-reciben-11-400-plantines-nativos/

Ventajas: El costo total de instalación y operación es mucho menor que el de los sistemas de purificación o bombeo de agua. Para muchas familias, representa una gran reducción en su factura de servicios públicos. La mayoría de los tejados actúan como zona de captación viable, conectada con el sistema de recolección. No se necesitan máquinas a base de combustible, lo cual reduce el impacto ambiental. Además, se disminuye la demanda de agua subterránea. Fuera del uso como agua potable, también puede utilizarse para el inodoro, lavar la ropa, los platos, regar el huerto, etc.

Desventajas: Las precipitaciones son imprevisibles, por lo que la escasez o ausencia de lluvias puede limitar el suministro de agua. No es recomendable depender exclusivamente del agua de lluvia para todas las necesidades. Los sistemas requieren mantenimiento regular, ya que pueden verse afectados por roedores, mosquitos, algas, insectos o lagartos. Además, ciertos tipos de techos pueden filtrar productos químicos o excrementos de animales.

5.3. Explorar la recolección de agua de lluvia en el subsuelo superficial

En complemento a la costosa construcción de embalses (presas, diques), que además están sujetos a la evaporación, la CAF y el PNUD/GEF promueven dos acciones que permiten economizar el agua en regiones secas y áridas:

La conservación y restauración de humedales. Además de almacenar agua en áreas poco profundas, los humedales actúan como biofiltros, gracias a las macrófitas acuáticas, contribuyendo al tratamiento de aguas residuales.

La siembra y cosecha de agua. Se trata del proceso de recolección ("siembra") de agua de lluvia en el subsuelo para poder recuperarla tiempo después ("cosecharla"). Esta práctica se implementa mediante la construcción de zanjas de infiltración, así como la conservación y recuperación de praderas, y la forestación y reforestación.

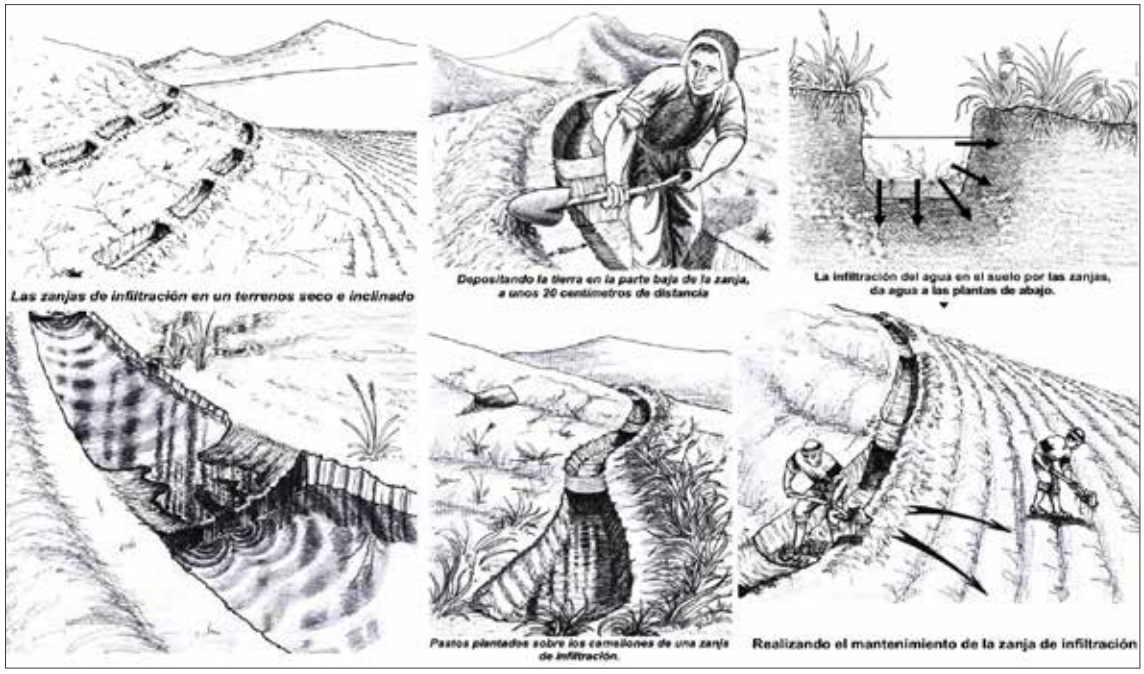
Las **zanjas de infiltración** tienen orígenes ancestrales. Son pequeños canales construidos a lo largo de las curvas de nivel, diseñados para detener la escorrentía de las lluvias y almacenar agua que luego beneficia a pastos y cultivos ubicados aguas abajo (Fig. 42).

5.4. Construir embalses subterráneos para beneficiar la agricultura

Frente al actual contexto de sequía en el entorno del Lago Titicaca, resulta útil inspirarse en soluciones adoptadas en regiones semiáridas y áridas del mundo, como el Sertão brasileño (región Nordeste de Brasil) o el valle del río Senegal en África occidental.

Una estrategia eficaz consiste en la construcción de embalses subterráneos que permiten almacenar agua evitando pérdidas por evaporación. El método consiste en excavar una zanja perpendicular al lecho de un riachuelo, impermeabilizar su fondo con arcilla o una geomembrana, y posteriormente rellenarla con tierra. Durante la época de lluvias, el caudal del riachuelo infiltra en el subsuelo hasta alcanzar el nivel impermeable de la zanja. El agua acumulada crea un reservorio subterráneo, cuya humedad beneficia directamente los cultivos situados aguas abajo (ver Fig. 43).

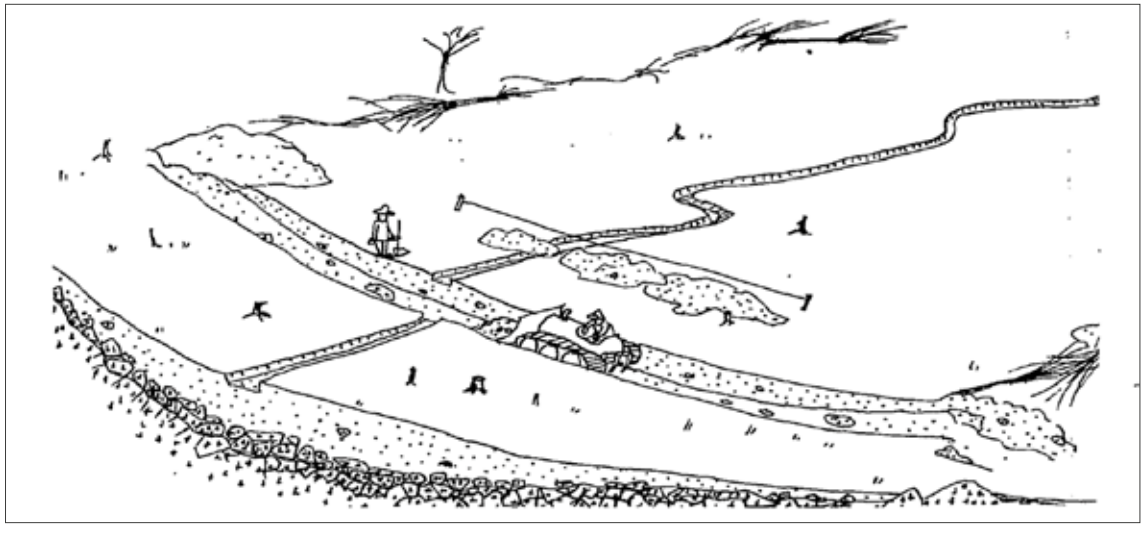
Figura 42. En los terrenos con pendiente



Fuente: Proyecto JALDA: https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/green/green72-6_1-16.pdf

Nota: En los terrenos con pendiente (*q'atas*), cuando llueve, infiltra poca agua en el suelo, la mayor parte corre por la superficie, y se pierde para siempre. La zanja de infiltración es como un hoyo en el terreno, donde se acumula el agua de lluvia, para que infiltre más agua en el suelo. El espacio entre una y otra zanja, debe excavarse hasta una profundidad de 10 cm (*'una t'ajlla'*). Permite que el agua de una zanja llena pueda pasar a otra zanja, llenando así todas las zanjas por igual.

Figura 43. Embalse subterraneo



Fuente: Molle & Cadier (1992).

Nota: En regiones semi-áridas como el Chaco boliviano y el Nordeste brasileiro, la evaporación de los cuerpos de agua puede representar una bajada de nivel de 2 m/año. Construir un 'embalse subterráneo' representa una opción para evitar esta perdida y generar suficiente humedad en el subsuelo para cultivar más abajo.

Otra estrategia basada en el mismo principio consiste en aprovechar la humedad del litoral del lago, que queda disponible a medida que el nivel del agua desciende, para practicar cultivos de **retracción posinundación**. Esta técnica milenaria permite sembrar en suelos naturalmente irrigados por el retroceso del lago, sin necesidad de riego artificial, favoreciendo la seguridad alimentaria en contextos de cambio climático.

5.5. Sembrar las nubes

Es una metodología que intenta "mejorar la capacidad de una nube para producir lluvia o nieve" (Fig. 44). Se trata de un procedimiento costoso, de gran complejidad técnica, y cuyos resultados son relativamente pobres. Después de todo, las regiones secas suelen tener pocas nubes aprovechables circulando por sus cielos. Aun así, esta técnica es utilizada con cierta frecuencia en Bolivia.

Figura 44. Principios de la siembra de nubes para provocar lluvias

Fuente: https://www.20minutos.es/noticia/5237349/0/que-consiste-siembra-nubes-que-emplea-dubai/

Nota: Principios de la siembra de nubes para provocar lluvias. OJO: Por encima del punto de congelación (0°C), o sea temperaturas positivas, el agua pasa al estado líquido. Los cristales de sal pueden ser mezclados también con magnesio, cloruro de sodio y cloruro de potasio.

Aunque íntimamente relacionadas con el cambio climático, las inundaciones que azotaron Dubái en abril de 2024 despertaron polémica cuando se mencionó la siembra de nubes, un método ampliamente empleado en los Emiratos Árabes. Se trata de un proyecto de geoingeniería controversial a nivel mundial, ya que constituye una actividad humana que altera el ambiente de forma artificial. Sin una supervisión adecuada, esta práctica puede generar consecuencias graves.

En su Declaración sobre la modificación del tiempo y el clima, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) concluye lo siguiente respecto al aumento de precipitaciones:

> *"[…] Las pruebas que demuestran cambios beneficiosos y significativos en la precipitación en el suelo como resultado de la siembra son polémicas y, en muchos casos, no pueden establecerse con certeza […]. Se ha demostrado que la siembra de nubes convectivas con materiales higroscópicos se adapta a diferentes tipos de nubes y ha arrojado resultados alentadores; sin embargo, no es aún una tecnología establecida".*

¿Qué hay que recordar?

SOLUCIONES ESTRUCTURALES PARA ADAPTARSE AL CAMBIO CLIMÁTICO

En primer lugar, el cambio climático no puede ser controlado; en Bolivia, lo máximo que podemos hacer es adaptarnos. Al no ser un país altamente industrializado, Bolivia contribuye muy poco a su generación pero sí sufre intensamente sus efectos.

La reforestación es una estrategia indispensable cuyos beneficios se manifiestan a largo plazo. Promover la cosecha de agua de lluvia es posiblemente la medida más eficaz, por su simplicidad y bajo costo, especialmente cuando se combina con acciones de recarga de acuíferos subterráneos.

En cambio, la siembra de nubes aún carece de suficiente respaldo científico y, además, no existen las condiciones atmosféricas adecuadas –como una presencia constante de nubes– que permitan su aplicación con eficacia.

6. Acciones no estructurales para controlar la contaminación y eutrofización y adaptarse al cambio climático

6.1. Elevar la consciencia y la protección del medioambiente

El incremento de la contaminación con residuos sólidos a lo largo de los ríos, las carreteras y el litoral del lago evidencia una profunda pérdida de sensibilidad y respeto hacia el medioambiente. Lo que no se conoce, no se protege. El **urbanocentrismo** ha alejado al ciudadano de la naturaleza. Es imprescindible –y urgente– impulsar un nuevo paradigma, en el que se recupere la conciencia sobre la necesidad de proteger el entorno natural. Esta transformación debe comenzar en el hogar, a través del ejemplo de los padres, y continuar en las escuelas, con niños y adolescentes.

Algunas fundaciones, institutos y organizaciones no gubernamentales realizan en este sentido un trabajo admirable. Es necesario utilizar todos los medios disponibles –radio, televisión, redes sociales, periódicos, documentales, entre otros– para acelerar este cambio cultural. Sin un giro en la conciencia individual y colectiva, sin voluntad política y sin los recursos necesarios, las estrategias estructurales no tendrán éxito.

¡Los ríos no son cloacas, y el Lago Titicaca no es el botadero de una sociedad de consumo sin límites!

Transformamos gran parte de lo que producimos en basura, que luego arrojamos a ríos, lagos, humedales y océanos, o enterramos cerca de nuestras viviendas. ¿Qué clase de sociedad nos hemos vuelto? Somos parte de una civilización marcada por la destrucción ambiental: el **Antropoceno**. Los vestigios que los arqueólogos descubren de nuestros antepasados suelen ser arquitectónicos y artísticos; no escombros ni residuos sólidos. En cambio, los reinos animal y vegetal producen belleza, armonía y equilibrio.

Nuestros padres dieron lo mejor de sí para legarnos el planeta que hoy habitamos, confiando en que continuaríamos su labor. Por desgracia, hoy esa continuidad está en riesgo. La mayoría de las personas –a veces por falta de recursos, otras por su exceso– priorizan el aprovechamiento inmediato de los recursos naturales, sin considerar las consecuencias para las futuras generaciones. No contribuyen a la conservación ni a la restauración de los ecosistemas, que son esenciales para la vida humana y no humana en la Tierra.

No debemos olvidar que dependemos absolutamente del planeta: del aire que respiramos, del clima, del agua, de los suelos fértiles. El planeta, en cambio, no depende de nosotros. ¡Al contrario!

6.2. Incluir la educación al medio ambiente y el cambio climático en el currículo escolar y universitario

Para la elaboración de este acápite se revisaron las líneas generales del programa de Ciencias Naturales tanto en el ciclo de Primaria (6 años) como en el de Secundaria (6 años). Si bien la educación escolar es obligatoria hasta los 12 años, una parte del estudiantado sobre todo del área rural concluye únicamente el ciclo de Primaria, principalmente por razones económicas familiares y por la falta de oportunidades para continuar estudios en zonas urbanas.

Los Planes y Programas de Educación Primaria Comunitaria Vocacional 2023[51] del Ministerio de Educación, definen así el enfoque de las Ciencias Naturales:

- **Seres vivos.** En este componente se estudia la diversidad de seres vivos, sus características, los cambios y su clasificación basada en ciertos criterios; relacionando las funciones que cumplen en el equilibrio de los ecosistemas, encontrando analogías entre el funcionamiento de los órganos de plantas y animales, así como de sus ciclos de vida.
- **Madre tierra.** Los contenidos hacen énfasis en la relación de cuidado y protección de la Madre Tierra – Madre Naturaleza como fuente de la supervivencia de todos los seres vivos, la comprensión de que el desequilibrio genera problemas en el ecosistema, teniendo impacto en todos los sistemas de vida, por ello se propone el cuidado de los bosques, las cuencas y la gestión de riesgos.
- **La tierra y el sistema solar.** Los contenidos estudian las características físicas del planeta Tierra y los fenómenos internos y externos que se producen en ella, el estudio de la importancia de la atmósfera y el agua, y la comprensión de algunos fenómenos climáticos.

  En este componente, también se estudia los distintos fenómenos relacionados con los movimientos de la tierra, la luna, y los conocimientos sobre el sistema solar.
- **Capacidades que se enfatizan en el área de Ciencias Naturales.** En ciencias naturales se enfatiza el desarrollo de ciertas capacidades que les permita reconstruir el conocimiento científico en el ámbito escolar, como:
- **Explorar, observar:** explorar implica que el estudiante debe descubrir y conocer el medio en el cual se desarrolla, …

51 https://red.minedu.gob.bo/documento/recurso/4296

- **Investigar:** aquí se incluye indagar, averiguar, buscar información de diferentes fuentes, …
- **Formular preguntas:** las formulaciones de preguntas deben partir de los intereses de los estudiantes, …
- **Experimentar:** desde la ciencia para la vida, la forma de abordar la experimentación debe tomar un nuevo rumbo, más responsable con los derechos de la Madre Tierra y los seres que forman parte de ella, …
- **Comunicar:** implica la argumentación de ideas, su confrontación, la elaboración de explicaciones, …
- **Aplicación de los saberes y conocimientos a situaciones concretas:** la educación en ciencias naturales ha estado relegada a lo del conocimiento producido en otros contextos y no así a la producción de conocimientos que servirán para actuar en la transformación de la realidad…
- **Respetar, proteger y cuidar la Madre Tierra-Madre Naturaleza:** implica el respeto integral a su existencia, que conozcan sus componentes, estructura y funcionamiento ecológico, sus beneficios y considerándola como un sujeto, …

Perfil de salida de nivel en Ciencias Naturales:

Protege y preserva toda manifestación de vida, desde una convivencia equilibrada y armónica con la Madre Tierra, resolviendo problemáticas de su contexto a través de la indagación, el desarrollo de prácticas socioambientales, la comprensión de la relación de interdependencia y la toma de decisiones informadas sobre salud integral.

Campos de saberes y conocimientos: Vida Tierra Territorio / Área de saberes y conocimientos: Ciencias Naturales:

Tabla 2. Población por Distrito de El Alto

1º año	2º año	3º año	4º año	5º año	6º año
Madre Tierra: acciones para establecer relaciones armónicas con la Madre Tierra.	Madre Tierra: saberes sobre la convivencia armónica con los sistemas de vida, reducción del riesgo de desastres	Madre Tierra: relaciones de equilibrio entre los elementos de un ecosistema, la preservación del agua y manejo de residuos sólidos, aguas residuales, como acciones preventivas ante riesgos de desastres.	Madre Tierra: consecuencias de la acción humana en la estabilidad del medio ambiente, proponiendo acciones de reducción del riesgo y adaptación al cambio climático.	Madre Tierra: características de los pisos ecológicos del ciclo integral del agua, el problema de la erosión, respondiendo con acciones en reducción de riesgos.	Madre Tierra: importancia de acciones de adaptación al cambio climático, cuidado y defensa del ambiente y reducción de riesgos ante eventos adversos.
Seres vivos: tienen diferentes características de acuerdo con determinados criterios.	Seres vivos: su importancia en la prevención de enfermedades y equilibrio ecológico.	Seres vivos: características de los seres vivos, su ciclo vital, la forestación y reforestación como acciones en la recuperación de los ecosistemas.	Seres vivos: pautas sencillas de clasificación de los seres vivos, de bosques, desde los procesos de adaptación, conservación del ecosistema.	Seres vivos: importancia del proceso de la fotosíntesis proponiendo acciones de conservación y protección de las distintas formas de vida.	Seres vivos: importancia del cuidado de las semillas como fuente de vida, conservación de los diferentes tipos de cobertura vegetal y su relación dentro de la cadena trófica, comunicando sus conclusiones.
La Tierra y el Sistema Solar: características, diferencias y efectos que tiene el día y la noche en los seres vivos.	La Tierra y el Sistema Solar: características de los fenómenos atmosféricos y sus cambios durante el ciclo de las estaciones.	La Tierra y el Sistema Solar: las características, los movimientos de rotación y traslación, considerando sus efectos en la tierra.	La Tierra y el Sistema Solar: la estructura de la tierra, sus fenómenos internos y externos por medio de modelos.	La Tierra y el Sistema Solar: demuestra la escasez relativa del agua dulce y la influencia del sol y la luna en los sistemas de vida de la tierra.	La Tierra y el Sistema Solar: investigación sobre las características del sistema solar, de la atmósfera que posibilitan la vida y propone medidas de protección.

Durante los seis años de educación primaria, en lo que concierne a la enseñanza de las Ciencias Naturales, el programa parece bastante denso y desarticulado, considerando que los dos primeros años están dedicados sobre todo a aprender a leer, escribir, analizar y desarrollar el sentido crítico. Se presentan muchos dogmas, y algunos temas son tratados de forma obsesiva: riesgos de desastres, adaptación al cambio climático (cuando apenas uno puede adaptarse), problemas de erosión, prevención de enfermedades, forestación/

reforestación, bosques, etc. No se presenta nada sobre los organismos acuáticos ni sobre el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. ¿Por qué este énfasis en el sistema solar? Parece hasta místico. Este programa de Ciencias Naturales es muy fragmentado y minimalista; no permite entender cómo interactúan los organismos con su medioambiente. Tampoco como debemos interactuar con la naturaleza. No presenta nociones sobre los ecosistemas. No parece adaptado ni formador de conocimiento y reflexión para niños de seis a doce años.

No obstante, en ninguno de los sistemas curriculares se habla de los valores ambientales ni de la biodiversidad del Lago Titicaca, o por lo menos no a nivel nacional. Preguntas: ¿sería posible que ciertas nociones, como la Madre Tierra, el Vivir Bien o el Cosmos, ¿resulten demasiado abstractas frente a las limitaciones de la dura realidad cotidiana de las familias? ¿Serían difíciles de aplicar incluso cuando los niños se vuelven adolescentes? ¿Será realmente que estas tres entidades (Madre Tierra, Vivir Bien y Cosmos) son los mecanismos que controlan nuestras existencias y la naturaleza? No se prepara a los jóvenes para afrontar su vida futura con conceptos tan pobres. ¿Dónde se presenta el método científico como herramienta para deducir el funcionamiento de los fenómenos? La visión inculcada es extremadamente antropocéntrica; por tanto, no es sorprendente que, cuando adultos, no puedan dar sentido a sus vidas ni a su contribución a la sociedad, e ignoren la necesidad de proteger el medioambiente.

Los Planes y Programas de Educación Secundaria Comunitaria Productiva 2023[52] del Ministerio de Educación, definen así el enfoque de las Ciencias Naturales:

- Respetar y prservar la vida con salud ambiental, para establecer una relación equilibrada de los seres vivos que interactúan en el espacio geográfico y el cosmos.
- Transformación sustentable de los recursos naturales, en equilibrio y armonía con la Madre Tierra y el Cosmos, a través de procedimientos científicos, técnicos y tecnológicos en procesos educativos comunitarios, orientados a desarrollar cualidades de respeto a la vida y la naturaleza.

Durante los 6 años de educación secundaria, los grandes componentes de Ciencias Naturales abordados son:

52 https://red.minedu.gob.bo/repositorio/fuente/4096.pdf

Ciencias Naturales: Biología – Geografía

- Asume una posición biocéntrica con respeto de interdependencia desde explicaciones científicas de los fenómenos naturales, comprendiendo los procesos biológicos, ecológicos, físicos y químicos que intervienen en el desarrollo y estructura de los seres vivos, además de los procesos que transforman el espacio geográfico con cuidado de la salud ambiental.

- Aplica saberes y conocimientos a situaciones concretas, enfrentando diversos retos de la sociedad actual en la resolución de problemas cotidianos mediante la observación, indagación, experimentación y comunicación de hechos relacionados con el cuidado socioambiental, Salud Comunitaria y la transformación de recursos en equilibrio y armonía con la Madre Tierra y el Cosmos desde una visión holística e integradora.

Ciencias Naturales: Física

- Comprende el análisis investigativo, experimental, aplicado como elemento transformador de los recursos estratégicos en los fenómenos naturales, para describirlo y cuantificarlo de forma básica mediante la Física a través del método científico, ecuaciones matemáticas y algebraicas, al mismo tiempo comprende los fenómenos Físicos, Químicos y sus diferencias en el cuidado de la Madre Tierra para el desarrollo de los sistemas de vida y su estructura en los seres vivos.

Ciencias Naturales: Química

- Aplica los conocimientos de la química orgánica e inorgánica en la transformación de la materia valorando la convivencia armónica y la interdependencia mediante los procedimientos sistemáticos de manera experimental, creativa y propositiva en la preservación del medio ambiente, desarrollando un espíritu emprendedor con el uso de las tecnologías de manera sustentables que permitan responder a las necesidades y problemáticas mediante proyectos Socio comunitarios y productivos.

Los temas de ciencias naturales por año y trimestre son:

Año	1er trimestre	2do trimestre	3er trimestre
1º año	La diversidad de seres vivos que habitan en la Madre Tierra		Matemática aplicada a las ciencias naturales | ecología: relaciones de interdependencia en la Madre Tierra
2º año		Matemática aplicada a las Ciencias Naturales	Interacción de la vida en el espacio geográfico
3º año			Los fenómenos cíclicos de la madre tierra y el uso sustentable de los recursos naturales | efectos del cambio climático en la madre tierra | preservación y conservación de los recursos del medio ambiente
4º año			La biodiversidad en Bolivia, conservación y protección
5º año			Estructura y procesos vitales en las plantas | uso sustentable de los recursos de la madre tierra | regiones ecológicas de Bolivia |
6º año	La evolución de los seres vivos y eras geológicas		Diversidad del reino animal en la madre tierra | interacciones de la vida en la madre tierra: ecología | gestión ambiental como medida de mitigación de desastres naturales

Nota: No existe contenido mínimo respecto al medioambiente regional.

El núcleo común del programa educativo de Secundaria es amplio y denso. Paradójicamente, en la práctica, y considerando las relaciones de abandono y descuido con el medioambiente, estos conocimientos no se aplican por la mayor parte de la sociedad. Es difícil entender esto. Parece que los adolescentes y la sociedad en general no han asimilado este programa, o lo han hecho solo de "manera escolar", sin contextualizarlo ni plasmarlo en la vida cotidiana, profesional y social. ¿Tal vez su presentación es demasiado metafísica, idealista e intelectual? ¿No será demasiado dogmática, y por lo tanto no suficientemente pragmática, sin visión a mediano ni largo plazo, especialmente en relación con la contaminación y el deterioro del medioambiente y los recursos naturales?

¿Se sigue realmente en su totalidad en todas las escuelas del país? Otra posibilidad es que parte de la sociedad no haya cursado la Secundaria, en particular en el medio rural o incluso en las ciudades, debido a los flujos migratorios en busca de oportunidades, considerando la importancia del empleo informal. Finalmente, la calidad de la enseñanza de las Ciencias Naturales, y en particular de la Ecología, dependerá realmente de la formación de los profesores.

En las unidades educativas de primaria de algunas comunidades ribereñas al lago, hemos podido observar que temas de ecología funcional y aplicada –en particular, sobre la visión global de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas; las relaciones entre comunidades de organismos animales y vegetales; la red trófica y sus respuestas a las perturbaciones antrópicas y climáticas; la complejidad y no linealidad de los sistemas; los sistemas acuáticos; los organismos microscópicos del plancton; los procesos bio-físico-químicos; el ciclo del agua, entre otros– no son enseñados. Esto resulta muy sorprendente tratándose de alumnos que viven en comunidades a orillas del lago, que dependen de sus recursos y experimentan a diario cómo está cambiando por efecto de la contaminación, el calentamiento global, el descenso del nivel del lago debido a la sequía, etc.

Una enseñanza diferenciada, según las regiones y el lugar de vida de los alumnos y las escuelas, es indispensable para conocer mejor y, por lo tanto, respetar mejor el medioambiente y la naturaleza. ¿No se explican los orígenes y las consecuencias complejas del cambio climático, o la diferencia entre este y el cambio global? ¿No se menciona la situación de Bolivia, que no contribuye significativamente al cambio global, aunque sufre sus consecuencias? ¿No se presenta nada sobre el lago Titicaca, los glaciares, los bofedales, los ríos, los humedales, la biodiversidad, el endemismo, las especies en peligro de extinción, los efectos de la minería, entre otros aspectos del Altiplano?

Tampoco se incluye información sobre el papel de los bosques tropicales en el equilibrio climático y el ciclo del agua, los ciclos de vida, las interacciones entre fauna y flora, el extractivismo frente a la conservación, la expansión de la frontera agrícola, la conservación de la biodiversidad, la destrucción causada por la vorágine aurífera, el paradigma del crecimiento económico permanente en un mundo de recursos naturales finitos, o las energías renovables y no renovables, entre tantos otros temas de actualidad.

6.3. Informar y educar vía los medios de comunicación

En Bolivia, en el ámbito de la ecología, el medioambiente y las ciencias en general, existe una carencia a nivel nacional de periódicos y periodistas especializados, así como de programas de radio y televisión, documentales y oportunidades de visitar librerías, bibliotecas, museos o parques. Las redes sociales han adquirido una importancia desmedida, incluso en comparación con la lectura. Los programas de televisión y las series como *Animal Planet*, *BBC*, *National Geographic*, entre otros, son excelentes fuentes de información, pero lamentablemente no todos tienen acceso a ellos. Por eso, esta curiosidad debe ser estimulada desde una edad temprana, por parte de los padres, las escuelas, los colegios y la enseñanza superior, para quienes puedan acceder a ella. Por supuesto, también es necesario que existan posteriormente oportunidades laborales en estos ámbitos, las cuales actualmente son demasiado limitadas.

6.4. Promover el monitoreo ambiental participativo

Participar en grupos de monitoreo ambiental participativo, de manera voluntaria, ayuda e incentiva a conocer la naturaleza, amarla y, por lo tanto, protegerla. También permite compartir ese conocimiento, entusiasmo y pasión con otras personas. En escuelas, cuarteles, pescadores, piscicultores, agricultores, agentes de turismo, periodistas, comerciantes, industriales o jubilados –es decir, en todas las categorías profesionales– debería

promoverse esta experiencia como algo gratificante, que además puede transmitirse a las siguientes generaciones. Además de ampliar los conocimientos generales, esta participación aporta muestras y datos actualizados que sirven para enriquecer las bases de datos científicas, facilitar su interpretación… y fomentar vocaciones.

6.5. Incluir un presupuesto para contribuir con los costos de tratamiento de agua y producción de agua potable en las tasas municipales mensuales de los hogares

Esta práctica es indispensable para financiar, al menos en parte, el funcionamiento y mantenimiento de las instalaciones de saneamiento en la comunidad, el municipio o la ciudad en la que uno vive, al igual que la electricidad, el agua potable, la gestión de residuos domésticos y la limpieza urbana. La construcción y el mantenimiento de instalaciones de saneamiento básico, como el alcantarillado, son tan importantes como la educación, el transporte y la salud, los cuales también están a cargo del Estado. Asimismo, es una obligación que los contaminadores paguen y/o contribuyan a la limpieza y restauración de los ambientes que contaminan, como una medida de respeto hacia el medioambiente, la salud y la calidad de vida de la sociedad en su conjunto. Esto resulta particularmente crítico para las industrias que descargan productos que no cumplen con las normativas.

6.6. La educación sobre el Cambio Climático (CC): una oportunidad para las escuelas, por Éric Guilyardi[53] – 26/09/2024

- Según el autor, tiene muchas virtudes para los jóvenes: enseña los conceptos físicos del clima, crea capacidad de pensamiento crítico, aprende a cooperar, da confianza en el futuro y en su capacidad de actuar.
- El CC nos concierne a todos; es una prioridad para nuestros sistemas educativos (cf. el artículo 12 del Acuerdo de París 2015 sobre el Clima)
- Diagnóstico: muy pocos profesores de Primaria, Primer Ciclo y Segundo Ciclo de secundaria han recibido una formación adecuada sobre las cuestiones climáticas e incorporado este tema a su enseñanza.
- La gran mayoría de jóvenes no sabe explicar ni las causas del CC actual, ni sus posibles consecuencias; el 74% de adolescentes franceses afirma padecer de ansiedad ecológica (frente a la situación ambiental en el futuro).
- Los jóvenes necesitan conocimientos básicos para construir una narrativa no catastrofista, proyectarse positivamente en el futuro y no verse como víctimas, sino como actores.
- Francia es pionera en "educación para el desarrollo sostenible" (EDS), transversal para mejorar la comprensión de relaciones complejas entre cuestiones medioambientales, económicas, sociales y culturales.

53 https://lejournal.cnrs.fr/billets/leducation-au-changement-climatique-une-opportunite-pour-lecole#:~:text=L'éducation%20au%20changement%20climatique%20est%20parée%20de%20multiples-%20vertus,en%20sa%20capacité%20d'agir. El autor es científico climatólogo del laboratorio LOCEAN-IPSL, una unidad CNRS/IRD/MNHN/Univ. Sorbona, Paris, Francia.

- La educación sobre el cambio climático (ECC), utiliza la ciencia y ofrece una visión más global y coherente de los problemas que la EDS.
- El aprendizaje basado en investigación y experimentación favorece el pensamiento crítico y la capacidad de resolver problemas (complejos, no lineales) de forma colectiva.
- Los conceptos de incertidumbre, diferentes escalas espaciales y temporales, causas y efectos múltiples, educación en complejidad, ayudan a comprender la naturaleza sistémica del CC.

6.7. Priorizar temas para las investigaciones aplicadas

Algunos ejemplos de investigaciones clave:

- Detección y monitoreo de microplásticos, antibioresistencia y PFAS en las aguas de ríos, lagos y PTARs.
- Identificación y caracterización de superbacterias y superhongos en las aguas de ríos, lagos y PTARs.
- Estudio de la coexistencia del virus COVID-19 en las aguas de descarga de las PTARs.
- Estudios comparativos sobre las condiciones ambientales y microorganismos específicos en la PTAR de Puchukollo (a 3.918 m s.n.m.), evaluando su eficiencia en el tratamiento de aguas en comparación con PTARs en regiones a menor altitud. Propuestas para infraestructuras y procesos mejor adaptados.
- Estudios experimentales comparativos, a escala real, de la eficiencia de humedales construidos y jardines flotantes para el tratamiento de aguas residuales.
- Análisis de las ventajas de la descentralización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, comparando mini-PTARs con PTARs compactas.
- Evaluación de las prestaciones de otros tipos de recolección municipal de residuos sólidos, promoción del reciclaje y fomento de la economía circular.
- Exploración de las formas de uso de la totora (en materiales de construcción, papel, embalajes, etc.).
- Utilización de macroalgas en la fabricación de filmes 'bioplásticos' alimentarios, como reemplazo de embalajes plásticos de un solo uso.

Además de la participación de universidades, institutos, fundaciones y ONG, se podría involucrar a la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia (ANCB, https://www.aciencias.org.bo), el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), y el Viceministerio de Ciencia y Tecnología (VCYT, https://www.minedu.gob.bo), así como a la cooperación internacional.

6.8. Incentivar un turismo ambiental-cultural responsable

Frente a la emigración masiva de las regiones ribereñas del Lago Titicaca hacia las grandes ciudades del Altiplano, como El Alto, Viacha, La Paz o incluso el extranjero, incentivar un turismo ambiental-cultural responsable podría crear nuevos empleos y permitir el retorno, al menos de los jóvenes, quienes podrían capacitarse en universidades e institutos nacionales o en el exterior. Esto impulsaría la economía local y el dinamismo en las comunidades. Un apoyo por parte del Ministerio de Turismo y el Ministerio de Culturas sería fundamental. Una prioridad sería dinamizar el turismo comunitario, que beneficia directamente a las comunidades, pero también impulsa el emprendimiento de familias y pequeños empresarios. Una exigencia de calidad en el servicio sería indispensable para mantener una comunidad de turistas nacionales e internacionales entusiastas, ya que el boca a boca sería clave para dar a conocer la actividad.

Además del tour clásico entre Huatajata, Copacabana e Isla del Sol (eventualmente en conexión con Cusco y Machu Picchu en Perú), existen varias opciones interesantes alrededor del Lago Menor, como por ejemplo:

- La (ex) isla de Quehuaya (hoy península), que cuenta con atractivos remarcables como el totoral de la Bahía de Cohana, la ciudad de piedras de Kalauta, la isla flotante de los Urus, y la isla Pariti. Esta zona también cuenta con un albergue, y se pueden organizar circuitos de 1, 2 o más días.
- En Huatajata, se destacan los restaurantes, los constructores de balsas de totora y el Museo Titi de la navegación ancestral.
- En la isla de Suriqui, se pueden conocer a los constructores de embarcaciones a vela, balsas y artesanía de totora.
- Mediante el IIADI, el Proyecto de Ecoturismo en Milluni ofrece rutas turísticas y un restaurante.
- El Corredor Verde del puente Seke, Distrito 14 de El Alto, también es una opción interesante impulsada por el IIADI.
- Y muchas otras opciones.

Para desarrollar estas opciones, sería necesario elaborar mapas y proponer circuitos de 1, 2 y 3+ días, así como facilitar el transporte, alojamiento y alimentación. Además, es esencial hablar en los colegios y centros de formación docente sobre la existencia e importancia de los recursos naturales y la biodiversidad del Lago Titicaca.

¿Qué hay que recordar?

EDUCACIÓN Y CAPACITACIÓN PARA LA PROTECCIÓN DEL MEDIOAMBIENTE

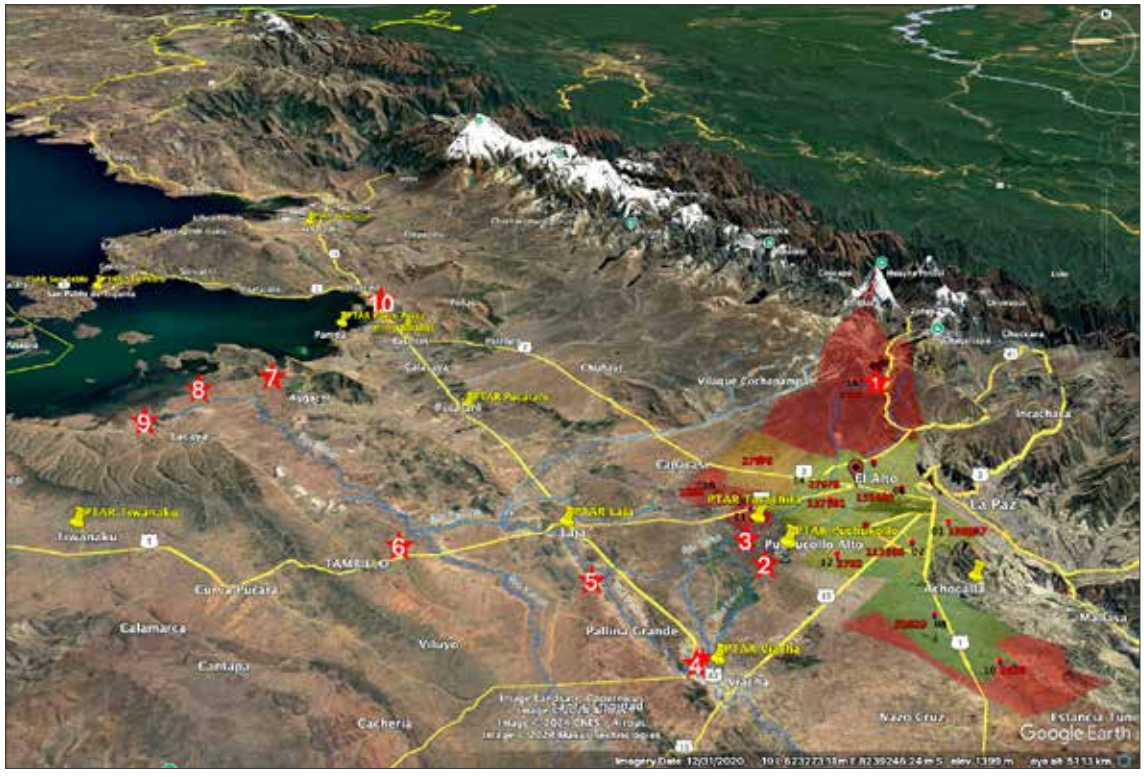
Los programas de educación primaria y secundaria en ciencias naturales no proporcionan los conocimientos suficientes para entender el funcionamiento ecológico de los ecosistemas acuáticos, la biodiversidad, la contaminación, la eutrofización, el cambio climático, el tratamiento de aguas residuales ni la protección del medioambiente. Además, no abordan nada relacionado con el Lago Titicaca y su cuenca hidrográfica. Esto debería ser obligatorio para los estudiantes de la región altiplánica, así como para aquellos de las urbes de El Alto y La Paz. Es fundamental capacitar a los profesores, utilizar todos los medios de comunicación disponibles, promover el monitoreo participativo entre las diferentes clases sociales, y asegurar presupuestos suficientes para mantener los sistemas de tratamiento y producción de agua potable. También es crucial fomentar un turismo responsable que permita descubrir el medioambiente y la cultura local, contribuyendo al desarrollo económico de la zona. Además, se debe presentar el método científico en las aulas, incentivar investigaciones orientadas a resolver problemas medioambientales y promover la ingeniería ecológica, es decir, las soluciones basadas en la naturaleza. Para proteger el medioambiente y los organismos, es necesario conocerlos a fondo.

7. Recomendaciones finales

7.1. Los puntos críticos en la cuenca Katari y el Lago Menor

En conclusión, el diagnóstico ambiental de las regiones norte y central del sector boliviano del Lago Menor destaca los siguientes puntos críticos donde son indispensables los programas de monitoreo, protección y restauración (ver Fig. 45):

Figura 45. Mapa de los distritos de El Alto



Fuentes: GAMEA para los Distritos, Espinoza (2011) para las poblaciones, MMAyA para los ríos; elaboración personal de los puntos críticos; proyección en visión 3D en Google Earth ©.

Nota: Mapa de los distritos de El Alto (números en negro), los ríos de la cuenca Katari (en celeste), las PTARs (balizas amarillas), hacia las regiones norte y central del Lago Menor. Para cada Distrito se presenta el tamaño de la población (en rojo). Los 10 principales puntos críticos están representados como estrellas rojas con su numeración: 1-Minas de Milluni; 2-Descarga PTAR Puchukollo; 3-Descarga PTAR Tacachira (en construcción); 4-Unión ríos Seco-Pallina; 5-Unión ríos Seke-Pallina; 6-Unión ríos Pallina-Katari; 7-Desembocadura del río Sehuenca en la bahía de Cumana; 8-Ex -desembocadura del río Katari en Cohana, bahía Cohana; 9-Nueva desembocadura del río Katari en Chojasivi, Bahía Cohana; 10-Desembocadura del río Batallas al sur de la isla Cojata.

1. **Minas de Milluni:** Es necesario emprender el cierre de los pasivos ambientales mineros para garantizar una mejor salud a los agricultores, ganaderos y sus animales, e incentivar proyectos de turismo.
2. **PTAR de Puchukollo:** Finalizar a la brevedad posible el programa de aumento de capacidad (para atender la población proyectada de El Alto-Viacha en los próximos 20-30 años). Además, se debe modernizar y optimizar los tratamientos secundarios y terciarios. Retener el fosforo es una estrategia comprobaba[54] que se debe explorar. Es esencial valorar el curso del río Seco y sus riberas mediante un proyecto de Corredor Verde en la salida del emisario de la planta. Completar el tratamiento de la PTAR con la construcción de un humedal de macrófitas acuáticas como filtro verde.
3. **PTAR de Tacachira:** Finalizar la construcción de la PTAR lo antes posible, con tratamientos secundarios y terciarios. Minimizar la superficie de los tanques para reducir las molestias visuales y olfativas. Añadir una zona de humedal construido para complementar el tratamiento, que podría servir también como Corredor Verde. Ampliar la red de alcantarillado para conectar la mayoría de los usuarios de los 14 distritos de El Alto. Eliminar las conexiones clandestinas de descargas a los ríos Seke y Seco. Maximizar el tratamiento de los efluentes de las industrias familiares. En El Alto-Viacha y sus suburbios, compensar las deficiencias en el tratamiento de aguas residuales instalando mini-PTARs y PTARs compactas en los barrios desfavorecidos.
4. **Unión ríos Seco-Pallina:** Implementar una PTAR compacta y/o un humedal construido.
5. **Unión ríos Seke-Pallina:** Implementar una PTAR compacta y/o un humedal construido.
6. **Unión ríos Pallina-Katari:** Implementar una PTAR compacta y/o un humedal construido.
7. **Desembocadura del río Sehuenca en la bahía de Cumana:** Implementar una PTAR compacta y/o un humedal construido.
8. **Ex desembocadura del río Katari en Cohana, bahía Cohana:** Consolidar el totoral en un humedal construido para tratar el pasivo ambiental de casi tres décadas de descargas de aguas residuales contaminadas.
9. **Nueva desembocadura del río Katari en Chojasivi, Bahía Cohana:** Implementar una PTAR compacta y/o un humedal construido. Además, construir el alcantarillado combinado (aguas residuales y aguas pluviales/tormentas) alrededor del lago hacia Huarina, con sistemas de bombas y PTARs compactas. Las aguas solo deben verterse al Lago Menor después de ser tratadas.
10. **Desembocadura del río Batallas al sur de la isla Cojata:** Implementar una PTAR compacta y/o un humedal construido. Finalizar el alcantarillado combinado

54 En lagos, existe una relación universal entre las concentraciones de fosforo y de clorofila-a del fitoplancton (como proxi de la biomasa de las microalgas). Por lo que eliminar el fosforo permite reducir la clorofila-a (ver Fig. 33a). Es un tratamiento fisicoquímico relativamente simple, utilizado en todas las PTARs ('STEPs' en francés) en Suiza, en particular. Requiere la aplicación de cloruro férrico FeCl3.

(aguas residuales y aguas pluviales/tormentas) alrededor del Lago proveniente de Chojasivi, con sistemas de bombas y PTARs compactas. Las aguas solo deben verterse al Lago Menor después de ser tratadas.

11. **PTAR de Viacha:** Finalizar su construcción y puesta en marcha, medir su eficiencia de tratamiento entrada vs. salida) y garantizar una tasa municipal para el mantenimiento del servicio. En la salida del emisario, implementar un humedal construido para maximizar el tratamiento.

12. **PTAR de Pucarani:** Dado que la construcción y puesta en marcha están finalizadas, es necesario también concluir el humedal en el río y asegurar la financiación de su funcionamiento mediante una tasa mensual moderada a los usuarios. Se debe medir la eficacia del tratamiento (entrada vs. salida).

7.2. Las acciones prioritarias

¿Qué hay que recordar?

RECOMENDACIONES FINALES PARA LAS ACCIONES PRIORITARIAS

Con el objetivo de reducir la contaminación y acelerar la capacidad de tratamiento de aguas residuales y desechos sólidos, se proponen las siguientes acciones clave:

Emprender de forma inmediata campañas de concienciación y educación ambiental, dirigidas a todos los grupos etarios —niños, adolescentes y adultos— para generar una cultura de protección de los cuerpos de agua. Se debe promover la Red Binacional de Jóvenes Promotores de los Derechos del Lago Titikaka (REBIJO) e incentivar el liderazgo ambiental juvenil como actores de cambio en la gestión sostenible del lago.

Priorizar la implementación de medidas de restauración basadas en la naturaleza, también conocidas como soluciones de ingeniería ecológica, debido a su bajo costo y facilidad de implementación. Se recomienda especialmente la combinación de humedales construidos (Constructed Wetlands) en las desembocaduras de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), como mecanismos complementarios de purificación de aguas.

Investigar y comparar las características técnicas y los costos de implementación de mini-PTARs y PTARs compactas transportables (PTARCs) con diversos fabricantes internacionales y regionales. Como medida piloto, se propone estimar el costo de ejecución de un sistema de alcantarillado combinado (aguas residuales y pluviales) circunlacustre, que integre mini-PTARs en puntos estratégicos –especialmente entre Huarina y Chojasivi– para interceptar y tratar las aguas antes de que lleguen al lago.

Establecer Centros Municipales de Acopio Selectivo de Residuos, reemplazando progresivamente el uso de Rellenos Sanitarios. Estos centros deben integrarse en una estrategia local de economía circular e incluir incentivos para el desarrollo de empresas de reciclaje, especialmente orientadas al tratamiento de envases plásticos y de vidrio, altamente presentes entre los residuos sólidos no tratados que contaminan la cuenca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8. Referencias bibliográficas

AAPS (2019). *Guía para Aplicación de Herramientas e Instrumentos de Seguimiento, Monitoreo y Control de la Operación y Mantenimiento de las PTAR de Bolivia*. La Paz: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico. 106 pp.

Achá, D. (2022). *Construcción de humedales artificiales de Totora. Resultados de una experiencia piloto para el Altiplano Boliviano*. Proyecto Piloto BIOREM 03-B-03, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Fundo Mundial para el Medio Ambiente (GEF), Proyecto binacional de Gestión Integral de Recursos Hídricos del sistema hídrico Lago Titicaca-Río Desaguadero-Lago Poopó-Salar de Coípasa (GIRH TDPS), Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD).

Achá, D. & X. Lazzaro (2015). Comunicado: Análisis y recomendaciones acerca de la muerte de peces, anfibios y aves ocurrida en la zona Norte del Lago Menor durante el mes de Abril 2015. Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo, *IRD-Bolivia*. http://www.bolivia.ird.fr/toda-la-actualidad/la-actualidad/comunicadoanalisis-y-recomendaciones-acerca-de-la-muerte-de-peces-anfibios-y-aves-ocurrida-en-lazona-norte-del-lago-menor-durante-el-mes-de-abril-2015#eztoc3326304_1

Adrian, R., C.M. O'Reilly, H. Zagarese, S.B. Baines, D.O. Hessen, W. Keller, D.M. Livingstone, R. Sommaruga, D. Straile, E. Van Donk, G.A. Weyhenmeyer & M. Winder (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6, part 2): 2283–2297.

ALT (2022). Autoridad Binacional del Lago Titicaca presentó a Cancillería de Bolivia el último inventario sobre fuentes contaminantes. https://cancilleria.gob.bo/mre/2022/06/28/5377/

Ocola Salazar, J., J. Escalante Arcos & A.S. Ñahuincopa Vergara (2021). *Diagnostico binacional pesquero y acuícola en el ámbito del sistema hídrico Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó y Salar de Coipasa, TDPS. Volumen II: Acuícola*

Álvarez, A. (1987). *Diseño y construcción de una planta piloto para el tratamiento de aguas por Schoenoplectus tatora*. Tesis de Licenciatura, Instituto de Química, Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz, Bolivia, 148 pp.

Archundia, D., C. Duwig, F. Lehembre, S. Chiron, M.-C. Morel, B. Prado, M. Bourdat-Deschamps, E. Vince, G. Flores Aviles & J.M.F. Martins (2017a). Antibiotic pollution in the Katari subcatchment of the Titicaca Lake: Major transformation products and occurrence of resistance genes. *Science of The Total Environment* 576: 671-682.

Archundia, D., C. Duwig, L. Spadini, G. Uzu, S. Guédron, M.-C. Morel, R. Cortez, O. Ramos Ramos, J. Chincheros & J.M.F. Martins (2017b). How Uncontrolled Urban Expansion Increases the Contamination of the Titicaca Lake Basin (El Alto, La Paz, Bolivia)? *Water Air Soil Pollut* 228: 44, DOI 10.1007/s11270-016-3217-0.

Archundia, D., C. Duwig, J.M.F. Martins, F. Lehembre, M.-C. Morel & G. Flores (2018). Antibiotic Pollution and Occurrence of Bacterial Antibiotic Resistance Genes in Latin American Developing Countries – Case Study of the Katari Watershed in the Bolivian Highlands. En: *Antimicrobial Resistance in Wastewater Treatment Processes*, P.L. Keen & R. Fugère (Eds.), John Wiley & Sons, Inc., 293-308.

Archundia, D., C. Duwig, L. Spadini, M.-C. Morel, B. Prado, M.P. Perez, V. Orsag & J.M.F. Martins (2019). Assessment of the Sulfamethoxazole mobility in natural soils and of the risk of contamination of water resources at the catchment scale. *Environment International* 130 (2019) 104905.

Archundia, D., J.M.F. Martins, F. Lehembre, M.-C. Morel & C. Duwig (2021). Sulfamethoxazole biodegradation and impacts on soil microbial communities in a Bolivian arid high altitude catchment. *Chemosphere* 284 (2021) 131335.

Arze, C. (1983). *Schoenoplectus tatora (totora) como agente descontaminante de aguas*. Informe inédito UNESCO, La Paz, Bolivia, 74 pp.

Arze, C. (1984). *Comportamiento de Schoenoplectus tatora (totora) frente a contaminaciones inorgánicas*. Informe inédito, UNESCO, La Paz, Bolivia, 87 pp.

Arze, C. & A. Álvarez (1987). *Diseño de una planta para la purificación de aguas mediante Schoenoplectus tatora*. Informe inédito, La Paz, Bolivia, 148 pp.

Arze, C. & A. Álvarez (1990). Totora como descontaminante de aguas en movimiento. *Revista Boliviana de Química 9* (1), 3-8.

Arze, C., P. Crespo, M. Diaz, M. Calliconde & S. Uzqueda (1989). Descontaminación de aguas con base en la Schoenoplectus tatora (totora). *Ingeniería Hidráulica en México, mayo a agosto: 19-30*.

Babatunde, A.O., Y.Q. Zhao, M. Neill, y B. O'Sullivan (2008). Constructed wetlands for environmental pollution control: a review of developments, research and practice in Ireland. *Environment International* 34(1): 116-126.

BID. *Programa de Saneamiento del Lago Titicaca (Cuenca Katari, Bahía Cohana). Proyecto BO – L1118. Marco de Gestión Ambiental y Social (MGAS)*. Banco Interamericano de Desarrollo, Análisis Ambiental y Social (AAS), mayo 2016, 125 pp.

Blanco, J.A. (2019). Suitability of Totora (*Schoenoplectus californicus* [C.A. Mey.] Soják) for its use in constructed Wetlands in areas polluted with heavy metals. *Sustainability* 11(1), 19, https://doi.org/10.3390/su11010019

Bocángel, D. (2003). *Uso de Totorales para la Descontaminación en Bolivia. Proyecto de Conservación de la Biodiversidad del Sistema TDPS. Contrato 21.06*. Informe Final. Fundación MEDMIN (Medio Ambiente, Minería e Industria), Autoridad binacional autónoma del Lago Titicaca y sistema hídrico TDPS (ALT), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 282 pp.

Bradley, R.S., F.T. Keimig & H.F. Diaz (2004). Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geopphysical Research Letters 31,* L16210, doi:10.1029/2004GL020229.

Brienza, M., C. Duwig, S. Pérez, y S. Chiron (2017). 4-nitroso-sulfamethoxazole generation in soil under denitrifying conditions: Field observations versus laboratory results. *Journal of Hazardous Materials* 334: 185-192. Jul 15:334:185-192. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.015. Epub 2017 Apr 7.

Bush, M.B., J.A. Hanselman & W.D. Gosling (2010). Nonlinear climate change and Andean feedbacks: an imminent turning point? *Global Change Biology 16: 3223–3232*, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02203.x

Calcina Rondan, L.E. (2009). Determinación del potencial de *Schoenoplectus tatora* 'Totora' como especie usada para fitorremediación, Lago Titicaca - 2007. Magister en Planificación y Gestión Ambiental, Universidad Católica de Santa María, Escuela de Postgrado, Arequipa, Perú. 137 pp.

Castillo, I. (2019). *Seguimiento al cumplimiento de las recomendaciones del informe de Auditoría Ambiental respecto de la contaminación hídrica en la cuenca del río Katari y la Bahía de Cohana*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Ministerio de de Minería y Metalúrgica (MMM), Gobierno Autónomo Departamental de La Paz (GADLP), Gobiernos Autónomos Municipales de El Alto, Viacha, Laja, Pucarani y Puerto Pérez, Empresa Pública y Social de Agua y Saneamiento S.A. (EPSAS), intervenida. Informe de Seguimiento K2/AP05/J13/E1 (PE23/1). 402 pp.

CEPF[55] (Centro de Alianza para Ecosistemas Críticos) (2025). Definición de puntos críticos de biodiversidad. Obtenido de *Critical Ecosystem Partnership Fund* (CEPF): https://es.cepf.net/our-work/biodiversity-hotspots/hotspots-defined

Chambi Huaman, J.S. & C.E. Yanes Martínez (2023). *Presencia de microplásticos en playas del Lago Titicaca, Puno – 2023*. Tesis de Ingeniero Ambiental. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 109 pp.

Colares, G.S., N. Dell'Osbel, P.G. Wiesel, G.A. Oliveira, P.H.Z. Lemos & F.P. da Silva (2020). Floating treatment wetlands: a review and bibliometric analysis. *Science of The Total Environment* 714, 20 April 2020, 136776.

Contraloría del Estado (2014). *Informe de Auditoría sobre el Desempeño Ambiental respecto a la Contaminación Hídrica en la Cuenca del Río Katari y la Bahía de Cohana*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Ministerio de Minería y Metalurgia, Ministerios de Relaciones Exteriores, Gobierno Autónomo Departamental de La Paz, Gobiernos Autónomos Municipales de El Alto, Viacha, Laja, Pucarani y Puerto Pérez, EPSAS, EMALT, FPS. Informe de Auditoría Ambiental K2/AP05/J13. La Paz. 268 pp.

Costantini, M.L., L. Sabetta, G. Mancinelli & L. Rossi (2004). Spatial variability of the decomposition rate of Schoenoplectus tatora in a polluted area of Lake Titicaca. *Journal of Tropical Ecology* 20 (3): 325-335.

EPSAS (Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento) (2023). *Audición de Rendición Pública* de Cuentas Final 2023. https://aaps.gob.bo/index.php?option=com_content&view=featured&limitstart=36

Espinoza, C.I. (2011). *Atlas de El Alto - Estudio con información estadística, descriptiva y analítica, sobre las condiciones, oportunidades e institucionalidad de la población y la ciudad*. El Alto: Centro de Promoción de la Mujer Gregoria Apaza. 90 pp. https://biblioteca.gregorias.org.bo/repositorio/pmb_documents/1_Atlas_de_El_Alto.pdf

Fonder, N. & T. Headley (2010). Chapter 15 - Systematic classification, nomenclature and reporting for constructed treatment wetlands. En: *Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands*, J. Vymazal (Ed.), Springer Science & Business Media B.V., Dordrecht, The Netherlands: 191-219. DOI 10.1007/978-90-481-9585-5_15

55 El CEPF es una iniciativa conjunta de Conservación Internacional, la Agencia Francesa de Desarrollo, la Unión Europea, la Fundación Hans Wilsdorf, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial, el Gobierno de Japón y el Banco Mundial: https://www-conservation-org.translate.goog/about/critical-ecosystem-partnership-fund?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

Fonturbel Rada, F. (2005). Physicochemical and biological indicators of the eutrophication process at Titikaka Lake (Bolivia). *Ecología Aplicada* 4(1-2): 135-141. ISSN 1726-2216

Fonturbel Rada, F. (2010). Contaminación hídrica y conservación en el Lago Titikaka: ¿Existe suficiente evidencia empírica para tomar acciones concretas? *Revista Virtual REDESMA* 4(2): 57-62.

Gascon (2022). Turismo rural comunitario en destinos de rutas turísticas: un caso en el circuito del Sur Andino Peruano". *ROTUR, Revista de Ocio y Turismo, 16(2).* DOI: 10.17979/rotur.2022.16.2.9005

Guerra, M.A. (2000). *Efecto descontaminante de la totora en las lagunas de estabilización de Puchuckollo Bajo.* Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca y sistema hídrico TDPS (ALT), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), La Paz, Bolivia. 282 pp.

Huanacuni Ajrota, V.C. (2012). Restauración de ecosistema del Lago Titicaca con técnicas del trasplante de Totora, *Schoenoplectus tatora* Kunt Palla. Tesis de Doctorado. Escuela de Postgrado, Doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Universidad Nacional del Altiplano (UNAP), Puno. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/251

IIADI (2023). *Soluciones innovadoras: Sistema de retención y extracción de residuos sólidos. Tecnología de descontaminación del agua por medio de biocarbón*. Instituto de Investigación y Acción para el Desarrollo Integral, La Paz. 26 pp.

INE (2013). *Censo Agropecuario 2013 Bolivia*. Instituto Nacional de Estadística. 145 pp.

INE (2022). *Bolivia: Estudios de impacto ambiental homologado y aprobado, 2006-2023*. https://www.ine.gob.bo/index.php/medio-ambiente/eventos-adversos-de-origen-natural-introduccion-2/

INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, Francia) (2018). *Resistencia a los antibióticos: un fenómeno masivo y preocupante:* https://www.inserm.fr/dossier/resistance-antibiotiques/

Jacobsen, D. & O. Dangles (2017). *Ecology of High-Altitude Waters*. Oxford University Press, 298 pp. ISBN: 9780198736868.

Jenny, J.P., O. Anneville, F. Arnaud, Y. Baulaz, D. Bouffard, I. Domaizon, S.A. Bocaniov, N. Chèvre, M. Dittrich, J.-M. Dorioz, E.S. Dunlop, G. Dur, J. Guillard, T. Guinaldo, S. Jacquet, A. Jamoneau, Z. Jawed, E. Jeppesen, G. Krantzberg, J. Lenters & G.A. Weyhenmeyer (2020). Scientists' Warning to Humanity: Rapid degradation of the world's large lakes. J. *Great Lakes Research* 46(4): 686-702.

Jeppesen, E., B. Moss, H. Bennion, L. Carvalho, L. DeMeester, H. Feuchtmayr, N. Friberg, M.O. Gessner, M. Hefting, T.L. Lauridsen, L. Liboriussen, H.J. Malmquist, L. May, M. Meerhoff, J.S. Olafsson, M.B. Soons & J.T.A. Verhoeven (2010). Interaction of climate change and eutrophication. En: *Climate change impacts on freshwater ecosystems*, M. Kerman, R.W. Battarbee & B. Moss (Eds.), Wiley-Blackwell: 119-151. https://doi.org/10.1002/9781444327397.ch6

Jones, I.D. & J.P. Smol (Eds.) (2023). *Wetzel's Limnology: Lake and River Ecosystems*. Academic Press, 4th Edition, 978-0-12-822701-5. https://doi.org/10.1016/C2019-0-04412-3

Karstens, S., M. Langer, H. Nyunoya, I. Čaraitė, N. Stybel, A. Razinkovas-Baziukas & R. Bochert (2021). Constructed floating wetlands made of natural materials as habitats in eutrophicated coastal lagoons in the Southern Baltic Sea. *Journal of Coastal Conservation 25: 44*. https://doi.org/10.1007/s11852-021-00826-3

Laabassi, A., D. Harzallah & A. Boudehane (2015). Performance of a constructed wetland treating planted with emergent and floating macrophytes under Algerian semi-arid climate. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 10(4): 65-74.

Lazzaro, X., Cruz Hernández, V. E., Ormachea Rojas, M., L. A., & Nuñez Villalba Javier, E. (2023). *El libro del Observatorio permanente del Lago Titicaca* (OLT). Proyecto piloto 05-B-05 (2019-2022), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Fundo Mundial para el Medio Ambiente (GEF), Proyecto Binacional de Gestión Integral del Lago Titicaca y sistema hídrico (GIRH-TDPS), Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT), ISBN nº 978-9917-0-3035-5, 378 pp.

Lazzaro, X. (1981). Biomasses, peuplements phytoplanctoniques et production primaire du lac Titicaca. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale*, 14(4), 349-380.

Lazzaro, X. (1985). Poblaciones, biomasas y producciones fitoplanctónicas del Lago Titicaca. *Ecología en Bolivia* 7: 23-63.

LIDEMA (2002). *Manual de gestión ambiental*. Vidal Zapata, R. Liga de Defensa del Medio Ambiente.

Loayza, E., A. Barrientos & G. Janssens (2022). Evidence of microplastics in water and commercial fish from a high-altitude mountain lake (Lake Titicaca). *PeerJ* 10:e14112 https://doi.org/10.7717/peerj.14112

Luque (2013). *Evaluación del manejo del estiércol y la fertilidad del suelo en parcelas agrícolas*. https://repositorio.umsa.bo

Mamani Layme, D. (2023). Diseño del sistema de alcantarillado sanitario y planta de tratamiento de aguas residuales domésticos para las localidades de Pucarani, Puerto Pérez y Batallas. *Memoria laboral para obtención del Grado Licenciatura en Ingeniería Civil*. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Mayor de san Andrés (UMSA), La Paz. 267 pp.

Mendoza Reyes, S. (2024). Los ignorados de la Bahía Cohana y una inversión de $us 86 MM aún sin resultados visibles. Obtenido de *lanube, reportajes*: https://todosnube.com/blog/2024/08/27/los-ignorados-de-la-bahia-cohana/ https://www.youtube.com/watch?v=qdjzkp44VXA

Michiels, D. (2019). Water pollution and purification in a tropical high-altitude lake (Lake Titicaca, Bolivia). A mesocosm study, Master in Biology, Specialization in Human Ecology, Vrije Universiteit Brussel (VUB). 21 pp.

Mitsch, W.J. (2005). Wetland creation, restoration, and conservation: a wetland invitational at the Olentangy River Wetland Research Park. *Ecological Engineering 24(4): 243-251*.

Mitsch, W.J. & Gosselink, J. (2000). *Wetlands*, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, 920 pp. ISBN: 0 471 29232 X.

Mitsch, W.J. & S.E. Jørgensen (Eds.) (1989). Ecological engineering: An introduction to ecotechnology. Environmental Science and Technology: *A Wiley-Interscience Series of Texts and Monographs*. 496 pp. ISBN: 978-0471625599.

Mitsch, W.J., L. Zhang, K.C. Stefanik, A.M. Nahlik, C.J. Anderson, B. Bernal, M. Hernandez & K. Song (2012). Creating Wetlands: Primary Succession, Water Quality Changes, and Self-Design over 15 Years. *BioScience 62(3): 237–250*. https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.3.5

MMAyA (2016). *Cartilla 3. Sistemas de cosecha de aguas de lluvia*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR), La Paz, 35 pp. https://www.mmaya.gob.bo/wp-content/uploads/2022/10/Cartilla-3ra-sistema-de-cosecha.pdf

MMAyA (2017). Propuesta de una planta piloto de filtros de macrófitas flotantes para la isla de Suriqui que permita la recuperación ecológica parcial del Lago Huiñaymarca con el uso de y manejo tradicional de *Schoenoplectus californicus* spp. *totora* var *totora*. En: Consultoría para la *Elaboración de una Propuesta para Plantas Piloto de Fitorremediación para la isla Suriqui, Río Katari y Bahía de Cohana, como Medida de Adaptación al Cambio Climático*. UGCK/MMAyA, Banco Interamericano de Desarrollo (BID). 95 pp.

MMAyA (2018). *Plan Director de la Cuenca Katari y su Estrategia de Recuperación Integral de la Cuenca y del Lago Menor del Titicaca*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR), Programa Nacional de Cuencas (PNC). https://www.scribd.com/document/459872316/PDC-Cuenca-Katari-2-pdf

Molina, C.I., X. Lazzaro, S. Guédron, & D. Achá (2017). Contaminación de la Bahía de Cohana, Lago Titicaca (Bolivia): Desafíos y oportunidades para promover su recuperación. *Ecología en Bolivia 52*(2): 65-76. ISSN: 1605-2528.

Montuelle, B. & A. Clémens (2015). *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions. Zone Atelier Bassin du Rhône* (ZABR), Observatoire des Lacs Alpins (OLA). Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE). 205 pp. ISBN: 978-2-917199-04-6. http://www.graie.org/zabr/OuvrageLacs/accueilLacs.htm

Moss, B., S. Kosten, M. Meerhoff, R.W. Battarbee, E. Jeppesen, N. Mazzeo, K. Havens, G. Lacerot, Z. Liu, L. de Meester, H. Paerl & M. Scheffer (2011). Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters* 1: 101-105. DOI: 10.5268/IW-1.2.359.

Northcote, T., S., P. M., Levy, D., & M.S. Greaven M.S. (Eds.) (1991). *Contaminación en el Lago Titicaca, Perú: Capacitación, Investigación y Manejo*. Westwater Research Centre, University of British Columbia, Vancouver, Canada; Instituto de Aguas Alto Andinas, Universidad Nacional del Altiplano (UNAP), Puno, Perú. ISBN: 01-920146-38-4.

Núñez-López, R.A., Y.M. Vong, R.O. Borges & E.J. Olguín (julio-septiembre, 2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones., 69-82. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf

Ocola Salazar, J., V. *Fernández Valdivia, J. Escalante Arcos, K.G. Bratzo, L.V. Wilber, C.P. Llojan & E.L. César (2020). La acuicultura y la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del Lago Titicaca*. Universidad Nacional de Juliaca, Editorial San Marcos, 294 pp. ISBN: 9786123156985.

Ocola Salazar, J. (2021a). *Presentación del Diagnóstico Binacional Pesquero y Acuícola en el ámbito del Sistema Hídrico Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coipasa*. Ministerio de Relaciones Exteriores, Estado Plurinacional de Bolivia, 19 de Octubre de 2021, https://cancilleria.gob.bo/mre/2021/10/19/6259/

Ocola Salazar, J. (2021b). *Presentación del Diagnóstico Pesquero y Acuícola del Lago Titicaca potenciará a la región. 05 de octubre 2021*. Red Nacional de Información Acuícola (RNIA). Ministerio de la Producción, Perú. https://rnia.produce.gob.pe/presentacion-del-diagnostico-pesquero-y-acuicola-del-lago-titicaca-potenciara-a-la-region/

Ocola Salazar, J.J., M.A. Meza Álvarez, J. Escalante Arcos & L.P. Sullcata Cruz (2022). *Inventario de Recursos Hídricos y Fuentes Contaminantes en la Cuenca Lago Titicaca – Bolivia*. Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Lago Titicaca-Río Desaguadero-Lago Poopó y Salar de Coipasa (ALT). 178 pp.

OECD (1982). *Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. Paris, 154 pp.

OECD (2022). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options, OECD* Publishing, Paris, 201 pp. https://doi.org/10.1787/de747aef-en

Paredes-Zavala, J., A. Sánchez Moreno del Castillo, K. Ordoñez Rivera & M. Palo Zegarra (2017). Caracterización de microplásticos en los recursos hidrobiológicos del Lago Titicaca. En: *Fondo Semilleros de Investigación*. Universidad Catolica de Santa Maria, Arequipa, Perú. https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9479 , https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ea1b7162-b379-4687-a4b9-43c32aece302/content

Pavlineri, N., N.T. Skoulikidis & V.A. Tsihrintzis (2017). Constructed floating wetlands: a review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis. *Chemical Engineering Journal* 308: 1120-1132.

Marco Pilotti, M., L. Baronea, M. Balistrocchi, G. Valerio, L. Milanesi & D. Nizzoli (2021). *Constructed floating wetlands: a review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis*. Water Research 190: 116727. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116727

PNUMA (2011)[56]. *Hacia una economía verde: Guía para el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza - Síntesis para los encargados de la formulación de políticas*. www.unep.org/greeneconomy , https://sostenibilidadyprogreso.org/files/entradas/hacia-una-economia-verde.pdf

Revilla Herrero, C.J. (2021). *¿Somos nosotros mismos? Desigualdades socioecológicas y urbanización en la cuenca del río Katari*. Centro de Estudios para el Desarrollo Laboral y Agrario (CEDLA), La Paz, 334 pp. https://cedla.org/producto/somos-nosotros-mismos-desigualdades-socioecologicas-y-urbanizacion-en-la-cuenca-del-rio-katari/, https://biblioteca-repositorio.clacso.edu.ar/bitstream/CLACSO/16801/1/somos_nosotros_mismos.pdf

Revilla Herrero, C.J. (2022). *Diagnóstico situación ambiental de la cuenca Katari*. Instituto de Investigación y Acción para el Desarrollo Integral (IIADI), La Paz, 40 pp. ISBN: 978-9917-9986-1-7. https://iiadi.bolivia.bo/wp-content/uploads/2023/06/Diagnostico-Cuenca-Katari-LIBRO-OFICIAL.pdf

Revilla Herrero, C.J. (2023). Aproximaciones a los mecanismos de desigualdad socioecológicas urbano-rural: lecciones desde la cuenca Katari en La Paz, Bolivia. *Umbrales* 40: 101-130. DOI: 10.53287/tpko4631jf45. https://doi.org/10.53287/cdwp8767bb33q

Ribera Arismendi, M.O. (2008). *La híper-contaminación de la Bahía de Cohana*. Observatorio Ambiental de la Liga de Defensa del Medio Ambiente (LIDEMA), La Paz. 90 pp.

56 En 2011, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) publicó el informe "Hacia una economía verde: Caminos hacia el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza", destacando la importancia de la economía verde para el crecimiento económico, la creación de empleos y la reducción de la pobreza. Este informe analizó el potencial de la economía verde y su aplicación en diferentes contextos, incluyendo el caso de España.

Riveros Urbina, G.C. (2024). Microplásticos en peces nativos del género Orestias spp. del Lago Titicaca que son destinados al consumo humano - Perú. Tesis de Licenciado en Biología, Universidad Nacional del Altiplano (UNAP), Escuela Profesional de Biología, Puno. 74 pp. https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/21904/Riveros_Urbina_Gariz_Chileca.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ronchail, J., J. Espinoza, D. Labat, J. Callède & W. Lavado (2014). Evolución del nivel del Lago Titicaca durante el siglo XX. (Capitulo A-1). En: M. Pouilly, X. Lazzaro, D. Point, & M. Aguirre (Eds.). *Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca*. 320 pp. Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) – Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN), Quito, Ecuador: 1-13. ISBN: 978 99974-41-84-3. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2014-015.pdf

Ryding, S:O. & W. Rast (1989). *The Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs. MAB – Man and the Biosphere Series*. París: UNESCO / The Parthenon Publishing Group. 314 pp. ISBN: 978-92-3-102550-1, 0-929858-13-1, 1-85070-257-8. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000085776

Salt, D.E., R.D. Smith & I. Raskin (1998). Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol*. 49: 643-668. https://www.academia.edu/8745483/1998_Salt_Phytoremediation

Scheffer, M. (1998). *The Ecology of Shallow Lakes. Springer, New York*, 358 pp. ISBN: 978-0-412-74920-9. https://link.springer.com/book/9780412749209

SENASAG (2021). *Resolución Administrativa n° 09/2021*. https://www.senasag.gob.bo/index.php/normativas-y-resoluciones/reglamento-y-resoluciones-administrativas/category/5403-2021

SERGEOMIN (2018). *Gestión de Residuos Mineros y Remediación Ambiental*. Ver: https://www.sergeomin.gob.bo , y para mayores información CODEaUNI en Lima: https://www.codeauni.com/comunidad/blog/73/#:~:text=La%20gestión%20de%20residuos%20mineros,extraídos%20junto%20con%20los%20minerales

U.S. Corps of Engineers (1982). Lake Erie Wastewater Management Study – Final Report. District, Buffalo. The Ohio State University (OSU), EE. UU. 534 pp. https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=osu.32435015575657&seq=3

Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. Ecological Engineering 25(5): 478-490.

Wetzel, R.G. (1975). *Limnology*. W. B. Saunders Co. Philadelphia, London, and Toronto.743 pp. https://doi.org/10.4319/lo.1976.21.6.0930

Wood, A. (1995). Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding. *Water Science and Technology* 32(3): 21-29.

Paredes-Zavala, J., A. Sanchez Moreno del Castillo, K. Ordoñez Rivera, M. Palo Zegarra (2017). *Caracterización de Microplásticos en los Recursos Hidrobiológicos del Lago Titicaca*. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9479

Zhang, H., W. Tang, W. Wang, W. Yin & X. Ma Liu H. (2021). A review on China's constructed wetlands in recent three decades: Application and practice. *Journal of Environmental Sciences*, 104: 53-68. DOI: 10.1016/j.jes.2020.11.032.

ISBN: 978-9917-9749-4-9

La elaboración de este documento es gracias al apoyo de Diakonía: