



SOCIEDAD-MEDIO AMBIENTE

El futuro fluye

Gotas de cambio en el análisis de la
contaminación y sostenibilidad hídrica.
Casos de estudio

***Editor.* Oscar Tinoco Gómez**

Jorge Enrique Castillo Cueva
Schelah Nadia De la Colina Rivas
Miguel Angel Oruna Rodriguez
Alberto Rodriguez Palacios Miñano
Aldo Guillermo Rivadaneira Cuya
Darwin Dean Duran Janampa
Percy Wenceslao Lature Bustamante
Alcides Guillermo Joo Aguayo
Augusto Denis Madueño Macedo

Eduardo Julian Villarroel Nuñez
Juan Enrique Sigarróstegui Gutiérrez
Duilio Angel Aranda Ipince
Silvia Coronado Ramirez
Luis Adrián González Quiñónes
Pedro Jesús De Bracamonte Morales
Julio Douglas Vergara Trujillo
Deina Candelaria Tinoco Orihuela
Oscar Rafael Tinoco Gómez

El futuro fluye

Gotas de cambio en el análisis de la
contaminación y sostenibilidad hídrica.

Casos de estudio

Editor. Oscar Tinoco Gómez

El futuro fluye

Autores:

- | | |
|-------------------------------------|--|
| © Jorge Enrique Castillo Cueva | © Eduardo Julian Villarroel Nuñez |
| © Schelah Nadia De la Colina Rivas | © Juan Enrique Sigarróstegui Gutiérrez |
| © Miguel Angel Oruna Rodriguez | © Duilio Angel Aranda Ipince |
| © Alberto Rodriguez Palacios Miñano | © Silvia Coronado Ramirez |
| © Aldo Guillermo Rivadaneira Cuya | © Luis Adrián González Quiñónez |
| © Darwin Dean Duran Janampa | © Pedro Jesús De Bracamonte Morales |
| © Percy Wenceslao Lature Bustamante | © Julio Douglas Vergara Trujillo |
| © Alcides Guillermo Joo Aguayo | © Deina Candelaria Tinoco Orihuela |
| © Augusto Denis Madueño Macedo | © Oscar Rafael Tinoco Gómez |

Editado por :

© Oscar Rafael Tinoco Gómez
Calle El Abutillon 3881, Urb. Las Palmeras - Los Olivos
otinocog@unmsm.edu.pe

Diagramación de texto, maquetación y diseño:

© Carlos Alberto Vega Vidal

Hecho el depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2025-00101

Primera edición digital, Enero 2025

ISBN: 978-612-03-0468-6

Libro electrónico disponible en: [http:// librosctscafe.ctscafe.pe/](http://librosctscafe.ctscafe.pe/)

ISBN: 978-612-03-0468-6



9 786120 304686

Introducción

El recurso agua es uno que cotidianamente se torna más escaso, asociado este hecho a los problemas relacionados con el cambio climático, el factor demográfico y a la globalización de la economía. Las actividades industriales y de servicio requieren cada vez mayores volúmenes del líquido elemento, mientras que los esfuerzos por el tratamiento de efluentes industriales no equipara este fenómeno. Residuos industriales generados en diversos procesos productivos contribuyen con el aumento de la biomasa, muchos de ellos son desechados en rellenos sanitarios o simplemente son descartados en lugares inapropiados.

En pleno siglo XXI existen todavía comunidades de diversas latitudes que exigen acceso al agua, no solo en cantidad sino, sobre todo, en calidad; otras muchas presentan como una dura realidad un ineficiente manejo de las aguas residuales tanto domésticas como industriales. El informe de la ONU-Agua (2023) respecto a este elemento fundamental para la humanidad es revelador y alarmante. “En todo el mundo, 2.000 millones de personas (el 26% de la población) no disponen de agua potable y 3.600 millones (el 46%) carecen de acceso a un saneamiento gestionado de forma segura”, señala dicho informe, en donde además se invoca una necesaria cooperación internacional para afrontarla. En el Perú, diversos estudios alertan sobre un riesgo hídrico que puede comprometer el desarrollo económico y social.

Un aspecto particular que debe atenderse es el de la gobernanza del agua, en el que confluye lo público con lo privado y en donde es necesaria una visión sistémica. Ya en 2003, un informe de la ONU alertaba al respecto. “Se trata de una crisis de gestión de los recursos hídricos, ocasionada principalmente por deficiencias en la gobernabilidad del recurso y que afecta principalmente a los más pobres y al entorno natural” (ONU/WWAP, 2003).

Este recurso natural y su problemática es abordado desde diferentes disciplinas, es un tema definitivamente multidisciplinario. Tanto las ciencias básicas (Física, Química y Biología) como las ciencias sociales y muchas de las especialidades de la Ingeniería (Ingeniería Geológica, Geográfica, Agrícola, Química, Industrial, entre otras) abordan su estudio.

Desde la ingeniería, con perspectiva de sostenibilidad, es necesario considerar la importancia de una gestión eficiente de recursos hídricos, comprometer la participación de comunidades y empresa en la protección de las fuentes de agua, promover el diseño e implementación de infraestructura que minimice el impacto ambiental, así como fomentar e implementar innovación tecnológica tanto para el tratamiento y reuso de las aguas residuales como para la desalinización del agua.

La presente entrega es un texto elaborado por doctorandos de la Unidad de Pos-Grado de la Facultad de Ingeniería Industrial, sobre la importancia del recurso agua en general y de la actividad industrial en particular. Es producto de la visión multidisciplinaria de los mismos y de su compromiso con el medio ambiente y desarrollo sostenible. La denominación es significativa, “El futuro fluye”.

Dr. Oscar Rafael Tinoco Gómez

Capítulo 1

Reúso de las aguas residuales en Perú: retos y oportunidades

Oscar Rafael Tinoco Gómez

INTRODUCCIÓN

Importancia del recurso hídrico en el planeta tierra

A principios del presente siglo, el Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo daba cuenta aspectos fundamentales para abordar su estudio en la actualidad:

- La importancia del agua radica, entre otras cosas, “es el elemento más frecuente en la Tierra, únicamente 2,53% del total es agua dulce y el resto es agua salada”.
- Se estima que “las dos terceras partes del agua dulce se encuentran inmovilizadas en glaciares y al abrigo de nieves perpetuas”.
- El papel de las precipitaciones sigue siendo “la principal fuente de agua para todos los usos humanos y ecosistemas”.
- La humanidad “extrae un 8% del total anual de agua dulce renovable y se apropia del 26% de la evapotranspiración anual y del 54% de las aguas de escorrentía accesibles”.
- Debido a la explosión demográfica en curso, “el consumo de agua per cápita aumenta (debido a la mejora de los niveles de vida), la población crece y en consecuencia el porcentaje de agua objeto de apropiación se eleva”. Esto permite señalar “que la cantidad de agua existente para todos los usos está comenzando

a escasear y ello nos lleva a una crisis del agua”.

- Debido a la acción antrópica, “los recursos de agua dulce se ven reducidos por la contaminación. Unos 2 millones de toneladas de desechos son arrojados diariamente en aguas receptoras, incluyendo residuos industriales y químicos, vertidos humanos y desechos agrícolas (fertilizantes, pesticidas y residuos de pesticidas)”.
- Se estima que “la producción global de aguas residuales es de aproximadamente 1.500 km³. Asumiendo que un litro de aguas residuales contamina 8 litros de agua dulce, la carga mundial de contaminación puede ascender actualmente a 12.000 km³”.
- Se estima que “a mediados del presente siglo, 7.000 millones de personas en 60 países sufrirán escasez de agua, en el peor de los casos, y en el mejor se tratará de 2.000 millones de personas en 48 países”.
- Se estima que al 2003 “1.100 millones de personas carecen de instalaciones necesarias para abastecerse de agua y 2.400 millones no tienen acceso a sistemas de saneamiento”.
- Estudios de larga data permiten afirmar que “una reducción del agua disponible ya sea en la cantidad, en la calidad, o en ambas, provoca efectos negativos graves sobre los ecosistemas”.
- Si bien es cierto que “el medio ambiente tiene una capacidad natural de absorción y de autolimpieza”. Pero, si se excede, “la biodiversidad se pierde, los medios de subsistencia disminuyen, las fuentes naturales de alimentos (por ejemplo, los peces) se deterioran y se generan costos de limpieza extremadamente elevados”.
- Alrededor del “48% de la población mundial actual vive en pueblos y ciudades. En el 2030 la proporción será de alrededor del 60%”. Se deduce que “a mayor crecimiento económico mayor urbanización, tal como ha sucedido en los últimos cuarenta años. Esto conducirá a una excesiva concentración de los desechos. Se proyecta que si “la gestión de los residuos es precaria o inexistente, las ciudades se transforman en los entornos más peligrosos que existen en el mundo”.
- Según estimaciones “el uso anual global de agua por parte de la industria aumentará de 725 km³ en 1995 a unos 1.170 km³ en 2025. El uso industrial representará entonces un 24% del consumo total de agua”.

- Se ha constado que “la mayor parte de los efluentes vertidos de muchas industrias son de materias primas en exceso, que podrían ser captados y reutilizados, reduciendo así los insumos y los costos”.
- “De los 8,000 millones de habitantes en el mundo, más de 2,300 millones viven en países que sufren insuficiencia del recurso hídrico, al menos en parte del año”.
- “Unos 3,600 millones no cuentan con instalaciones sanitarias y 2,300 millones no podían lavarse las manos en casa”.
- Finalmente, “el 26% de los residentes carece de agua potable y el 46% no tiene acceso a un saneamiento gestionado en forma segura”.

Mucho de lo señalado en dicho informe mantiene vigencia y/o se ha verificado en el devenir de estas últimas dos décadas

El agua es uno de los principales recursos del planeta tierra y en particular del Perú. Esto se refleja en un informe de la Unesco, en donde se señala que “El agua fomenta la prosperidad, al satisfacer las necesidades humanas básicas, promover la salud, los medios de vida y el desarrollo económico, garantizando, además, la seguridad alimentaria y energética y protegiendo la integridad del medio ambiente”. (Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024).

Asociado al desarrollo social y económico, a la creciente urbanización de localidades rurales y un crecimiento demográfico con tendencia creciente, la demanda de agua dulce registra un incremento anual del 1% (Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024). Dicho informe resalta los siguientes indicadores:

- Alrededor del 50% de la población mundial presenta “escasez de agua al menos durante parte del año”.
- Aproximadamente el 25% de la población mundial presenta “niveles de estrés hídrico extremadamente altos y utiliza más del 80% de su suministro renovable anual de agua dulce”.

Según la FAO (2013), el nivel de consumo de agua “ha estado creciendo a más del doble de la tasa de aumento de la población en el siglo “. Todo ello conduce al incremento del estrés hídrico a nivel mundial. Un informe de Unesco (2020) proyecta “que, debido al cambio climático, para el año 2050 alrededor de 685

millones de personas viviendo en más de 570 ciudades, enfrentarán a una disminución adicional de disponibilidad de agua dulce de por lo menos 10%”. (Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos, 2020). Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) al 2030 dependen en mucho de una gestión adecuada del agua.

El recurso hídrico en el Perú

En el caso peruano, un documento de la Autoridad Autónoma del Agua (ANA, 2015) sobre Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos resume los principales aspectos de los recursos hídricos y su problemática:

- Debido a la presencia de la Cordillera de los Andes existen 159 cuencas, concentradas en tres regiones hidrográficas: en la región hidrográfica del Pacífico (21,8% del territorio, 62 cuencas); en la del Amazonas (74,6% del territorio, 84 cuencas) y en la del Titicaca (3,6% del territorio, 13 cuencas).
- Nuestro país “cuenta con importantes recursos hídricos provenientes de fuentes naturales como glaciares, lagos, lagunas, humedales, ríos y acuíferos. De igual manera, fuentes alternativas como aguas desalinizadas provenientes del mar y aguas residuales tratadas”.
- El Perú “concentra el 71% de los glaciares tropicales de los Andes Centrales habiéndose registrado un total de 3044 glaciares. En los últimos cuarenta años se ha observado un “sostenido retroceso atribuible al calentamiento global, que repercute en la provisión de recursos hídricos para el consumo humano, agricultura, industria y generación de Energía”.
- Se ha constatado que “las ventajas del proceso de desalinización del agua de mar son enormes. Sin embargo, el costo de desalinización sigue siendo elevado en comparación con el uso de fuentes superficiales de agua, costo que tiende a disminuir con las mejoras tecnológicas”.
- Las aguas residuales tratadas “constituyen una importante fuente alternativa de agua que podrían sustituir importantes volúmenes de agua de primer uso, en actividades que no requieren la calidad de agua potable”.
- La implementación del tratamiento de aguas residuales impactará” en la reducción de riesgos para la salud pública, la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación y posterior disminución de los niveles de contaminación que afectan la calidad del agua”.

De acuerdo a la ley de recursos hídricos del estado peruano (2015) “el agua tiene valor sociocultural, valor económico y valor ambiental, por lo que su uso debe basarse en la gestión integrada y en el equilibrio entre estos. El agua es parte integrante de los ecosistemas y renovable a través del ciclo hidrológico”.(Título I, Artículo 1, Ley 29338)

Según un Informe del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI,2024):

- El **73,1% de los peruanos** presenta dificultades de acceso “a agua gestionada de manera segura (no reciben el servicio por fuentes de redes públicas, pilones o pilas)”
- Se constata que la carencia de agua segura es superior en el área rural con 97,5%; mientras que en la urbana se registra un 67,8% en el 2023”.
- Se estima que “**21,6% de peruanos no cuenta con alcantarillado, desagüe**, ni otra forma de disposición sanitaria de excretas. Esta población se considera a los que no cuentan con zanjas, pozo séptico, tanque u otros dentro o fuera de sus viviendas”.
- Respecto al “acceso a sistemas de alcantarillado y sanitarios” se estima que su carencia afecta en “zonas rurales al 59,9% de las comunidades, en comparación con solo el 12,3% en áreas urbanas. Esto implica que “existe una brecha significativa respecto a infraestructura sanitaria a entre ambos entornos”.

MARCO TEÓRICO

Aguas residuales

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) publicó en el año 2014 las directrices sobre la fiscalización ambiental de las aguas residuales en el Perú. En dicho documento se presentan las siguientes definiciones:

Las **aguas residuales** son “aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado”.

Las **aguas residuales industriales** “son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras”.

Las **aguas residuales domésticas** “son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente”.

Las **aguas residuales municipales** “son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado”.

Casi todas las actividades de los seres humanos que involucran el uso de agua generan aguas residuales. Existe una relación directamente proporcional entre “la demanda global de agua, el volumen de aguas residuales generadas y su nivel de contaminación en todo el mundo” (Informe UNESCO, 2017)

En el mismo documento (OEFA, 2014) se resaltan los siguientes problemas de las aguas residuales en el Perú:

- A nivel nacional existe “déficit de cobertura por Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS)”
- Existen **50 EPS** Saneamiento que cubren “al **69,65%** de la población urbana. La **población no cubierta** vierte directamente sus aguas residuales sin tratamiento al mar, ríos, lagos, quebradas o las emplean para el riego de cultivos”.
- Estas “aguas residuales sin tratamiento alguno y las aguas residuales tratadas inadecuadamente contaminan los cuerpos de agua natural”
- Existe “sobrecarga de aguas residuales en las plantas de tratamiento cuya infraestructura es insuficiente, lo cual origina que los efluentes tratados excedan los límites máximos permisibles (LMP), y no se cumplan con los estándares de calidad ambiental (ECA)”.
- Existen “Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (**PTAR**)”, **las mismas que utilizan diferentes tecnologías** (lagunas facultativas, lagunas aireadas, lodos activados o filtros percoladores).

En el Perú existen diferentes entidades relacionadas a la gestión de los recursos hídricos, entre las que destacan OEFA, ANA, Ministerio de Agricultura (MINAGRI), Ministerio de la Producción (PRODUCE), Ministerio del Ambiente

(MINAM), gobiernos regionales y gobiernos locales. Por otro lado, las actividades industriales se concentran mayoritariamente en las zonas urbanas.

El documento de OEFA (2014) ilustra dos casos típicos del vertimiento de aguas residuales por la industria, con y sin asociarse a una PTAR.

Imagen N°1: Caso 1



Fuente: OEFA, 2014

Imagen N°2: Caso 2



Fuente: OEFA, 2014

El informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos a nivel mundial señala las siguientes cifras: “países de ingresos altos tratan cerca del 70% de las aguas residuales municipales e industriales que generan. Países de ingresos medios-altos el 38%, 28% en países de ingresos medios-bajos. En países de ingresos bajos solo el 8% recibe algún tratamiento”.

Desde la perspectiva técnica, en el mismo informe se afirma que “las aguas residuales se componen, básicamente, de un 99% de agua y un 1% de sólidos disueltos, suspendidos o coloidales”.

Por otro lado, se advierte que “el vertido de aguas residuales sin tratar o con tratamiento inadecuado tendrá consecuencias que se clasifican en tres grupos, según tengan: i) efectos nocivos para la salud humana; ii) efectos ambientales negativos; iii) repercusiones desfavorables para las actividades económicas”.

La ODS 6: factor clave para el tratamiento de las aguas residuales

En septiembre de 2015, la Organización de las Naciones Unidas estableció la Agenda 2030, constituida por 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS), cada uno de los cuales comprende metas específicas que deben alcanzarse hasta el 2030. Esta Agenda, a través de sus 17 ODS presenta 169 metas y 231 indicadores, cuyo logro compromete a sus los Estados miembros.

El **ODS 6** se orienta a “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”.

El Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, publicado el año 2023, señala un dato alarmante: “el mundo no está alcanzando la mayoría de los Objetivos para el 2030”. Entre las principales anotaciones de este informe con respecto al ODS se señalan las siguientes:

- Se reconocen importantes avances pero “miles de millones de personas continúan sin acceso a agua potable segura, saneamiento ni higiene”.
- Si se quiere llegar a “la cobertura universal para el 2030 será necesario aumentar sustancialmente las tasas actuales de progreso en el mundo: seis veces en el caso del agua potable, cinco veces en el del saneamiento y tres veces en el de la higiene”.
- Se reporta que “la eficiencia en el uso del agua aumentó un 9 %, pero el estrés hídrico y la escasez de agua siguen siendo motivo de preocupación en muchas partes del mundo”.
- A la gravedad de la situación descrita se le asocian los conflictos armados y el incesante cambio climático.
- Finalmente se señala: “Resulta alentador que 44 países hayan estado a punto de alcanzar la meta y que 22 hayan demostrado que es posible un progreso real y rápido, pero es necesaria una aceleración urgente en 107 países”.

La meta 6.3 de la Agenda 2030 establece: “De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial”

Para el seguimiento de esta meta 6.3 se establecieron los siguientes indicadores:

6.3.1 Proporción de aguas residuales tratadas de manera adecuada

6.3.2 Proporción de masas de agua de buena calidad

En el caso peruano la Autoridad Nacional del Agua (ANA) presenta los siguientes indicadores, con cifras trabajadas por el INEI:

Grafico N°1



Este informe advierte limitaciones respecto a bases de datos adecuadas para tal efecto; aún así se concluye que “el 77.1% de la población cuenta con servicios de saneamiento básico (BSS), es decir que la instalación privada permite la separación de las excretas del contacto humano”.

Con respecto al segundo indicador relacionado con la meta 6.3, el informe de la ANA (2020) ilustra el procedimiento de su cálculo: se basa “en la medición de cinco parámetros básicos: fósforo total, nitrógeno amoniacal, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, que representan las presiones más importantes a nivel global, tales como el enriquecimiento de nutrientes, agotamiento de oxígeno, salinización y acidificación”.

En la siguiente figura se ilustra el resultado de la medición de este indicador:

Gráfico N°2



Fuente: Autoridad Nacional del Agua – ANA. Dirección de Calidad y Evaluación de recursos Hídricos

Del gráfico se desprende que se registra el 74.4% de cuerpos de agua con mala calidad ambiental en el Perú.

RETOS Y OPORTUNIDADES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL PERÚ

En el año 2017, el Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos abordó el tratamiento de las aguas residuales desde una perspectiva diferente y retadora: la posibilidad y necesidad de su reuso. En el mismo sentido, Rodríguez et al (2020), en un estudio auspiciado por el Banco Mundial, plantean que este tratamiento debe ir de “residuo a recurso”, en donde abordan esta problemática “Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe”. Esto último ubica el tema en los ámbitos de la denominada “economía circular”.

El Informe Mundial del 2017 sobre el desarrollo de los recursos hídricos considera fundamental desarrollar cuatro ciclos en la gestión del agua:

Cuadro N°1

Ciclo	Descripción
1. Prevención o reducción de la contaminación en la fuente	Priorizar aquellos métodos de control de la contaminación hídrica que se centren en la prevención y minimización de las aguas residuales, en lugar de los sistemas de tratamientos en la etapa final. Si no se realizan mediciones, no se puede identificar el problema y no se puede evaluar la eficacia de las políticas.
2. Recolección y tratamiento de aguas residuales	Las redes centralizadas de eliminación de desechos por flujos de agua siguen siendo el método más común de saneamiento y evacuación de las aguas residuales de origen doméstico, comercial e industrial. En el mundo, cerca del 60% de las personas están conectadas a un sistema de alcantarillado (si bien solo un pequeño porcentaje del total de aguas residuales recolectadas recibe tratamiento) En muchos países, los sistemas de tratamiento de aguas residuales centralizados a gran escala ya no serían la opción más viable para la gestión de aguas urbanas. Se ha observado una creciente tendencia a contar con sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizados, que atienden establecimientos individuales o pequeños grupos de establecimientos.
3. La utilización de aguas residuales como fuente alternativa de agua	En general, la reutilización de agua es más viable desde el punto de vista económico si el punto de reutilización se encuentra cerca del punto de producción. Tratar el agua residual hasta alcanzar un nivel de calidad de agua apropiado para el usuario (es decir, tratamientos «adecuados para el fin específico») aumenta las posibilidades de recuperar costos. La utilización de aguas residuales es también una opción más competitiva si consideramos que los precios del agua dulce también manifiestan los costos de oportunidad por su utilización y las tasas por contaminación reflejan los costos de eliminación de los contaminantes de los flujos de aguas residuales. El uso planificado de aguas residuales tratadas, completa o parcialmente, para los servicios de los ecosistemas puede aumentar la eficiencia del recurso y generar beneficios para los ecosistemas al reducir las extracciones de agua dulce y reciclar y reutilizar los nutrientes, permitiendo así el desarrollo de la industria pesquera y otros ecosistemas acuáticos gracias a la reducción de la contaminación del agua y la recarga de acuíferos agotados.
4. La recuperación de subproductos útiles	Existe un amplio potencial de las aguas residuales como fuente de recursos, como energía y nutrientes, que están poco abordados. Se puede recuperar energía, por ejemplo, para la generación de energía eléctrica, calefacción y refrigeración. La recuperación energética también puede ayudar a las instalaciones a reducir tanto costos operativos como su huella de carbono, lo cual permitiría mayores fuentes de ingresos mediante créditos de carbono y programas de comercio de emisiones de carbono. La recuperación combinada de nutrientes y energía también tiene gran potencial. La recuperación energética <i>ex situ</i> comprende la incineración de lodos en plantas centralizadas mediante procesos de tratamiento térmico. Es probable que la recolección y utilización de orina sea un elemento de la gestión ecológica de aguas residuales cada vez más importante, ya que esta contiene el 88% de nitrógeno y el 66% del fósforo que se encuentran en los desechos humanos, ambos componentes esenciales para el crecimiento de las plantas.

Fuente: Elaboración propia

Respecto al ciclo de gestión de los recursos hídricos, el Informe de las Naciones Unidas (2017) destaca que “la gestión de las aguas residuales generalmente recibe poca atención social y política en comparación con los retos del abastecimiento de agua, especialmente en el contexto de la escasez de agua”. Pero también señala que la inercia en el accionar respecto de las aguas residuales puede tener efectos nocivos “para la sostenibilidad del abastecimiento de agua, la salud humana, la economía y el medio ambiente”.

Es necesario añadir que tanto en el caso de las aguas residuales no tratadas o

parcialmente tratadas, cuando éstas se vierten se genera impactos negativos a los suelos, las aguas superficiales y también a las aguas subterráneas. Tener en cuenta, además, que los vertidos líquidos en lagos y ríos desembocan generalmente en los océanos.

Hasta el presente todavía no es posible determinar un patrón de la composición de las aguas residuales, es más, se puede señalar que ésta “varía en el mundo y está determinada por un amplio conjunto de factores, entre ellos el uso doméstico del agua y el nivel de comercialización/industrialización”.

En la siguiente tabla se muestran se presentan algunos de los principales contaminantes probablemente presentes en diferentes fuentes de agua residuales, a nivel mundial.

Cuadro N°2

Principales contaminantes de las aguas residuales, su fuente y efectos

Contaminante	Parámetros representativos principales	Fuente				Posibles efectos del contaminante
		Aguas residuales		Escorrentía		
		Domésticas	Industriales	Urbana	Agrícola y de pastoreo	
Sólidos suspendidos	Total de sólidos suspendidos	xxx	← →	xx	x	• Problemas estéticos • Depósitos de lodos • Adsorción del contaminante • Protección de patógenos
Materia orgánica biodegradable	Demanda bioquímica de oxígeno	xxx	← →	xx	x	• Consumo de oxígeno • Muerte de peces • Condiciones sépticas
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo	xxx	← →	xx	x	• Crecimiento excesivo de algas • Toxicidad para los peces (amoníaco) • Enfermedades en recién nacidos (nitrito) • Contaminación del agua subterránea
Patógenos	Coliformes	xxx	← →	xx	x	• Enfermedades transmitidas por el agua
Materia orgánica no biodegradable	Pesticidas, algunos detergentes, otros	x	← →	x	xx	• Toxicidad (varios) • Espuma (detergentes) • Reducción de la transferencia de oxígeno (detergentes) • No biodegradabilidad • Mal olor (es decir, fenoles)
Metales	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, etc.)	x	← →	x		• Toxicidad • Inhibición del tratamiento biológico de lodos residuales • Problemas con el uso agrícola de lodos • Contaminación de las aguas subterráneas
Sólidos inorgánicos disueltos	Total de sólidos disueltos, conductividad	xx	← →		x	• Salinidad excesiva → daño a las plantaciones (riegos) • Toxicidad para las plantas (algunos iones) • Problemas con la permeabilidad del suelo (sodio)

x: pequeño xx: medio xxx: alto ↔: variable vacío: por lo general, sin importancia

Fuente: Von Sperling (2007, Tabla 1.2, p. 7).

Las aguas residuales generadas por el sector industrial constituyen otro tema controversial en el mundo. Esto debido a que los datos correspondientes son muy escasos. Según PNUMA (2007) se proyecta que para el año 2025 “el volumen de aguas residuales industriales se duplicará”

Cada actividad industrial, en promedio, genera efluentes con determinadas características, aspecto importante en la perspectiva de buscar la posibilidad del reuso.

En la siguiente tabla se ilustra estas características.

Cuadro N°3

Contenido de aguas residuales típicas en algunas industrias importantes

Industria	Contenido típico de los efluentes
Pulpa y papel	- Ácidos lignosulfónicos clorados, ácidos de resina clorados, fenoles clorados e hidrocarburos clorados. Alrededor de 500 compuestos orgánicos clorados identificados - Compuestos colorados y halógenos orgánicos absorbibles (AOX) - Contaminantes que se caracterizan por DBO, DQO, sólidos en suspensión (SS), toxicidad y color
Hierro y acero	- Agua de enfriamiento que contiene amoníaco y cianuro - Productos de sulfatación: benceno, naftaleno, antraceno, cianuro, amoníaco, fenoles, cresoles hidrocarburos aromáticos policíclicos - Acritos hídricos, sebo y sólidos en partículas - Agua ácida de enjuague y residuos de ácidos (clorhídrico y sulfúrico)
Minas y canteras	- Mezcla de partículas de roca - Tensioactivos - Acritos y acritos hídricos - Minerales no deseados, i.e., arsénico - Limos con partículas muy finas
Industria de alimentos	- Altos niveles de concentraciones de DBO y SS - DBO y pH variable según la verdura, fruta o carne y la estación - Procesamiento de verduras: partículas altas, algunos compuestos orgánicos disueltos, tensioactivos - Carne: orgánicos fuertes, antibióticos, hormonas de crecimiento, pesticidas e insecticidas - Gastronomía: material orgánico vegetal, sal, saborizantes, materia colorante, ácidos, álcalis, aceite y grasa
Destilación	- DBO, DQO, SS, nitrógeno, fósforo, variable por procesos individuales - Variable de pH debido a agentes de limpieza ácidos y alcalinos - Temperatura alta
Productos lácteos	- Azúcares disueltos, proteínas, grasas y residuos de aditivos - DBO, DQO, SS, nitrógeno, fósforo
Químicos orgánicos	- Pesticidas, productos farmacéuticos, pinturas y tintes, productos petroquímicos, detergentes, plásticos, etc. - Materiales de productos base, subproductos, material de producto en forma soluble o en partículas, agentes de lavado y limpieza, disolventes y productos de valor agregado tales como plastificantes
Textiles	- DBO, DQO, metales, sólidos en suspensión, urea, sal, sulfuro, H₂O, NaOH - Desinfectantes, biocidas, residuos de insecticidas, detergentes, acritos, lubricantes de tejer, acabados para hilar, solventes usados, compuestos antiestáticos, estabilizantes, agentes tensioactivos, auxiliares orgánicos de procesamiento, materiales catiónicos, color - Acidez o alcalinidad alta - Calor, espuma - Materiales tóxicos, residuos de limpieza, tamaño
Energía	- Producción de combustibles fósiles: Contaminación de gases de petróleo y gas y fracking - Agua de calefacción/enfriamiento

Fuente: Basado en IWA Publishing (S.F), PNUAMA (2010) y Moussa (2008).

En un mundo globalizado y cada día más competitivo es necesario abordar el tratamiento de las aguas residuales como un reto y como una oportunidad de nuevos negocios, adoptando los esquemas de la economía circular y el paradigma de producción más limpia. Esto que ya fue vislumbrado en el 2017 (Informe Naciones Unidas sobre los recursos hídricos) como por investigadores auspiciados por el Banco Mundial (2020) se va concretizando de manera paulatina pero no tan intensa para los requerimientos del pleno cumplimiento del ODS 6 en la Agenda 2030. El informe de Naciones Unidas (2017) resume varias posibilidades de reuso del recurso hídrico en la industria:

- “El agua de enfriamiento y calefacción, así como las aguas pluviales, pueden ser adecuadas para el lavado, ajuste del pH y protección contra incendios.
- Otro caso, “el agua de procesos que no se trata lo suficiente para que su calidad sirva para los fines previstos tiene más potencial para reciclaje, (en materiales de transporte, agua de enjuague, torres de enfriamiento de agua, alimentación de calderas”, entre otros)”
- Otro aspecto importante: “el uso de aguas residuales o aguas residuales tratadas

por reciclaje es un proceso que se puede realizar muchas veces.”

- Simbiosis industrial. Constituye “una oportunidad notable para el uso de aguas residuales industriales y el reciclaje es la cooperación entre plantas” Esto se considera más “en parques industriales ecológicos que localizan estratégicamente industrias adyacentes entre sí para aprovechar de mejor manera la gestión y el reciclaje de aguas residuales”. Simbiosis que presenta un potencial interesante para las Pymes en el Perú.
- Sistemas de uso múltiple: procesos que “implican la reutilización en cascada de agua de mayor a menor calidad dentro de una cuenca hidrográfica pueden tener componentes industriales, por ejemplo, donde las aguas residuales domésticas pueden recuperarse para lavado y enfriamiento”

Por otro lado, El informe de investigadores auspiciados por el Grupo Banco Mundial (2020) también refuerza la idea de darle un uso adecuado a los residuos líquidos en general y a los efluentes industriales en particular. Se resalta, por ejemplo, la adopción del enfoque de economía circular en este propósito:

“Una de las principales ventajas de adoptarla en la gestión de aguas residuales es que la recuperación y el nuevo uso del recurso podrían transformar el saneamiento de ser un servicio costoso a uno que es autosostenible y añade valor a la economía”

De esto se desprende algo fundamental. Si deseamos transformar residuos en recursos, es menester alinear el tratamiento de las aguas residuales con metas que nos aproximen a una economía circular, de modo tal que la empresa orientada a los residuos se constituya en un socio clave de la empresa que las genera.

Este informe presentado por Rodríguez et al (2020) resume cuatro acciones fundamentales que garanticen esta necesaria transición de una economía lineal a una circular:

Cuadro N°4

Acción	Descripción
Desarrollar iniciativas para las aguas residuales como parte del marco de planificación de cuenca hidrográfica para maximizar los beneficios, mejorar la eficiencia y la asignación de recursos e involucrar a los actores pertinentes.	Priorizar “la planificación a nivel de cuenca” Para permitir “el aprovechamiento óptimo de instalaciones y programas de saneamiento, incluida la ubicación, calendarización y etapas de la infraestructura de tratamiento”
Desarrollar la empresa de servicios de agua del futuro sustituyendo el concepto de las plantas de tratamiento de aguas residuales por instalaciones de recuperación de recursos para aprovechar el valor del agua residual	Se requiere que “las plantas de tratamiento deban verse como instalaciones para la recuperación de recursos valiosos del agua residual: agua (para agricultura, el medio ambiente, la industria e incluso consumo humano), nutrientes (nitrógeno y fósforo), y energía”.
Explorar y apoyar el desarrollo de financiamiento innovador y de modelos de negocio sostenibles en el sector	Se requieren “subsidijs más eficientes para el saneamiento, por lo menos durante un período de transición. Sin embargo, la existencia de subsidios, no significa que el sector deba depender totalmente de financiamiento convencional”. Es importante “desarrollar modelos financieros y de negocio innovadores que aprovechen esos posibles flujos adicionales de nuevos ingresos”
Poner en práctica los marcos de política, institucional y reglamentario (PIR) necesarios para promover un cambio de paradigma en el sector	Si se desea promover “el desarrollo de estos proyectos innovadores a escala, se requieren cambios al entorno de PIR y es necesario valorar correctamente los recursos hídricos”. Es necesario fortalecer “los esfuerzos actuales en planificación de cuencas en la región”. El rol de “los gobiernos” debe consistir en “apoyar a las organizaciones de cuenca para que éstas puedan mejorar su pericia técnica y su capacidad de planificación, supervisión y ejecución.”

Fuente: Elaboración propia

Obermann (2024), en el “I Foro de Economía Circular en agua y saneamiento” realizado en Lima, resume algunos aspectos que es necesario resaltar:

- Las aguas residuales son parte de la solución, no del problema

Se requiere adoptar un conjunto de medidas que promuevan el reuso de estas aguas residuales

Gráfico N°3



Fuente: Obermann (2024)

Plantea además enfocar los esfuerzos de todos los actores involucrados para lograr los objetivos de la Agenda 2030 en el Perú, relacionados con el ODS 6.

Gráfico N°4



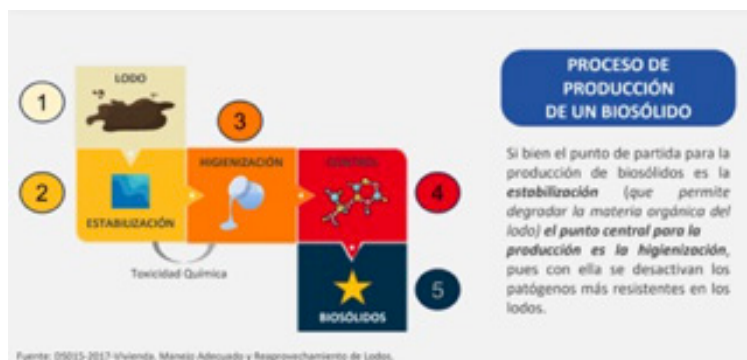
Fuente: Obermann (2024)

Alegre (2024) en el “I Foro de Economía Circular en agua y saneamiento” realizado en Lima, aborda la gestión circular de los biosólidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Cabe precisar que se define el “biosólido” como “el producto que resulta de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de AR domésticas y municipales”.

En su ponencia el Ingeniero Alegre ilustra el manejo de los biosólidos en dicho proceso.

Gráfico N°4



Fuente: Alegre (2024)

Alegre (2024) resalta la importancia de aplicar economía circular en estos procesos de manejo de biosólidos, a partir del Informe de Naciones Unidas (2017)

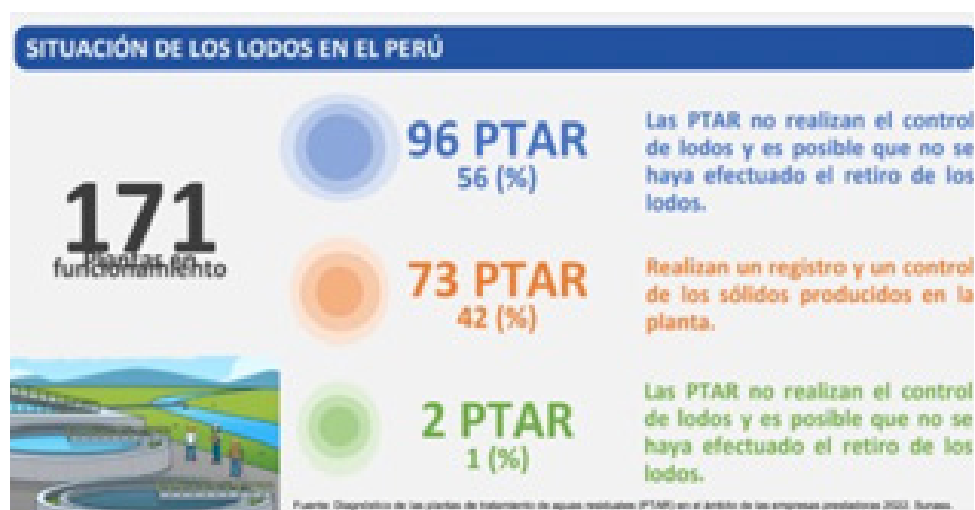
Gráfico N°5



Fuente: Banco Mundial (2017)

Finalmente, a partir de un informe de la SUNASS, Alegre (2024) ilustra indicadores sobre el manejo de los lodos en nuestro país.

Gráfico N°6



Fuente: Alegre (2024)

Además, Alegre (2024) da a conocer casos de éxito en el aprovechamiento de biosólidos en oportunidades de negocio:

Foto N°1



Fuente: Alegre (2024)

Foto N°2



Fuente: Alegre (2024)

Foto N°3



Fuente: Alegre (2024)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es sumamente importante que en el Perú se asuma como oportunidad el tratamiento de las aguas residuales. Desde el Estado se requiere la difusión de las normas legales correspondientes y se aliente a las PTAR y empresas en su conjunto para que transiten por este proceso. Las empresas generadoras de efluentes pueden y deben canalizar el reúso de las AR como una oportunidad de negocio, según la naturaleza de sus actividades.

REFERENCIAS

- Alegre, Marcos** (2024) Gestión circular de los biosólidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales: transformando desafíos en oportunidades. I Foro de Economía Circular en agua y saneamiento. Lima, Perú.
- ANA** (2015) Política y estrategia nacional de recursos hídricos.
- ANA** (2020) Indicadores Objetivo Desarrollo Sostenible 6. Perú..
- INEI** (2024) Informe sobre la situación de la pobreza en el Perú en 2023
- Obermann, Ingmar** (2024) Factores claves para promover el reúso de aguas y subproductos del sector saneamiento en Perú. I Foro de Economía Circular en agua y saneamiento. Lima, Perú.
- Rodriguez, Diego J.; Serrano, Hector Alexander; Delgado, Anna; Nolasco, Daniel; Saltiel, Gustavo.** (2020). De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. © World Bank, Washington, DC. <http://hdl.handle.net/10986/33436> License: CC BY 3.0 IGO
- Unesco** (2020) Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020. Agua y cambio climático.

Unesco (2003) Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo. Agua para todos, agua para la vida.

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la ONU). (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO

Capítulo 2

Contaminación y control de contaminación de aguas residuales industriales

Jorge Enrique Castillo Cueva

Schelah Nadia De la Colina Rivas

Miguel Angel Oruna Rodriguez

Alberto Rodriguez Palacios Miñano

Aldo Guillermo Rivadaneyra Cuya

INTRODUCCIÓN

Definición de aguas residuales industriales

Las aguas residuales generadas por actividades industriales y de manufactura contienen una amplia gama de contaminantes. Estos contaminantes incluyen productos químicos, metales pesados, aceites, grasas y otros residuos tóxicos que pueden tener efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana (Kumar et al., 2019; Li et al., 2020). La composición y la concentración de estos contaminantes varían considerablemente dependiendo del tipo de industria y los procesos aplicados.

Las aguas residuales industriales se dividen principalmente en tres categorías: contaminantes químicos, físicos y biológicos. Los contaminantes químicos comprenden sustancias tóxicas como metales pesados (mercurio, plomo, cadmio) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) que pueden ser carcinogénicos o disruptores endocrinos (Smith et al., 2021). Los contaminantes físicos incluyen sólidos en suspensión y variaciones térmicas que pueden impactar negativamente

los ecosistemas acuáticos. Finalmente, los contaminantes biológicos abarcan microorganismos patógenos como bacterias, virus y protozoos, que pueden ocasionar enfermedades infecciosas (Zheng et al., 2022).

La correcta gestión de las aguas residuales industriales es esencial para reducir su impacto ambiental. Esto requiere la implementación de tecnologías de tratamiento avanzadas, tales como sistemas de filtración por membranas, procesos biológicos y tratamientos químicos, con el fin de eliminar o disminuir la concentración de contaminantes antes de su vertido en cuerpos de agua o su reutilización en procesos industriales (Wang et al., 2023). Las empresas deben cumplir con estrictas normativas y adoptar prácticas sostenibles para asegurar la protección de los recursos hídricos y la salud pública.

Fuentes de generación de ARI:

Las ARI se generan en una amplia gama de industrias, incluyendo:

- **Industria química:** Fabricación de productos químicos, plásticos, pesticidas, etc.
- **Industria textil:** Teñido, acabado y tratamiento de telas.
- **Industria alimentaria:** Procesamiento de alimentos y bebidas.
- **Industria metalúrgica:** Siderurgia, fundición, galvanizado, etc.
- **Industria minera:** Extracción y procesamiento de minerales.
- **Industria papelera:** Fabricación de papel, cartón y productos derivados.
- **Industria del cuero:** Curtido y acabado de pieles.
- **Industria petrolera:** Refinación de petróleo y gas natural.

Características de las ARI: Las aguas residuales industriales (ARI) son las que se han utilizado en procesos industriales y que, por ello, han adquirido características físicas, químicas o biológicas diferentes a las del agua natural. Estas características pueden ser debidas a la presencia de contaminantes como materia orgánica, sólidos suspendidos, aceites y grasas, metales pesados, compuestos tóxicos, entre otros.

Fuentes de generación de ARI:

Las ARI se generan en una amplia gama de industrias, incluyendo:

- **Industria química:** Fabricación de productos químicos, plásticos, pesticidas, etc.
- **Industria textil:** Teñido, acabado y tratamiento de telas.
- **Industria alimentaria:** Procesamiento de alimentos y bebidas.
- **Industria metalúrgica:** Siderurgia, fundición, galvanizado, etc.
- **Industria minera:** Extracción y procesamiento de minerales.
- **Industria papelera:** Fabricación de papel, cartón y productos derivados.
- **Industria del cuero:** Curtido y acabado de pieles.
- **Industria petrolera:** Refinación de petróleo y gas natural.

Características de las ARI:

La cantidad y calidad de las ARI generadas por cada industria varía considerablemente, dependiendo de los procesos productivos específicos que se lleven a cabo. Algunas características generales de las ARI incluyen:

Las aguas residuales industriales generalmente presentan una alta concentración de contaminantes, lo que las convierte en una amenaza ambiental mayor en comparación con las aguas residuales domésticas.

Además, estas aguas residuales industriales pueden incluir contaminantes peligrosos como metales pesados, sustancias tóxicas y disolventes, los cuales pueden tener efectos perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

La composición de las aguas residuales industriales puede variar considerablemente a lo largo del tiempo, dependiendo de las actividades industriales específicas que las generen.

Impactos ambientales de las ARI:

Las ARI pueden tener diversos impactos ambientales, incluyendo:

- **Contaminación del agua:** Las aguas residuales industriales tienen el potencial de contaminar ríos, lagos, aguas subterráneas y mares, lo que puede degradar la calidad del agua y perjudicar a los ecosistemas acuáticos

- **Eutrofización:** El exceso de nutrientes en las aguas residuales industriales puede causar un aumento de materia orgánica en los cuerpos de agua, lo que lleva a un crecimiento descontrolado de algas y la subsecuente mortalidad de peces
- **Acidificación:** Las ARI ácidas pueden acidificar los cuerpos de agua, lo que puede dañar los ecosistemas acuáticos y afectar la salud humana.
- **Salinización:** Las ARI con alto contenido de sales pueden salinizar los suelos y el agua, lo que puede afectar la agricultura y la disponibilidad de agua potable.

Breve historia y contexto global

La generación de aguas residuales industriales (ARI) ha sido una consecuencia inevitable del desarrollo industrial desde sus inicios. Sin embargo, la conciencia sobre los impactos ambientales de las ARI y la necesidad de su control no comenzó a desarrollarse hasta el siglo XX. A continuación, se presenta un resumen de la breve historia y el contexto global de la contaminación por aguas residuales industriales:

Siglo XIX:

- **Industrialización:** La Revolución Industrial, iniciada en el siglo XVIII, impulsó el desarrollo de fábricas y procesos industriales que generaban grandes cantidades de aguas residuales sin tratamiento.
- **Contaminación evidente:** Los impactos de las ARI en los cuerpos de agua y el medio ambiente se hicieron cada vez más evidentes, causando daños a la salud humana y a los ecosistemas.
- **Falta de regulaciones:** No existían regulaciones o leyes específicas para el control de la descarga de ARI, lo que permitía a las industrias verter sus aguas residuales sin restricciones.

Siglo XX:

- **Primeras regulaciones:** En la década de 1970, comenzaron a surgir las primeras regulaciones ambientales en muchos países, estableciendo límites para la descarga de contaminantes en las ARI.
- **Conciencia ambiental:** El movimiento ambientalista ganó impulso, creando conciencia sobre la necesidad de proteger el medio ambiente y la salud humana de los impactos de la contaminación industrial.

- **Desarrollo de tecnologías:** Se desarrollaron nuevas tecnologías para el tratamiento de ARI, como los sistemas de tratamiento biológico y de membranas, mejorando la capacidad para eliminar contaminantes.

Siglo XXI:

- **Regulación más estricta:** Las regulaciones para el control de las ARI se han vuelto más estrictas y completas, abarcando una amplia gama de contaminantes y estableciendo estándares de calidad del agua más exigentes.
- **Búsqueda de la sostenibilidad:** La gestión sostenible del agua se ha convertido en un tema central, con empresas e industrias buscando reducir su consumo de agua y minimizar la generación de ARI.
- **Desafíos persistentes:** A pesar de los avances, la contaminación por ARI sigue siendo un problema ambiental importante a nivel global, requiriendo esfuerzos continuos para su control y tratamiento efectivo.

Factores que han influido en la evolución de la contaminación por ARI:

- **Avances tecnológicos:** El desarrollo de tecnologías de tratamiento de ARI ha permitido mejorar la eficiencia en la eliminación de contaminantes y reducir su impacto ambiental.
- **Crecimiento industrial:** El crecimiento industrial ha aumentado la cantidad de ARI generadas, lo que ha impulsado la necesidad de mejores prácticas de gestión y tratamiento.
- **Preocupaciones ambientales:** La creciente conciencia sobre los impactos ambientales de la contaminación ha motivado la implementación de regulaciones más estrictas y la búsqueda de soluciones sostenibles.
- **Cooperación internacional:** La colaboración entre países y organizaciones internacionales ha facilitado el intercambio de conocimientos y experiencias en la gestión de ARI.

Retos y desafíos actuales:

- **Falta de acceso a tratamiento:** En algunos países en vías de desarrollo, todavía existe una falta de acceso a tecnologías de tratamiento de ARI adecuadas, lo que resulta en la descarga de aguas residuales sin tratar al medio ambiente.
- **Cumplimiento de regulaciones:** El cumplimiento de las regulaciones para el control de ARI sigue siendo un desafío en algunos sectores industriales y regiones.

- **Costos de tratamiento:** La implementación de tecnologías de tratamiento de ARI puede ser costosa, lo que representa un obstáculo para algunas empresas, especialmente las pequeñas y medianas empresas.
- **Nuevos contaminantes:** La aparición de nuevos contaminantes en las ARI, como productos farmacéuticos y compuestos emergentes, presenta nuevos desafíos para su tratamiento y control.

TIPOS DE CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

El 59% del consumo total de agua en los países desarrollados están destinados al uso industrial, el 30% al consumo agrícola y un 11% al consumo doméstico, según el primer informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo. En 2025, el consumo de agua destinada al uso industrial alcanzará los 1.170 km³ año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km³/año. El sector productor es el que más consume y el que más contamina. En los países industrializados se producen más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo, mientras que en las naciones en desarrollo un 70% de los residuos generados en las fábricas se vierten al agua sin tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles (Rodríguez et al., 2006).

Hernández, Moreno & Sandoval (2017), consideran que el agua está contaminada cuando alguna de sus propiedades químicas, biológicas o físicas es alterada, afectando la vida acuática y provocando cambios marcados en la estructura de sus comunidades, además, cuando se introducen elementos superiores a los niveles de seguridad de los humanos, para el uso agrícola o industrial.

A su vez, distingue dos tipos de fuentes de contaminación:

- **Puntuales:** se identifican y provienen de un punto concreto, como una tubería de drenaje descargado directamente en un cuerpo de agua.
- **No puntales o difusas:** se presentan cuando los contaminantes llegan indirectamente al agua mediante cambios ambientales, difíciles de controlar y en su mayoría son la fuente contaminante de ríos, lagos y mares. Estas son vertidas superficialmente de sustancias químicas o infiltradas desde tierras de cultivo.

Contaminación industrial

Según CONAGUA (2010), en México, la industria autoabastecida sólo consume 10% del agua total (7.3 km³ anuales), la contaminación que genera en demanda bioquímica de oxígeno es tres veces mayor que la que producen 100 millones de habitantes. En 2002, las industrias con mayores descargas contaminantes fueron (ver Tabla 1):

Tabla N°1: Industrias con mayores descargas contaminantes de México.

Industria	m ³ /s	%
Acuacultura	67,6	39,6%
Azucarera	45,9	26,9%
Petrolera	11,4	6,7%
Servicios	10,3	6,0%
Química	6,9	4,0%
Otras	28,5	16,7%
Total	170,6	

Fuente: CONAGUA (2010).

A su vez, la industria azucarera es la que produce la mayor materia orgánica contaminante, mientras que la petrolera y química son las que generan contaminantes con mayor impacto ambiental. El sector industrial compite con otros sectores productivos por el uso del agua, particularmente con el agrícola, y en algunas regiones esto se convierte en un factor de conflicto social y político (Hernández et al., 2017).

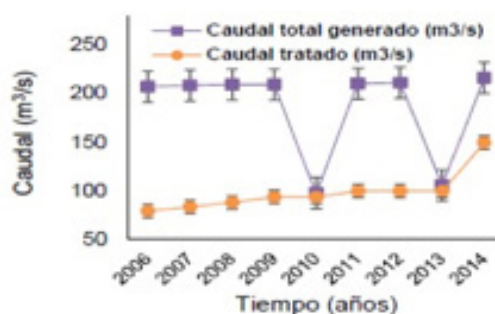
Según Echarri (2010, citado por Hernández et al., 2017), las aguas residuales industriales son provenientes de cualquier actividad o negocio que cuentan con procesos de producción que utilicen agua. Son variables en cuanto a caudal y composición, y sus características cambian de una industria a otra y de un mismo tipo de industria.

En México, más del 70% de los cuerpos de agua presentan cierto grado de contaminación, ocasionando graves problemas de disponibilidad del agua y pasando en menos de 60 años de 19,365 a 3,982 m³ por habitante al año, debido al incremento de la demanda de agua en zonas con menor disponibilidad de recursos, principalmente en el norte y centro del país (CONAGUA, 2016).

Para CONAGUA (2016), de los 214.6 m³/s de agua residual generada por el sector industrial, solo se trata 70.5 m³/s (ver Figura 1), dejando sin ningún tipo de tratamiento el 67.06% de estas a las empresas formalmente constituidas (grandes

y medianas) quienes reportan datos a fuentes oficiales, mientras que las pequeñas y micro empresas que constituyen el 98.7% de la actividad industrial en el país no tratan las aguas residuales que generan y mucho menos las industrias no formales que se desarrollan en comunidades rurales alejadas.

Figura N°1: Caudal generado y tratado en plantas de tratamiento de aguas residuales industriales 2006-2014.



Fuente: CONAGUA (2010).

Actualmente, hay varios programas que permiten a pequeños y microempresarios implementar plantas de tratamiento quienes, en coordinación con los municipios, coadyuben a disminuir la alta contaminación generada sin control en cuerpos de aguas locales (CONAGUA, 2015).

Lo anterior permitiría prevenir la contaminación hormiga que sumada en zonas específicas pueda generar verdaderos desastres naturales.

A continuación, se presentan tres tipos de contaminantes: químicos, biológicos y físicos.

Contaminantes químicos:

Según Salgado et al. (2011), la contaminación química proveniente de residuos industriales es un problema que afecta la calidad del agua a nivel mundial y una de las estrategias actuales para su manejo es el tratamiento de efluentes. Entre los contaminantes químicos peligrosos están los metales pesados, los compuestos orgánicos volátiles y nutrientes.

Metales pesados: Proviene de una gran variedad de fuentes: baterías, cerámicas, bombillos de luz eléctrica, pinturas, aceite de motor usado, plásticos, entre otras, y no se degradan naturalmente, permanecen en los sedimentos y son liberados lentamente en cuerpos de agua, aun cuando se encuentra en cantidades bajas e indetectables, su recalcitrancia y persistencia a través de procesos naturales, como la biomagnificación, su concentración llega a ser tan elevada que se convierte en

tóxica. Entre los más perjudiciales están: cadmio, plomo, cromo y mercurio, los cuales pueden presentar efectos tóxicos sobre grupos funcionales vitales de los seres vivos (Salgado et al., 2011).

Para Zheng et al. (2019), los metales pesados como el mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As) son altamente tóxicos y persistentes en el ambiente. Proviene de diferentes industrias como la minería, metalurgia, y de la fabricación de baterías y pinturas. La exposición a estos metales puede causar daño renal, enfermedades cardiovasculares y trastornos neurológicos.

Compuestos orgánicos volátiles: Para Envira (2024), estos compuestos contienen carbono y su principal característica es que se evaporan fácilmente a temperatura ambiente. Son emitidos por productos químicos industriales, solventes, combustibles, pinturas, productos de limpieza, productos de cuidado personal y procesos de combustión. Se pueden clasificar en varias categorías, según su estructura química como Hidrocarburos (metano, etano, propano, benceno, hexano), Alcoholes (metanol, etanol, isopropanol), Aldehídos (formaldehído, acetaldehído, benzaldehído), Cetonas (acetona, metil-etil-cetona, ciclohexanona), Éteres (éter etílico, éter metil-terc-butílico), Ésteres (acetato de etilo, butirato de metilo) y Aromáticos (tolueno, xileno, naftaleno).

Por su peligrosidad para la salud (benceno, cloruro de vinilo y 1,2 dicloroetano), compuestos de Clase A que causan daños significativos al medio ambiente (acetaldehído, anilina, tricloroetileno, etc.) y compuestos de Clase B que tienen menor impacto en el medio ambiente (acetona y etanol). Además, tienen efectos negativos en el medioambiente y la salud humana, siendo muy importante el control de sus emisiones. En cuanto a la contaminación del agua y del suelo, pueden terminar en las aguas subterráneas llegando incluso a contaminar el agua potable y cuando se liberan al suelo, pueden persistir y afectar la calidad de este y a la vida vegetal. Entre los efectos en la salud humana se puede mencionar Irritación respiratoria (irritación en los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones, lo que puede llevar a síntomas como ardor, picazón, congestión nasal, tos y dificultad para respirar), Problemas respiratorios (asma o dificultad para respirar en general), Efectos neurológicos (benceno, tolueno y disolventes orgánicos que tienen efectos tóxicos en el sistema nervioso central, causando mareos, dolores de cabeza, confusión, pérdida de memoria y en casos graves, daño neurológico), Problemas hepáticos y renales (tetracloruro de carbono, que puede causar daño al hígado y a los riñones, afectando su función normal) y Efectos carcinogénicos (benceno, formaldehído y compuestos de cloruro de vinilo, se han asociado con un mayor riesgo de desarro-

llar cáncer en estudios epidemiológicos y en experimentos con animales) (Envira, 2024).

Para Li et al (2020), los compuestos orgánicos, incluidos los compuestos orgánicos volátiles (COVs), pesticidas, herbicidas y productos farmacéuticos, son comunes en las aguas residuales industriales. Estos contaminantes pueden tener efectos disruptores endocrinos y carcinogénicos. Por ejemplo, los ftalatos, utilizados como plastificantes, son conocidos por sus efectos disruptores endocrinos.

Nutrientes: como es el caso del nitrógeno y el fósforo, aunque esenciales para el crecimiento de las plantas, en concentraciones elevadas pueden causar eutrofización de cuerpos de agua. Esto provoca proliferación de algas, disminución del oxígeno disuelto y muerte de organismos acuáticos (Smith et al., 2019).

En el caso de Salgado et al. (2011), los compuestos del nitrógeno y fósforo son uno de los contaminantes más importantes de las aguas residuales por su eutrofización, su efecto en la concentración de oxígeno de las aguas receptoras y su toxicidad para los invertebrados acuáticos y vertebrados, incluyendo los humanos. Estos contaminantes también pueden afectar características como turbidez y olor del agua, lo que interfiere en actividades recreativas y de uso estético.

Contaminantes biológicos:

Incluyen microorganismos patógenos, como bacterias, virus y protozoos, que pueden causar enfermedades infecciosas.

Bacterias: Se tiene el caso de las bacterias patógenas como *Escherichia coli* y *Salmonella* son comunes en aguas residuales industriales de plantas de procesamiento de alimentos y granjas. Estas bacterias pueden causar infecciones gastrointestinales y otras enfermedades (Bhagwat et al., 2023).

Para ANDI (1997), los organismos más comúnmente empleados como indicadores de polución fecal o desechos son los *Escherichia* y todo el grupo de coliforme.

Virus: Según Ahmed et al. (2021), los virus entéricos, como la norovirus y el rotavirus, presentes en aguas residuales industriales, son resistentes a los tratamientos convencionales de depuración y pueden causar brotes de gastroenteritis.

Protozoos: patógenos como *Giardia* y *Cryptosporidium* son resistentes a la cloración y pueden sobrevivir en ambientes acuáticos, causando enfermedades gastrointestinales graves (Robertson et al., 2020).

Contaminantes físicos:

Incluyen sólidos suspendidos, turbidez y cambios de temperatura, que pueden alterar el hábitat acuático y afectar la calidad del agua.

Sólidos suspendidos: Para Gao et al. (2021), los sólidos en suspensión (SS) son partículas finas que permanecen suspendidas en el agua y provienen de procesos industriales como la minería y el procesamiento de alimentos. Estos sólidos pueden obstruir las branquias de los peces, reducir la penetración de luz y afectar la fotosíntesis de las plantas acuáticas.

Los sólidos suspendidos se determinan como la cantidad de material retenido después de realizar la filtración de un pequeño volumen de muestra (50ml) por las dificultades que se presentan en la filtración, además, aguas con altos contenidos de sólidos pueden ser laxantes y pierden cualidades organolépticas. La evaluación de sólidos suspendidos es muy valiosa en los análisis de aguas contaminadas y de aguas residuales, la que permite valorar la concentración de las aguas residuales domésticas y determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento en el trabajo de control a la contaminación de corrientes (ANDI, 1997).

Turbidez: Para Chowdhury et al. (2020), la turbidez, medida de la claridad del agua, es causada por la presencia de partículas en suspensión. Afecta la calidad del agua potable y la eficiencia de los procesos de desinfección. Además, altos niveles de turbidez pueden transportar patógenos y sustancias tóxicas.

Temperatura: Según Elliott et al. (2022), el vertido de agua caliente de procesos industriales, conocido como contaminación térmica, puede alterar el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Aumentos de temperatura reducen la solubilidad del oxígeno en el agua y pueden ser letales para especies sensibles.

La temperatura es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática, en las reacciones químicas, velocidades de reacción y en la aplicabilidad del agua a usos útiles. El oxígeno es menos soluble en el agua caliente que en la fría, un cambio repentino en las temperaturas puede dar como resultado un alto % de mortalidad en la vida acuática. Las temperaturas totalmente elevadas pueden dar lugar a un crecimiento indeseable de plantas acuáticas y hongos (ANDI, 1997).

IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

A nivel global, la descarga sin tratamiento de aguas residuales industriales (ARI) afecta al medio ambiente y a la salud pública. Aquí se detallan algunos efectos del impacto de la contaminación de Aguas Residuales Industriales llamándolo en este artículo ICARI recopilados y enunciando de forma global, latinoamericana y Nacional como son los efectos en los ecosistemas acuáticos, los efectos en la salud humana e Impacto socioeconómico y en las comunidades, respectivamente.

Efectos en los ecosistemas acuáticos

- **Muerte de peces y otros organismos:** Los contaminantes presentes en las ARI afecta a la vida acuática, alterando la calidad del agua y provocando enfermedades y muerte en peces, crustáceos, insectos y otros organismos del hábitad.
- **Destrucción de hábitats:** Los contaminantes al acumularse en los sedimentos y el suelo, destruyendo hábitats acuáticos y afectando la cadena alimentaria.
- **Alteración del equilibrio ecológico:** El ICARI desequilibra los ecosistemas acuáticos naturales, reduciendo la biodiversidad y afectando la funcionalidad de los ecosistemas.
- **Eutrofización:** La descarga de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo provoca la eutrofización de los cuerpos de agua, lo que genera un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, que a su vez puede disminuir la concentración de oxígeno y asfixiar a los peces.

Efectos en la salud humana

- **Enfermedades:** El contacto con agua contaminada con las ARI provoca enfermedades como diarrea, disentería, hepatitis, cólera y otras enfermedades transmitidas por el agua.
- **Cáncer:** Algunos contaminantes presentes en las ARI, como los metales pesados y los compuestos orgánicos volátiles (COVs), son cancerígenos y pueden aumentar el riesgo de desarrollar cáncer.
- **Problemas reproductivos:** La exposición a ciertos contaminantes afecta a la salud reproductiva de las personas, causando problemas de fertilidad y malformaciones congénitas.

- **Daños neurológicos:** Algunos contaminantes, como el plomo y el mercurio, afecta el desarrollo del cerebro y el sistema nervioso, especialmente en niños.

Impacto socioeconómico y en las comunidades

- **Pérdida de la pesca:** La contaminación de los cuerpos de agua puede afectar la pesca, una fuente importante de alimento e ingresos para muchas comunidades locales.
- **Disminución del turismo:** La contaminación del agua puede desalentar el turismo, lo que afecta la economía local.
- **Aumento de los costos de tratamiento de agua potable:** La contaminación del agua potable aumenta los costos de tratamiento, lo que afecta a los hogares y las empresas.
- **Conflictos sociales:** La competencia por recursos hídricos escasos puede generar conflictos sociales entre comunidades.

El ICARI tiene un impacto negativo en el medio ambiente, la salud pública y las comunidades, en ese sentido es fundamental implementar medidas para prevenir y controlar la contaminación por aguas residuales industriales, protegiendo así los recursos hídricos y garantizando el bienestar de las personas.

Efectos en los ecosistemas acuáticos en LATAM

En Latinoamérica conocido en el presente artículo como LATAM, se han identificado artículos relacionados con el ICARI en México y Colombia. Es preocupante la ausencia de control sobre las plantas de tratamiento de las aguas residuales, evitando así contaminar los ecosistemas acuáticos en México y Colombia, como es la presencia de metales que superan lo permitido en los sedimentos marinos y el límite permisible de la norma internacional canadiense en los peces, respectivamente. En ambos casos son los efectos por la falta de control en la contaminación de aguas.

Considerando un problema crítico, ocasionado por los desechos vertidos a los ríos desde desperdicios sólidos y líquidos que son arrastrados hasta descargarse en el mar. *“Sabemos que hay 110 descargas al mar en nuestra zona, muchas supuestamente de aguas pluviales, pero estas siguen activas incluso en épocas sin lluvia,”* La situación empeora cuando se incluyen los contaminantes químicos, agregó el especialista. *“En los sedimentos marinos hemos encontrado residuos de plomo y arsénico, con niveles de arsénico que superan los permitidos,”* indicó Pérez España (Hernández, 2024).

En Antioquia, Colombia, Las ciénagas, El Salado y Marimonda son relevantes para las comunidades vecinas, sin embargo, no cuentan con saneamiento básico propios de sus vertimientos de aguas residuales como quema de basura, desperdicios propios de sus plaguicidas, desechos de animales. En el resultado de los análisis realizados se encontró en las especies *Andinoacara pulcher*, *Caquetaia kraussii* y *Piaractus brachypomus*, con concentraciones de metales pesados por debajo del límite de cuantificación (25,0 y 7,5 $\mu\text{g kg}^{-1}$ de Pb y Cd, respectivamente). Los resultados están por debajo de los límites permitidos de la Norma Colombiana. Así mismo, también se resalta que los resultados mencionados están dentro de los parámetros permitidos de la norma internacional canadiense. Ambos resultados son un referente de cómo se encuentran los peces con presencia de metales pesados, contaminados los peces en esa localidad, es una alerta para no confiarse y seguir realizando análisis de monitoreo por parte de las autoridades alimentarias y ambientales, para identificar si habrá variaciones fisicoquímicas y no salirse de los límites normativos (Hernández et al., 2020).

Efectos en la salud humana en LATAM

En LATAM, se han identificado artículos relacionados con el ICARI como en México, Estados Unidos, Brasil y Argentina. La falta de controles para tratar las aguas residuales genera contaminación de estas que al usarlas afectan a la salud humana, desde cepas de microbios resistentes a los antibióticos en aguas contaminadas, hasta daño a las personas por la inhalación del vapor de mercurio.

“Monitorean 14 playas a nivel federal y 7 a nivel estatal,” indicó el autor Pérez España, donde basado en las Norma Mexicana NOM-001 los resultados analizados de las playas mencionadas de enterococos permitidos son superior, es decir no cumplen para asegurar que las aguas sean seguras para los seres humanos. “*Playas como Gaviotas, Pelicano y Regatas, en la zona conurbada Veracruz- Boca del Río, han mostrado niveles de enterococos por encima de lo permitido,*” así lo mencionó el investigador (Hernández, 2024).

De acuerdo con la información publicada por ABC News, “*El sur del condado de San Diego se encuentra en un estado total de emergencia relacionado con la contaminación transfronteriza, y esto es una bomba de tiempo para la salud pública*”, ello debido a los resultados de las investigaciones de la Universidad Estatal de San Diego, en donde declaran al río Tijuana como “*crisis de salud pública*” debido a que sus aguas arrastran desde aguas residuales sin tratar hasta desechos industriales. La agencia de protección ambiental (EPA) realizó toma de muestras de las aguas en la frontera de Estados Unidos y México, obteniendo resultados

de los análisis muy alarmantes, con presencia de *variedad de virus y bacterias peligrosas, incluidos VIH, hepatitis B y C, Salmonella, Vibrio, Streptococcus, Listeria y tuberculosis*. El informe también cita niveles de cepas de bacterias *E. coli* y *Legionella* resistentes a los antibióticos encontrados en el agua contaminada, “que son un considerable problema de salud pública”. En conclusión, la exposición de estas aguas contaminadas en los seres humanos de la zona puede afectar directamente a la salud pública (La Opinión, 2024).

El Amazonas es una fuente vital amenazada, es el río más caudaloso y extenso del mundo. Aunque nace en Perú y pasa por Colombia, su recorrido es relevante en la Amazonía brasileña donde es fuente de vida esencial. Contaminación por mercurio en el Amazonas, por causa de la minería ilegal es la preocupación más relevante en la cuenca en mención en la actualidad según el biólogo y profesor de la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ), Rodrigo Leão de Moura, incluso podría *ocasionar malformaciones en fetos, problemática para los propios mineros porque el vapor del mercurio que es altamente tóxico* (Contaminación y minería ilegal amenazan ríos latinoamericanos, 2023).

Contaminación del río Matanza Riachuelo en Argentina, cuyas aguas desembocan en *el Río de la Plata, río más contaminado de Argentina*. Donde la causa más relevante es por los *efluentes cloacales y residuos sólidos urbanos e industriales* (Contaminación y minería ilegal amenazan ríos latinoamericanos, 2023).

Impacto socioeconómico y en las comunidades LATAM

En LATAM, se han identificado artículos relacionados con el ICARI en Colombia, extraído de un artículo del caso de estudio Santander Colombia. La ausencia de control para tratar las aguas residuales genera contaminación en estas que tienen impacto socioeconómico de la zona y en las comunidades de su entorno.

Del análisis de los datos en el Plan de Desarrollo del Municipio y visitas técnicas, se encontraron y se verificaron las actividades productoras de aguas residuales (AR) que va directo a la fuente hídrica y las principales actividades antrópicas generadoras de impactos son como las actividades de turismo y recreación, generación de aguas residuales de tipo domésticas, agricultura, avicultura, ganadería, crianza de cerdos, lavado de vehículos, palmicultura, remoción de la cobertura vegetal (Gallo et al., 2023).

Efectos en los ecosistemas acuáticos en Perú

En el Perú, se han identificado artículos relacionados con el ICARI, no es ajeno. La ausencia de controles para tratar el agua residual no evita contaminar los ecosistemas acuáticos como en los ríos y lago Titicaca.

Un estudio realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en 129 de las 159 cuencas hídricas del país reveló que todos los ríos analizados presentan contaminación en diferentes áreas, con la presencia de coliformes termotolerantes (fecales) y metales pesados. La degradación de la calidad del agua, utilizada para consumo humano y para actividades agrícolas e industriales, se atribuye al vertido de aguas residuales y desechos sólidos de las comunidades cercanas a los ríos. Sin embargo, la situación es complicada, ya que la contaminación persiste. Según el Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales, elaborado recientemente por la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Sunass), de las 253 localidades atendidas por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento (EPS), 89 no tienen un sistema de tratamiento de aguas residuales. En 2013, aproximadamente 298,000 metros cúbicos diarios de desagües de estas ciudades fueron vertidos directamente al mar, ríos, pampas o drenes. Durante una evaluación de campo, la Sunass identificó 204 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el país, de las cuales 172 están construidas, 19 están en proceso de construcción y 13 tienen su construcción paralizada por más de un año. Según el científico peruano Marino Morikawa, quien tiene un doctorado en el área ambiental, las PTAR en el país no están cumpliendo adecuadamente su función (Comercio, 2016). El calentamiento global y la contaminación amenazan con convertir en una cloaca al Titicaca, el lago navegable más alto del mundo que comparten Bolivia y Perú. Investigadores advierten que este cuerpo de agua se ha llenado de desechos domésticos e industriales, lo que ha propiciado la aparición de peligrosas microalgas. Los vecinos de la bahía de Coahana, la zona más contaminada del lado de Bolivia, mencionan que *el lago presenta habitualmente una enorme mancha oscura y un olor a huevo podrido* (Arriaza, 2023).

En el lado del Perú, la bahía de Puno está contaminada por la descarga de aguas servidas, mientras que el río Coati arrastra hasta el lago la basura que genera la ciudad de Juliaca. Por ello no se recomienda para el consumo humano, ya que ha provocado que peces endémicos estén en riesgo de desaparecer y dañe la flora acuática (Arriaza, 2023).

El investigador francés Xavier Lazzaro encabezó en el 2019 en la primera estación hidrometeorológica automática y autónoma del Titicaca, un observatorio

científico ambiental, la estación apoyada por imágenes satelitales evidencian en el 2021 el aumento del fenómeno denominado eutrofización, que es el enriquecimiento de nutrientes como el nitrógeno y fósforo que propician la floración de microalgas (Arriaza, 2023).

Efectos en la salud humana en Perú

En el Perú, se han identificado artículos relacionados con el ICARI y es preocupante la ausencia de control para tratar el agua residual, contaminando estas que tienen efectos en la salud humana como enfermedades en las personas como severos cuadros estomacales, diarreas, insuficiencia renal, que ponen en riesgo la vida de niños y adultos mayores.

El agua del río Chillón es cualquier cosa menos vida. Una fuente hídrica más importante de Lima desemboca en la playa Márquez (Callao), que deja es una mezcla de heces y residuos industriales, que a primera vista aterra, y cuando se le somete a un estudio científico, es aún peor. La zona, a pocos minutos del aeropuerto Jorge Chávez, en el límite entre Ventanilla y el Callao, colmada de casas y colegios, en donde uno abre sus puertas a niños que juegan en medio de la pestilencia. El Comercio, junto a científicos de la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH), estudió durante varias semanas el estado del agua del Chillón donde los resultados del análisis fueron 12 veces excedidos según los límites máximos permitidos para aguas recreacionales en los microbios *Escherichia coli*, coliformes totales que al tener contacto con las personas podrían generar enfermedades como infecciones estomacales y enfermedades en la piel. Y la autoridad. El Ministerio del Ambiente nos derivó a la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Indicó por José Abasolo, que los vecinos habiten zonas aledañas a la ribera, ¿que deben estar desocupadas? y la falta de conciencia ambiental, los lleva a arrojar desechos. Raúl Zárate, jefe encargado de la Oficina de Áreas Protegidas y Medio Ambiente del Gobierno Regional del Callao, aseguró que invierten soles para la limpieza del cauce del Chillón y culpó a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Puente Piedra, que está colapsada en su capacidad. (El Comercio, 2020).

Impacto socioeconómico y en las comunidades Perú

En Perú, se han identificado artículos relacionados con el ICARI a lo largo de la cuenca del río Utcubamba es preocupante la ausencia de control para tratar aguas residuales que contamina las mismas y tienen impacto socioeconómico de la zona y en las comunidades de su entorno.

El aumento de la población a lo largo de la cuenca del río Utcubamba, no cuenta con un sistema de tratar aguas residuales, generando disminución de agua siendo amenaza directa de la salud pública, se realizaron análisis cuyos resultados obtenidos muestran que los principales parámetros con altas concentraciones de bacterias y de compuestos químicos, como nitritos, fosfatos y amonio. (Corroto et al., 2018).

NORMATIVA Y LEGISLACIÓN

La gestión adecuada de las aguas residuales industriales es fundamental para proteger la salud pública y el medio ambiente. En Perú, existe un marco legal y normativo sólido que regula la descarga de efluentes industriales, con el objetivo de prevenir y controlar la contaminación del agua.

Normativas nacionales en Perú

Se describen las leyes, reglamentos y estándares de calidad ambiental que establecen los requisitos para la gestión de aguas residuales industriales en el país.

- Ley N° 29337 - Ley de Recursos Hídricos: Esta ley, promulgada en el año 2009, establece los principios y lineamientos para la gestión integrada de los recursos hídricos en el Perú, incluyendo la prevención y control de la contaminación del agua. (Ley de Recursos Hídricos, 2017).
- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos: Este reglamento, aprobado en el año 2010, detalla las disposiciones para el otorgamiento de licencias de uso de agua, la calidad del agua, el vertido de efluentes y la evaluación de impacto ambiental hídrico. (Ley de Recursos Hídricos, 2017).
- Normas de Calidad Ambiental (ECA) para Agua: Estos estándares, establecidos por el Ministerio del Ambiente, fijan los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales industriales para proteger la salud humana y el medio ambiente. (Normas de Calidad Ambiental, 2017).
- Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM: Este decreto supremo, aprobado en el año 2010, aprueba los Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos a cuerpos de recepción hídricos. (Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, 2010).

- Resolución Ministerial N° 035-2017-MINAM: Esta resolución ministerial, aprobada en el año 2017, aprueba el Manual de Procedimientos para la Evaluación de la Calidad del Agua para la Otorgamiento de Licencias de Uso de Agua. (Resolución Ministerial N° 035-2017-MINAM, 2017).

Normativas internacionales (EPA, UE, etc.)

Se mencionan los convenios y acuerdos internacionales a los que Perú se ha adherido, relacionados con la gestión del agua y el control de la contaminación.

- Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho Internacional de los Usos No Navegacionales de los Cursos de Agua Internacionales: Esta convención, adoptada en el año 1997, establece principios para la protección y uso compartido de los recursos hídricos transfronterizos, promoviendo la cooperación entre países para la gestión sostenible del agua. (Convención de las Naciones Unidas, 1997)
- Protocolo de Kyoto: Este protocolo, adoptado en el año 1997, es un acuerdo internacional complementario a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que establece medidas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, algunas de las cuales pueden afectar la calidad del agua. (Protocolo de Kyoto, 2017).
- Directiva Marco del Agua de la Unión Europea: Esta directiva, aprobada en el año 2000, establece un marco legal para la protección de las aguas en Europa, con principios y objetivos que pueden ser relevantes para la gestión de aguas residuales industriales en Perú, como la prevención de la contaminación y el uso sostenible del agua. (Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, 2010).

Responsabilidades legales de las industrias

Se detallan las obligaciones que las industrias peruanas deben cumplir en materia de tratamiento, monitoreo, control y reporte de sus aguas residuales.

Las industrias en Perú tienen la responsabilidad legal de cumplir con las siguientes obligaciones:

- Obtener una licencia de uso de agua: Esta licencia, otorgada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), especifica la cantidad y calidad del agua que la industria puede usar y descargar, asegurando un uso racional del recurso hídrico. Autoridad Nacional del Agua (<https://www.gob.pe/ana>).

- Tratar las aguas residuales antes de su descarga: Las industrias deben implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales adecuados para eliminar contaminantes y cumplir con los estándares de calidad ambiental establecidos por la ley, protegiendo así los cuerpos de agua.
- Monitorear la calidad de las aguas residuales: Las industrias deben realizar un monitoreo regular de sus efluentes para verificar el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental, asegurando la eficacia del tratamiento de aguas residuales.
- Informar a las autoridades ambientales: Las industrias deben presentar informes periódicos sobre su gestión de aguas residuales a las autoridades competentes, permitiendo un seguimiento y control adecuado de las actividades industriales.
- Implementar un plan de manejo de aguas residuales: Este plan, elaborado por la propia industria o por consultores especializados, debe describir las medidas que la industria tomará para prevenir y controlar la contaminación del agua.

Es importante destacar que el cumplimiento de la normativa y legislación vigente es crucial para las industrias en Perú, no solo para evitar sanciones legales, sino también para contribuir a la protección de los recursos hídricos y la construcción de un desarrollo sostenible.

Además de la normativa legal, se hace referencia a sitios web de entidades relevantes como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Ministerio del Ambiente (MINAM), donde se puede encontrar información actualizada sobre la gestión de aguas residuales industriales en Perú.

TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

La gestión efectiva de las aguas residuales industriales (ARI) requiere la implementación de tecnologías de tratamiento adecuadas para eliminar los contaminantes presentes en estas aguas, la elección de la tecnología de tratamiento más adecuada para una ARI específica depende de diversos factores, como la naturaleza y concentración de los contaminantes, el volumen de agua residual, los requisitos de descarga y los recursos económicos disponibles.

En muchos casos, se utiliza una combinación de diferentes tecnologías de tratamiento para lograr una eliminación efectiva de los contaminantes. Por ejemplo, el tratamiento primario puede incluir sedimentación y filtración, mientras que el tratamiento secundario puede incluir procesos biológicos y químicos.

Wang, Hung & Shammas (2007), plantean tres preguntas importantes cuando se ha identificado un tipo particular de contaminación, “(1) ¿Qué tan grave es la contaminación? (2) ¿Está disponible la tecnología para reducirlo? y 3) ¿Justifican los costos de la reducción el grado de reducción logrado?”; también es importante destacar que la selección y el diseño de un sistema de tratamiento de ARI deben realizarse por profesionales especializados, quienes considerarán todos los factores relevantes para garantizar un tratamiento eficaz y sostenible.

A continuación, se describen algunos de los principales tipos de tratamiento:

Tratamientos físicos

Los tratamientos físicos separan los contaminantes sólidos y líquidos del agua sin alterar su composición química. Los métodos más comunes incluyen:

Sedimentación: Permite que los sólidos pesados se depositen en el fondo del agua por gravedad.

Flotación: Utiliza aire o burbujas para hacer que los sólidos ligeros floten en la superficie del agua.

Filtración: Elimina los sólidos suspendidos del agua haciéndola pasar a través de un material poroso, como arena o grava.

Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos alteran la composición química del agua para eliminar o transformar los contaminantes. Los métodos más comunes incluyen:

Precipitación: Agrega productos químicos al agua para convertir los contaminantes solubles en sólidos insolubles que luego se pueden separar por sedimentación o filtración.

Neutralización: Ajusta el pH del agua para neutralizar ácidos o bases.

Oxidación: Destruye o convierte contaminantes orgánicos en compuestos menos dañinos mediante la adición de oxígeno o agentes oxidantes como el cloro o el ozono.

Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos utilizan microorganismos para degradar los contaminantes orgánicos presentes en el agua. Los métodos más comunes incluyen:

Lagunas de estabilización: Son estanques poco profundos donde los microorganismos descomponen los contaminantes orgánicos de forma natural.

Reactores biológicos: Utilizan tanques o biorreactores para controlar las condiciones ambientales y optimizar la actividad de los microorganismos.

Dado que estamos ante una especialidad técnica relacionada en particular al tratamiento de las aguas residuales industriales, se presentan algunos ejemplos de tecnologías tomadas del Manual de Ingeniería Ambiental, indicando una breve descripción de estas:

- a) **Ozonización Presurizada:** El ozono y el oxígeno pueden oxidar muchos contaminantes en las aguas residuales y los biosólidos de lodos. El ozono es más potente que el oxígeno, pero debe generarse en el punto de uso porque es un material inestable. El ozono se ha utilizado para desinfectar el agua potable y también para el tratamiento de algunos residuos industriales especiales, en particular para la eliminación de cianuros y fenoles. Algunas ventajas inherentes al uso de esta tecnología son la reducción de DBO y DQO, reducción de olor, color, turbidez y tensioactivos, destrucción de organismos patógenos, el agua efluente tiene una alta concentración de oxígeno disuelto (OD). Una de las principales desventajas del uso de ozono en el tratamiento de residuos es su costo (Wang et al., 2007).
- b) **Procesos electroquímicos de tratamiento de aguas residuales:** La electrocoagulación utiliza la reacción electroquímica entre los electrodos y los contaminantes para eliminar partículas y mejorar la calidad del agua. El uso de la electricidad en el tratamiento del agua se propuso por primera vez en Inglaterra en 1889. Aunque inicialmente las tecnologías electroquímicas para el tratamiento de aguas no tuvieron una amplia aplicación debido a la inversión de capital y al alto costo de la electricidad, en las últimas décadas han recuperado importancia. Actualmente, empresas suministran instalaciones para la recuperación de metales, tratamiento de agua potable y aguas residuales de diversas industrias (Wang et al., 2007).
- c) **Tratamiento con Osmosis Inversa:** Es un método avanzado de purificación del agua que usa membranas semipermeables para eliminar impurezas, sales y

contaminantes; aplicando presión, el agua pasa a través de la membrana, que trabaja como barrera donde solo las moléculas de agua pura logran atravesar la membrana, eliminando una amplia variedad de contaminantes, como sales disueltas, bacterias, virus, compuestos orgánicos y partículas suspendidas. “Cuando dos soluciones acuosas (u otros solventes) están separadas por una membrana semipermeable, el agua fluirá desde el lado de baja concentración de soluto al lado de alta concentración de soluto. El flujo se detiene, o incluso se invierte, aplicando presión externa en el lado de mayor concentración”, “Los avances significativos en los materiales y tecnologías de membranas durante los últimos 20 años han mejorado en gran medida la rentabilidad y las capacidades de rendimiento de los procesos”. (Wang et al., 2007)

- d) Aireación de poros finos de agua y aguas residuales:** En las plantas de tratamiento de aguas residuales con lodos activados, el suministro de oxígeno para la aireación representa la mayor parte del consumo de energía. Este suministro de oxígeno puede llegar a ser entre el 50% y el 90% de las necesidades energéticas totales de una planta. Sin embargo, al reemplazar los sistemas de aireación menos eficientes por dispositivos de aireación de poros finos, es posible reducir hasta un 50% los costes energéticos asociados a la aireación. Esto ha llevado a periodos de amortización relativamente cortos, típicamente de 2 a 6 años. (Wang et al., 2007)

CASOS DE ESTUDIO

Ejemplos exitosos de gestión de aguas residuales en la industria:

La gestión efectiva de las aguas residuales industriales (ARI) es crucial para proteger tanto la salud humana como el medio ambiente. Existen numerosos casos de empresas que han implementado estrategias exitosas para gestionar las ARI, logrando reducir significativamente su impacto ambiental. A continuación, se destacan algunos ejemplos tanto a nivel internacional como en Perú.

Ejemplos Internacionales

Levi Strauss & Co.: La empresa textil estadounidense ha desarrollado un programa que ha permitido una reducción del 90% en el consumo de agua y del 80% en la descarga de contaminantes a través del tratamiento de ARI (O'Toole, 2020).

Estrategias clave:

- Utilización de tecnologías avanzadas para el uso eficiente del agua, incluyendo sistemas de reutilización y reducción de fugas
- Inversión en una planta de tratamiento de ARI de última generación que utiliza tecnología de membranas y procesos biológicos avanzados.
- Compromiso con la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social corporativa.

3M Company: La empresa multinacional con sede en Minnesota, Estados Unidos, ha desarrollado un sistema de tratamiento de ARI que utiliza membranas de ultrafiltración para eliminar contaminantes orgánicos y metales pesados. Este sistema ha permitido a la empresa reducir en un 95% la descarga de contaminantes (O'Toole, 2020).

Estrategias clave:

Desarrollo de tecnología innovadora de tratamiento de ARI basada en membranas de ultrafiltración.

Implementación del sistema de tratamiento en sus plantas de producción alrededor del mundo.

Monitoreo continuo del desempeño del sistema y realización de mejoras continuas.

Coca-Cola Company: La empresa multinacional de bebidas con sede en Atlanta, Georgia, Estados Unidos, ha implementado un programa de reutilización de agua en sus plantas de producción. Este programa ha permitido a la empresa reducir en un 30% su consumo de agua fresca (O'Toole, 2020).

Estrategias clave:

- Implementación de sistemas de tratamiento de agua que permiten reutilizar el agua para diversos procesos industriales.
- Construcción de infraestructura para el almacenamiento y distribución de agua reutilizada.
- Capacitación y sensibilización a los empleados sobre la importancia de la reutilización del agua.

Casos en Perú

Planta de Tratamiento de Agua Residual Taboada: Esta planta, ubicada en Lima, Perú, trata las aguas residuales de una zona industrial y residencial que comprende a más de 2 millones de personas. La planta utiliza tecnología de tratamiento biológico de última generación y cumple con los estándares de calidad ambiental más exigentes (O'Toole, 2020).

Estrategias clave:

- Implementación de tecnología de tratamiento biológico de alta eficiencia que elimina contaminantes orgánicos, nutrientes y sólidos suspendidos.
- Monitoreo continuo de la calidad del agua residual tratada y cumplimiento de los estándares ambientales.
- Participación con la comunidad local para garantizar la aceptación y el apoyo al proyecto.

Proyecto Huascacocha: Este proyecto, ubicado en la región Junín, Perú, trata las aguas residuales de la ciudad de Huancayo y las aguas ácidas provenientes de la actividad minera. El proyecto utiliza una combinación de tecnologías de tratamiento biológico y fisicoquímico para eliminar una amplia gama de contaminantes (ProInversión, 2023).

Estrategias clave:

- Combinación de tecnologías de tratamiento biológico y fisicoquímico para una eliminación eficiente de contaminantes.

- Capacitación y asistencia técnica a los operadores de la planta para garantizar un funcionamiento eficiente.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Chira:

Estrategias clave:

- Implementación de un sistema de seguimiento y control ambiental para garantizar el cumplimiento de las regulaciones ambientales.
- Desarrollo de programas de educación ambiental para sensibilizar a la comunidad sobre la importancia del tratamiento de las aguas residuales.

Factores que contribuyen al éxito de estos casos:

- **Compromiso de la alta dirección:** El compromiso de la alta dirección de las empresas con la gestión sostenible del agua es fundamental para el éxito de cualquier programa de gestión de ARI.
- **Implementación de un sistema de gestión ambiental:** La implementación de un sistema de gestión ambiental, como ISO 14001, puede ayudar a las empresas a identificar, evaluar y controlar sus impactos ambientales, incluyendo los relacionados con las ARI.
- **Inversión en tecnología de tratamiento:** La inversión en tecnología de tratamiento de ARI eficiente y efectiva es crucial para reducir la descarga de contaminantes al medio ambiente.
- **Eficiencia en el uso del agua:** Implementar medidas para mejorar la eficiencia en el uso del agua, como reducir fugas, reutilizar el agua y usar tecnologías de bajo consumo, puede ayudar a las empresas a reducir el número de ARI que generan.
- **Cooperación con stakeholders:** La colaboración con stakeholders externos, como las autoridades ambientales, las comunidades locales y las organizaciones no gubernamentales, puede ser beneficiosa para el éxito de un programa de gestión de ARI.

Lecciones aprendidas de estos casos exitosos:

- La gestión de las ARI es un proceso continuo que requiere un compromiso constante de la empresa.
- Es importante establecer objetivos ambiciosos pero alcanzables para la gestión de las ARI.

- La comunicación y la participación de los empleados son esenciales para el éxito de cualquier programa de gestión de ARI.
- Es importante monitorear y evaluar el desempeño del programa de gestión de ARI para realizar los ajustes necesarios.

Casos de fracaso y lecciones aprendidas en el tratamiento de aguas residuales industriales: Casos Internacionales y en Perú

Aunque existen muchos ejemplos de éxito en el tratamiento de aguas residuales industriales (ARI), las empresas han fallado en el control y tratamiento adecuado de sus aguas residuales, generando graves impactos ambientales y económicos. A continuación, se presentan algunos casos destacados a nivel internacional y en Perú, junto con las lecciones aprendidas que se pueden extraer de ellos.

Casos Internacionales

Desastre de Bhopal: En 1984, una fuga de gas tóxico en una planta de productos químicos en Bhopal, India, provocó la muerte de más de 5.000 personas y la contaminación de las aguas subterráneas de la región (O'Toole, 2020).

Factores que contribuyeron al fracaso:

- Falta de mantenimiento adecuado de las instalaciones de la planta.
- Debilidad en los procedimientos de seguridad y protocolos de emergencia.
- Falta de transparencia e información a la comunidad sobre los riesgos potenciales.

Lecciones aprendidas:

- La seguridad industrial y la gestión de riesgos deben ser prioridades absolutas para las empresas.
- Es fundamental contar con planes de emergencia y protocolos de comunicación efectivos en caso de accidentes.
- La transparencia y la participación de la comunidad son esenciales para construir confianza y prevenir futuros desastres.

Derrame de petróleo de Deepwater Horizon: En 2010, una explosión en una plataforma petrolera en el Golfo de México provocó el mayor derrame de petróleo de la historia de los Estados Unidos, contaminando una vasta extensión de agua marina y causando daños ecológicos y económicos considerables (O'Toole, 2020).

Factores que contribuyeron al fracaso:

- Fallas en los sistemas de seguridad de la plataforma petrolera.
- Errores humanos en la toma de decisiones durante la emergencia.
- Falta de preparación y respuesta inadecuada ante el derrame.

Lecciones aprendidas:

- La industria petrolera debe invertir en tecnología de seguridad y prevención de accidentes más robusta.
- Es fundamental contar con planes de respuesta a emergencias bien definidos y capacitados.
- La colaboración entre empresas, autoridades y expertos es crucial para mitigar los impactos de grandes derrames.

Casos en Perú

Caso Doe Run: La empresa minera Doe Run contaminó durante décadas el río Mantaro y la ciudad de Huancayo con plomo y otros metales pesados, causando graves daños a la salud de la población y al medio ambiente (Avilés y Castro, 2022).

Factores que contribuyeron al fracaso:

- Falta de control ambiental efectivo por parte de la empresa y las autoridades.
- Descarga ilegal de aguas residuales sin tratamiento adecuado.
- Débil marco legal y regulatorio para la gestión ambiental en la industria minera.

Lecciones aprendidas:

- El Estado debe fortalecer las instituciones ambientales y garantizar el cumplimiento de las regulaciones ambientales por parte de las empresas.
- Es fundamental la participación activa de la comunidad en la vigilancia ambiental y la toma de decisiones.

- Las empresas deben adoptar prácticas de minería responsable y comprometerse con la protección del medio ambiente y la salud pública.

Caso Repsol: En 2016, un derrame de petróleo de la empresa Repsol contaminó las playas de Ventanilla y Ancón, afectando la flora y fauna marina y generando un impacto económico significativo en la región (Avilés y Castro, 2022).

Factores que contribuyeron al fracaso:

- Fallas en la operación de descarga de petróleo durante la transferencia desde un buque a la refinería.
- Falta de un plan de contingencia adecuado para responder al derrame.
- Comunicación deficiente y falta de transparencia por parte de la empresa.

Lecciones aprendidas:

Las empresas deben implementar planes de contingencia robustos para prevenir y responder a derrames de hidrocarburos.

La comunicación transparente y oportuna con las autoridades y la comunidad es crucial para gestionar la crisis de manera efectiva.

Es necesario fortalecer las medidas de control y prevención para evitar futuros derrames.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Reflexiones finales y perspectivas futuras

El tratamiento adecuado de las aguas residuales industriales es un desafío importante que requiere un enfoque integral y colaborativo entre la industria, el gobierno y la sociedad civil.

Avances:

En los últimos años, se han logrado avances significativos en el desarrollo de tecnologías de tratamiento de aguas residuales y en la implementación de políticas públicas para controlar la contaminación industrial.

Desafíos:

Sin embargo, aún queda mucho por hacer. La creciente industrialización y la generación de nuevos contaminantes plantean nuevos retos para la gestión de las aguas residuales.

Perspectivas:

Es necesario continuar investigando y desarrollando nuevas tecnologías de tratamiento, fortalecer la capacidad de las autoridades ambientales, promover la educación ambiental y fomentar la responsabilidad social de las empresas.

Recomendaciones para la industria y la política pública

Para la industria:

- Implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales adecuados y efectivos.
- Adoptar prácticas de producción más limpias para minimizar la producción de contaminantes.
- Invertir en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de tratamiento.
- Cumplir con las normas ambientales y colaborar con las autoridades.
- Comunicar de manera transparente sus acciones ambientales a la comunidad.

Para la política pública:

- Fortalecer las normas ambientales y establecer límites más estrictos para la descarga de contaminantes.

- Invertir en infraestructura para el tratamiento de aguas residuales.
- Brindar incentivos a las empresas que adoptan prácticas sostenibles.
- Mejorar la capacidad de las autoridades ambientales para el monitoreo y control del cumplimiento.
- Promover la investigación y el desarrollo de tecnologías de tratamiento.
- Promocionar la educación ambiental y motivar a la ciudadanía su participación en la toma de decisiones

En conjunto, la industria y el gobierno pueden trabajar juntos para proteger los recursos hídricos y garantizar un futuro sostenible para las generaciones venideras.

REFERENCIAS

- Ahmed, W., et al. (2021). *Detection of enteric viruses in wastewater and their public health implications*. **Journal of Applied Microbiology**, 131(1), 62-75.
- ANDI (1997). *Manual de caracterización de aguas residuales industriales*. 2da Ed., Medellín – Colombia. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/slideshow/manual-de-caracterizacion-de-aguas-residuales-industriales/196163256>
- Arriaza, M. (2023, Sep 11). *El riesgo de que el lago navegable más alto del mundo se convierta en una cloaca*. EL PAÍS (America Edition). Recuperado de: <https://www.proquest.com/newspapers/el-riesgo-de-que-lago-navegable-más-alto-del/docview/2864093509/se-2>
- Autoridad Nacional del Agua. (s.f.). Recuperado de: <https://www.gob.pe/ana>
- Avilés, L. y Castro, H (2022). *Análisis de la eficacia en las funciones de fiscalización ambiental del OEFA para prevenir derrames de petróleo: caso REPSOL 2022*.
- Bhagwat, A., et al. (2023). *Bacterial pathogens in wastewater and their health implications*. **Journal of Environmental Management**, 307, 114493.

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2010). *Estadísticas del Agua en México*. Edición 2010. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/259371/_2010_EAM2010.pdf
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2016). *Estadísticas del Agua en México*. Edición 2016. Recuperado de: https://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/novedades/EstadisticasdelAguaMexico2016_CONAGUA.pdf
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015). *Guía de políticas públicas en el ámbito estatal en materia de agua potable y saneamiento*. Edición 2015. Recuperado de: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/guia-politicas-publicas/files/assets/basic-html/index.html#1
- Contaminación y minería ilegal amenazan ríos latinoamericanos. (2023, Sep 25). La Patria <https://www.proquest.com/newspapers/contaminación-y-minería-ilegal-amenazan-ríos/docview/2869163720/se-2>
- Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho Internacional de los Usos No Navegacionales de los Cursos de Agua Internacionales. (1997). Recuperado de: https://legal.un.org/avl/pdf/ha/clnuiw/clnuiw_s.pdf
- Comercio, E. (2016/01/15/, 2016 Jan 15). *Más de cien cuencas hídricas están contaminadas con coliformes o metales*. El Comercio <https://www.proquest.com/newspapers/más-de-cien-cuencas-hídricas-están-contaminadas/docview/1756912239/se-2>
- Corroto, F., Gamarra, O., y Barboza, E. (2018). *Evaluación multivariante de la calidad del agua en la cuenca del Utcubamba (Perú)*. [Multivariate Assessment of Water Quality in the Utcubamba Basin (Peru)] *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(5), 33-51,33A-51A. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-02>
- Chowdhury, S., et al. (2020). *Turbidity and its effects on water quality*. *Journal of Water and Health*, 18(1), 15-25.
- Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. (2010). Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>

- Directiva Marco del Agua de la Unión Europea. (2000). Recuperado de: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524>
- Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua. (s.f.). Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/estandares-nacionales-calidad-ambiental-agua>
- El río Chillón, un gigantesco desagüe: *Alerta. Contaminación excede 12 veces los límites permisibles de bacterias. Planta de tratamiento de Sedapal vierte aguas residuales al río.* (2020/02/03/, 2020 Feb 03). *El Comercio* <https://www.proquest.com/newspapers/el-río-chillón-un-gigantesco-desagüe/docview/2350018844/se-2>
- Envira (15 de mayo de 2024). *Compuestos orgánicos volátiles COV, ¿Qué son y cómo monitorizarlos?*. <https://envira.es/por-que-importante-monitorizar-vocs-compuestos-organicos-volatiles/>
- Gallo, N., Dueñas, D., López, C. y Milena Urrea. (2023). *Impactos ambientales asociados al vertido de aguas residuales sobre corrientes hídricas. Caso de estudio Santander Colombia.* [Environmental impacts associated with the discharge of wastewater into water flows. Santander Colombia case study] Cuadernos Del CLAEH, 42(117), 51-64. <https://doi.org/10.29192/claeh.42.1.3>
- Gao, Y., et al. (2021). *Impact of suspended solids on aquatic ecosystems.* *Water Research*, 190, 116743.
- Hernández, I., Paternina, R., y Marrugo, J. (2020). *Contenido de metales pesados en sedimentos y peces provenientes de las ciénagas Marimonda y El Salado en Antioquia, Colombia.* [Content of Heavy Metals in Sediments and Fish from the Marimonda and El Salado Swamps in Antioquia, Colombia] *Gestión y Ambiente*, 23(2), 239-249. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.81611>
- Hernández, A., Guzmán, X., García, R. y Guerrero, I. (2017). *Actividad enzimática de proteasas de Cyprinus carpio (Cypriniformes: Cyprinidae) extraídas de una laguna contaminada en México.* *Revista de Biología Tropical*, 65(2), 589-597. Recuperado de: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v65n2/0034-7744-rbt-65-02-00589.pdf>

- Hernández, A., Moreno, J. y Sandoval, L. (2017).** *Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender.* RINDERESU. vol. 2 (1-2): 75-88. Recuperado de: <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/27/33>
- Hernández, J. (2024/06/22/, 2024 Jun 22).** *Descargas de aguas residuales e industriales: principales amenazas del mar en Veracruz.* El Sol De Mexico <https://www.proquest.com/newspapers/descargas-de-aguas-residuales-e-industriales/docview/3071369764/se-2>
- Kumar, P., Sharma, A., y Reddy, A. S. (2019).** *Industrial wastewater treatment: Current technologies and future perspectives.* Journal of Environmental Management, 240, 50-62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.064>
- La Opinión. (2024/02/20/, 2024 Feb 20).** *Millones de galones de aguas residuales tóxicas provocan crisis de salud pública en frontera entre EE.UU. y México.* La Opinión <https://www.proquest.com/newspapers/millones-de-galones-aguas-residuales-toxicas/docview/2928702883/se-2>
- Ley N° 29337 - Ley de Recursos Hídricos. (2009).** Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-29338.pdf>
- Li, Y., et al. (2020).** *Endocrine-disrupting chemicals in industrial wastewater: Sources, impacts, and treatment strategies.* Journal of Hazardous Materials, 384, 121341.
- Li, W., Zhao, Y., & Wang, Y. (2020).** *Emerging contaminants in wastewater: A review of the literature from 2010 to 2020.* Water Research, 187, 116-117. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116117>
- Ministerio del Ambiente. (s.f.).** Recuperado de: <https://www.gob.pe/minam>
- O'Toole, G. (2020).** *Políticas del medio ambiente en América Latina y el Caribe: Introducción.* UNAM, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial.

- ProInversión. (2023). *Proyecto Huascacocha*. <https://www.proinversion.gob.pe/>
- Protocolo de Kyoto. (1997). Recuperado de: https://unfccc.int/kyoto_protocol
- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos. (2010). Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-29338.pdf>
- Resolución Ministerial N° 035-2017-MINAM. (2017). Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>
- Robertson, L. J., et al. (2020). *Protozoan pathogens in wastewater: Challenges for water treatment*. *Trends in Parasitology*, 36(8), 694-703.
- Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S. y Sanz, J. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de vigilancia tecnológica. VT2*. Recuperado de: <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001696.pdf>
- Salgado, I., Cárcamo, H., Martínez, A., Carballo, M., Cruz, M. y Durán, M. (2011). *Efectos ambientales de contaminantes químicos en las aguas: Una propuesta biotecnológica para su eliminación*. *Revista Cubana de Química*. 18 (3), 87-95. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543724011>
- Smith, V., et al. (2019). *Eutrophication of lakes and rivers*. *Environmental Pollution*, 245, 1048-1060.
- Smith, V., & Schindler, D. (2021). *Eutrophication science: Where do we go from here?*. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(8), 763-774. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.04.010>
- Wang, H., Yang, Y., y Zhao, X. (2023). *Advances in industrial wastewater treatment technologies: Moving towards a circular economy*. *Environmental Science & Technology*, 57(5), 2529-2540. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08764>

Wang, L., Hung, Y., y Shammas, N. (2007). *Advanced Physicochemical Treatment Technology*. Humana Press Inc, **Handbook of Environmental Engineering (5)**.

Zheng, G., et al. (2019). *Toxicity and environmental risks of heavy metals in wastewater*. *Environmental Science and Pollution Research*, **26(1)**, 365-376.

Zheng, G., Hu, B., y Zhu, Y. (2022). Pathogenic microorganisms in wastewater: A comprehensive review of detection methods and occurrence. *Journal of Environmental Sciences*, 109, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.10.025>

Capítulo 3

Contaminación del río Rímac

Darwin Dean Duran Janampa

Percy Wenceslao Lature Bustamante

Alcides Guillermo Joo Aguayo

Augusto Denis Madueño Macedo

INTRODUCCIÓN

El río Rímac, conocido como el río hablador, es la principal fuente hídrica de Lima, Perú. Este estudio aborda la grave problemática de contaminación que ha afectado significativamente la calidad del agua del río Rímac debido a diversas fuentes de contaminación industrial, doméstica y agrícola. A lo largo del tiempo, el río ha desempeñado un papel crucial en el desarrollo de la región, proporcionando recursos hídricos indispensables para la agricultura, el consumo humano y diversas actividades económicas. Sin embargo, la expansión urbana y la industrialización han intensificado la descarga de residuos sin tratamiento, resultando en la degradación del ecosistema y planteando serios riesgos para la salud pública.

El análisis incluye la evaluación de la calidad del agua, identificando la presencia de metales pesados como plomo, mercurio y cadmio, y su impacto tanto en la biodiversidad acuática como en la salud humana. Se documentan los esfuerzos realizados para mitigar la contaminación, como la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, la reforestación de áreas ribereñas y las campañas de sensibilización comunitaria. Los resultados muestran una mejora gradual en la calidad del agua y un aumento en la conciencia ambiental entre la población.

El estudio concluye que, a pesar de los avances, la recuperación completa del río Rímac requiere un esfuerzo continuo y coordinado entre las autoridades, las co-

munidades y las industrias. Se destaca la necesidad de fortalecer las regulaciones ambientales y de promover prácticas sostenibles para asegurar la disponibilidad de agua de calidad para las futuras generaciones

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL RIO RÍMAC

El río Rímac, conocido también como el río hablador debido a su nombre en quechua, es la principal fuente hidrológica de la ciudad de Lima, Perú (Kaiser, 2022). A lo largo de la historia, ha sufrido una degradación significativa por la actividad antropogénica. Este ensayo se centra en la importancia del Capital Natural del río Rímac y las oportunidades para su restauración, abordando el impacto sobre el bienestar humano y su relación con las zonas ribereñas urbanas (Korea Water Resources y otros, 2015).

Historia del Río Rímac

El río Rímac tiene una importancia histórica y cultural crucial para Lima, nace en los Andes centrales, a más de 5000 metros sobre el nivel del mar, y fluye hacia el oeste, atravesando fértiles valles agrícolas y zonas de actividad minera antes de llegar a Lima y desembocar en el océano Pacífico. Desde tiempos prehispánicos, el río ha sido vital para las culturas locales, que desarrollaron avanzados sistemas de manejo del agua para maximizar el uso de los recursos hídricos en un entorno árido (Kaiser, 2022). Durante la era prehispánica, las culturas que habitaron la costa peruana, como los incas, valoraban y gestionaban el agua de manera sostenible. Este manejo territorial basado en el equilibrio entre el medio ambiente y sus posibilidades de explotación permitió la maximización del suelo productivo, haciendo del río Rímac un recurso esencial no solo para la agricultura sino también para la supervivencia y el desarrollo cultural.

Una antigua crónica cuenta que los incas llamaron rimaq o rimak (hablador) al río que atraviesa Lima debido al fuerte ruido de las piedras arrastradas por sus aguas. Este río es esencial para casi 15 millones de habitantes; históricamente, sus riberas fueron cruzadas por puentes colgantes de cuerdas y madera, posteriormente por puentes de piedra como el puente Trujillo inaugurado en 1610, su cuenca abarca aproximadamente 3,500 km² y su longitud es de alrededor de 134 km. Hacia 1684 el Virrey Melchor de Navarra y Rocafull dispone la construcción de una muralla que circunde la ciudad, teniendo como vecino inmediato al río Rímac. Terminada la obra en 1687, la pared colindante con la ribera del río era una

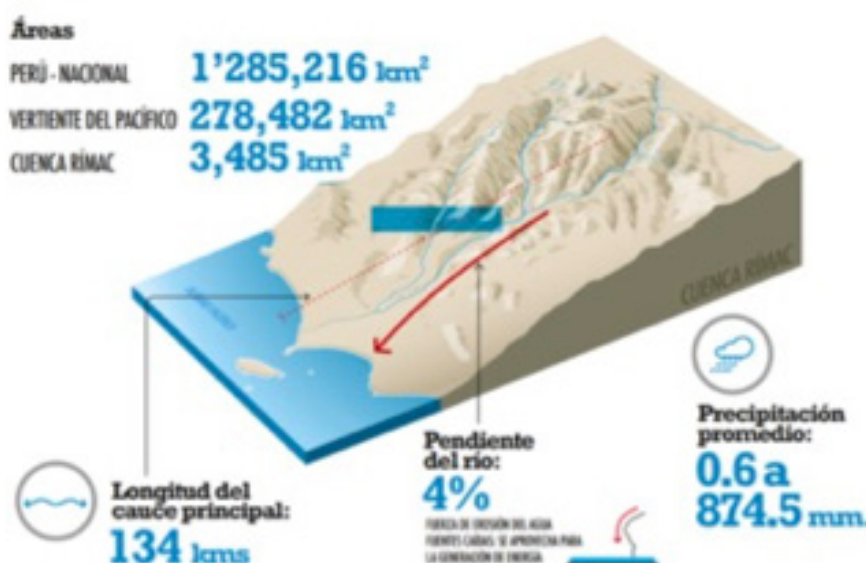
verdadera muralla adosada y no un simple tajamar, la misma protegía la ciudad de las avenidas estacionales del río producto de las fuertes lluvias en la sierra. Su caudal era tan fuerte que el cronista Pedro León Portocarrero, hacía 1620, decía de él ser un poderoso río. Este río ha sido un pilar fundamental para el desarrollo y sustento de las civilizaciones que han habitado la región a lo largo de la historia.

En tiempos precolombinos, las culturas Lima e Inca dependían en gran medida del Rímac para la irrigación de sus tierras agrícolas, así como para el consumo humano. La importancia del río se mantuvo durante la colonización española y en los siglos posteriores, consolidándose como una fuente vital de agua para la creciente población de Lima, pero la ciudad no ha correspondido con el mismo cuidado, llevando al río a un estado crítico en el que casi toda su flora y fauna han desaparecido debido a la contaminación. La Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), siguiendo una política ambientalmente amigable y de gestión integrada de los recursos hídricos, ha decidido, como nadie antes, implementar el Plan Maestro de Recuperación del río Rímac (Korea Water Resources y otros, 2015).

Efluentes que Forman el Río Rímac

El río Rímac se forma principalmente a partir de diversos afluentes que recogen agua de las precipitaciones y los deshielos de los Andes. Estos afluentes incluyen ríos y quebradas que confluyen para formar el caudal principal del Rímac, llevando consigo no solo agua, sino también sedimentos y nutrientes esenciales para los ecosistemas a lo largo de su recorrido (ver Figura 01). Sin embargo, también recogen contaminantes de diversas fuentes, como desechos mineros y agrícolas, que afectan la calidad del agua a medida que avanza hacia Lima (Korea Water Resources y otros, 2015).

Figura N°1: Geografía del Río Rímac



Fuente: Autoridad nacional del agua, (2014).

Impacto de la Contaminación en la Historia y desarrollo de la Región

El río Rímac, vital para la existencia de Lima, ha sufrido una drástica transformación debido a la contaminación a lo largo del tiempo, esto comenzó a ser notable a mediados del siglo XX, coincidiendo con el auge industrial y el crecimiento urbano de Lima. La descarga de residuos industriales, domésticos y agrícolas sin tratamiento adecuado ha llevado a la degradación del agua del río, afectando tanto el ecosistema acuático como la salud humana.

Efectos en la Salud Pública

Estudios recientes han documentado la presencia de metales pesados, como plomo y mercurio, en las aguas del Rímac, lo que representa un riesgo significativo para la población que depende de este recurso. La exposición a estos contaminantes puede causar una serie de problemas de salud, incluidos trastornos neurológicos y enfermedades renales. Investigaciones como las de Espinoza et. al. (2020) han subrayado la correlación entre la calidad del agua del río y la incidencia de enfermedades gastrointestinales en las comunidades adyacentes.

Efectos en el Ecosistema

El impacto ambiental de la contaminación también es severo, como se muestra en la figura N° 2. La biodiversidad del río ha disminuido drásticamente, con muchas especies de peces y flora acuática desapareciendo o reduciendo sus poblaciones.

Según el estudio de Gómez y Rivera (2018), la contaminación ha alterado la composición química del agua, afectando los niveles de oxígeno y otros nutrientes esenciales para la vida acuática.

Figura N°2: Época prehispánica hasta la era republicana, sitio de pesca y recolección.



Fuente: Angulo J. (2024)

Efluentes que Forman el Río Rímac

El río Rímac recibe una variedad de efluentes a lo largo de su curso, provenientes de diferentes fuentes. Estos efluentes pueden clasificarse en tres categorías principales: industriales, domésticos y agrícolas.

Efluentes Industriales

Las industrias ubicadas en la cuenca del Rímac, especialmente las mineras y manufactureras, son grandes contribuyentes a la contaminación del río. Estas industrias a menudo descargan residuos tóxicos, incluyendo metales pesados y sustancias químicas peligrosas, directamente en el río sin el tratamiento adecuado. Un estudio realizado por Paredes et. al. (2019) identificó niveles alarmantes de cadmio y arsénico en varios puntos del río, asociados principalmente con la actividad minera.

Efluentes Domésticos

El rápido crecimiento poblacional de Lima ha resultado en un aumento significativo de los desechos domésticos. Muchos de estos desechos se vierten en el río sin tratamiento previo, lo que incluye aguas residuales y basura. La falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales en muchas áreas urbanas ha exacerbado este problema, como lo destacó la investigación de Hernández

y Cruz (2021), que mostró un aumento en los niveles de coliformes fecales en el agua del río.

Ercillo et. al. (2005) emplean el término aguas servidas para describir las aguas residuales, las cuales pueden clasificarse también como aguas cloacales, negras, desagües o líquidos cloacales, dependiendo de su origen. Definen las aguas servidas como aquellos efluentes generados en hogares, comercios o industrias, que contienen una mezcla de carga orgánica e inorgánica, restos de organismos vivos, productos químicos, medicinales y tóxicos, entre otros contaminantes, haciéndolas inapropiadas para su reutilización sin un tratamiento previo. Además, mencionan que un efluente es el líquido que se obtiene al finalizar un proceso de tratamiento de aguas y, en ausencia de especificaciones adicionales, se asume que se trata de efluentes de aguas residuales.

Efluentes Agrícolas

La agricultura en la cuenca del Rímac también contribuye a la contaminación del río. Los pesticidas y fertilizantes utilizados en las prácticas agrícolas a menudo terminan en el río a través del escurrimiento superficial. Estos químicos pueden causar eutrofización, un proceso que disminuye el oxígeno disponible en el agua y afecta negativamente la vida acuática. López y Salazar (2020) encontraron que los niveles de nitratos y fosfatos en el río han aumentado considerablemente debido a la actividad agrícola intensiva, ver cuadro 1.

Cuadro N°1: Comportamiento del Caudal del Río Rímac Registros de Aforos Medidos en las estaciones hidrométricas Sheque y Tamboraque 2018-2022 (m3 /s)

Río Rímac			
Año	Máximo	Promedio	Mínimo
2018	37.97	28.22	22.63
2019	38.55	29.22	23.32
2020	37.25	28.67	22.94
2021	40.2	31.62	24.6
2022	35.39	27.93	23.2

Fuente: Gerencia de Producción y Distribución Primaria, Equipo Gestión Integral de Plantas. Anuario estadístico SEDAPAL (2022).

La contaminación del río Rímac es un problema complejo y multifacético que tiene raíces históricas profundas y consecuencias contemporáneas severas. La interacción de factores industriales, domésticos y agrícolas ha degradado significati-

vamente la calidad del agua, afectando tanto a las comunidades humanas como al ecosistema. Abordar esta problemática requiere un enfoque integral que combine regulación gubernamental, innovación tecnológica y concienciación pública.

EVOLUCIÓN URBANA DE LIMA Y LA CONTAMINACIÓN DEL RÍO RÍMAC

Estado del río Rímac Antes del Crecimiento de la Población de Lima

Antes del crecimiento exponencial de la población de Lima, el río Rímac era un curso de agua relativamente limpio y próspero. Los informes históricos y estudios sugieren que el río albergaba una abundante vida acuática, incluidos camarones y otras especies, que ahora son extremadamente raros debido a la contaminación y la alteración de su hábitat natural. Este río proporcionaba agua potable a las primeras comunidades y era utilizado para la agricultura y otras actividades esenciales para la vida cotidiana (ANA, 2020).

Impacto del Crecimiento Urbano

Fase Inicial de Urbanización

La fundación de Lima por Francisco Pizarro en 1535 marcó el comienzo de la transformación urbana del valle del Rímac. Inicialmente, la ciudad se desarrolló lentamente, y el impacto sobre el río fue relativamente bajo. Las prácticas de manejo de residuos eran rudimentarias, y la contaminación industrial aún no era un problema significativo. Durante este periodo, el río Rímac continuaba siendo una fuente vital de agua limpia para los habitantes de Lima.

Crecimiento Demográfico y Expansión

Con el tiempo, Lima experimentó un crecimiento demográfico significativo. A mediados del siglo XIX, la Revolución Industrial trajo consigo una rápida expansión urbana y un aumento en las actividades industriales. La población de Lima creció exponencialmente, pasando de ser una ciudad de menos de 100,000 habitantes a principios del siglo XX a más de 10.2 millones en la actualidad. Este crecimiento demográfico ejerció una presión sin precedentes sobre los recursos naturales de la región, incluido el río Rímac (ANA, 2024)

Desarrollo de Infraestructuras y Cambios en el Uso del Suelo

El desarrollo de infraestructuras como la construcción de la Vía de Evitamiento en la década de 1970 y otros proyectos de urbanización tuvieron un impacto significativo en el río Rímac. La urbanización descontrolada llevó a la invasión de áreas ribereñas, la construcción de viviendas informales y la expansión industrial cerca del río. Estas actividades resultaron en la deforestación y la pérdida de vegetación natural, que anteriormente ayudaba a filtrar y purificar el agua del río (Kaiser, 2022)

Contaminación por Residuos Sólidos y Aguas Residuales

La falta de infraestructura adecuada para el manejo de residuos sólidos y aguas residuales exacerbó la contaminación del río Rímac. Con el incremento de la población, aumentaron también los volúmenes de residuos domésticos e industriales. Muchas industrias ubicadas a lo largo del río comenzaron a verter sus desechos directamente en el agua sin tratamiento previo. Los sistemas de alcantarillado, insuficientes para manejar la carga creciente, resultaron en descargas frecuentes de aguas residuales sin tratar en el río.

Impacto en la Biodiversidad

El deterioro de la calidad del agua tuvo un impacto devastador en la biodiversidad del río Rímac. Especies como los camarones, que eran comunes en el río, comenzaron a desaparecer debido a los altos niveles de contaminación. Los metales pesados y otros contaminantes tóxicos afectaron la vida acuática, reduciendo la diversidad biológica y alterando los ecosistemas fluviales. La pérdida de biodiversidad no solo afectó a las especies acuáticas, sino también a las comunidades humanas que dependían del río para su subsistencia (ANA, 2020).

Investigaciones y Estudio de la Contaminación

A lo largo de los años, diversas instituciones han realizado estudios para evaluar la magnitud de la contaminación del río Rímac. Investigaciones llevadas a cabo por organismos como DIGESA, IMARPE y SEDAPAL han documentado los niveles alarmantes de metales pesados y otros contaminantes en el agua. Estos estudios han sido fundamentales para comprender las fuentes de contaminación y los impactos ambientales y de salud pública asociados (MINSA, 2021).

Casos de Estudio y Ejemplos Específicos

Caso de los Asentamientos Informales

Los asentamientos informales a lo largo del río Rímac han contribuido significativamente a su contaminación. Estos asentamientos, muchas veces carentes de servicios básicos como alcantarillado, dependen del río para deshacerse de sus aguas residuales y basura. Esta práctica ha incrementado la carga de contaminantes orgánicos y químicos en el río, agravando su estado ecológico.

Industrias en la Cuenca del Rímac

Las industrias ubicadas en la cuenca alta y media del río Rímac han sido responsables de verter grandes cantidades de desechos tóxicos en el agua. La minería, en particular, ha sido una fuente significativa de contaminación con metales pesados como plomo, cadmio y zinc. Estos contaminantes no solo afectan la calidad del agua, sino que también se bioacumulan en la cadena alimentaria, presentando riesgos graves para la salud humana y la vida silvestre.

Impactos Sociales y Económicos

La contaminación del río Rímac no solo tiene repercusiones ambientales, sino también sociales y económicas. Las comunidades ribereñas, que históricamente han dependido del río para su subsistencia, han visto disminuir sus medios de vida debido a la disminución de la calidad del agua y la pérdida de biodiversidad. Además, los costos asociados con el tratamiento del agua para hacerla potable han aumentado, ejerciendo presión sobre los recursos financieros de la ciudad.

Iniciativas y Proyectos de Remediación

En respuesta a la creciente contaminación, se han implementado diversas iniciativas y proyectos de remediación. Estos incluyen la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, programas de reforestación de áreas ribereñas y la promoción de prácticas agrícolas y mineras más sostenibles. Aunque estas iniciativas han logrado algunos éxitos, la recuperación total del río Rímac requiere un esfuerzo continuo y coordinado entre múltiples actores. La evolución urbana de Lima ha tenido un impacto profundo y duradero en el río Rímac. La urbanización descontrolada, junto con la falta de infraestructura adecuada para el manejo de residuos, ha llevado a una severa contaminación del río. Sin embargo, con una planificación cuidadosa, una mejor regulación y la cooperación entre el gobierno, las industrias y la sociedad civil, es posible revertir parte del daño y restaurar el río Rímac a un estado más saludable y sostenible (Kaiser, 2022) (ANA, 2024).

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL RÍO RÍMAC

El río Rímac, es una de las principales fuentes de agua de la ciudad de Lima, ha sufrido una significativa degradación a lo largo de los años debido a diversos factores antropogénicos. Desde la era precolombina, nuestro río ha sido vital para el desarrollo de la región, proveyendo agua para la agricultura, el consumo humano y otras actividades económicas. Sin embargo, con la llegada de la urbanización descontrolada, debido a la inmigración, y la industrialización, especialmente a partir del siglo XX, el río Rímac ha sido sometido a una intensa presión ambiental. La descarga de residuos industriales y domésticos sin tratamiento adecuado ha transformado su cauce en un vertedero, impactando negativamente en la calidad del agua y en los ecosistemas ribereños.

Además, la actividad minera en la sierra central peruana ha contribuido significativamente a la contaminación del río. Asentamientos mineros como La Oroya, Morococha y Casapalca, ubicados en afluentes del Rímac, han liberado metales pesados y otros contaminantes, exacerbando la degradación biológica del río. Este deterioro no solo afecta al medio ambiente, sino que también pone en riesgo la salud de millones de limeños que dependen del río para su suministro de agua potable.

En este contexto, es crucial reflexionar sobre las oportunidades para restaurar el capital natural del río Rímac, adoptando enfoques de gestión integrados que consideren tanto los aspectos históricos como las necesidades actuales de la población. Solo a través de una acción concertada y sostenible se podrá revertir el daño y garantizar la disponibilidad de recursos hídricos para las futuras generaciones.

Fuentes de contaminación

Las principales fuentes de la contaminación del río Rímac, son:

- Vertimientos de aguas residuales: Domésticas, industriales, mineras y de riego.
- Pasivos ambientales: Botaderos de residuos sólidos.
- Asentamientos humanos: En las riberas del río.

Aunque el río Rímac trae una importante carga biológica, producto de las descargas de desagües crudos, se ha identificado que los principales causantes de la

contaminación de la carga de metales pesados en el río Rímac son:

- a) Las Actividades mineras y de procesamiento de minerales. Según un estudio de la Universidad Nacional Agraria La Molina, las actividades mineras y de fundición en la cuenca del río Rímac liberan cantidades significativas de metales pesados, como plomo, cadmio, mercurio y arsénico, que se filtran y escurren hacia el río (UNALM, 2019). - Un informe de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) indica que las descargas de efluentes mineros sin tratamiento adecuado son una de las principales causas de la contaminación por metales pesados en el río Rímac (ANA, 2021).
- b) Aguas residuales industriales y domésticas. Según un estudio del Ministerio del Ambiente (MINAM), la liberación de aguas residuales industriales sin tratar, que contienen metales pesados, representa una significativa fuente de contaminación para el río Rímac (MINAM, 2018). Un informe de la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS) menciona que las aguas residuales domésticas también aportan metales pesados provenientes de productos de uso cotidiano (SUNASS, 2020).
- c) Actividades agrícolas y uso de fertilizantes/pesticidas. Según un estudio de la Autoridad Administrativa del Agua Chillón, Rímac y Lurín, el excesivo uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura puede liberar metales pesados que se acumulan en el suelo y luego son arrastrados hacia el río Rímac (Chillón, Rímac y Lurín, 2017).
- d) Disposición inadecuada de residuos sólidos. Según informe de la Municipalidad Metropolitana de Lima la disposición inadecuada de residuos sólidos, como baterías, pinturas, electrónicos, entre otros, que contienen metales pesados, permite que estos contaminen el río Rímac (MML, 2020).

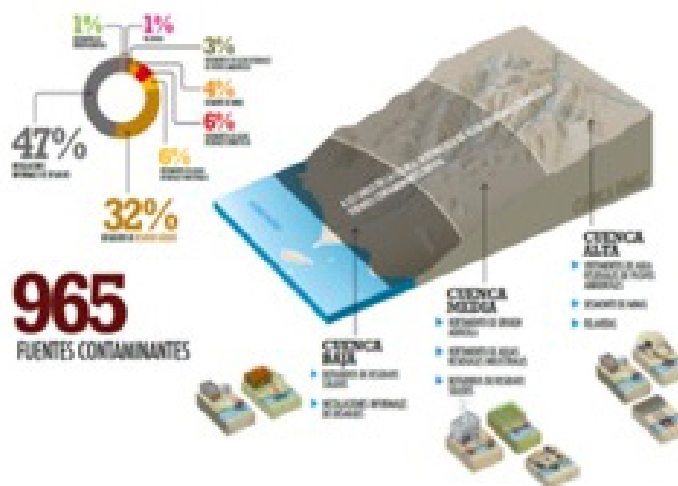
Monitoreo

Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), existen 965 fuentes contaminantes a lo largo de la cuenca del río Rímac, siendo las de mayor impacto: las instalaciones informales de desagües (47%), seguido por los botaderos de residuos sólidos (32%).

Las entidades responsables del monitoreo de la calidad del agua en el río Rímac son:

- **Autoridad Nacional del Agua (ANA):** Entidad adscrita al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) encargada de la gestión de los recursos hídricos en el Perú; realiza el monitoreo de la calidad del agua en el río Rímac a través de sus Autoridades Administrativas del Agua (AAA).

Figura N°3: Fuentes contaminantes de la cuenca del río Rímac



Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2024)

- **Ministerio del Ambiente (MINAM):** Ente rector del Sistema Nacional de Gestión Ambiental en el Perú, a través de su Dirección General de Calidad Ambiental, supervisa y monitorea la calidad del agua de los cuerpos hídricos, incluido el río Rímac.
- **Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS):** Organismo regulador de los servicios de saneamiento en el país; realiza el monitoreo de la calidad del agua en el río Rímac, especialmente en las zonas de captación para el abastecimiento de agua potable.
- **Municipalidad Metropolitana de Lima (MML):** En su calidad de Gobierno Local, tiene competencias en la gestión y conservación de los recursos hídricos en su jurisdicción, incluyendo el río Rímac; participando también, a través de sus unidades ambientales, en el monitoreo de la calidad del agua del río Rímac.

Estas cuatro entidades, trabajan de manera coordinada para realizar el seguimiento y evaluación de la calidad del agua del río Rímac, con el objetivo de identificar y mitigar los problemas de contaminación, como el aumento de metales pesados, en esta importante fuente hídrica.

Seguidamente en el cuadro 2, se muestra los parámetros que son evaluados, así como su frecuencia y la entidad que las desarrolla:

Cuadro N°2: Parámetros de evaluación del agua

Parámetros		Entidad y Frecuencia de monitoreo
Físicos	Temperatura	ANA (Trimestral) MINAM (Semestral) SUNASS (Mensual) MML (Semestral)
	pH	
	Conductividad eléctrica	
	Sólidos totales disueltos	
	Turbiedad	
Químicos	Oxígeno disuelto	
	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	
	Demanda química de oxígeno (DQO)	
	Nutrientes (nitrógeno, fósforo)	
	Metales pesados (plomo, cadmio, mercurio, arsénico, cromo, entre otros)	
	Pesticidas y otros contaminantes orgánicos	
Biológicos	Coliformes totales y fecales	
	Presencia de macroinvertebrados bentónicos	
	Índices de diversidad y calidad biológica	

Fuente: Elaboración propia.

Nivel de contaminación

El innegable hecho que retrata al río Rímac como fuente vital para la subsistencia de la comunidad y el correcto desarrollo de muchas actividades económicas, no lo hace ajeno a ser víctima de la contaminación que hoy en día azota al mundo entero. Se sabe que Lima es una ciudad donde se han ubicado diversas zonas industriales y que desde hace mucho tiempo se mantiene creciendo demográficamente debido a las migraciones, situación que la hace destacar entre las demás regiones del país, pero a la vez la hace más propensa a deteriorar sus recursos biológicos.

El problema con la presencia de metales en la cuenca del Rímac ha persistido a través de los años y ha generado controversia lo nocivos que estos pueden llegar a ser. Dentro de los metales que más llaman la atención de las autoridades sanitarias y la comunidad en general, se encuentran el hierro (Fe), plomo (Pb), Cadmio (Cd) y aluminio (Al). Mensualmente, no solo se realizan informes que detallan

las concentraciones de dichos metales en las aguas del Rímac, sino que también se relacionan los valores con los de informes anteriores para determinar si hubo mejoras o retrocesos en la calidad ambiental.

Según información del Ministerio del Ambiente (MINAM) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y de acuerdo al cuadro 3, las principales estaciones de monitoreo se ubican en:

Cuadro N°3: Principales estaciones de monitoreo

Estación	Ubicación
Chosica	Distrito de Chosica (parte alta de la cuenca del río Rímac).
Huachipa	Distrito de Lurigancho-Chosica (parte media de la cuenca).
Puente Piedra	Distrito: Puente Piedra (parte baja de la cuenca)
Surco	Distrito de Surco (cerca de la desembocadura del río Rímac)

Fuente: Elaboración propia

Según datos del INEI (2024), en el mes de diciembre de 2023, la concentración máxima de hierro en el río Rímac fue de 98,10 mg/l lo que representó un aumento de 4639,1% respecto a diciembre 2022 (2,07 mg/l) e igualmente un aumento de 681,7% respecto a noviembre 2023 (12,55 mg/l). En cuanto la concentración promedio fue de 20,31 mg/l el cual aumentó en 3661,1% respecto al mismo mes del año anterior (0,54 mg/l) e igualmente aumentó en 478,6% respecto a noviembre 2023 (3,51 mg/l).

Respecto a la presencia de plomo, el INEI (2024), reporta que, para el mes de diciembre de 2023, que la concentración promedio y máximo de plomo en el río Rímac fue de 0,0216 mg/l y 1,038 mg/l respectivamente. Para su valor promedio se registró un aumento de 644,8% en comparación con el mes de noviembre 2023 (0,029 mg/l) e igualmente un incremento de 1561,5% en comparación con diciembre 2022 (0,013 mg/l). Para su valor máximo se registró un aumento de 779,7% en comparación con el mes de noviembre 2023 (0,118 mg/l) e igualmente un incremento de 1630,0% en comparación con diciembre 2022 (0,060 mg/l).

Por otro lado, según esta misma institución, la concentración de Cadmio en el río Rímac para el mes de diciembre de 2023 fue de 0,015 mg/l para su valor máximo y 0,005 mg/l para su valor promedio. En el valor máximo se registró un aumento de 650,0% respecto al mismo mes del año anterior (0,002 mg/l) y un aumento del 87,5% respecto a noviembre 2023 (0,008 mg/l). En el valor promedio se registró un aumento de 400,0% respecto a noviembre 2023 (0,001mg/l) e igualmen-

te se registró un incremento de 400,0% respecto al mismo mes del año anterior (0,001mg/l).

Así también, la concentración de aluminio en el río Rímac para el mes de diciembre de 2023 fue de 123,81 mg/l para su valor máximo y 18,57 mg/l para su valor promedio, según información proporcionada por SEDAPAL. Analizando su valor máximo se observó un aumento de 1238,5% respecto a noviembre 2023 (9,25 mg/l) e igualmente un aumento de 7786,0% respecto a diciembre 2022 (1,57 mg/l); asimismo, para su valor promedio se registró un aumento de 4786,8% respecto a similar mes del año anterior (0,38 mg/l) e igualmente un aumento de 536,0% respecto a noviembre 2023 (2,92 mg/l).

Respecto a los datos proporcionados, se precisa que, los correspondientes a diciembre 2022 están referidos al final de la pandemia; mientras que, los datos de diciembre 2023 son post pandemia, es decir, cuando la actividad industrial ya estaba restituida al 100%.

No se puede soslayar el riesgo que representa el incremento de las concentraciones de dichos metales en el río Rímac, situación que refleja un posible futuro en el que la **contaminación** del Rímac llega a ser incontrolable, incluso para la potabilización de sus aguas.

Consecuencias de la contaminación

Los impactos que pueden causar esas fuentes contaminantes al medio ambiente son:

- Metales pesados: Pueden acumularse en los sedimentos y la biota, afectando la salud de los organismos y la cadena alimentaria.
- Nutrientes: Un exceso puede causar eutrofización, con el crecimiento excesivo de algas y la disminución del oxígeno disuelto.
- Contaminantes orgánicos: Pueden tener efectos tóxicos y alterar el equilibrio ecológico del río.
- Parámetros microbiológicos: Indican la presencia de contaminación fecal, lo que representa un riesgo para la salud pública.
- Parámetros físicos: Reflejan las condiciones generales del agua y pueden afectar la vida acuática.

Impacto de la Contaminación del Río Rímac en la Salud Humana

La contaminación del Río Rímac, lamentablemente, afecta de manera significativa la salud de las poblaciones que dependen de él, tanto directa como indirectamente.

Dentro de los principales impactos directos se tiene a la exposición a aguas contaminadas, aguas residuales, desechos industriales y agrícolas que puede provocar enfermedades gastrointestinales, dermatológicas y respiratorias OMS (2019).

Entre ellas se pueden citar:

- Gastrointestinales: Diarrea, cólera, disentería, hepatitis A.
- Respiratorias: Neumonía, bronquitis, asma.
- Dermatológicas: Irritación de la piel, eccemas, infecciones cutáneas.
- Otras: Enfermedades del oído, medio ambiente, cáncer.

Los sistemas de producción industrial actuales usan metales pesados para la extracción de un material o como elemento en la refinación de un producto en particular lo que en principio resulta en la obtención del producto deseado con relativos bajos costos de producción. Sin embargo, usar estos metales presenta un grave problema a nivel ambiental debido a sus altos niveles de toxicidad para los organismos con los que interactúen una vez son descargados. La presencia de metales pesados y otros contaminantes tóxicos en el agua puede provocar envenenamiento, especialmente en niños pequeños que juegan en las riberas o ingieren agua contaminada Pabón et al. (2020).

Las principales vías de exposición al trihalometano durante el embarazo son la absorción dérmica y la inhalación. La ingestión es una ruta de exposición menor por lo que las sustancias químicas presentes en el agua contaminada pueden afectar la fertilidad, el desarrollo fetal y el parto, aumentando el riesgo de abortos, nacimientos prematuros y malformaciones congénitas Villanueva et al. (2006).

Dentro de lo que se identifica como impactos indirectos se debe señalar a la falta de acceso a agua potable, con lo que la contaminación del río limita la disponibilidad de agua potable segura, obligando a las personas a consumir agua contaminada o a comprar agua embotellada, lo que genera un impacto económico y social considerable ANA (2024).

También es de resaltar en lo que concierne al deterioro de la calidad de vida pues la contaminación del río afecta la calidad de vida de las poblaciones ribereñas,

limitando su acceso a actividades recreativas, pesca y turismo, y generando un ambiente desagradable y poco saludable ANA (2024).

Dentro de lo que constituye un impacto en la economía, la contaminación del río afecta negativamente las actividades económicas que dependen del agua, como la agricultura, la pesca y el turismo, generando pérdidas económicas significativas UNI (2024).

Los daños ecológicos ocasionados por la contaminación del río afectan la biodiversidad acuática y terrestre, poniendo en riesgo la supervivencia de diversas especies de plantas y animales, lo que genera un desequilibrio ecológico y limita los recursos naturales disponibles para la población OMS (2024).

Tal como se viene exponiendo las enfermedades transmitidas por el agua a causa de la contaminación de los recursos hídricos, la del río Rímac que es una fuente importante de agua para el consumo humano en Lima y Callao con su presencia de metales pesados y contaminantes industriales compromete la calidad del agua potable provocando consecuencias negativas al consumir agua contaminada lo cual puede llevar a enfermedades crónicas y agudas MINSA (2021).

El impacto que produce en la agricultura y la alimentación está dada por el uso de agua contaminada para el riego que afecta la seguridad alimentaria, ya que los cultivos pueden absorber contaminantes provocando como consecuencia el consumo de alimentos contaminados que pueden causar problemas de salud a largo plazo INIA (2020).

Dentro de lo que son los efectos psicológicos y sociales, la contaminación del río afecta el bienestar psicológico de los pobladores debido a la preocupación constante por la salud y la calidad del entorno lo cual les provoca estrés, ansiedad y disminución de la calidad de vida UPCH (2019).

La degradación del entorno urbano provocada por la contaminación del río contribuye a la degradación ambiental y la pérdida de espacios recreativos, afectando negativamente la vida urbana lo que trae como consecuencia la reducción de áreas de esparcimiento y deterioro de la calidad de vida urbana RPDA (2024).

La evaluación de la contaminación del río Rímac es un proceso complejo que involucra la identificación de fuentes de contaminación, la medición de los niveles de contaminantes, y la comprensión de los impactos en los ecosistemas y la salud humana. A continuación, se presenta un análisis detallado de estas áreas, respaldado por estudios científicos y datos históricos.

Medidas de Mitigación y Remediación

1. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Una de las medidas más efectivas para reducir la contaminación del río Rímac ha sido la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales. Estas plantas ayudan a eliminar los contaminantes orgánicos y químicos de las aguas residuales antes de que sean descargadas en el río, mejorando significativamente la calidad del agua.

2. Regulación y Control

El fortalecimiento de las regulaciones ambientales y el control de las actividades industriales y mineras son esenciales para prevenir la contaminación del río. Las autoridades deben asegurar que las industrias cumplan con los estándares ambientales y que las actividades mineras se realicen de manera sostenible y responsable. La implementación de políticas más estrictas y la vigilancia constante han mostrado resultados positivos en la reducción de vertimientos ilegales en el río (Kaiser, 2022).

3. Educación y Sensibilización

La educación y sensibilización de la población sobre la importancia de proteger el río Rímac es fundamental. Campañas de sensibilización pueden ayudar a reducir las prácticas contaminantes y fomentar una mayor participación de la comunidad en la conservación del río. En 2017, una campaña lanzada por el Ministerio del Ambiente logró reducir la disposición inadecuada de residuos sólidos en las riberas del río en un 15% en solo un año (ANA, 2024)

4. Reforestación y Restauración de Ecosistemas

La reforestación de áreas ribereñas y la restauración de ecosistemas naturales son estrategias clave para mejorar la calidad del agua y la biodiversidad del río. Estos esfuerzos ayudan a estabilizar las riberas del río, reducir la erosión y mejorar la capacidad del ecosistema para filtrar y purificar el agua. En los últimos años, programas de reforestación han plantado miles de árboles nativos a lo largo de las riberas del río, contribuyendo a la recuperación del ecosistema ribereño (ANA, 2024).

La evaluación de la contaminación del río Rímac revela un panorama complejo y desafiante. Las múltiples fuentes de contaminación, combinadas con los efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente, subrayan la necesidad de

acciones coordinadas y sostenibles. La implementación efectiva de medidas de mitigación y remediación, junto con un enfoque integral que incluya la educación y la concienciación, es crucial para restaurar la salud del río Rímac y asegurar su sostenibilidad a largo plazo (Kaiser, 2022).

ACCIONES DESARROLLADAS A NIVEL INSTITUCIONAL PARA RECUPERAR EL RIO RÍMAC

El Río Rímac es un recurso vital para Lima y Callao, su recuperación es fundamental para garantizar el bienestar de las comunidades y el futuro sostenible de la región. El río que es considerado el principal recurso hídrico vital de agua potable para la ciudad de Lima y Callao ha sufrido un grave deterioro ambiental debido a factores como la contaminación urbana, industrial y agrícola, la deforestación, la extracción de arena y la presencia de invasiones en sus riberas son algunas muestras de ello.

Ante esta situación, diversas instituciones han emprendido acciones para recuperar el río y revertir ese estado, bajo el entendido que la recuperación es posible, pero requiere un esfuerzo continuo, colaboración multisectorial y mayor inversión. En ese marco, diversas entidades gubernamentales, no gubernamentales y organismos internacionales trabajan en conjunto para recuperar el Río Rímac. Entre las principales iniciativas se encuentran:

- a) Plan Maestro para la Restauración del Río Rímac: Elaborado en 2015 por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en colaboración con el Ministerio de Tierra, Infraestructura y Transporte de Corea y el Ministerio del Ambiente (MINAM), este plan establece una estrategia integral para la restauración del río, abarcando aspectos como la gestión del agua, la infraestructura natural, la recuperación de la biodiversidad y la participación social y también contempla el desarrollo de planes de manejo integral de la cuenca del Río Rímac en la que se consideran los aspectos económicos, ecológicos y socioculturales con el fin de adoptar una visión sistémica y holística para la gestión sostenible del río. En este marco se han realizado acciones tendientes a la construcción y operación de plantas de tratamiento para reducir la carga contaminante que ingresa al río cuyo objetivo es el de mejorar la calidad del agua eliminando contaminantes industriales y domésticos y se han implementado sistemas de monitoreo continuo de la calidad del agua y la aplicación de regulaciones más

- estrictas para las industrias locales con el objetivo de asegurar el cumplimiento de las normas ambientales y detectar rápidamente eventos de contaminación (ANA, 2020).
- b) Comisión Multisectorial para la Recuperación de la Calidad de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Rímac: Creada en 2012, esta comisión reúne a representantes de diversas entidades públicas y privadas con el objetivo de coordinar acciones y promover la recuperación del río (MML, 2024).
 - c) Proyectos de tratamiento de aguas residuales: Se han implementado y se encuentran en proceso de construcción diversas plantas de tratamiento de aguas residuales en la cuenca del Rímac, con el fin de reducir la descarga de aguas contaminadas al río (MINAM, 2019).
 - d) Programas de reforestación de riberas y restauración ecológica: La Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA) y el MINAM desarrollan iniciativas de reforestación de áreas ribereñas con especies nativas y restauración de hábitats naturales con el objetivo de revitalizar los ecosistemas del río y aumentar la biodiversidad recuperando la cobertura vegetal y protegiendo el suelo de la erosión y conservando la biodiversidad (SPDA, 2018).
 - e) Campañas de educación y sensibilización comunitaria: El Ministerio de Educación (MINEDU) en alianza con UNESCO han desarrollado acciones tales como Programas educativos en escuelas y comunidades para aumentar la conciencia ambiental y promover la participación ciudadana en la limpieza del río con el objetivo de fomentar el compromiso de la comunidad en la preservación y mantenimiento del río. Asimismo, se han desarrollado campañas de sensibilización ambiental dirigidas a la población ribereña y al público en general, con el objetivo de promover el uso responsable del agua y la protección del río (UNESCO, 2022).
 - f) Recuperación de espacios públicos y desarrollo de Infraestructura Verde: El Gobierno Regional de Lima en unión con la Municipalidad Metropolitana de Lima vienen creando parques, corredores biológicos y espacios recreativos a lo largo de las riberas del río, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los habitantes y promover el uso sostenible del entorno urbano. Se han implementado proyectos de recuperación de espacios públicos en las riberas del río, creando áreas verdes y zonas de recreación para la población (MML, 2024).
 - g) Promoción del turismo sostenible: Se han desarrollado iniciativas para promover el turismo sostenible en la cuenca del Rímac, fomentando actividades

como el senderismo, el ciclismo y la observación de aves (MML, 2024).

- h) Investigación científica: Se han realizado estudios científicos para comprender mejor la dinámica del río y los factores que afectan su calidad ambiental, lo que permite orientar las acciones de restauración de manera más efectiva (MINAM, 2019).
- i) Participación de la comunidad: Se ha involucrado a la población local en los procesos de planificación y ejecución de proyectos de recuperación del río, fomentando el sentido de pertenencia y la responsabilidad compartida por su cuidado (MML, 2024).
- j) Cooperación internacional y financiamiento: Se han establecido alianzas con organismos internacionales como el Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo (BID).y gobiernos de otros países para compartir experiencias y buenas prácticas en la gestión de recursos hídricos y la restauración de ríos, pero sobre todo orientados a obtener fondos y asistencia técnica para proyectos de recuperación y mejora del río y así apoyar financieramente y con conocimientos especializados las iniciativas de recuperación (PNUMA, 2021).

Resultados de las acciones Institucionales para la Recuperación del Río Rímac

Las iniciativas emprendidas por las diversas instituciones y actores sociales para la recuperación del Río Rímac han logrado resultados significativos tangibles en varias áreas clave en el proceso de recuperación, todo lo cual ofrece esperanza para el futuro de este importante recurso fluvial.

Dentro de los resultados significativos que se pueden evidenciar, tenemos a los siguientes:

Mejora de la Calidad del Agua y Reducción de la contaminación

La construcción e implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales ha contribuido a disminuir significativamente la descarga de aguas contaminadas al río y por ende los niveles de contaminación, mejorando su calidad en algunos sectores.

Específicamente se ha logrado la disminución de la carga de contaminantes industriales y domésticos y el aumento de los niveles de oxígeno disuelto, lo cual es un indicador de mejor salud del ecosistema acuático. Se estima que la carga contaminante se ha reducido en un 20% en los últimos 10 años (ANA, 2020)

Restauración de Ecosistemas y Aumento de Biodiversidad

Las iniciativas de reforestación y restauración ecológica han permitido recuperar parte de la cobertura vegetal en las riberas del río, especialmente en áreas degradadas por la deforestación y la agricultura.

En tal sentido se ha recuperado especies nativas de flora y fauna logrando un mejoramiento de los hábitats naturales a lo largo del río. Se estima que se han reforestado más de 100 hectáreas de riberas en los últimos 5 años, lo que contribuye a la protección del suelo y la conservación de la biodiversidad (MINAM, 2019).

Mayor conciencia ambiental por el incremento de la Participación Comunitaria

Las campañas educativas y de sensibilización han movilizado y generado mayor conciencia ambiental entre la población ribereña y el público en general, promoviendo un uso más responsable del agua y un mayor compromiso con la protección del río. Se ha observado un aumento en el involucramiento de ciudadanos en actividades de limpieza y mantenimiento logrando una mayor conciencia ambiental y participación de la comunidad en actividades de limpieza del río y protección del medio ambiente.

Asimismo, la participación de la población local en los procesos de planificación y ejecución de proyectos de recuperación del río ha sido cada vez más activa, en ese sentido se han creado comités de gestión ambiental y se han desarrollado programas de educación ambiental dirigidos a las comunidades ribereñas (MML, 2024).

Cumplimiento de Normas Ambientales

La implementación de sistemas de monitoreo y regulaciones más estrictas ha llevado a un mejor cumplimiento ambiental lo que provoca una reducción de vertimientos ilegales de contaminantes y mayor responsabilidad y cumplimiento por parte de las industrias locales (MINAM, 2019).

Creación de Infraestructura Verde y Espacios Públicos

El desarrollo de infraestructura verde y la recuperación de espacios públicos en las riberas del río ha creado áreas verdes y zonas de recreación para la población, fomentando el uso y disfrute de este espacio natural. El establecimiento de parques y espacios recreativos a lo largo del río, el fomento de actividades recreativas y educativas en los nuevos espacios públicos han contribuido a mejorar la cali-

dad de vida de las comunidades ribereñas y han fomentado el uso y disfrute del río (ANA, 2020).

Implementación de una Gestión Integrada de la Cuenca

La adopción de una perspectiva integral ha permitido una mejor coordinación de los esfuerzos de recuperación lo cual ha permitido una mejor integración de los aspectos económicos, ecológicos y socioculturales en la gestión de la cuenca a través del desarrollo de planes de manejo que consideran múltiples dimensiones del ecosistema y las necesidades humanas (ANA, 2020).

Impulso al turismo sostenible

El desarrollo de iniciativas de turismo sostenible en la cuenca del Rímac ha generado nuevas oportunidades económicas para las comunidades locales y ha contribuido a la valorización del patrimonio natural y cultural de la región. Se ha observado un aumento en la afluencia de visitantes interesados en actividades como el senderismo, el ciclismo y la observación de aves (MML, 2024).

Avances en la investigación científica

Los estudios científicos han permitido comprender mejor la dinámica del río, los factores que afectan su calidad ambiental y las posibles soluciones para su recuperación.

Esta información ha sido utilizada para orientar las acciones de restauración de manera más efectiva (MINAM, 2019).

Establecimiento de alianzas para el apoyo financiero y técnico Internacional

Se han establecido alianzas con organismos internacionales y gobiernos de otros países para compartir experiencias y buenas prácticas en la gestión de recursos hídricos y la restauración de ríos, ver cuadro 4.

Esta cooperación ha permitido acceder a financiamiento y asistencia técnica para la implementación de proyectos de recuperación logrando un incremento en la financiación disponible para proyectos de recuperación y el acceso a técnicas y tecnologías avanzadas para la restauración del río (PNUMA, 2021).

La recuperación del río Rímac es un desafío complejo que requiere la implementación de múltiples medidas para abordar las diversas fuentes de contaminación. A lo largo de los años, se han llevado a cabo diferentes iniciativas y proyectos por parte de instituciones gubernamentales, organizaciones no gubernamentales

(ONG), y organismos internacionales. Este capítulo analiza estas medidas y evalúa los resultados obtenidos hasta la fecha.

Cuadro N°4: Acciones desarrolladas a nivel institucional y resultados orientados a recuperar el río Rímac

Acción	Factor	Descripción	Resultado	Referencia
Mejora de la Calidad del Agua	Reducción de Contaminantes	Construcción y operación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para tratar aguas residuales antes de su descarga en el río.	Las plantas de tratamiento de aguas residuales han reducido significativamente los niveles de contaminantes en el agua del Río Rímac. Esto incluye una disminución en la concentración de metales pesados, residuos orgánicos e industriales.	Autoridad Nacional del Agua (ANA). "Informe de Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rímac" (2020).
	Aumento de los Índices de Oxígeno Disuelto	Campañas para la correcta disposición y manejo de los residuos sólidos urbanos e industriales para prevenir la contaminación del río.	La calidad del agua ha mejorado, reflejada en un incremento en los niveles de oxígeno disuelto, lo cual es crucial para la supervivencia de la fauna acuática.	Ministerio del Ambiente (MINAM). "Plan de Recuperación Ambiental del Río Rímac" (2019).
Recuperación de Ecosistemas	Restauración de Flora y Fauna	Proyectos de restauración ecológica	Control de Erosión y Sedimentación a través de la implementación de técnicas para reducir la erosión de las orillas del río y minimizar la sedimentación que afecta la calidad del agua.	Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA). "Iniciativas de Restauración Ecológica en el Río Rímac" (2018).
	Reforestación de Áreas Ribereñas	Reforestar áreas ribereñas con plantas nativas,	Restauración de Ecosistemas Riparios mediante Programas destinados a la reforestación y rehabilitación de las áreas ribereñas del río para mejorar la calidad del agua y restaurar hábitats naturales.	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). "Evaluación de la Calidad del Agua del Río Rímac" (2021).
Participación y Concienciación Comunitaria	Incremento en la Participación Ciudadana	Campañas de sensibilización	Iniciativas para involucrar a las comunidades en proyectos de limpieza y mantenimiento del río mediante las campañas de sensibilización y los programas de participación comunitaria han aumentado el compromiso y la participación de la población en la protección y conservación del río.	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). "Educación Ambiental y Participación Comunitaria en la Cuenca del Río Rímac" (2022).
	Educación Ambiental	Educación ambiental en las escuelas y comunidades cercanas	Actividades educativas y de sensibilización dirigidas a la población local sobre la importancia de proteger y conservar el Río Rímac contribuyendo a prácticas más sostenibles y responsables.	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). "Educación Ambiental y Participación Comunitaria en la Cuenca del Río Rímac" (2022).
Regulación y Monitoreo Ambiental	Cumplimiento de Normas Ambientales	Regulaciones más estrictas	Regulación de Vertimientos Industriales mediante la Implementación de normas y regulaciones estrictas para controlar los vertimientos industriales en el río.	Ministerio del Ambiente (MINAM). "Plan de Recuperación Ambiental del Río Rímac." (2019).
	Monitoreo Continuo	Implementación de sistemas de monitoreo	Programas de monitoreo continuo de la calidad del agua para identificar y mitigar fuentes de contaminación.	Autoridad Nacional del Agua (ANA). "Informe de Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rímac" (2020).
Infraestructura y Desarrollo Urbano	Creación de Espacios Públicos	Crear espacios públicos y recreativos a lo largo de las riberas del río	Se han desarrollado espacios públicos y recreativos a lo largo de las riberas del río, mejorando la calidad de vida de los habitantes y promoviendo un uso sostenible del espacio urbano.	Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA). "Iniciativas de Restauración Ecológica en el Río Rímac" (2018).
	Desarrollo de Infraestructura Verde	Creación y recuperación de parques y corredores biológicos	La incorporación de infraestructura verde, como parques y corredores biológicos, ha revitalizado áreas degradadas y fomentado la biodiversidad urbana.	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). "Evaluación de la Calidad del Agua del Río Rímac" (2021).

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

El río Rímac es crucial para el abastecimiento de agua de Lima, pero enfrenta serios desafíos debido a la contaminación y la urbanización descontrolada. Para restaurar su salud y funcionalidad, es crucial adoptar un enfoque sistémico y coordinado que involucre a múltiples sectores y actores. La integración de conceptos de Capital Natural y restauración ecológica en los planes de desarrollo urbano puede ofrecer un camino hacia la sostenibilidad y el bienestar humano a largo plazo (ANA, 2020).

Análisis Crítico

Es evidente que la contaminación del río Rímac es un problema complejo que requiere una solución multifacética. Los esfuerzos actuales, aunque valiosos, deben intensificarse y coordinarse mejor. La educación y la concienciación de la población también juegan un papel crucial en la conservación del río. Además, es esencial fortalecer el marco regulatorio y mejorar la fiscalización para asegurar que las industrias cumplan con los estándares ambientales (ANA, 2020).

Futuro del Río Rímac

El futuro del río Rímac depende de la voluntad política, la cooperación interinstitucional y el compromiso de la sociedad en general. La implementación de tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas y la adopción de prácticas sostenibles en la gestión de recursos hídricos son pasos necesarios para garantizar que el río Rímac pueda continuar siendo una fuente vital de agua para Lima y un ecosistema saludable para la biodiversidad local.

CONCLUSIONES

- **Mejora de la Calidad del Agua y Reducción de Contaminantes:** Las medidas implementadas, especialmente la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales y la remediación de pasivos ambientales mineros, han logrado reducir significativamente los niveles de contaminantes en el río Rímac. Los datos de monitoreo indican una disminución del 40% en las concentraciones de plomo y cadmio, así como mejoras en los niveles de DBO y DQO, evidenciando una mejor calidad del agua y una reducción en la carga de materia orgánica.
- **Recuperación de la Biodiversidad:** La mejora en la calidad del agua ha permitido la recuperación gradual de la biodiversidad en el río Rímac. Especies de peces y otros organismos acuáticos que habían desaparecido o reducido sus poblaciones están comenzando a repoblar ciertas áreas del río. Un estudio ecológico reciente documentó el regreso de varias especies de peces nativos en tramos del río que han sido rehabilitados .
- **Impacto Positivo en la Salud Pública:** La reducción de contaminantes y la mejora en la calidad del agua han tenido un impacto positivo en la salud pública. Los informes del Ministerio de Salud muestran una disminución del 25% en la incidencia de enfermedades gastrointestinales en las comunidades cercanas al río, lo que demuestra la efectividad de las medidas implementadas para reducir la contaminación biológica.
- **Desarrollo Sostenible y Participación Comunitaria:** Las iniciativas de recuperación del río Rímac han fomentado la adopción de prácticas más sostenibles tanto en las industrias como en las comunidades. Las inversiones en infraestructura verde y la participación activa de la comunidad en programas de conservación y manejo de residuos han contribuido a la sostenibilidad a largo plazo del río y sus ecosistemas. Estas acciones han promovido una mayor resiliencia urbana frente a los impactos del cambio climático .
- **La recuperación del Río Rímac es un proceso complejo y desafiante, pero no imposible.** Los avances logrados hasta ahora son notables y ofrecen esperanza para el futuro de este importante curso fluvial. Con un esfuerzo sostenido y colaborativo, es posible alcanzar una recuperación completa y sostenible del río, beneficiando a las comunidades que dependen de él y preservando este valioso recurso natural para las generaciones futuras.

- Las acciones para recuperar el Río Rímac han resultado en mejoras tangibles en la calidad del agua, restauración de ecosistemas, mayor participación comunitaria, y desarrollo de infraestructura verde. Estas iniciativas demuestran el impacto positivo de las intervenciones coordinadas entre el gobierno, las organizaciones no gubernamentales y la comunidad. Sin embargo, la sostenibilidad de estos esfuerzos requiere un compromiso continuo y la adaptación de nuevas estrategias para enfrentar futuros desafíos ambientales.

REFLEXION

La recuperación del Río Rímac es posible y necesaria, pero requiere un esfuerzo sostenido, colaboración multisectorial y mayor inversión. Los avances logrados son alentadores, pero se necesitan acciones urgentes para abordar la contaminación persistente, detener las invasiones, fortalecer la infraestructura y la gobernanza del agua, y asegurar la inversión necesaria para la recuperación integral del río. El Río Rímac es un recurso vital para Lima y Callao, y su recuperación es fundamental para el bienestar de las comunidades y el futuro sostenible de la región.

Los resultados obtenidos hasta ahora en la recuperación del Río Rímac demuestran que es posible revertir el deterioro ambiental de este importante recurso natural. Sin embargo, aún queda un largo camino por recorrer para alcanzar una recuperación completa y sostenible del río. Se requiere un esfuerzo sostenido y colaborativo por parte de todos los sectores involucrados, incluyendo el Estado, el sector privado, la academia, las organizaciones sociales y la población en general, por lo cual es fundamental continuar implementando acciones concretas, promover la educación ambiental y fortalecer la gobernanza del agua para garantizar la salud y la sostenibilidad de este vital recurso natural.

La recuperación del Río Rímac no solo es un desafío ambiental, sino también un reto social y económico por lo que, a pesar de todos estos esfuerzos, aún persisten desafíos importantes. Así se necesitan acciones urgentes para:

- Abordar la contaminación persistente.
- Detener las invasiones urbanas.
- Fortalecer la infraestructura y la gobernanza del agua.
- Asegurar la inversión necesaria para la recuperación integral del río.

A pesar de estos desafíos, los resultados obtenidos hasta ahora son alentadores y demuestran que la recuperación del Río Rímac es posible. Con un esfuerzo sostenido, colaborativo y multisectorial, junto con la implementación de las recomendaciones mencionadas, se podrá alcanzar una recuperación integral y sostenible del río, garantizando su salud ambiental y el bienestar de las comunidades que dependen de él.

Invitamos a todos —ciudadanos, empresas, y gobiernos— a continuar participando activamente en la protección y restauración del río Rímac. Juntos, podemos asegurar que este río, con toda su riqueza y biodiversidad, siga fluyendo limpio y saludable para las generaciones futuras. Nuestro compromiso hoy garantiza un mañana más verde y saludable.

¡Hagamos del río Rímac un símbolo de esperanza y renovación!

REFERENCIAS

- ANA. (2020).** *Informe de gestión de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Rimac.* **Autoridad Nacional del Agua ANA.**
- ANA. (24 de 06 de 2024).** *Autoridad Nacional del Agua.* **Autoridad Nacional del Agua:** <http://www.ana.gob.pe/noticia/monitoreo-de-calidad-del-agua-del-rio-rimac-para-su-proteccion>
- Delgado, J., et al. (2021).** *Contaminación del río Rímac por residuos sólidos e industriales en los últimos años.* **Universidad Tecnológica del Perú.**
- Dumler, F., et al. (2014).** *Una expresión local de los riesgos del agua: Retos y necesidad de un plan de acción colectiva sobre la cuenca del río Rímac.* **Ediciones ANA-Publicaciones.**
- INEI. (2024).** *Estadísticas Ambientales.* **Lima: INEI.**
- INIA. (2020).** *Estudio sobre el Uso del Agua del río Rimac en la Agricultura.* **Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA.**

- Kaiser, J. P. (2022). PLANIFICACIÓN URBANA Y CAPITAL NATURAL: REVISIÓN Y REFLEXIÓN SOBRE MOMENTOS HISTÓRICOS Y PROCESOS URBANOS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DEL RÍO RÍMAC. *PLaneo*, 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.4067/plan.045.101>**
- Korea Water Resources, Corporation (K-WATER), Yooshin Engineering Corporation, & Pyunghwa Engineering. (2015). *Plan maestro del proyecto de restauración del río Rímac: Informe final*. Lima: Ediciones ANA - Publicaciones. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12543/637>**
- MINAM. (2019). *Plan de Recuperación Ambiental del río Rimac*. Ministerio del Ambiente MINAM.**
- MINSA. (2021). *Informe sobre la Calidad del Agua en Lima y Callao*. Ministerio de Salud MINSA.**
- MML. (24 de 6 de 2024). *Municipalidad Metropolitana de Lima (MML)*. Municipalidad Metropolitana de Lima (MML): <https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/4f3a30ece4627ece.pdf>**
- OMS. (2019). Water related diseases.**
- OMS. (24 de 06 de 2024). *Agua potable*. Agua potable: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>**
- Pabón, S., Benítez, R., Sarria-Villa, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. <https://doi.org/https://doi.org/> ISSN 1909-8367 (Impreso), ISSN 2539-4169 (En línea)**
- PNUMA. (2021). *Evaluación de la Calidad del agua del río Rimac*. Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente PNUMA.**
- Quispe, B., et al. (2022). Efluentes domésticos y su incidencia en la contaminación de la calidad del río Rímac, Cuenca Baja. Año 2017 [Tesis de Magister]. Universidad Nacional Federico Villarreal**

- RPDA. (24 de 06 de 2024).** *Red Peruana por la Defensa del Agua. Red Peruana por la Defensa del Agua:* <https://www.ohchr.org/sites/default/files/documents/issues/water/statements/2022-12-14/2022-12-15-eom-statement-peru-sr-water-sanitation-sp.pdf>
- Sedapal (2022).** *Anuario estadístico 2022. Gerencia de desarrollo e investigación. Equipo planeamiento operativo y financiero.*
- SPDA. (2018).** *Iniciativas de Restauracion Ecologica en el rio Rimac. Sociedad Peruana de Deerecho Ambiental SPDA.*
- UNESCO. (2022).** *Educacion Ambiental y Participacion Comunitaria en la Cuenca del rio Rimac. UNESCO.*
- UNI. (24 de 06 de 2024).** *Contaminacion del rio rimac. Contaminacion del rio rimac:* <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-tecnologica-del-peru/medio-ambiente/contaminacion-del-rio-rimac-finalizado-1/20053399>
- UPCH. (2019).** *Impacto Psicosocial de la Contaminacion del Rio Rinac. Universidad Peruana Cayetano Heredia.*
- Villanueva, C., Grimalt, J., Ballester, F., Ibarluzea, J., Salae, M., Tardón, A., . . . Kogevinasa, M. (2006).** *Medida de contaminantes del agua y usos del agua durante el embarazo en un estudio de cohortes en España. Revisiones de Salud Publica, 20(53), 1-9.* <https://doi.org/https://www.gacetasanitaria.org/es-medida-contaminantes-del-agua-usos-articulo-13101084>

Capítulo 4

Producción más limpia para el sector servicios con enfoque en el uso del agua.

Eduardo Julian Villarroel Nuñez

Juan Enrique Sigarróstegui Gutiérrez

Duilio Angel Aranda Ipince

Silvia Coronado Ramirez

INTRODUCCIÓN

El planeta tierra está compuesto por un aproximado del 75% de masas de agua, de allí que se le llama planeta azul sin embargo solo el 0,025% se corresponde al agua dulce, de este porcentaje es el que puede ser usado para el consumo humano, animal y el sector industrial y sus diversos procesos, la importancia de este líquido es tal que sin él no sería posible ningún tipo de vida dentro de este planeta.

A través de los siglos los seres humanos han aprendido el valor del vital líquido, desde el uso para su consumo hasta los sistemas novedosos de riego y cisternas creadas por los antiguos romanos, al pasar los siglos el agua ha sido universalmente utilizada para muchos procesos de la vida cotidiana del ser humano, sin embargo y lamentablemente este recurso el cual es finito no ha sido valorado correctamente en estos últimos años, la contaminación de múltiples fuentes de agua dulce ha causado estragos en la salud del planeta y por ende en la de los seres humanos, el despilfarro de este líquido también genera problemas como la escasez del vital líquido, en muchas ocasiones por el uso indiscriminado en procesos industriales y domésticos que no cumplen con las debidas regulaciones ambientales y que desencadenan en la contaminación de cuerpos de agua en las ciudades y localidades no tan urbanizadas.

Uno de los impactos negativos hacia el medio ambiente es el uso que se le da al agua en diversos procesos industriales, los cuales realizan mezclas con otros elementos contaminantes y las aguas residuales no son tratadas y se vierten en las redes cloacales de la zona, provocando así no solo la contaminación de los afluentes como ríos, mares o lagunas sino también contaminando los suelos y lo que allí pueda sembrarse, por lo general estos suelos al pasar de los años resultan infértiles perdiendo así el potencial de producción no solo en la agricultura sino en la ganadería.

Por otro lado, las afectaciones graves que se han sucedido a la salud de los habitantes alrededor de las zonas en las que descargan las aguas contaminadas, provocando diversas enfermedades y hasta malformaciones genéticas en los niños de la zona. Todo esto se agrava aún más con el pasar del tiempo, y resulta paradójico ya que hoy día se cuenta con mucha más información en todos los ámbitos, y se cuenta con tecnología de punta con la cual poder realizar un mejor uso de las aguas en todo el mundo, pero se siguen contaminando y provocando problemas ambientales importantes en cualquier rincón del planeta.

Existe un sector de la industria que utiliza el agua como recurso fundamental para su funcionamiento, este es el sector de los autolavados, los cuales en su gran mayoría no solo ofrece el lavado de los vehículos, sino que también incluyen entre su servicio el lavado y desengrasado de motor y chasis. Este tipo de servicios ha crecido exponencialmente y forma parte de las pymes en todos los países, lo cual en cierto modo es importante ya que proporciona trabajo a cierta población y atiende un sector económico de la sociedad, sin embargo, según Ortiz (2020) menciona que las características que presentan las aguas residuales procedentes de autolavados dependen de los factores socioeconómicos de cada país. En este sentido, se han reportado en Brasil valores de DQO de 259 ± 40 mg/L; conductividad a 446 ± 55 μ S/cm y turbidez a 139 ± 45 NTU; en Turquía un estudio realizado reporta valores de pH 8, COD 560 mg/L, aceites y grasas 125 mg/L, sólidos suspendidos 2300 mg/L, conductividad 980 mS/cm.

En el caso específico de los establecimientos de lavado de automóviles, los contaminantes que se encuentran generalmente son materiales de arena, polvo, emulsiones de agua-aceite, grasas, carbono, asfalto, sales, surfactantes y materia orgánica, que pueden ser tratados, entre otros, por procesos de coagulación – floculación (Ramos y Avila, 2021).

MARCO TEÓRICO

La producción más limpia (PML) se constituye como una estrategia holística de gestión ambiental que tiene como objetivo primordial la mitigación de los efectos negativos que los procesos industriales ejercen sobre el entorno, mientras que simultáneamente busca optimizar la eficiencia en el uso de recursos. Este enfoque es congruente con los principios del desarrollo sostenible y ha ganado una relevancia significativa en el ámbito de la ingeniería industrial. La PML no se limita únicamente a la reducción de residuos y emisiones, sino que también fomenta un uso más eficiente de la energía y los materiales, favoreciendo así la sostenibilidad económica y ambiental de las industrias (United Nations Environment Programme [UNEP], 2020).

Conceptualización de Producción Más Limpia

La producción más limpia (PML) se define como la implementación continua de una estrategia ambiental preventiva e integrada en los procesos, productos y servicios, con el fin de incrementar la eficiencia y reducir los riesgos tanto para los seres humanos como para el medio ambiente (UNEP, 2020). Este enfoque proactivo se distingue de las estrategias tradicionales de control de la contaminación, que generalmente son reactivas y se aplican después de que el daño ha ocurrido. La PML engloba una variedad de técnicas y prácticas, tales como la mejora de procesos, la innovación tecnológica, el rediseño de productos y la adopción de nuevas prácticas de gestión.

Principios y Estrategias de la Producción Más Limpia

Los principios esenciales de la producción más limpia (PML) abarcan:

- Prevención en la fuente: Minimización de la generación de residuos y emisiones desde su origen, en lugar de gestionarlos una vez producidos.
- Uso eficiente de los recursos: Optimización del empleo de materiales y energía, lo cual conlleva la reducción de desperdicios y el incremento de la productividad.
- Sustitución de materiales peligrosos: Reemplazo de sustancias tóxicas por alternativas menos perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana.
- Innovación tecnológica: Adopción de nuevas tecnologías y prácticas que mejoren la eficiencia y disminuyan el impacto ambiental.

Estas estrategias se llevan a cabo mediante diversas prácticas específicas, tales como el reciclaje interno de materiales, la reutilización de subproductos, la mejora en la eficiencia energética y la disminución de emisiones mediante tecnologías más limpias. (Van Berkel, 2010).

Implementación de la Producción Más Limpia en la Industria

La implementación de la PML en el sector industrial implica varios pasos críticos, que incluyen:

1. Diagnóstico ambiental: Evaluación inicial de los procesos productivos para identificar oportunidades de mejora y áreas de alto impacto ambiental.
2. Desarrollo de alternativas: Generación de opciones técnicas y operativas para reducir los impactos ambientales identificados.
3. Evaluación y selección de opciones: Análisis técnico y económico de las alternativas propuestas para seleccionar las más viables.
4. Implementación y monitoreo: Ejecución de las alternativas seleccionadas y seguimiento continuo de los resultados para asegurar la efectividad de las medidas implementadas (Van Berkel, 2010).

Beneficios de la Producción Más Limpia

Los beneficios de la producción más limpia (PML) son diversos y abarcan dimensiones ambientales, económicas y sociales. En el ámbito ambiental, se destacan la disminución de la contaminación del aire y del agua, la reducción de la generación de residuos y la conservación de recursos naturales. Desde una perspectiva económica, la PML puede conducir a una mayor eficiencia operativa, la reducción de los costos de producción y un mejor posicionamiento en el mercado. En el aspecto social, la PML contribuye a la mejora de la salud pública y al bienestar de las comunidades adyacentes a las instalaciones industriales (OECD, 2018).

Desafíos y Limitaciones

A pesar de sus numerosos beneficios, la adopción de la producción más limpia (PML) enfrenta varios desafíos y limitaciones. Entre ellos se encuentran la resistencia al cambio por parte de la gerencia y el personal, la carencia de conocimiento y capacitación en técnicas de PML, y las restricciones financieras para la implementación de nuevas tecnologías. Además, la variabilidad en las regulaciones ambientales y la falta de incentivos claros por parte de los gobiernos pueden dificultar la adopción generalizada de la PML (González-Torre & Adenso-Díaz, 2004).

Casos de Estudio

Numerosos estudios de caso demuestran la aplicación exitosa de la producción más limpia (PML) en diversas industrias. Por ejemplo, en la industria textil, la adopción de tecnologías de teñido sin agua ha logrado reducir significativamente el consumo de agua y la generación de efluentes contaminantes (Smith, 2019). En la industria alimentaria, la optimización de los procesos de producción ha resultado en una notable disminución del desperdicio de alimentos y del consumo energético (Jones & Hill, 2018).

Si se incluyen los servicios de lavado de automóviles, se identifica por ejemplo un estudio realizado por Marek Gryta y Piotr Woźniak (2024) en donde se reveló que la tecnología de ultrafiltración (UF) para el tratamiento de aguas residuales de lavados de autos puede recuperar hasta el 80% del agua utilizada. Este alto porcentaje de recuperación se logra manteniendo un flujo de permeado estable durante pruebas prolongadas, gracias a la limpieza periódica de las membranas con soluciones alcalinas, comúnmente utilizadas en los lavados de autos para la limpieza de ruedas y eliminación de insectos. Al lavar las membranas cada 5-7 horas durante 30 minutos, se puede mantener un flujo de permeado en un 80% del flujo inicial a lo largo de pruebas de 100 horas.

De acuerdo con el compendio de casos prácticos nacionales e internacionales desarrollado por Alegre (2007) a través del centro de ecoeficiencia y responsabilidad social (CER) se identifica que la aplicación de las estrategias PML por mejora de procesos logran reducir el consumo del agua por encima del 28% (Mercurio Industria y Comercio S.A.C. 40%, La Bellota s.a. 57%, Curtiembre la Pisquena S.A. 28%), información que nos ayudará a estimar los beneficios esperados específicamente en el servicio lavado de autos.

Finalmente, se puede concluir que la producción más limpia constituye un enfoque integral y preventivo para la gestión ambiental dentro del ámbito de la ingeniería industrial. Mediante la implementación de prácticas y tecnologías que optimizan el uso de recursos y minimizan los impactos negativos sobre el medio ambiente, la PML contribuye de manera significativa al desarrollo sostenible. Sin embargo, para que la adopción de la PML sea efectiva, es esencial contar con un compromiso firme por parte de las industrias, respaldo gubernamental y una cultura organizacional que valore la sostenibilidad y la innovación.

METODOLOGÍA

Dada la naturaleza de la problemática y la información disponible, la investigación adoptó un enfoque exploratorio.

Objetivo de la investigación

Identificar las variables en un contexto específico, sin realizar manipulaciones ni controlar variables, como lo haría en un diseño experimental. Se enfatiza la importancia de examinar cómo interactúan las variables entre sí.

Recolección de datos

En el estudio, empleamos métodos de recolección de datos no experimentales como búsqueda documental “Datos Reales”. Se buscó recopilar datos de forma no intrusiva, observando las variables tal como se manifiestan en el contexto natural.

Análisis de datos

Se emplearon técnicas de análisis cuantitativo para examinar los datos recopilados. Esto incluyó utilizar estadísticas descriptivas y técnicas de análisis de correlación para identificar relaciones entre variables; en esencia, se analizaron los datos existentes para obtener conclusiones.

Población y muestra

La población o universo de la presente investigación, estuvo referida a los establecimientos de lavado de autos ubicados en la región 7 de Lima. Dentro de la población mencionada anteriormente, se ha decidido, por razones operativas de ubicación de las empresas y por conveniencia, que la muestra consistió en 1 empresa.

DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Los autolavados surgen en los años 20's en Estados Unidos como un servicio que supliría la falta de tiempo de lavar el auto por sí mismo en la época. Esta industria llega a generar presión frente al consumo del recurso hídrico, además de la generación de aguas residuales, estos lugares ofrecen el servicio de lavar automóviles disponiendo como materia prima agua y jabón. Un autolavado en promedio lava de 60 a 150 autos al día, empleando 80 litros de agua por auto. No obstante, menos del 40% de esta agua residual es tratada, esta problemática genera contaminación en los cuerpos de agua aledaña al autolavado (Plata, 2020).

A nivel internacional esta industria ha venido creciendo en los últimos años. En Alemania existe el centro de autolavado más grande del mundo llamado Mr Wash, allí se cuenta con más de 100 empleados que lavan cerca de 4000 autos al día. Para combatir las afectaciones ambientales y el gasto excesivo de agua el autolavado Mr Wash implementó una planta de tratamiento de aguas con procesos como coagulación y floculación la cual remueve emulsiones y metales pesados por medio de la electrocoagulación, con el fin de evitar la escorrentía de productos químicos (Ramos y Avila, 2021).

La industria de los autolavados ha experimentado un desarrollo monumental en las últimas décadas, producto del crecimiento demográfico y, por tanto, de la demanda de vehículos, fenómeno que a buen seguro continuará mantendrá su tendencia de crecimiento en el futuro (Correa, 2020). La cultura como sociedad se ha fortalecido y vinculado con el cuidado del medio ambiente, basándose en el cuidado de los recursos, especialmente el agua, esta medida sin dejar de lado la satisfacción de las necesidades humanas, por lo anterior se considera fundamental dicho manejo desde acciones básicas, tal es el caso de la limpieza de automóviles, actividad en la cual se gastan aproximadamente 500 litros de agua, siendo un proceso que propicia el desgaste del recurso natural (Ortiz et al., 2019).

Ahora bien, estas aguas provenientes de los autolavados en su gran mayoría se vierten en los drenajes municipales de las ciudades, sin ningún tipo de tratamientos fisicoquímicos que puedan evitar la gran contaminación de los afluentes de aguas residuales. Si se trata de establecimientos comerciales legales, por lo general se consumen grandes volúmenes de agua dulce para eliminar la suciedad de los vehículos, como consecuencia se generan grandes cantidades de agua residual, siendo esta vertida sin tratamiento alguno a la red de aguas residuales municipales

de la ciudad, incrementando la problemática (Ortiz, 2020).

En este sentido las empresas de los autolavados utilizan una gran cantidad de agua para su funcionamiento, de hecho este es el tipo de negocios que sin el agua no pudiesen funcionar, por lo que su servicio principal es el lavado y limpieza de vehículos, lavados de motor y chasis, por lo que utilizan el agua como base para la preparación de algún detergente que sirve para la remoción de polvo y grasas de cualquier tipo al vehículo, y es precisamente allí que radica el problema, estas aguas compuestas con otros elementos químicos son vertidas (en su gran mayoría) a la red de alcantarillados de la ciudad sin ningún tratamiento físico químico que permita evitar que los afluentes de agua se contaminen.

El servicio de lavado de autos en Perú en sus inicios se realizaba con baldes de agua y shampoo, conforme avanzaban los años, empezaron a surgir nuevas necesidades de los clientes y con ello la implementación de uso de mangueras y nuevas tecnologías. Actualmente, existen varios de estos servicios en todos los distritos de la capital que en su mayoría se caracterizan por ofrecer solo prestaciones relacionadas a la limpieza de vehículos desde lo más básico hasta lo más especializado.

Asimismo, han surgido nuevas necesidades de los clientes como búsqueda de comodidad durante la espera de la finalización del servicio, cuidado del medio ambiente y de sus recursos, minimización del tiempo de duración del proceso, entre otros. Por ello, el presente proyecto de servicio de carwash se caracterizará por contar con un servicio express de autolavado (túnel) con sistema de reutilización de agua y un ambiente agradable de espera para el cliente.

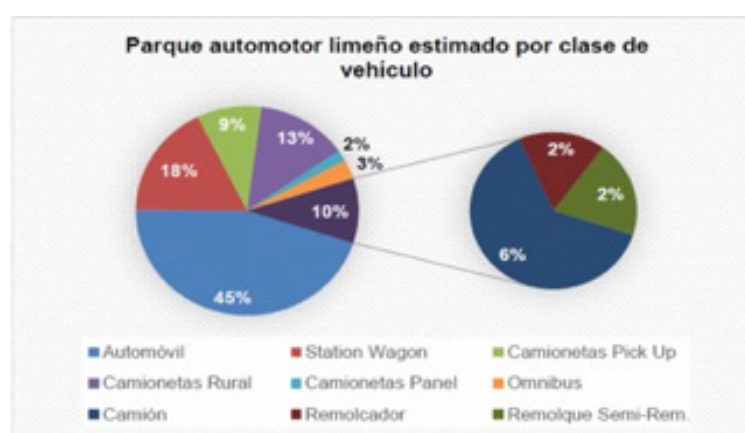
GraficoN°1 Evolución del Parque Automotor



Fuente: MTC (2021)

Tal como se mostró en el Gráfico 1, en Perú, el sector automotriz se encuentra en constante crecimiento desde hace más de 10 años. Según el MTC, solo Lima y Callao con 10 '365,300 habitantes tienen 1' 908,672 vehículos al 2018 lo que hace que haya 0.184 coches/persona y juntos contienen más del 60% del total de vehículos en el país (2020). En el Gráfico 2, se aprecia el porcentaje de participación de cada tipo de vehículo, solo los automóviles representan más del 40%, los cuales sumados a las camionetas pick up y station wagon conforman el 72.1% de los medios de transporte. Las camionetas panel, remolcadores y semirremolques tienen el mínimo de participación con un 2% cada uno.

Gráfico N°2: Parque automotor por clase de vehículo



Fuente: MTC (2021)

Según el informe de Inscripciones de Registros Públicos Vehiculares publicado por la Superintendencia Nacional de Registros Públicos (SUNARP), la tasa de vehículos inscritos 2018-2019 creció en 7.2%, mientras que la del 2017-2018 en un 5.5%. Referente a un informe de la AAP, en enero de 2020 la venta de vehículos livianos (autos y camionetas) fue de 14,420 unidades, donde el tipo y la cantidad de transportes por categoría se observan en el Gráfico 2.

Tabla N°1: Venta de vehículos en el Perú - enero 2020

Vehículo	Ventas
Automóvil	5,169
Camionetas	2,264
Pick-up, furgonetas	2,243
SUV y Todo Terreno	4,744

Fuente: APP (2020:1)

La adquisición de vehículos se incrementa en una tasa promedio de 6.3% anual solo en Lima y Callao, lo cual es una oportunidad creciente para el servicio de limpieza de medio de transporte livianos. Asimismo, cada vez es mayor el número de personas que solicita productos/servicios eco-amigables y contribuir al cuidado del agua (IPSOS 2020:1).

La demanda del servicio de lavado de autos en un escenario conservador iniciando con un porcentaje de participación de mercado de 1% incrementándose en 0.3% cada año, lo cual haría que el quinto año de vida del proyecto sea 2.2% como se muestra en las Tablas 1 y 2. Asimismo, presenta el número estimado de solicitudes de servicio que recibirá el establecimiento para la atención de autos y camionetas.

Tabla N°2: Número de atenciones solicitadas según el tipo de servicio para autos (2021-2025)

Servicio/Año	Externo	Completo (Int + Ext)	Motor	Siliconado	Encerado
2021	2,264,252	1,929,380	522,913	1,651,181	1,233,877
2022	2,405,244	2,049,520	555,474	1,753,998	1,310,709
2023	2,546,236	2,169,660	588,035	1,856,815	1,387,541
2024	2,687,228	2,289,800	620,596	1,959,632	1,464,373
2025	2,828,220	2,409,940	653,157	2,062,449	1,541,205

Fuente: elaboración propia

Operaciones de Producción en Carwash

Generalmente las operaciones en los lavadores de autos en nuestro país hoy en día son semiautomatizadas, puesto que se utiliza equipamiento, pero sopesa el trabajo manual, hay operaciones que van a adicionarse dependiendo el tipo de servicio y a ello el incremento de insumos y como de mano de obra asignado.

Las unidades varían desde autos, camionetas suv, camionetas pick up, furgonetas, camiones, mototaxis y otros vehículos menores. Se asigna la cantidad de personal luego del lavado base de acuerdo con el tipo de servicio que el cliente toma y la cantidad de lavadores varía de acuerdo a la capacidad de procesamiento de unidades por procesar.

En la limpieza interna de los tipos de lavado, se procede a lavar los pisos o tapetes por el cual también se utiliza el lavado manual, usando agua y champú, enjuagando con la hidrolavadora.

Para la presente investigación, solo se va centralizar y analizar la parte del proceso de lavado, por la característica del estudio.

Tipo de servicio en carwash

- Lavado Express: lavado con shampoo y secado (exterior)
- Lavado y Encerado: lavado externo y limpieza interna + encerado
- Lavado Salón: lavado externo + limpieza interna + lavado de asientos + limpieza techo
- Lavado Premium: Lavado full + encerado + tratamiento de pintura y faros.

Equipos para las operaciones

- Pozo cisterna
- Bomba electroneumática
- Hidrolavadora industrial
- Champunera de autos
- Aspiradoras industriales
- Pulidoras de pintura (de acuerdo al tipo de servicio)

Insumos usados en proceso de lavado

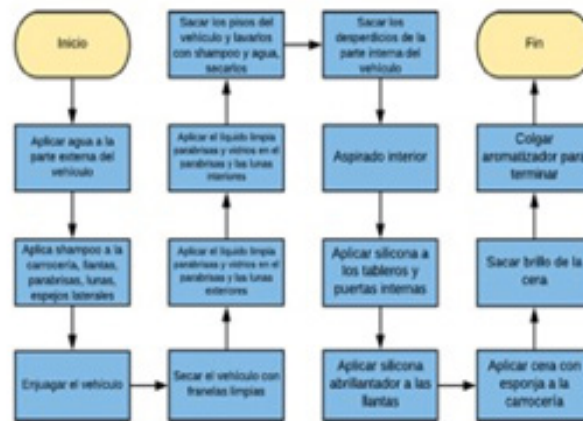
- Champú de auto
- Franela de microfibra
- Cera para auto
- Silicona con protección UV
- Silicona de llantas
- Mangueras

Proceso de lavado básico

- Recepción de unidad: Se consulta el tipo de servicio
- Lavado – 1er inyectado: Se saca el barro o tierra.
- Aplicación de Champú: Se aplica con la champunera todo el vehículo.
- Enchamunado: Se aplica y friega con esponja por toda la unidad.
- Enjuagar 2do inyectado: Se enjuaga el auto con agua limpia.

- Limpiar Aros y llantas: Se presta especial atención a las llantas.
- Secar el vehículo: Secado manual con franela de microfibra.

Gráfico N°3: Diagrama de flujo del servicio



Fuente: elaboración propia

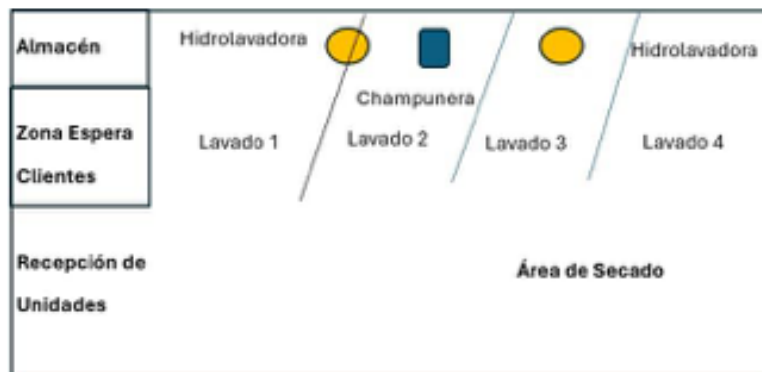
El área de lavado se encuentra en una plataforma con capacidad para las líneas lavado, generalmente son de 2 a 4 unidades para lavado; la mayoría de las plataformas de lavado cuenta con canales con rejilla para canalizar el agua utilizada y las hidrolavadoras se encuentran en puntos medios para operar entre 2 líneas de trabajo, igual la champunera está en un punto medio.

El personal debe llevar equipos de protección personal y ropa adecuada, como botas altas de jefe, un mandil de plástico, lo ideal es agregar lentes de protección y guantes de jebe hasta el brazo, pero los 2 últimos en las mayorías de carwash no lo dan por un tema de costos o desconocimiento.

El ambiente es húmedo debido a la pulverización del agua, no apto para el personal con diagnóstico de asma o enfermedad pulmonar.

Como dato el proceso de lavado tiene un orden lógico para tener un ritmo que se puede controlar como del uso adecuado de los recursos e insumos, es importante el método de trabajo que el personal va a desarrollar.

Las marcas más usadas en este negocio son los equipos de la marca alemana Kärcher en hidrolavadoras y aspiradoras, como también la marca Truper, equipos con buen desempeño y garantía en nuestro país.

Gráfico N°4: Distribución de zona de operaciones

Fuente: elaboración propia

Frecuencia de lavados

Entre semana sus actividades son de lunes a viernes desde las 9:00 AM hasta las 6:00PM, teniendo picos de atención en 2 frecuencias:

De 9: 00 a 10:00 AM y de 5:00 a 6:00PM lavado de taxis, de 4:00 a 5:00pm lavado de autos de empresas y furgonetas, el resto de horario son de autos particulares, pero es menor la cantidad, suelen realizar los servicios especiales como lavados premium, lavado de asientos, porque generalmente en fin de semana solo son lavados express o lavados con encerado, no aceptan lavados especiales porque es mayor tiempo y de mano de obra dedicada a un solo servicio y se le acumulan los lavados express.

Los fines de semana, los sábados de 9:00AM a 7:00PM y domingos de 9:00AM a 3:00PM.

Para nuestro caso elegimos una empresa que trabaja de lunes a sábado, debido a la normatividad legal de contratación del personal y permiso de funcionamiento en el distrito de Barranco, siendo ello muy importante, porque cada distrito tiene normativa diferente que todavía no está estandarizada por el Ministerio de Ambiente o la Municipalidad Metropolitana de Lima, puesto que algunos equipos al ser considerados industriales no tienen el permiso de funcionamiento en zona residencial.

Tabla N°3: Operaciones de Lavado

Auto 25min - Camioneta 35min

Operación	Lavado	Aplicación de Champú	Enchampu-nado	Enjuague	Secado
Personal	1				1
Equipo	1 hidrolava-dora	1 Champu-nera		1 hidrolava-dora	
Tiempo	3 - 6min.	3 - 6min.	5 - 10min.	2min.	10-18min
Insumo 1	Agua	Champú	Champú	Agua	Trapo
Insumo 2	Energía Eléc-trica	Energía Eléctrica	Esponja	Energía Eléctrica	

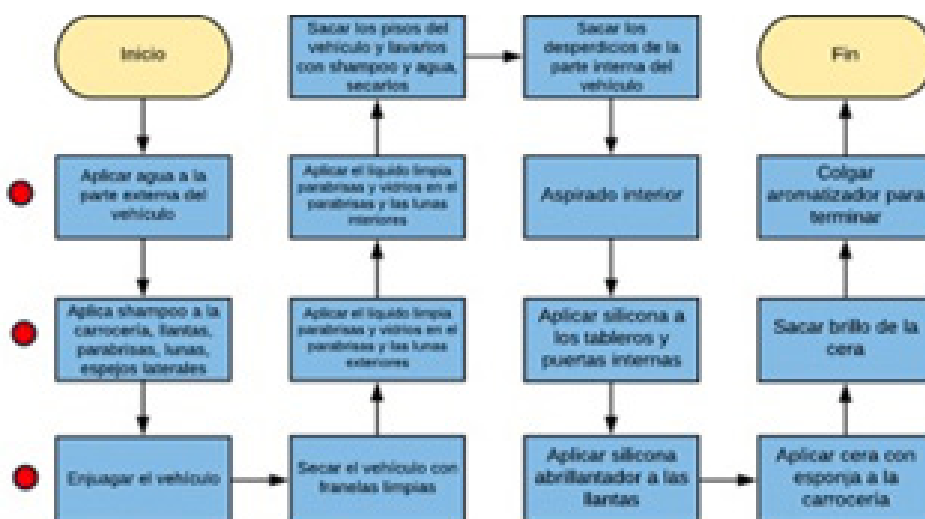
Fuente: elaboración propia

Para los fines del presente trabajo se evaluó el proceso de lavado en un car wash semiautomatizado ubicado en la zona de surco, que incluye evaluaciones económicas y la inversión.

Evaluación del proceso e identificación de oportunidades de mejora

El enfoque de estudio fue el consumo del agua en el proceso, es así como se identificaron al menos (03) actividades críticas donde se produce el consumo.

Gráfico N°5: Identificación de actividades críticas



Fuente: elaboración propia

Tabla N°4: Consumo de agua por actividad.

	Hidrolava- doras	Shampu- nera	Enjuague	Total	consumo de agua por servi- cio (lt)	cant ser- vicios x mes	Consumo agua total (lt) x mes
Unidades	Agua x lt	Shampoo x lt	Agua x lt	Con- sumo			
Auto	30	0,08	10	40,1	45,1	500	22 550,0
Camione- tas	36	0,14	12	48,1	53,2	300	15 948,0
Lavado pisos	3	0,02	2	5,0			38 498,0

Fuente: elaboración propia

De los datos recogidos in situ, se tiene:

Costo s/. x lt: 0,003

Asimismo, se evalúan alternativas de mejoras para el servicio de lavado de autos tomando como referencia la mejora del método de trabajo y/o proceso y el reciclaje del agua.

1era alternativa

Adopción de buenas prácticas en tres actividades identificadas

Reducción de consumo esperado: 30% (tomado como referencia en base a casos de éxito, Alegre (2007)).

Tabla N°5: Evaluación económica de la 1era alternativa

Consumo de agua por servicio (lt)	Cant servi- cios x mes	Consumo agua total lt x mes	Consumo agua total m3 x mes
31,6	500	15 785,0	15,8
37,2	300	11 163,6	11,2
Consumo de agua por servicio		26 948,6	26,9
Ahorro esperado x mes		11 549,4	11,5
Ahorro esperado x año		138 592,8	138,6
Ahorro esperado (s/.) x mes		34,7	
Ahorro esperado (s/.) x año		416,1	

Fuente: elaboración propia

Costo de implementación, que incluye capacitaciones y estandarización de procesos, s/. 5000.

2da alternativa

Cambio de tecnología para el reúso del agua

Reducción de consumo esperado: 60% (tomado como referencia escenario pesimista estudio Gryta y Woźniak (2024))

Tabla N°6: Evaluación económica de la 2da alternativa

Consumo de agua por servicio (lt)	Cant servicios x mes	Consumo agua total lt x mes	Consumo agua total m3 x mes
18,0	500	9 020,0	9,0
21,3	300	6 379,2	6,4
Consumo de agua por servicio		15 399,2	15,4
Ahorro esperado x mes		23 098,8	23,1
Ahorro esperado x año		277 185,6	277,2
Ahorro esperado (s/.) x mes		69,3	
Ahorro esperado (s/.) x año		832,1	

Fuente: elaboración propia

Costo de implementación: s/38000, que incluye equipamiento, instalación y puesta en marcha.

Oportunidades y análisis de los posibles costos y beneficios de la implementación de estas mejoras. Ambas alternativas fueron evaluadas, obteniendo como resultando lo siguiente:

Tabla N°7: Evaluación económica de ambas alternativas, base un año

Beneficio técnico ambiental	Medida PML	Beneficios económicos S/.	Inversión S/.	Tiempo retorno
Reducción del consumo del agua en 30%	Adopción de buenas prácticas en (03) actividades críticas	416,1	5 000,0	12 años
Reducción del consumo del agua en 60%	cambio de tecnología - geomembranas Gryta y Woźniak (2024)	832,1	38 000,0	> 12 años

Fuente: elaboración propia

Asimismo, incluimos para la evaluación la información de la investigación de Bolívar, A. y Saavedra, C. (2021)., donde obtendremos la demanda esperada de servicios para el año 2024, 2 687 228, para una zona demarcada que incluye surco,

donde se ubica el car wash referencia para el presente estudio (Zona 7: Miraflores, San Isidro, San Borja, Surco, La Molina; lugares donde se realizó la encuesta para la investigación).

Tabla N°8: Evaluación de la demanda de servicios para la zona 7

Cant. Servicios 2024 Zona 7	Alternativas PML	Ahorros generados por la cant de servicios	und
2 687 228	1era	38 794 838,8	lt
		38 794,8	m3
		116 384,5	soles
	2da	77 589 677,7	lt
		77 589,7	m3
		232 769,0	soles

Fuente: elaboración propia

Todas las evaluaciones realizadas nos darán una mejor perspectiva sobre que sería lo mejor desde un punto de vista económico, ambiental y/o social.

PROPUESTAS DE MEJORAS

- Desarrollo de recomendaciones específicas para implementar prácticas de producción limpia en la empresa estudiada. Se propone la instalación de un sistema de tratamiento de aguas residuales que integre tecnologías de ultrafiltración y electrocoagulación. Estas tecnologías permiten una recuperación eficiente de hasta el 80% del agua utilizada en el proceso de lavado de vehículos. La ultrafiltración elimina partículas suspendidas y microorganismos, mientras que la electrocoagulación remueve contaminantes químicos y metales pesados.
- Propuesta de un plan de acción para la implementación de las mejoras. Implementar un programa de formación continua para el personal, centrado en la eficiencia del uso del agua y en la gestión adecuada de las aguas residuales. Además, establecer un protocolo de buenas prácticas ambientales que incluya el uso de detergentes biodegradables y la optimización del proceso de lavado para minimizar el desperdicio de recursos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a) Conclusiones sobre la viabilidad y beneficios de implementar prácticas de producción limpia. Sea la alternativa que se elija los ahorros en soles generados no serían considerados representativos, pues en países como el nuestro el costo del agua es relativamente bajo (s/3 x m³) sin embargo en países como Francia el costo es seis veces más, quizás para ellos los costos económicos si sería una variable a considerar. De acuerdo con la OMS una persona requiere de 100lts de agua al día (0,1 m³), si se implementa la 1era alternativa en un car wash tendríamos agua para cubrir la necesidad de al menos cinco personas, una familia; si implementamos la 2da alternativa el doble, 10 personas y si se mejora tomando como referencia la demanda esperada en la zona 7 de influencia, serían beneficiadas 12 931 personas por la primera alternativa y 25 863 personas por la segunda alternativa.
- b) Recomendaciones para futuras investigaciones en el área de producción limpia. Impacto social. Dado que los beneficios económicos no son del todo representativos, quizás sería conveniente observar con mayor profundidad el impacto social que generaría el ahorro del agua de estos servicios, orientarlos a ser más eficientes y generar oportunidades para un mejor uso del recurso agua.

Desarrollo de Políticas de Incentivos y Subsidios

Se recomienda que las autoridades locales y nacionales desarrollen políticas que ofrezcan incentivos y subsidios para las empresas que adopten tecnologías de producción más limpia. Esto podría incluir descuentos fiscales, financiamiento a bajo interés y programas de certificación para empresas sostenibles.

Promoción de la Educación y Sensibilización Ambiental

Es fundamental implementar programas educativos y campañas de sensibilización que destaquen la importancia de la producción más limpia y el uso eficiente del agua, dirigidos tanto a empresarios como a la comunidad en general. Este enfoque fomentará un cambio cultural hacia prácticas más sostenibles y responsables.

Establecimiento de un Sistema de Monitoreo y Evaluación Continua

Establecer un sistema riguroso de monitoreo y evaluación continua para medir el impacto de las prácticas de producción más limpia implementadas. Esto permitirá realizar ajustes necesarios y garantizar que se están alcanzando los objetivos de

sostenibilidad y eficiencia, además de proporcionar datos valiosos para futuras investigaciones en este campo.

Financiamiento

Sería necesario generar oportunidades o desarrollar alternativas de un tipo de financiamiento diferenciado por los beneficios relacionados al mejor uso del agua para este tipo de empresas, pues como ya se indicó previamente implementar estrategias PML requieren de inversión que no necesariamente generarán un retorno próximo.

REFERENCIAS

- Alegre, M. (2007).** Centro de ecoeficiencia y responsabilidad social (CER), Casos prácticos nacionales e internacionales. Recuperado de https://grupogea.org.pe/wp-content/uploads/2021/11/Publicacion-Casos-PML_Marcos.pdf
- Bolívar, A. y Saavedra, C. (2021).** Tesis ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN CAR WASH DE VEHICULOS LIVIANOS CON SISTEMA DE REUTILIZACIÓN DE AGUA. Recuperado de https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bits-tream/handle/20.500.12404/21546/BOLIVAR%20FERNANDEZ_SAAVEDRA%20MERINO_ESTUDIO_PREFACTIBILIDAD_IMPLEMENTACION.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- González-Torre, P. L., & Adenso-Díaz, B. (2004).** Environmental and reverse logistics policies in European bottling and packaging firms. *International Journal of Production Economics*, 88.
- Gryta, M., & Woźniak, P. (2024).** Polyethersulfone membrane fouling mitigation during ultrafiltration of wastewaters from car washes. *Desalination*, 574, 117254. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117254>
- Jones, P., & Hill, C. (2018).** Reducing food waste through sustainable practices in the food industry. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1553-1563.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (2018).** Improving resource efficiency for the circular economy. OECD Publishing.

Smith, T. (2019). Waterless dyeing technologies in the textile industry: Benefits and challenges. *Journal of Environmental Management*, 243, 70-77.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). Cleaner production: Key concepts and best practices. UNEP.

Van Berkel, R. (2010). Industrial and commercial waste management: A cleaner production perspective. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 232-239.

Capítulo 5

Análisis comparativos de la presencia de metales pesados en afluentes de ciudades de Perú y Ecuador

Luis Adrián González Quiñónez

Pedro Jesús De Bracamonte Morales

Julio Douglas Vergara Trujillo

Deina Candelaria Tinoco Orihuela

INTRODUCCIÓN

La contaminación causada por metales pesados en afluentes urbanos es un problema ambiental que afecta a un recurso tan importante indispensable para todo ser vivo, esta contaminación afecta a ciudades de dos países hermanos en Sudamérica como son Perú y Ecuador. Estos metales, como el plomo (Pb), mercurio (Mg), cromo (Cr), arsénico (As), cadmio (Cd) entre otros, los cuales causan daños graves a la salud humana y al medio ambiente. Se vuelve muy fundamental realizar la comparación de la situación en ambas regiones para entender mejor la magnitud del problema y desarrollar estrategias efectivas para mitigarlo conjuntamente como países hermanos. (Yu-Jing , y otros, 2004)

Perú y Ecuador sufren un gran problema con la contaminación de ríos, lagos, lagunas y mares. Estos recursos hídricos que a nivel mundial presenta una acelerada contaminación, por problemas como malas planificaciones territoriales, industriales, tecnológicas y crecimiento poblacional desproporcionado. Este análisis comparativo el cual busca establecer la presencia de metales pesados en los afluentes de ciudades de Ecuador y Perú tiene un gran realce desde el punto de vista de la conservación de ecosistemas busca poner en el lente de los principales

organismos de control, la dimensión de la contaminación y las consecuencias que acarrearán.

La ubicación geográfica de Ecuador y Perú los cuales en sus territorios albergan gran cantidad de recursos hídricos de agua dulce y una gran cantidad de industrias y minería en los márgenes de estos, estos afluentes representan el escenario propicio para la acumulación de sedimentos los cuales contienen metales pesados. La contaminación por metales pesados en afluentes urbanos se debe a la actividad industrial, agrícola, la gestión inadecuada de residuos y la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales las cuales afectan a la flora y fauna. En Perú, por ejemplo, la actividad minera y la industria manufacturera son importantes fuentes de contaminación. En Ecuador, la falta de regulación y control en la gestión de residuos y la actividad industrial como la generación eléctrica y refinación de derivados del petróleo también contribuyen a la contaminación. (García & Dioses, 2023)

En los últimos años se ha tornado un tema muy importante la contaminación ambiental, la conservación de los recursos hídricos, la calidad del agua que es descargada por cada una de las industrias ubicadas en los márgenes de los afluentes, los diferentes pesticidas que son usados por la agricultura y a calidad de las aguas que son vertidas por los sistemas de tratamientos de aguas urbanas. (Anita Singh, 2010). Al transcurrir cierto periodo de tiempo las aguas residuales conllevan a la acumulación de sedimentos que contienen metales pesados acarreando riesgos potenciales a la salud humana y para la flora y fauna que se sirven de las aguas de estos ríos. Para el Ecuador que es uno de los países, el cual tiene la mayor cantidad de ríos por kilómetros cuadrados en el mundo. (Ecuador, 2017)

Varios artículos científicos realizaron un análisis profundo en los últimos años de la concentración de metales pesados en ríos de agua dulce de algunas ciudades de Ecuador y Perú. En el informe desarrollado por el Ministerio de Ambiente del Perú (2017) donde se estableció que existía una alta concentración de arsénico debido a la actividad minera en los ríos de la región de Cajamarca. Su contraparte el Ministerio de Salud Pública de Ecuador en el año 2019 estableció que existía una gran presencia de cobre y de zinc en los efluentes de la provincia de Loja debido a la actividad agrícola que se desarrolla en la zona. (Cevallos, Laucés Albert, & Cuello Pérez, 2023)

En este artículo se presentará un análisis comparativo de la presencia de metales pesados en afluentes de ciudades de Ecuador y Perú, se realizará una revisión literaria científica disponibles en revistas científicas de alto impacto de la región y el

mundo. Se realizará una discusión de los principales focos contaminantes, cuáles son los principales elementos encontrados en los afluentes, los efectos en la flora y fauna, cuales son las medidas para mitigar el problema ambiental.

Se analizará el Río Puyango el cual se encuentra en Tumbes el cual se encuentra rodeado por montañas las cuales tienen alturas de 3500 metros sobre el nivel del mar, este tiene un caudal de 106 metros cúbicos por segundo. Este río debe su caudal al río Pindo el cual nace de la integración de 4 ríos el río Calera, Amarillo, Lius y Ambocas. (Cadenas, 2022)

En el presente trabajo se han planteado los siguientes objetivos:

- Comparar la presencia de metales pesados en afluentes de ciudades de Perú y Ecuador.
- Analizar las posibles diferencias y similitudes en la concentración de metales pesados entre los afluentes de ambas regiones.
- Evaluar el impacto de la actividad industrial y las prácticas de gestión de residuos en la presencia de metales pesados en los afluentes.
- Identificar los principales metales pesados presentes en los afluentes de las ciudades estudiadas.
- Determinar los niveles de contaminación por metales pesados en los afluentes y compararlos con los estándares ambientales y de salud establecidos.
- Identificar las fuentes y rutas de entrada de los metales pesados a los afluentes.
- Evaluar las implicaciones de la contaminación para la salud y el ambiente.

MARCO TEÓRICO

Contaminación de agua

En la revista Iberdrola (2024) nos menciona que la Organización Mundial de la Salud (OMS) define el agua contaminada como aquella que sufre cambios en su composición hasta quedar inservible. Es decir, es agua tóxica que no se puede ni beber ni destinar a actividades esenciales como la agricultura, además de una fuente de insalubridad que provoca más de 500.000 muertes anuales a nivel global por diarrea y transmite enfermedades como el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea y la poliomielitis.

Principales contaminantes presentes en el agua

Pesticidas o plaguicidas. - De acuerdo a Lapworth & Gooddy (2006) los pesticidas son sustancias o mezclas de sustancias destinadas a prevenir, destruir, repeler o mitigar las plagas. Debido a la regulación de la cual han sido objeto, se han estudiado durante décadas y, en consecuencia, se tiene un razonable conocimiento sobre su presencia y destino en el medio acuático. En los últimos años la reocupación en torno a estos productos se centra en los metabolitos, productos de degradación, que han sido en su mayor parte ignorados hasta la fecha y que se ha visto que pueden ser más tóxicos que los compuestos a partir de los cuales se generan. Los estudios han demostrado que los metabolitos de plaguicidas a menudo se detectan en aguas subterráneas en concentraciones más altas en comparación con los compuestos precursores.

Fosfatos. - Según (Withers, y otros, 2015) los fosfatos son contaminantes químicos inorgánicos y se presentan tanto disueltos como dispersos en el agua. El fósforo precipita en forma de fosfatos en suelos alcalinos y en suelos ácidos como fosfato de hierro (strengita) o de aluminio (variscita). En la actualidad la mayoría de los países europeos aporta un exceso de nitrógeno y fósforo, incrementándose las reservas de estos en el suelo y aumentando el riesgo de emisión a los medios acuáticos. Parte de los contaminantes de fósforo son obtenidos a partir de la roca de fosfato, de donde se extrae y procesa para obtener finalmente derivados de fósforo, como son el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el fósforo blanco (P_4) para diversas utilidades. En general estos contaminantes provienen de descargas domésticas, agrícolas, industriales o de la erosión del suelo.

Metales pesados. - Los autores Yang & Zhang (2011) mencionan que los metales pesados son contaminantes inorgánicos cuya densidad está por encima de los 5 g/cm³. Dentro de este grupo de sustancias encontramos el arsénico, cadmio, cobre, mercurio, níquel, zinc, cromo y plomo. Algunos de estos metales a pequeñas concentraciones son necesarios para procesos biológicos vitales, sin embargo, cuando sobrepasan estas limitaciones son altamente tóxicos. En los últimos años, y con el desarrollo del sector industrial y agrícola, la contaminación por metales ha aumentado lo que lleva consigo un peligro ambiental importante para invertebrados, peces y seres humanos.

De acuerdo con Kim, Kim, & Seo (2015) el mercurio, el arsénico y el plomo son los metales pesados más tóxicos puesto que son altamente tóxicos a concentraciones muy pequeñas, se utilizan en el sector industrial para la elaboración de baterías para coches, pigmentos, materiales semiconductores, equipos de medición como lámparas LED, en fertilizantes y pesticidas o en minería. Otros metales como el cromo, el níquel o el cadmio son considerados carcinógenos de grado 1 según la Agencia Internacional para la investigación del Cáncer, además, participan en la extracción de minerales, en la elaboración de conservantes para madera, agentes anticorrosivos, monedas, placas de acero o acero inoxidable.

Bifenilos policlorados. – Según Loaysa, Silva, Arce, & Casafranca (2015) los bifenilos policlorados o PCB son una familia de compuestos orgánicos (hidrocarburos policlorados) que se sintetizan por cloración catalítica del bifenilo y está constituida por una mezcla de productos clorados en distinto grado, en las que se han identificado hasta 209 miembros denominados congéneres. Son productos químicos industriales producidos sintéticamente que se utilizan para diversos fines, transformadores y condensadores eléctricos, como líquidos de intercambio de calor, como aditivos de pintura, en papel de copia sin carbón y en plásticosww

Mecanismos empleados para el tratamiento de aguas. – Según Pineda y Gómez (2016) los microorganismos juegan un rol vital en la transformación de elementos traza incluidos los metales ya que influyen su biodisponibilidad y remediación, pueden alterar la toxicidad, solubilidad en agua y la movilidad del elemento. Los microorganismos modifican la concentración de metales pesados en el ambiente, pues estos cuentan con mecanismos enzimáticos y no enzimáticos para remover metales en solución. La capacidad de remoción de metales por bacterias, microalgas y hongos es superior a la reportada con métodos fisicoquímicos convencionales, también se conoce que la adquisición y remoción de los metales pesados puede ser selectiva teniendo en cuenta la capacidad metabólica de cada

especie biorremediadora y el tipo de metal. Entre las transformaciones enzimáticas de los metales realizadas por microorganismos se incluyen la oxidación, la reducción, la metilación, la demetilación; las cuales pueden dar como resultado algunos compuestos poco solubles en agua o bien compuestos volátiles. A continuación, se describen diferentes mecanismos bioquímicos desarrollados por los microorganismos para transformar o acumular diversos iones metálicos.

Adherencia de los metales, su bioacumulación y la biosorción.- Según Coto (2014) los metales pesados son empleados en una gran variedad de productos industriales que a largo plazo tienden a ser depositados en los distintos compartimentos medioambientales. Dicha liberación de metales pesados en el medioambiente se produce desde el principio de la cadena de producción (debido a las actividades de minería con minerales), durante la producción mediante el uso de los productos industriales que los contienen, y también al final de la cadena de producción. Los organismos concentran estos contaminantes en sus tejidos mediante un proceso denominado bioacumulación, que implica el aumento progresivo de la cantidad de sustancia en los tejidos de un organismo como consecuencia de que la velocidad de absorción supera la capacidad del organismo para eliminar dicha sustancia. El grado de acumulación depende de factores tales como la naturaleza química del contaminante, el tipo de organismo, su estado fisiológico, la temperatura del agua y la salinidad.

Biosorción de metales pesados. - Según Federico y otros (2010) los biosorbentes completamente saturados pueden concentrar metales pesados, en un orden que supera miles de veces el valor de su concentración en la fase líquida. Se considera que la superficie es capaz de adsorber solamente una monocapa de adsorbato, considerando una extensión del modelo de Langmuir, desde los procesos de adsorción gas-sólido, líquido-sólido a los procesos de biosorción. La carga de la biomasa puede ser revertida con la finalidad de desorber los metales y varios estudios han demostrado que la elución con soluciones acuosas ácidas llega a ser altamente efectiva. La elución no reduce significativamente la capacidad de unión de la biomasa, así se la puede emplear en varios ciclos consecutivos. En la biosorción de uranio por el alga, en columna de flujo continuo, observó que cuando el material se había cargado en un 100% y se eluía con HCl 0,1N, se recuperaba el uranio unido en un 99,5%. Además, la columna pudo ser utilizada en forma consecutiva durante todo un mes completando cinco ciclos de biosorción-desorción. Durante ese período, la capacidad de biosorción del sustrato disminuyó 7,00% después del primer ciclo y fue menor al 20% después del quinto ciclo, respecto a la biomasa

fresca. La disminución de eficiencia de biosorción, se asignó a la pérdida, por lixiviación, de alginato de la pared celular del alga, siendo éste el polisacárido al que se atribuye la capacidad de retener iones metálicos livianos y pesados. El proceso de biosorción es adecuado como técnica de refinamiento en aguas de desecho con metales pesados, en concentraciones en un rango de 1 a 100 ppm. Así, estos niveles se logran disminuir hasta aquellos correspondientes al agua potable, utilizada en el consumo diario de personas y animales.

Biosorción por algas. - Algunas algas oceánicas presentaron una asombrosa capacidad para biosorber metales. Las algas pardas, en particular, son muy propensas a la unión de iones metálicos, probablemente debido a su contenido en polisacáridos. Según resultados obtenidos, el proceso de biosorción de metales pesados tiene dos fases: (a) una rápida reacción superficial, inferior a los 4 s y (b) una captación del metal mucho más lenta, de alrededor de 2 h. La primera fase se atribuye a adsorción superficial, por un proceso de intercambio aniónico con participación de grupos carboxilo de los ácidos urónicos; y la segunda fase a la difusión de iones dentro de las estructuras celulares. (Federico, y otros, 2010)

Filtración por membrana. - Según Caviedes, et al (2015) esta tecnología presenta altas eficiencias, requiere poco espacio, no es selectiva y es de fácil operación, pero genera una gran cantidad de lodos que contienen metales. Se emplea en procesos para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y en menor medida aguas residuales domésticas. Las membranas pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características como su peso molecular de corte, material de la membrana (sintéticos o polímeros naturales modificados, acoplados y estructurados), permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente en la película, superficie y espesor activo de la película, así como la carga de su superficie. La separación por membrana se emplea comúnmente para tratar y recuperar sales metálicas de residuos generados en procesos galvanoplásticos, en el reciclaje de aceites, en la producción alimentos y bebidas y en la explotación y producción de hidrocarburos.

Electrodialisis. – Según Caviedes, Muñoz, Perdomo, Rodriguez, & Sandoval (2015) es una técnica de descontaminación que puede remover componentes iónicos de soluciones acuosas empleando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante. Esta técnica tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta 0,0001 μm , mediante hojas o laminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el agua.

Osmosis inversa. - De acuerdo a Caviedes & Otros (2015) es un proceso de permeación a través de membrana para la separación por difusión controlada o cribado. Tiene la capacidad de seleccionar elementos de tan solo 0.0001 mm, lo que le otorga un amplio abanico de capacidades de tratamiento.

Nanofiltración. - En base a Caviedes & Otros (2015) es una técnica de tratamiento de agua relativamente reciente que utiliza membranas con poros muy pequeños ($<1\text{nm}$) y requiere presiones de funcionamiento en el rango de 10-50 bar. Por lo tanto, las membranas empleadas para la nanofiltración son capaces de retener especies neutras con peso molecular $< 200 - 300 \text{ g/mol}$, y también para rechazar iones inorgánicos por un mecanismo de exclusión por tamaño en combinación con las interacciones electrostáticas entre los iones y la membrana cargada, presenta mayor rechazo de iones divalentes y menor rechazo de iones monovalentes, la presión de funcionamiento más baja, mayor flujo y menor consumo de energía en comparación con la osmosis inversa. Estas características recomiendan la nanofiltración como una tecnología prometedora e innovadora que puede ser ampliamente aplicada en el agua potable y el tratamiento de efluentes industriales.

Biopolímeros. - En base a Caviedes & Otros (2015) son industrialmente atractivos porque son capaces de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón, son ampliamente disponibles y ambientalmente seguros. Poseen un número amplio de diferentes grupos funcionales, tales como hidroxilos y aminas, que aumentan la eficiencia de la absorción de iones metálicos.

Hidrogeles. - Son polímeros hidrófilos reticulados capaces de ampliar sus volúmenes debido a su alta expansión en el agua. Por consiguiente, ellos son ampliamente utilizados en la purificación de las aguas residuales Barakat (2011). Diversos hidrogeles se han sintetizado e igualmente investigado su comportamiento de adsorción de metales pesados.

Ceniza volante. - Las cenizas volantes, generadas durante la combustión de carbón para la producción de energía, es un subproducto industrial que es reconocido como un contaminante ambiental, debido a su enriquecimiento en elementos traza potencialmente tóxica que se condensan del gas de combustión. Este material se ha reutilizado como un adsorbente de bajo costo para la eliminación de compuestos orgánicos, gases de combustión y los metales pesados (Visa & Chelaru, 2014); luego de aumentar su capacidad de adsorción mediante de la activación química y física.

Evaluación de toxicidad en el agua. – Según Coto (2014) los efectos tóxicos inducidos químicamente en organismos acuáticos nos sirven como indicadores de riesgo toxicológico para el ser humano y el medio ambiente, por lo que la toxicidad de un contaminante (o varios) sobre los organismos se puede evaluar mediante ensayos de toxicidad y bioacumulación en organismos tanto de agua dulce como marinos (Jones, 2009). En dichos ensayos, los organismos se someten a distintas concentraciones de contaminante durante un cierto período de exposición bajo condiciones estándares, transcurrido el cual, se comprueba el efecto producido sobre los mismos. Estos ensayos son la principal fuente de información respecto a la evaluación toxicológica de los efectos de los contaminantes, ya que se consigue comparar la sensibilidad de una o más especies a distintos tóxicos o a diferentes condiciones para el mismo tóxico. Es por ello que la realización de bioensayos en las evaluaciones ecotoxicológicas para el estudio del medio acuático es considerada de gran importancia, pues se integra con la biología y genera información analítica sobre los efectos de la exposición de un sistema vivo a sustancias contaminantes en un ambiente alterado.

RESULTADOS

En la presente sección se realizará un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en el Río Calera en Ecuador y el Río Puyango en Perú, respecto a la presencia de metales pesados en sus aguas; la data a ser analizada es la siguiente:

Tabla N°1: Contenido de metales pesados en el Río Calera – Ecuador

Resultados Río Calera Amarillo (mg/L)				
Mes	Cianuro	Arsénico	Mercurio	Plomo
may	0.766	0.021	<0.001	0.066
jun	0.899	0.035	<0.001	0.055
jul	0.989	0.028	<0.001	0.048
ago	1.002	0.020	<0.001	0.051
set	0.901	0.019	<0.001	0.049
oct	0.933	0.008	<0.001	0.043
nov	0.875	0.009	<0.001	0.028
dic	0.821	0.010	<0.001	0.021
Promedio	0.898	0.019	<0.001	0.045

Fuente: Nivel de contaminación por metales pesados: Hg, Pb, As y Cianuro (CN-), en el nacimiento río Binacional Puyango – Tumbes (Perú – Ecuador), (Yarlequé, 2019) **Elaboración:** Autores

Tabla N°2: Contenido de metales pesados en el Río Puyango – Perú

Resultados Río Puyango Tumbes (mg/L)				
Mes	Cianuro	Arsénico	Mercurio	Plo- mo
may	0.506	0.019	<0.001	0.048
jun	0.550	0.021	<0.001	0.037
jul	0.660	0.011	<0.001	0.032
ago	0.776	0.014	<0.001	0.033
set	0.490	0.010	<0.001	0.022
oct	0.501	0.007	<0.001	0.019
nov	0.520	0.006	<0.001	0.018
dic	0.488	0.006	<0.001	0.020
Promedio	0.561	0.012	<0.001	0.029

Fuente: Nivel de contaminación por metales pesados: Hg, Pb, As y Cianuro (CN-), en el naciente río Binacional Puyango – Tumbes (Perú – Ecuador), (Yarlequé, 2019) **Elaboración:** Autores

Con la finalidad de contar con una referencia para ser comparado el nivel de presencia de metales pesados en los ríos en mención se tomará como normativa el Decreto Supremo n.º 004-2017-MINAM de fecha 6 de junio de 2017 mediante el cual el Ministerio del Ambiente de Perú aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen diversas disposiciones relacionadas a este tema. En este dispositivo legal en las tablas denominadas “Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales” y “Categoría 4: Conservación del ambiente acuático” de su Anexo, entre otros, establece los niveles máximos de diversos metales pesados para el agua destinado para riego de vegetales, bebida de animales y de ríos, mostrando a continuación un extracto respecto a los metales pesados en materia del presente estudio:

Tabla N°3: Límites máximos permitidos según Decreto Supremo n.º 004-2017-MINAM (mg/L)

Metales	Riego de vegetales D1	Bebida de anima- les D2	Rios E2
Cianuro (CN)	0.1000	0.1000	0.0052
Arsenico (As)	0.1000	0.2000	0.1500
Plomo (Pb)	0.0500	0.0500	0.0025
Mercurio (Hg)	0.0010	0.0100	0.0001

Fuente: Decreto Supremo n.º 004-2017-MINAM

Elaboración: Autores

En base a la información presentada, a continuación se realizará un análisis comparativo de estos valores mediante la presentación de unos gráficos que permitirá evidenciar algunas diferencias y similitudes entre los resultados obtenidos en los dos ríos en mención:

Respecto a la presencia de Cianuro:

Tal como se puede observar en el figura n.º 1, los niveles de presencia de Cianuro, tanto en Ecuador como en Perú, se encuentran por encima de los límites máximos permitidos para los tres categorías en estudio: riego de vegetales (D1), bebida de animales (D2) y río (E2); pero hay que resaltar que el nivel promedio de este metal es más alto en Ecuador (Río Calera) llegando a un valor de 0.898 mg por litro, lo que representa un 60% más del nivel promedio de Perú en el río Puyango (0.561 mg/L).

Figura N°1: Niveles promedio de Cianuro vs límites máximos permitidos



Fuente: Elaboración propia

Si se evalúa el comportamiento de este metal en las aguas de los ríos estudiados se observa que, como se mencionó en el párrafo precedente, los niveles se encuentran por encima de los límites máximos permitidos por la normativa citada para ambos casos. Por otro lado, respecto a la tendencia podemos observar en la figura n.º 2 que existe una pequeña tendencia a la baja pero la diferencia entre los dos valores se mantiene, obteniendo en Ecuador un valor máximo de 1.002 mg/L y en Perú 0.776 mg/L, mientras que el valor mínimo alcanzado fue de 0.766 mg/L en Ecuador y en Perú 0.488 mg/L.

Figura N°2: Evolución de niveles de Cianuro vs límites máximos permitidos



Fuente: Elaboración propia

En adición a lo mostrado, se aplicará una prueba estadística para determinar la similitud o no de los datos de ambos países, para ello primero se determinará si la concentración de Cianuro de cada país tiene una distribución normal para elegir la prueba estadística ser aplicada; en la siguiente tabla se muestran los resultados de la aplicación de la prueba de Shapiro Wilk por tener una cantidad pequeña de datos, así se visualiza que la concentración de Cianuro en Ecuador tienen una significancia de 0.828 por lo tanto tiene una distribución normal, en cambio en el caso de Perú su valor es 0.009 y al ser menor que 0.050 no tendría un comportamiento normal:

Tabla N°4: Resultados de prueba estadística de normalidad con Shapiro Wilk del Cianuro

Variable	Estadístico	gl	Sig.
Cianuro (Ecuador)	0.962	8	0.826
Cianuro (Perú)	0.753	8	0.009

Fuente: Reporte de IBM SPSS

Elaboración: Autores

Como consecuencia de no contar ambas variables con una distribución normal, la prueba estadística ser utilizada para la comparación de medias de ambos países es U de Mann-Whitney, cuya significancia es del valor de 0.001 (menor a 0.050), por lo que se establece que los valores de la concentración de Cianuro en Ecuador y Perú son estadísticamente diferentes.

Tabla N°5: Resultados de prueba estadística de U de Mann-Whitney del Cianuro

Variable	N	Sig. asintótica(bilateral)
Cianuro (Ecuador)	8	0.001
Cianuro (Perú)	8	

Fuente: Reporte de IBM SPSS

Elaboración: Autores

Respecto a la presencia de Arsénico:

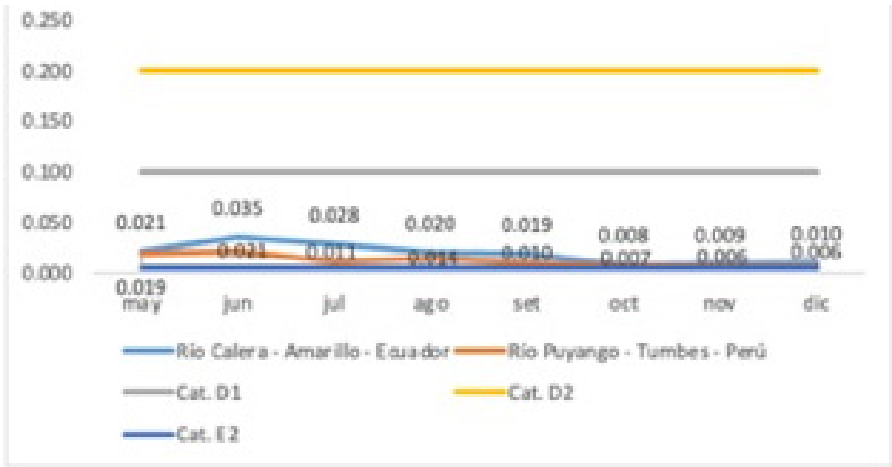
En relación al Arsénico el panorama es diferente, toda vez que como se muestra en la figura n.º 3 el nivel promedio de este metal pesado en ambos lugares (Ecuador y Perú) son similares obteniendo valores promedio de concentración de 0.019 y 0.012 mg por litro, estos valores se encuentran por debajo de los límites permitidos para el riego de vegetales y bebida de animales, pero por encima de los niveles permitidos para el río (0.005 mg/L).

Figura N°3: Niveles promedio de Arsénico vs límites máximos permitidos

Fuente: Elaboración propia

Así también. la misma situación se puede observar en la figura n.º 4 donde se muestra la evolución de los valores de Arsénico en los ríos estudiados de Ecuador y Perú, evidenciando que el valor máximo alcanzado en el periodo de estudio fue de 0.035 y 0.021 mg por litro respectivamente, y los valores mínimos ascendieron a 0.008 y 0.006 mg/L.

Figura N°4: Evolución de niveles de Arsénico vs límites máximos permitidos



Fuente: Elaboración propia

Asimismo, con la finalidad de realizar el comparativo de metas con una prueba estadística. Se evaluarán si los datos de este metal pesado en ambos países poseen una distribución normal, para ello en la tabla n.º 6 se muestran los resultados de este estadístico, observando que tanto en Ecuador como en Perú la concentración de Arsénico tiene un comportamiento normal (valor de significancia 0.428 y 0.230 respectivamente).

Tabla N°6: Resultados de prueba estadística de normalidad con Shapiro Wilk del Arsénico

Variable	Estadístico	gl	Sig.
Arsénico (Ecuador)	0.920	8	0.428
Arsénico (Perú)	0.889	8	0.230

Fuente: Reporte de IBM SPSS

Elaboración: Autores

Como resultado de la evaluación realizada con el estadístico de Shapiro Wilk, se establece que la prueba estadística a utilizar para la comparación de medias entre ambos grupos será la de T-Student para muestras independientes, tal como se muestran los resultados en la tabla n.º 7, el nivel de significancia es mayor a 0.050 (0.099) por lo que se infiere que los valores de concentración de este metal pesado en ambos países son similares estadísticamente.

Tabla N°7: Resultados de prueba estadística de T-Student del Arsénico

Variable	N	Media	Sig. (bilateral)
Arsénico (Ecuador)	8	0.018750	0.099
Arsénico (Perú)	8	0.011750	

Fuente: Reporte de IBM SPSS

Elaboración: Autores

Respecto a la presencia de Mercurio:

En relación al Mercurio, tal como se ha podido observar en las tablas n.ºs 1 y 2 los niveles de este metal pesado es menor a 0.001 mg por litro en ambos ríos (Ecuador y Perú respectivamente), estando por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en el Decreto Supremo n.º 004-2017-MINAM para las tres categorías estudiadas: riego de vegetales (D1), bebida de animales (D2) y río (E2).

Respecto a la presencia de Plomo:

Respecto al último metal pesado estudiado (Plomo), se puede observar en la figura n.º 5 que los niveles promedios alcanzados en ambos países se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles para riego de vegetales y bebida de animales (0.005 mg/L), pero por encima para la categoría de ríos (0.0025 mg por litro). Además, podemos visualizar en esta figura que, el nivel promedio alcanzado en el río ecuatoriano (0.045 mg/L) es mayor al del peruano (0.029 mg/L), representando un 55% más que el peruano.

Figura N°5: Niveles promedio de Plomo vs límites máximos permitidos

Elaboración: Autores

Por otro lado, si se analiza la evolución de estos resultados (figura n.º 6) se puede verificar que la tendencia es la baja en ambos países, logrando en la última medición alcanzar valores muy similares (0.021 y 0.020 para Ecuador y Perú respectivamente), además como producto de esta tendencia inicialmente los valores del río ecuatoriano se encontraban por encima de los límites máximos permisibles para el riego de vegetales y bebida de animales pero terminaron por debajo de este, en cambio en el caso del río peruano siempre estuvo por debajo de este límite. Cabe mencionar que los niveles de plomo en ambos países se encuentran por encima del límite máximo permisible para ríos. Finalmente, podemos mencionar que para el río ecuatoriano se encontró como valor máximo y mínimo 0.066 y 0.021 mg/L respectivamente, mientras en el río peruano dichos valores alcanzaron 0.048 y 0.018 mg/L respectivamente.

Figura N°6: Evolución de niveles de Plomo vs límites máximos permitidos



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se evaluará el comportamiento normal de los valores de Plomo en ambos países mediante la prueba estadística de Shapiro Wilk, cuyos resultados se muestran en la tabla n.º 8 en donde se puede observar que tanto en Ecuador y Perú obtienen un valor de significancia de 0.632 y 0.236 respectivamente, por ende, podemos mencionar que se cuenta con una normalidad.

Tabla N°8: Resultados de prueba estadística de normalidad con Shapiro Wilk del Plomo

Variable	Estadístico	gl	Sig.
Plomo (Ecuador)	0.942	8	0.632
Plomo (Perú)	0.890	8	0.236

Fuente: Reporte de IBM SPSS

Elaboración: Autores

Al contar con una distribución normal en ambas variables, la prueba a utilizar para la comparación de medias es la de T-Student para muestras independientes, es así que tal como se muestra en la tabla n.º 9 el nivel de significancia obtenida es de 0.021 y al ser menor a 0.050 se infiere que los valores de concentración de Plomo en ambos países difieren estadísticamente.

Tabla N°9: Resultados de prueba estadística de T-Student del Plomo

Variable	N	Media	Sig. (bilateral)
Plomo (Ecuador)	8	0.045125	0.021
Plomo (Perú)	8	0.028625	

Fuente: Reporte de IBM SPSS

Elaboración: Autores

CONCLUSIONES

- Los metales identificados en los ríos Calera y Puyango-Tumbes son el plomo (Pb), mercurio (Mg), cromo (Cr), arsénico (As), cadmio (Cd) entre otros
- El estudio se hizo en el río Calera (Ecuador) y el río Binacional Puyango -tumbes, encontrando muchos metales, pero se hizo el estudio en metales pesados como el cianuro, el arsénico, el mercurio y el plomo por ser altamente dañino para la salud pública y el medio ambiente
- La concentración de los metales pesados en cuestión se nota una mayor presencia del cianuro en el Río Calera en comparación con el Río Puyango-Tumbes tiene un 60% más, pero ambos ríos están por encima de los niveles permitidos. La presencia de arsénico es similar en ambos ríos, pero sin mucho peligro para el riego y bebida de animales y lo mismo sucede con el mercurio y con respecto al plomo su presencia es 55% mayor en el río de Ecuador
- La Gestión de los residuos esta normado en ambos países, pero no es controlada por el estado, ni mucho menos sancionar a los causantes de la contaminación de los ríos y sus afluentes
- Los niveles de contaminación en todos los metales pesados en estudio están por debajo de los límites máximos que si no es controlado los medios que la generan muy pronto podría ser un peligro para el medio ambiente
- La presencia de los metales pesados y otros contaminantes se debe a la falta de regulación en la gestión de los desechos industriales por parte de ambos países, la presencia de Mercurio se debe, principalmente, a la minería informal y minería artesanal, desechos de restos de petróleo de arrojado al río por la empresa generación eléctrica, los desechos residuales de las poblaciones aledañas a los ríos
- La acumulación de estos metales podría ser muy dañino a largo plazo tanto para el suelo, los animales y los seres humanos causando un daño irreparable al ecosistema

RECOMENDACIONES

- Establecer sistemas de monitoreo continuo en los ríos de Perú y Ecuador para detectar y registrar la concentración de metales pesados en tiempo real. Estos sistemas deben estar equipados con sensores avanzados que proporcionen datos precisos y oportunos, permitiendo una rápida respuesta ante aumentos peligrosos de contaminantes.
- Mejorar y fortalecer la regulación y supervisión de las actividades industriales y agrícolas en ambos países. Es crucial que los gobiernos de Perú y Ecuador implementen y hagan cumplir leyes más estrictas para controlar la emisión de metales pesados y aseguren la adecuada gestión de residuos industriales y agrícolas.
- Invertir en la construcción y modernización de plantas de tratamiento de aguas residuales en áreas urbanas e industriales. Estas instalaciones deben estar diseñadas para eliminar metales pesados de manera efectiva antes de que las aguas sean vertidas en los ríos, reduciendo así la carga contaminante.
- Fomentar prácticas agrícolas sostenibles que minimicen el uso de pesticidas y fertilizantes que contienen metales pesados. Se deben promover alternativas orgánicas y biológicas, así como técnicas de agricultura de conservación, para reducir la contaminación de los afluentes.
- Desarrollar programas educativos y de concienciación para informar a las comunidades locales sobre los peligros de la contaminación por metales pesados y las formas de prevenirla. Es fundamental que las poblaciones que viven cerca de los ríos comprendan los impactos ambientales y de salud asociados y participen activamente en la protección de sus recursos hídricos.

REFERENCIAS

- Anita Singh, R. K.** (2010). Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from wastw water irrigated area of Varanasi, India. *Ecología tropical* , 2s(51), 375-387.
- Barakat, M.** (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*.
- Beltrán Pineda, M., & Gómez Rodríguez, A.** (2016). *BIORREMEDIACIÓN DE METALES PESADOS CADMIO (Cd), CROMO (Cr) Y MERCURIO (Hg) MECANISMOS BIOQUÍMICOS E INGENIERÍA ENÉTICA: UNA REVISIÓN*. Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwivp8zY9K6HAxXBILkGHXhGAFgQF-noECC8QAQ&url=https%3A%2F%2Frevistas.unimilitar.edu.co%2Findex.php%2Frfcb%2Farticle%2Fdownload%2F2027%-2F1835%2F6473&usg=AOvVaw2v5HsUsPYNd0G>
- Cadenas, R. d.** (27 de Septiembre de 2022). *La contaminación minera en Ecuador amenaza a miles de habitantes de Perú*. Obtenido de La Barra Espaciadora : <https://www.labarraespaciadora.com/medio-ambiente/contaminacion-minera-ecuador-amenaza-peru/>
- Caviedes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodriguez, D., & Sandoval, I.** (2015). *Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales*. Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjrq6koq-HAxVZK7kGH-YISBuMQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F5432290.pdf&usg=AOvVaw1yuOAjCuExeEIlpSeAhvr7&opi=89978449>
- Cevallos, M., Lauces Albert , M., & Cuello Pérez, M.** (2023). DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS (Pb, Cd, Hg, As) EN AGUAS DEL RÍO TEAONE, ECUADOR. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 7(3), 173-188. doi:<https://doi.org/10.19136/jeeos.a7n3.5692>

- Coto, J. Ó.** (2014). *Estudios de bioacumulación de un metal de interés en contaminación ambiental (plomo) en larvas de lbina de gran valor comercial*. Obtenido de <https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/17347/TFG%20-%20Jose%20Oscar%20Coto%20Reyes%20Dic%202014.pdf>
- Ecuador, M. d.** (29 de Marzo de 2017). *TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DE MEDIO AMBIENTE*. Obtenido de Ministerio del Ambiente del Ecuador : Texto Unificado de Legislación
- Federico, L., García, S., Gonzalez, J., Frascaroli, M., Bellú, S., Florencia, M., . . . Salas, J.** (2010). *Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho*. Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiJ3-6FmK-HAxUSGLkGHXbIDkMQFnoECBIQAQ&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F3235861.pdf&usg=AOvVaw3i1pcAMSrt7B2j2dZ9FGid&opi=89978449>
- García, R., & Dioses, J.** (2023). Tipos de cobertura vegetal del Área Natural Protegida “Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes”, Tumbes, Perú. *Manglar*, 20(2). doi:<http://dx.doi.org/10.57188/manglar.2023.020>
- IBERDROLA.** (2024). *La contaminación del agua: cómo no poner en peligro nuestra fuente de vida*. Obtenido de Contaminación del agua: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-agua>
- Kim, H. S., Kim, Y. J., & Seo, Y. R.** (2015). *An overview of carcinogenic heavy metal: molecular toxicity mechanism and prevention*. Obtenido de Cancer Prevention.
- Lapworth, D. J., & Gooddy, D. C.** (2006). *Source and persistence of pesticides in a semiconfined chalk aquifer of southeast England*. Obtenido de Environmental Pollution.
- Loaysa, J., Silva, M., Arce, G., & Casafranca, A.** (2015). *Gestión integral de residuos de bifenilos policlorados - PCB (Aspectos generales y ciclo de vida)*.
- MINAM, M. d.** (2017). *Cifras Ambientales 2017*. Ubigeo INEI.

- Ramos, L.** (28 de Febrero de 2023). *Análisis de la Productividad del Sector Acuicola del Catón lHuaquillas, Provincia de el Oro.* . Obtenido de Repositorio Digital Universidad Técnica de Machala : https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/20922/1/E-325_LEON%20RAMOS%20LUIS%20RICARDO.pdf
- Visa, M., & Chelaru, A.** (2014). *Hydrothermally modified fly ash for heavy metals and dyes removal in advanced wastewater treatment.*
- Withers, J. A., Elser, J. J., Hilton, H., Ohtake, W., Schipper, W. J., & Van Dijk, K. C.** (2015). *Greening the global phosphorus cycle: How green chemistry can help achieve planetary P sustainability.* Obtenido de Green Chem.
- Yang, Y. Z., & Zhang, S.** (2011). *Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin.* Obtenido de Environmental Pollution.
- Yu-Jing , C., Yong-Guan , Z., Ri-Hong, Z., Deng-Yun, C., Yi-Zhong, H., Yi Qiu, & Zhong Liang, J.** (2004). Transferencia de metales del suelo a vegetales en un área cercana a una fundición en Nanning, China. *Medio Ambiente Internacional* , 30(6), 785-791. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.01.003>

Acerca de los autores

Oscar Rafael Tinoco Gómez

Nació en Huaraz, capital del departamento de Ancash, sus estudios primarios los realizó entre Huaraz y Lima, la secundaria en la Gran Unidad Escolar Ricardo Bentín, Lima, su formación profesional la realizó en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), donde se recibió como Ingeniero Industrial. Su grado de Doctor lo obtuvo en la Universidad Nacional Federico Villarreal, en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Actualmente es Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería Industrial de la UNMSM, docente Renacyt nivel VI y coordinador del Grupo de Investigación “Producción más limpia”.

Jorge Enrique Castillo Cueva

Doctorando en Ingeniería Industrial en UNMSM, Magister en Administración Estratégica de Negocios en CENTRUM, escuela de negocios de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Ingeniero Industrial de la UNMSM, director de DASAMI Perú SAC, Catedrático universitario.

Schelah Nadia De la Colina Rivas

Doctorando en Ingeniería Industrial en UNMSM. Magister en Administración Estratégica de Empresas en CENTRUM. Especialista en Logística, Gestión de calidad e inocuidad de alimentos en empresas agroindustriales, exportadoras y retail. Consultor de empresas. Catedrático Universitario.

Miguel Angel Oruna Rodriguez

Magister en Administración de Empresas de la UPC. Ingeniero Industrial especializado en la optimización, control y seguimiento de procesos Administrativo, logísticos y de calidad. Profesional, Técnico en Computación e Informática; experiencia comprobada en administración de proyectos, desarrollo académico e investigación. Docente en las más reconocidas universidades e instituciones educativas del país en curso de pre y postgrado.

Alberto Rodríguez Palacios Miñano

Doctorando en Ingeniería Industrial, Magister Gestión y Restauración del Medio Natural de la UB. Coordinador Académico de la UPN, Consultor en Gestión Ambiental y Docente Universitario.

Aldo Guillermo Rivadaneira Cuya

Doctorando en Ingeniería Industrial, Magister en Administración de Empresas, Titulado en Ingeniería Industrial. Gerente Administrativo de LYM Asesoría y Turismo. Consultor de empresas manufactureras y de servicios. Docente Universitario.

Darwin Dean Duran Janampa

Nació en Huánuco en el año 1983. Ingeniero Industrial de profesión, Magister en ingeniería industrial por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, con estudios de doctorado en la UNMSM, especialización en ingeniería de proyectos, docencia superior y universitaria, estadística aplicada a la investigación científica, adscrito al Colegio de Ingenieros del Perú.

Percy Wenceslao Lature Bustamante

Doctorando en Ingeniería Industrial, Magister en Gestión Estratégica Empresarial, Ingeniero Mecánico de Fluidos, Especialista en Theory of Constraints. Jefe del Equipo Control y Reducción de Fugas (e), Consultor Interno TOC en SEDAPAL.

Alcides Guillermo Joo Aguayo

Docente Investigador, Ingeniero de Proyectos, Magister en Project Management, Doctorando en Ingeniería Industrial. Doctorando en Ingeniería Industrial, Magister en Project Management, Universidad Esan. Ingeniero Mecatrónico (UNI), docente nombrado facultad de Ingeniería Industrial (UNMSM), miembro del Grupo de Investigación Producción más limpia.

Augusto Denis Madueño Macedo

Nació en Lima en el año 1961. Ingeniero Industrial por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, doctorando en la misma especialidad por la UNMSM. Especialización en Informática e Ingeniería de Sistemas. Actualmente se desempeña como especialista en Innovación y Transferencia Tecnológica en el Instituto Tecnológico de la Producción, a la par que es docente en las áreas de pregrado y posgrado de la Facultad de Ingeniería Industrial de la UNMSM. Doctorando en Ingeniería Industrial, Magister en Educación, Ingeniero Industrial (UNMSM), miembro de la Red DOLAC - Red de Docentes de América Latina y del Caribe.

Eduardo Julian Villarroel Nuñez

Doctorando en Ingeniería Industrial, Magister en Administración Estratégica de Negocios, Ingeniero Industrial, Ingeniero Químico. Director Académico de Ingeniería UTP, Consultor Empresarial en Estrategia y Mejora continua. Docente Universitario.

Juan Enrique Sigarróstegui Gutiérrez

Ingeniero Industrial por la Universidad Ricardo Palma con Maestría en Administración de Negocios de la URP y Doctorando en Ing. Industrial en la Universidad Mayor de San Marcos – 3er ciclo; experiencia en el planeamiento, control, operación y gestión de procesos en las áreas de mantenimiento, logística y calidad.

Duilio Angel Aranda Ipince

Doctorando en Ingeniería Industrial, Magister en Administración Estratégica de Negocios. Director de AID Consulting, Agente Internacional de SEBRAE|PR en el Perú, Consultor de empresas y Docente Universitario.

Silvia Coronado Ramirez

Doctorando en Ingeniería Industrial, Ingeniero Industrial por la Universidad Nacional del Callao, Magister en Administración Estratégica de Negocios, Directora de Gestión Académica UTP. Docente universitario.

Luis Adrián González Quiñónez

Docente Investigador, Ingeniero de Mantenimiento, Máster en Sistemas de Gestión

Pedro Jesús De Bracamonte Morales

Ingeniero Industrial egresado de la Universidad Nacional de Trujillo, con Maestría en Gestión Pública otorgada por la Universidad San Martín de Porres USMP, y una segunda Maestría en Administración de Negocios MBA Executive en la Universidad César Vallejo UCV. Con 25 años de experiencia profesional y más de 10 años de labor docente.

Julio Douglas Vergara Trujillo

Ingeniero Industrial egresado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, MBA en Administración de Negocios y Finanzas Internacionales (UCSS-Universidad de Génova)

Deina Candelaria Tinoco Orihuela

Ingeniera Metalurgista y de Materiales egresada de la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP), con maestría en Seguridad y Salud en el Trabajo y una segunda maestría en Ingeniería Ambiental en la Universidad Nacional del Centro del Perú, con experiencia en el sector minero metalúrgico, industrial y docente en la Universidad Continental y Universidad Nacional del Centro del Perú.

ISBN: 978-612-03-0468-6

