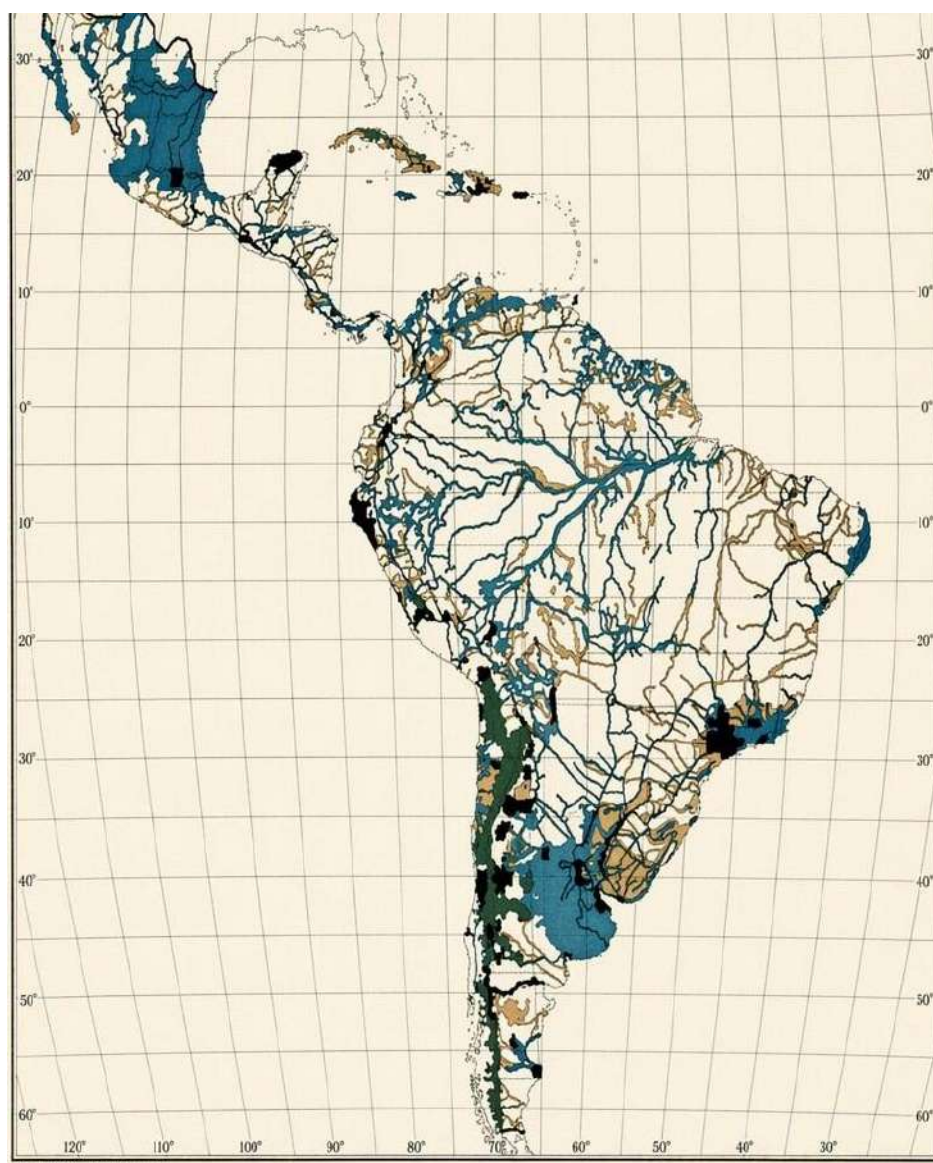


Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 8 - Número 15
Julio – Diciembre 2026
Maracaibo – Venezuela

Remoción de boro en agua destinada al consumo humano mediante ósmosis inversa: Avances tecnológicos y perspectivas de aplicación en el Lago Titicaca, Bolivia

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21523283>

Sabino Cota Mamani *

RESUMEN

El PET (tereftalato de polietileno) es uno de los polímeros termoplásticos más populares y utilizados en todo el mundo debido a su versatilidad, durabilidad y propiedades únicas, lo que le ha permitido ser ampliamente utilizado en varios ámbitos, siendo uno de ellos para fabricar envases y embalajes. Sin embargo, y derivado también de su amplio uso, el PET enfrenta grandes desafíos y problemas ambientales, desde su acumulación como un residuo hasta la falta de una cultura e infraestructura de reciclaje, lo que genera problemas ambientales. Este artículo presenta dos técnicas mecánicas como alternativas para darle un valor agregado al PET (tratamiento de desechos), primero, el electrospinning, del que se pueden obtener nanofibras con aplicaciones en diversas áreas; segundo, el spincoating, con la finalidad de obtener películas delgadas que pueden ser utilizadas como materia prima para otros productos. Se destacan los avances, ventajas y desafíos como el uso de solventes tóxicos, la necesidad de condiciones precisas y las limitaciones en la producción a gran escala, que aun con estos desafíos estas técnicas son una gran oportunidad para el aprovechamiento y reciclaje de plástico que no solo fomentan la sostenibilidad, sino que también abren nuevas oportunidades para el aprovechamiento de un residuo en aplicaciones industriales, dando un valor agregado a un residuo generado.

PALABRAS CLAVE: Polímeros, Plásticos, Tratamiento de desechos, Nanotecnología, Nuevos materiales.

* Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Mención Gestión de la Innovación y Prospectiva Empresarial, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8237-2957>. E-mail: sabinocota@gmail.com

Boron Removal in Drinking Water Using Reverse Osmosis: Technological Advances and Application Prospects in Lake Titicaca, Bolivia

ABSTRACT

Polyethylene terephthalate (PET) is one of the most widely used thermoplastic polymers worldwide due to its versatility, durability, and unique properties, which have enabled its extensive application in various fields, particularly in the manufacture of packaging and containers. However, due to its widespread use, PET faces significant environmental challenges, including its accumulation as waste and the lack of recycling culture and infrastructure, which generate substantial environmental impacts. This article presents two mechanical techniques as alternatives for adding value to PET waste (waste treatment). First, electrospinning, which enables the production of nanofibers with applications in various fields; and second, spin coating, aimed at obtaining thin films that can be used as raw materials for other products. The study highlights recent advances, advantages, and challenges such as the use of toxic solvents, the need for precise processing conditions, and limitations in large-scale production. Despite these challenges, these techniques represent a significant opportunity for plastic waste valorization and recycling, not only promoting sustainability but also opening new opportunities for the utilization of waste in industrial applications by adding value to discarded materials.

KEYWORDS: Polymers, Plastics, Waste treatment, Nanotechnology, Advanced materials.

Introducción

La seguridad hídrica mundial enfrenta una presión creciente debido al crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y los efectos del cambio climático, afectando a más de cuatro mil millones de personas (Mekonnen & Hoekstra, 2016). En este contexto, el boro (B) ha emergido como un contaminante de interés en los procesos de desalinización y potabilización del agua (Hilal et al., 2011). Aunque constituye un micronutriente esencial para las plantas, la exposición prolongada a concentraciones elevadas puede generar efectos adversos sobre la salud humana y afectar la productividad agrícola (Princi et al., 2016).

La remoción de boro mediante ósmosis inversa (OI) representa uno de los principales desafíos en los procesos de tratamiento de agua. En condiciones de pH neutro, el boro se encuentra predominantemente en forma de ácido bórico no dissociado ($B(OH)_3$), una especie

de baja carga eléctrica cuyo rechazo en membranas convencionales de poliamida es limitado (Ruiz-García & Nuez, 2021). En consecuencia, mientras que la eliminación de sales puede superar el 99 %, la remoción de boro en sistemas de OI de un solo paso suele situarse entre 40 % y 60 % (Güler et al., 2015; Najid et al., 2021). Además, la eficiencia del proceso depende no solo de la exclusión por tamaño, sino también de las interacciones electrostáticas entre el soluto y la superficie de la membrana (Ajali-Hernández et al., 2024; Ma et al., 2025).

Estas limitaciones adquieren especial relevancia en aplicaciones de abastecimiento de agua potable y riego agrícola, debido a que concentraciones entre 0,3 y 0,5 mg/L pueden producir efectos fitotóxicos en cultivos sensibles (Yavuz et al., 2013). En Bolivia, la Norma Boliviana NB-512 establece un límite máximo permisible de 0,3 mg/L para agua destinada al consumo humano (NB-512, 2004), lo que representa un desafío para el aprovechamiento de fuentes naturales con presencia de este elemento, particularmente en el sistema lacustre del Lago Titicaca.

A pesar de los avances en materiales de membrana y estrategias de optimización del proceso, persisten desafíos relacionados con la eficiencia de remoción, el consumo energético y la viabilidad operativa, especialmente en contextos con características hidrogeoquímicas complejas. Asimismo, existe una limitada evidencia sistematizada sobre la aplicación de configuraciones optimizadas de ósmosis inversa en regiones altoandinas.

En este contexto, el presente trabajo realiza una revisión crítica de los fundamentos y avances tecnológicos en la remoción de boro mediante ósmosis inversa, con énfasis en las estrategias orientadas a mejorar la eficiencia del proceso y su potencial aplicación en el sistema hídrico del Lago Titicaca, Bolivia. El objetivo es identificar alternativas tecnológicas sostenibles que contribuyan a garantizar la calidad del agua destinada al consumo humano en escenarios de alta vulnerabilidad hídrica.

1. Problemática del boro en el Lago Titicaca

El Lago Titicaca constituye un sistema hidrográfico cerrado cuya hidroquímica está influenciada por la erosión de rocas volcánicas ricas en boro y arsénico (ALT, 2014). En este contexto, los monitoreos realizados por la Autoridad Binacional del Lago Titicaca en el sector boliviano evidencian una distribución del metaloide que supera los límites permisibles en múltiples zonas del sistema lacustre, tal como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Niveles de boro y clasificación de calidad de agua en puntos críticos del sector boliviano del Lago Titicaca (ALT, 2014)

Nro.	Punto de Muestreo	Código	Coordenada E	Coordenada S	Sector	Boro (mg/L)	Factor de excedencia (NB-512 = 0.3 mg/L)
1	Bahía de Copacabana	Ltiti15	485255	8214523	Lago Mayor	1.291	4.3
2	Cusijata	Ltiti16	490716	8213763	Lago Mayor	1.202	4.0
3	Frente hoteles Copacabana	Ltiti16.1	480085	8212866	Lago Mayor	1.173	3.9
4	Isla del Sol (Challapampa)	Ltiti17	477441	8238192	Lago Mayor	1.276	4.3
5	Isla del Sol–Escoma	Ltiti18	477030	8251762	Lago Mayor	1.247	4.2
6	Desembocadura río Suhez	Ltiti19	481085	8265470	Lago Mayor	1.084	3.6
7	Frente Carabuco	Ltiti20	491586	8252173	Lago Mayor	1.099	3.7
8	Frente Ancoraimes	Ltiti20.1	516127	8231667	Lago Mayor	1.276	4.3
9	Isla de la Luna (SO)	Ltiti21	503515	8225496	Lago Mayor	1.202	4.0
10	Bahía Achacachi	Ltiti22	522521	8232333	Lago Mayor	1.055	3.5
11	Santiago de Huata	Ltiti23	516233	8205039	Lago Mayor	0.863	2.9
12	Estrecho de Tiquina	Ltiti24	518739	8205039	Lago Menor	0.789	2.6
13	Bahía de Chua	Ltiti25	527646	8206407	Lago Menor	0.804	2.7
14	Bahía de Huarina	Ltiti26	541147	8204018	Lago Menor	1.579	5.3
15	Puerto Pérez	Ltiti27	539797	8197450	Lago Menor	1.416	4.7
16	Este de Suriqui	Ltiti28	531922	8200171	Lago Menor	1.538	5.1
17	Bahía de Tiraska	Ltiti29	530359	8191300	Lago Menor	1.443	4.8
18	Cohana	Ltiti29.1	536318	8189860	Lago Menor	0.248	0.8
19	Norte de Taraco	Ltiti30	526596	8188330	Lago Menor	0.438	1.5
20	NE de Taraco	Ltiti31	511484	8187823	Lago Menor	1.647	5.5

21	Frente a Cohana	Ltiti32	503712	8180630	Lago Menor	1.457	4.9
22	Santa Rosa–Guaqui	Ltiti33	507468	8175020	Lago Menor	1.599	5.3
23	Bahía de Guaqui	Ltiti34	509953	8171090	Lago Menor	1.525	5.1
24	Bahía de Desaguadero	Ltiti35	496323	8169015	Lago Menor	1.321	4.4

Fuente: Adaptado de (ALT, 2014). El estándar de calidad de agua para consumo humano según (NB-512, 2004) es < 0.3 mg/L.

La Tabla 1 presenta la distribución espacial de las concentraciones de boro en 24 puntos de muestreo del sector boliviano del Lago Titicaca, diferenciando entre el Lago Mayor y el Lago Menor, e incluyendo el factor de excedencia respecto al valor normativo establecido por la NB-512 (0.3 mg/L). Los datos provienen de monitoreos institucionales reportados por la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT, 2014), lo que otorga consistencia y respaldo técnico al conjunto de observaciones.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, las concentraciones de boro presentan un rango aproximado entre 0.248 mg/L y 1.647 mg/L, lo que evidencia una marcada heterogeneidad espacial del contaminante dentro del sistema lacustre. Esta variabilidad sugiere la coexistencia de zonas relativamente menos impactadas (valores cercanos o inferiores a 0.8 mg/L) y sectores con elevada carga de boro, particularmente en el Lago Menor, donde se registran los valores más altos.

El factor de excedencia confirma que todos los puntos de muestreo superan el límite permisible establecido por la NB-512, alcanzando valores de hasta 5.5 veces el umbral normativo. Este comportamiento evidencia una condición generalizada de no conformidad respecto a la calidad del agua destinada al consumo humano, constituyendo un indicador crítico de riesgo ambiental y sanitario.

En términos espaciales, se identifica una tendencia de mayores concentraciones y mayores factores de excedencia en el Lago Menor en comparación con el Lago Mayor. Esta diferenciación sugiere que el sistema no presenta un comportamiento homogéneo, sino que responde a dinámicas locales asociadas a condiciones hidrodinámicas diferenciadas, procesos de mezcla y posibles aportes puntuales de origen natural y/o antropogénico.

En conjunto, la Tabla 1 evidencia un problema estructural de calidad de agua asociado al boro, donde la totalidad de los puntos evaluados incumple el estándar normativo vigente. Este resultado justifica la necesidad de implementar tecnologías de remediación avanzada, como la ósmosis inversa, así como estudios complementarios de transporte de contaminantes y modelación geoestadística para la identificación de fuentes y rutas de dispersión.

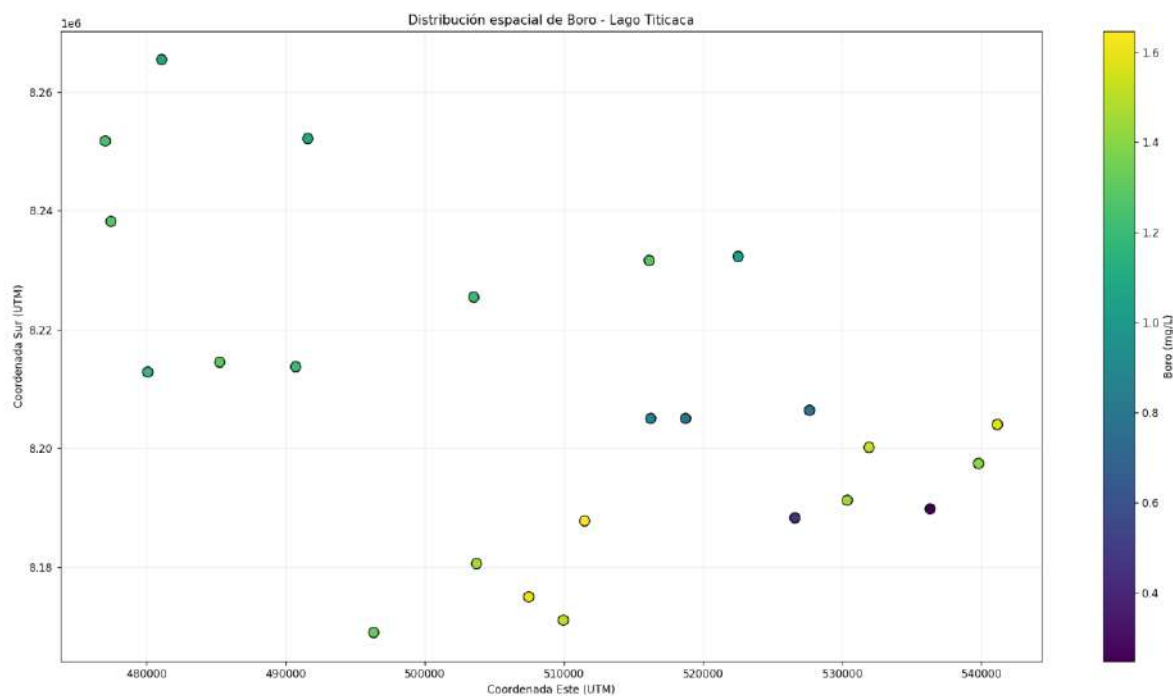


Figura 1. Distribución espacial de concentraciones de boro (mg/L).

La Figura 1 evidencia una distribución espacial heterogénea de las concentraciones de boro en el sistema del Lago Titicaca, con valores que oscilan entre 0.248 y 1.647 mg/L. El análisis espacial sugiere la presencia de gradientes geoquímicos diferenciados entre el Lago Mayor y el Lago Menor, reflejados en la variabilidad intra-sistema del contaminante.

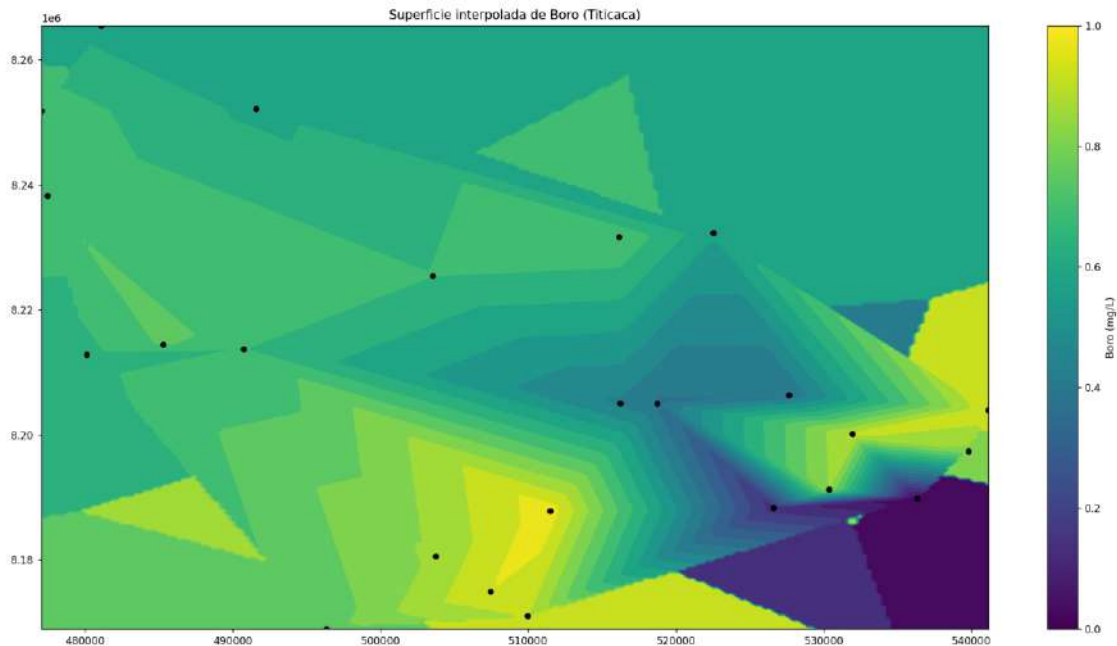


Figura 2. Interpolación espacial de boro.

La Figura 2 presenta una superficie interpolada de la distribución espacial del boro mediante métodos de estimación espacial. Se identifican zonas de posible acumulación del contaminante, especialmente en el sector sur del Lago Menor. No obstante, estos patrones deben interpretarse con cautela debido a la incertidumbre inherente a la interpolación en áreas con baja densidad de muestreo.

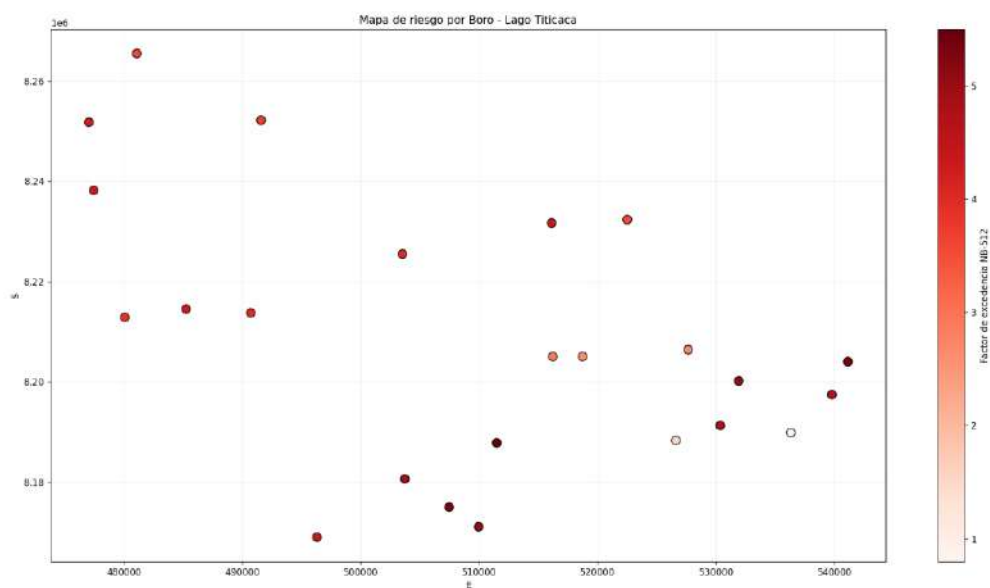


Figura 3. Factor de excedencia respecto a la NB-512.

La Figura 3 evidencia que todos los puntos analizados superan el valor guía establecido por la NB-512 (0.3 mg/L), con factores de excedencia entre 0.8 y 5.5. Este resultado confirma una condición generalizada de no conformidad normativa en el sistema lacustre, con mayor severidad en el Lago Menor.

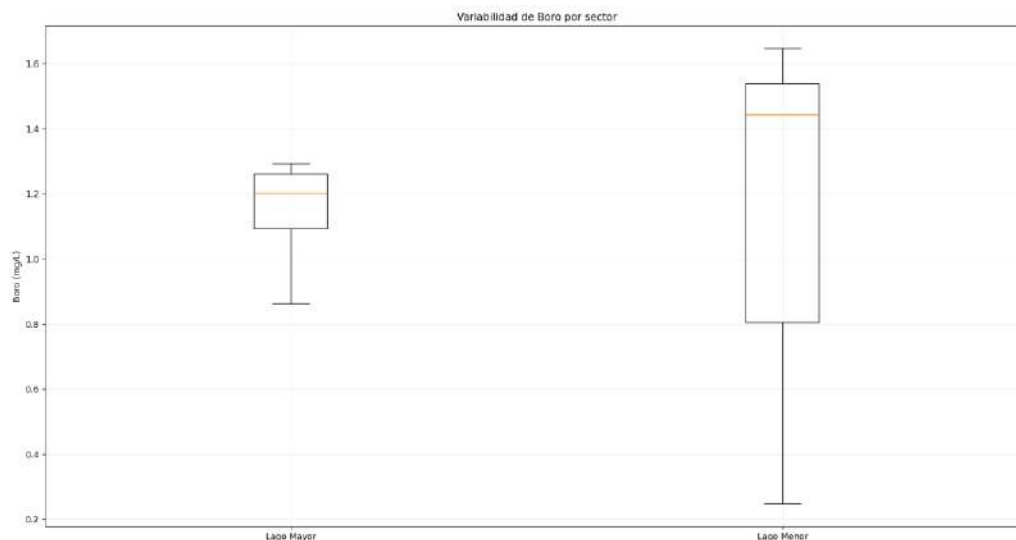


Figura 4. Comparación estadística entre Lago Mayor y Lago Menor.

La Figura 4 muestra la distribución estadística de las concentraciones de boro según sector lacustre. Se observa una mayor dispersión en el Lago Menor, con valores máximos significativamente superiores respecto al Lago Mayor. Esta diferencia sugiere una marcada heterogeneidad espacial asociada a procesos locales de contaminación y a condiciones hidrodinámicas diferenciadas entre ambos cuerpos de agua.

2. Fundamentos de la remoción de boro mediante ósmosis inversa

El rechazo de boro en procesos de ósmosis inversa mediante membranas de poliamida de tipo película delgada (TFC, thin-film composite) está controlado principalmente por el equilibrio ácido–base del sistema $B(OH)_3/B(OH)_4^-$ en solución acuosa, cuyo pKa es aproximadamente 9.23 a 25 °C (Hilal et al., 2011; Ruiz-García & Nuez, 2021). Este equilibrio determina la especiación del boro en función del pH, la cual varía de manera continua sin transiciones abruptas entre sus formas químicas.

En condiciones de pH inferiores al pKa, predomina la especie neutra $B(OH)_3$, caracterizada por ausencia de carga eléctrica y un reducido tamaño hidrodinámico ($\sim 1.6 \text{ \AA}$

de radio hidratado). Estas propiedades favorecen su transporte a través de la capa activa de la membrana mediante el mecanismo de solución–difusión, lo que limita significativamente su rechazo en sistemas convencionales de ósmosis inversa (Hyung & Kim, 2006; Najid et al., 2021).

A medida que el pH aumenta por encima del valor de equilibrio, la especie $B(OH)_4^-$ se vuelve progresivamente dominante. Esta forma iónica presenta mayor hidratación y carga negativa, lo que incrementa su interacción con la superficie de la membrana y favorece mecanismos de rechazo basados en la exclusión electrostática (efecto Donnan) y la exclusión estérica. La eficiencia de estos mecanismos depende, además, de la carga superficial de la membrana, la fuerza iónica del medio y la composición catiónica del agua tratada (Bao et al., 2021; Ruiz-García & Nuez, 2021).

En sistemas naturales complejos como el Lago Titicaca, la eficiencia de remoción de boro está fuertemente condicionada por la heterogeneidad de la matriz hidrogeoquímica. La presencia de iones competitivos, junto con variaciones en la fuerza iónica, puede alterar significativamente la interacción entre el soluto y la membrana, modificando el comportamiento de transporte y reduciendo el desempeño global del proceso de ósmosis inversa.

3. Avances tecnológicos

El desempeño de la ósmosis inversa para la remoción de boro ha evolucionado significativamente hacia enfoques basados en nanotecnología, modificación de superficies y control electroquímico avanzado. En la Tabla 2 se presenta una síntesis comparativa de tecnologías relevantes reportadas en la literatura.

El desarrollo tecnológico para la remoción de boro ha transitado desde sistemas convencionales de ósmosis inversa hacia configuraciones híbridas que integran mecanismos electroquímicos, modificaciones funcionales de membranas y procesos avanzados de separación. En este contexto, las tecnologías reportadas entre 1993 y 2025 pueden agruparse en tres categorías principales: (i) procesos de separación por membrana, (ii) membranas modificadas funcionalmente y (iii) sistemas híbridos electroquímico–membrana.

Los sistemas convencionales de ósmosis inversa, como SWRO y BWRO, han demostrado eficiencias de remoción entre 90% y 95% bajo condiciones alcalinas ($pH \approx 10$ –

10.5), donde la especiación del boro favorece la formación de la especie borato y su consecuente rechazo por mecanismos electrostáticos. No obstante, su desempeño se encuentra limitado por la fuerte dependencia del pH y por la composición iónica del agua de alimentación (Ruiz-García & Nuez, 2021; Yavuz et al., 2013).

Tabla 2. Comparación de tecnologías de remoción de boro y su eficiencia reportada

Autor(es)	Tecnología	Membrana/Medio	pH Operacional	% Remoción	Hallazgos clave
Shocron et al. (2023)	EARO	Electrodo de carbono conductivo	>10 (local)	58.3–93.8%	Generación de pH alcalino localizado mediante electrólisis interfacial, reduciendo necesidad de ajuste químico global
Li et al. (2020)	OI (SES)	TFC + NBS funcional plug	8.0	82.1–93.1%	Incorporación de estructuras moleculares en matriz de poliamida reduce defectos sub-nanométricos
Alkhudhiri et al. (2020)	MD	PTFE (0.2 µm)	3.0–11	99.2–100%	Alta eficiencia independiente del pH; limitada por consumo energético térmico
Zhang et al. (2024)	EC	Electrodos Fe–Al	9.0	84.0 ± 1.5%	Remoción basada en formación de flóculos metálicos con adsorción de borato
Yavuz et al. (2013)	BWRO	BW30-2540	10.5	95.0%	Alto rechazo a pH alcalino; adecuado para aplicaciones de riego bajo estándares de calidad
Ruiz-García (2021)	SWRO	TM820L-440	7.0	90.0–92.0%	Desempeño dependiente de permeabilidad intrínseca de membrana y fuerza iónica del feed

Fuente: Elaboración propia a partir de una revisión sistemática de la literatura. Los estudios analizados corresponden al periodo 1993–2025.

En contraste, las tecnologías emergentes, como la evaporación asistida por reacción electroquímica (EARO), introducen la posibilidad de generar gradientes de pH localizados en la interfaz membrana–solución, incrementando la selectividad del rechazo sin requerir la modificación del pH del volumen total del sistema. Este enfoque reduce el consumo de reactivos químicos asociados a la alcalinización global del agua tratada (Bao et al., 2021; Shocron et al., 2023).

Por otro lado, la tecnología de separación estructural (SES) incorpora estructuras moleculares funcionales dentro de la matriz de poliamida, permitiendo el sellado de defectos sub-nanométricos y reduciendo rutas de permeación no selectiva. Como resultado, se mejora el rechazo de especies de bajo peso molecular, incluyendo el ácido bórico (Li et al.,

2020). Sin embargo, su estabilidad operativa a largo plazo y su desempeño bajo condiciones reales de agua natural aún requieren validación adicional.

En el ámbito de los nuevos materiales de membrana, se han desarrollado membranas de película delgada compuesta (TFC) incorporando nanomateriales bidimensionales (2D), como nanhojas de nitruro de boro (BNNS) y nanofibras de aramida (ANF) (Ma et al., 2025). Estos materiales híbridos mejoran la resistencia mecánica y permiten la formación de canales de transporte molecular sintonizables, optimizando el equilibrio entre permeabilidad y selectividad.

Asimismo, el modelado y control mediante inteligencia artificial ha emergido como una herramienta clave en la optimización del proceso. El uso de redes neuronales artificiales (ANN) y técnicas de machine learning permite predecir en tiempo real el comportamiento del coeficiente de permeabilidad del boro en función de las condiciones operativas (Ajali-Hernández et al., 2024). Estos modelos dinámicos facilitan la optimización del proceso y contribuyen a garantizar que la calidad del permeado cumpla con los estándares de agua potable.

Finalmente, los procesos de destilación por membrana (MD) presentan la ventaja de alcanzar eficiencias de remoción cercanas al 100%, independientemente del pH, debido a su mecanismo basado en la volatilización térmica. Sin embargo, su aplicación a gran escala se ve limitada por sus elevados requerimientos energéticos, lo que condiciona su viabilidad económica en comparación con tecnologías de presión como la ósmosis inversa (Alkhudhiri et al., 2020).

4. Factores que influyen en la eficiencia de remoción de boro

El desempeño de los sistemas de ósmosis inversa para la remoción de boro está controlado por un conjunto de variables fisicoquímicas y operacionales que interactúan de manera acoplada, influyendo simultáneamente en los mecanismos de transporte a través de la membrana y en la especiación del soluto en solución.

El pH constituye una de las variables más determinantes debido a su efecto directo sobre el equilibrio ácido-base del sistema $B(OH)_3/B(OH)_4^-$. A medida que el pH supera el valor de pK_a (~9.23), se favorece la formación de especies cargadas, lo que incrementa el rechazo mediante mecanismos de exclusión electrostática. No obstante, este efecto

también depende de la fuerza iónica del medio, la carga superficial de la membrana y la composición del agua de alimentación (Agashichev & Osman, 2016; Yavuz et al., 2013).

La temperatura influye principalmente a través del aumento de la difusividad del soluto y la disminución de la viscosidad del agua, lo que puede reducir el rechazo neto de boro. Este efecto no es estrictamente lineal, ya que también modifica la estructura de la membrana y los coeficientes de transferencia de masa, afectando el desempeño global del proceso (Escarabajal-Henarejos et al., 2021; Ruiz-García & Nuez, 2021).

La presión operativa incrementa el flujo de permeado y puede mejorar el rechazo aparente del boro bajo ciertas condiciones. Sin embargo, también puede intensificar la polarización por concentración, generando gradientes locales en la superficie de la membrana que reducen la selectividad del sistema (Prats et al., 2000; Ruiz-García & Nuez, 2021).

Desde una perspectiva integral, los parámetros operativos como la presión de alimentación, el flujo de permeado y la temperatura del agua influyen directamente en los coeficientes de permeabilidad del sistema (Ajali-Hernández et al., 2024). Asimismo, la química del agua, especialmente el pH, resulta crítica, ya que las variaciones en la acidez o alcalinidad afectan tanto la carga superficial de la membrana como el estado de especiación del boro.

Las propiedades intrínsecas de la membrana también juegan un papel fundamental. El espesor de la capa selectiva, la rugosidad superficial y el potencial zeta determinan la capacidad de rechazo del sistema (Ma et al., 2025). Adicionalmente, fenómenos como la compactación de la membrana bajo altas presiones pueden reducir progresivamente su permeabilidad, afectando el rendimiento a largo plazo.

Finalmente, el ensuciamiento de membranas (fouling), tanto orgánico como inorgánico y biológico, altera las propiedades superficiales de la membrana, modificando su carga efectiva y reduciendo la permeabilidad hidráulica. Este fenómeno puede incrementar la permeación de especies neutras como el ácido bórico, afectando negativamente la eficiencia global del proceso (Huertas et al., 2008; Mane et al., 2009).

5. Perspectivas de aplicación en Bolivia

La implementación de sistemas de ósmosis inversa para la remoción de boro en el Lago Titicaca presenta desafíos técnicos relevantes, asociados principalmente a la alta

dureza del agua y a las complejas condiciones hidrogeoquímicas del sistema. Según la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT, 2014), la dureza del agua en el lago oscila entre 300 y 370 mg/L como CaCO_3 , lo que incrementa significativamente el riesgo de incrustaciones inorgánicas (scaling), especialmente de carbonatos y sulfatos, bajo condiciones de operación alcalina (Hasson et al., 2011).

En este contexto, la operación a pH elevados, necesaria para maximizar la conversión de ácido bórico a borato y mejorar su rechazo, puede inducir simultáneamente procesos de precipitación en la superficie de la membrana, afectando la permeabilidad y reduciendo la vida útil del sistema. Por esta razón, la implementación de esquemas de tratamiento multietapa se plantea como una alternativa técnicamente más viable.

Una estrategia potencial consiste en un sistema de doble paso, en el cual una primera etapa opera a pH natural para reducir parcialmente la dureza y estabilizar la matriz iónica del agua, seguida de una segunda etapa operada en condiciones alcalinas controladas (pH $\approx$ 10), con el objetivo de optimizar la especiación del boro y mejorar su rechazo en la membrana (Nir et al., 2013; Xu et al., 2010). No obstante, esta configuración requiere una evaluación integral del consumo de reactivos químicos, el balance de masas y la eficiencia global del sistema.

Desde el punto de vista energético, la integración de sistemas fotovoltaicos con ósmosis inversa (PV-RO) representa una alternativa especialmente pertinente para regiones de alta irradiación solar como el altiplano boliviano. Sin embargo, su viabilidad técnica depende de factores como el consumo específico de energía, la variabilidad de la radiación solar y la necesidad de sistemas de almacenamiento o esquemas de operación intermitente (Najid et al., 2021; Ruiz-García & Nuez, 2021).

En términos más amplios, la implementación de sistemas de ósmosis inversa en la región del Titicaca se enmarca dentro del nexo agua–energía, donde el tratamiento de agua mediante membranas presenta una alta demanda energética (Magni et al., 2025). En regiones como América Latina, donde persisten brechas en el acceso a servicios de agua gestionada de forma segura, la eficiencia energética se convierte en un criterio crítico de sostenibilidad tecnológica.

Las perspectivas futuras de aplicación en el Lago Titicaca sugieren que la implementación de ósmosis inversa podría fortalecerse mediante: (i) optimización energética, mediante el uso de modelos predictivos basados en redes neuronales artificiales

(ANN) para operar los sistemas en condiciones óptimas y reducir costos operativos (Ajali-Hernández et al., 2024); (ii) nuevas configuraciones de planta, orientadas a la transición hacia tecnologías de membrana más eficientes frente a alternativas térmicas convencionales (Magni et al., 2025); y (iii) sostenibilidad energética, mediante la integración de fuentes renovables para alimentar los sistemas de tratamiento y reducir su huella ambiental.

Finalmente, los pretratamientos mediante electrocoagulación o procesos de precipitación mineral, como la formación de etringita, pueden contribuir a la reducción de la dureza y de la carga contaminante inicial del agua. Sin embargo, su implementación debe evaluarse cuidadosamente considerando la generación de lodos, los costos operativos y su compatibilidad con sistemas de membrana a escala real (Tagliabue et al., 2025; Zhang et al., 2024).

Conclusiones

La presencia de boro en la cuenca del Lago Titicaca representa un desafío significativo para la gestión de la calidad del agua destinada tanto al consumo humano como a la actividad agrícola en el altiplano boliviano (ALT, 2014; Soto-Ramírez et al., 2025). Los resultados analizados en este estudio evidencian que los sistemas convencionales de ósmosis inversa de un solo paso presentan limitaciones en condiciones de pH neutro, debido a la predominancia de la especie molecular $B(OH)_3$, la cual exhibe una baja tasa de rechazo en membranas de poliamida.

En contraste, los avances recientes en tecnologías de membrana, incluyendo modificaciones estructurales a escala nanométrica y sistemas de generación de pH local como la evaporación asistida por reacción electroquímica (EARO), sugieren mejoras potenciales en la eficiencia de remoción de boro. Estas innovaciones permiten reducir la dependencia de la alcalinización global del sistema y, en consecuencia, disminuir el consumo de reactivos químicos (Li et al., 2020; Shocron et al., 2023). Sin embargo, dichas tecnologías aún requieren validación adicional bajo condiciones reales de matrices hidrogeoquímicas complejas, como las presentes en el Lago Titicaca.

Para el contexto boliviano, los resultados de este análisis indican que las configuraciones de tratamiento multietapa acopladas a sistemas de energía solar

fotovoltaica podrían constituir una alternativa técnicamente viable para mejorar la remoción de boro y cumplir con los límites establecidos por la norma NB-512. No obstante, su desempeño debe evaluarse de manera integral considerando criterios de eficiencia energética, estabilidad operativa, costo de ciclo de vida y escalabilidad regional (Najid et al., 2021; Ruiz-García & Nuez, 2021).

En conjunto, la remoción de boro mediante ósmosis inversa se perfila como una solución tecnológica robusta, aunque condicionada por la adecuada optimización del pH, la gestión de la dureza del agua y la integración de estrategias híbridas de tratamiento que permitan garantizar su viabilidad técnica y sostenibilidad en sistemas naturales complejos como el Lago Titicaca.

Referencias

Agashichev, S., & Osman, E. (2016). Low pressure RO for boron elimination: impact of pH on the degree of rejection of boron and monovalent ions. *Desalination and Water Treatment*, 57(10), 4701–4707. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.995138>

Ajali-Hernández, N. I., Ruiz-García, A., & Travieso-González, C. M. (2024). ANN based-model for estimating the boron permeability coefficient as boric acid in SWRO desalination plants using ensemble-based machine learning. *Desalination*, 573. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2023.117180>

Alkhudhiri, A., Darwish, N. Bin, Hakami, M. W., Abdullah, A., Alsadun, A., & Homod, H. A. (2020). Boron removal by membrane distillation: A comparison study. *Membranes*, 10(10), 1–15. <https://doi.org/10.3390/membranes10100263>

ALT. (2014). *Evaluación de la calidad del agua del Lago Titicaca Perú - Bolivia (Informe de monitoreo mes de marzo 2014)*.

Bao, X., Long, W., Liu, H., & She, Q. (2021). Boron and salt ion transport in electrically assisted reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, 637. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119639>

Escarabajal-Henarejos, D., Parras-Burgos, D., Ávila-Dávila, L., Cánovas-Rodríguez, F. J., & Molina-Martínez, J. M. (2021). Study of the influence of temperature on boron concentration estimation in desalinated seawater for agricultural irrigation. *Water (Switzerland)*, 13(3), 1–10. <https://doi.org/10.3390/w13030322>

Güler, E., Kaya, C., Kabay, N., & Arda, M. (2015). Boron removal from seawater: State-of-the-art review. In *Desalination* (Vol. 356, pp. 85–93). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.009>

Hasson, D., Shemer, H., Brook, I., Zaslavski, I., Semiat, R., Bartels, C., & Wilf, M. (2011). Scaling propensity of seawater in RO boron removal processes. *Journal of Membrane Science*, 384(1–2), 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.09.027>

Hilal, N., Kim, G. J., & Somerfield, C. (2011). Boron removal from saline water: A comprehensive review. In *Desalination* (Vol. 273, Number 1, pp. 23–35). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.012>

Huertas, E., Herzberg, M., Oron, G., Elimelech, M., & Xxiii, J. (2008). Influence of biofouling on boron removal by nanofiltration and reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 318, 264–270. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.02.053>

Hyung, H., & Kim, J. H. (2006). A mechanistic study on boron rejection by sea water reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 286(1–2), 269–278. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2006.09.043>

Li, Y., Wang, S., Song, X., Zhou, Y., Shen, H., Cao, X., Zhang, P., & Gao, C. (2020). High boron removal polyamide reverse osmosis membranes by swelling induced embedding of a sulfonyl molecular plug. *Journal of Membrane Science*, 597. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117716>

Ma, Y., You, Y., Wang, L., Yang, G., Qin, S., Su, Y., Singh, M., Lu, J., Liu, D., & Lei, W. (2025). ANF/BN thin-film composite membranes for efficient organic solvent nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 735. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2025.124540>

Magni, M., Jones, E. R., Bierkens, M. F. P., & van Vliet, M. T. H. (2025). Global energy consumption of water treatment technologies. *Water Research*, 277. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2025.123245>

Mane, P. P., Park, P. K., Hyung, H., Brown, J. C., & Kim, J. H. (2009). Modeling boron rejection in pilot- and full-scale reverse osmosis desalination processes. *Journal of Membrane Science*, 338(1–2), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.04.014>

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). *Four billion people facing severe water scarcity*. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>

Najid, N., Fellaou, S., Kouzbou, S., Gourich, B., & Ruiz-García, A. (2021). Energy and environmental issues of seawater reverse osmosis desalination considering boron rejection: A comprehensive review and a case study of exergy analysis. In *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 156, pp. 373–390). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.014>

NB-512. (2004). *Norma Boliviana NB 512 Agua Potable-Requisitos MINISTERIO DE SERVICIOS Y OBRAS PÚBLICAS VICEMINISTERIO DE SERVICIOS BÁSICOS*.

Nir, O., Herzberg, M., & Lahav, O. (2013). A new, energy-efficient approach for boron removal from SWRO plants. *Desalination and Water Treatment*, 51(7–9), 1651–1656. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.698801>

Prats, D., Chillon-Arias, M. F., & Rodriguez-Pastor, M. (2000). Analysis of the influence of pH and pressure on the elimination of boron in reverse osmosis. In *Desalination* (Vol. 128). www.elsevier.com/locate/desal

Princi, M. P., Lupini, A., Araniti, F., Longo, C., Mauceri, A., Sunseri, F., & Abenavoli, M. R. (2016). Boron Toxicity and Tolerance in Plants. *Plant Metal Interaction*, 115–147. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00005-9>

Ruiz-García, A., & Nuez, I. (2021). Performance evaluation and boron rejection in a SWRO system under variable operating conditions. *Computers and Chemical Engineering*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107441>

Shocron, A. N., Uwayid, R., Guyes, E. N., Dykstra, J. E., & Suss, M. E. (2023a). Order-of-magnitude enhancement in boron removal by membrane-free capacitive deionization. *Chemical Engineering Journal*, 466. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142722>

Shocron, A. N., Uwayid, R., Guyes, E. N., Dykstra, J. E., & Suss, M. E. (2023b). Order-of-magnitude enhancement in boron removal by membrane-free capacitive deionization. *Chemical Engineering Journal*, 466. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142722>

Soto-Ramírez, R., Barrientos, N., Videla, S., & Chamy, R. (2025). Improving irrigation water quality using a pilot algal treatment system: A case study from northern Chile. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101281>

Tagliabue, M., de Folly d'Auris, A., Pacini, A., Bellettato, M., Marra, G., Perucchini, S., Mazzara, C., Lagrotta, E., & Voccianti, M. (2025). Effect of Sulfoaluminate Clinker Addition on Boron Removal During Water Softening. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/app15168890>

Xu, J., Gao, X., Chen, G., Zou, L., & Gao, C. (2010). High performance boron removal from seawater by two-pass SWRO system with different membranes. *Water Supply*, 10(3), 327–336. <https://doi.org/10.2166/WS.2010.397>

Yavuz, E., Arar, Ö., Yüksel, M., Yüksel, Ü., & Kabay, N. (2013a). Removal of boron from geothermal water by RO system-II-effect of pH. *Desalination*, 310, 135–139. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.044>

Yavuz, E., Arar, Ö., Yüksel, M., Yüksel, Ü., & Kabay, N. (2013b). Removal of boron from geothermal water by RO system-II-effect of pH. *Desalination*, 310, 135–139. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.044>

Zhang, Y., Chen, X., Dong, M., Li, M., Wang, C., & Zhang, Y. (2024). Boron removal by iron-aluminum combined anodes from fracturing flowback fluid: Advantages and mechanisms. *Desalination and Water Treatment*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100127>

Conflicto de interés

El autor de este manuscrito declara no tener ningún conflicto de interés.

Declaración ética

El autor declara que el proceso de investigación que dio lugar al presente manuscrito se desarrolló siguiendo criterios éticos, por lo que fueron empleadas en forma racional y profesional las herramientas tecnológicas asociadas a la generación del conocimiento.

Copyright

La **Revista Latinoamericana de Difusión Científica** declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

