



## Resumen

El vertedero de Fajardo, Puerto Rico, presentó problemas de incumplimiento ambiental debido a las altas concentraciones de contaminantes en sus lixiviados, incluyendo cobre, surfactantes y metales pesados. Para solucionar esta situación, se diseñó, instaló y operó una planta de tratamiento basada en ósmosis inversa, que incorporó pretratamiento con floculantes y filtración con carbón activado y arena, seguido de una configuración en cascada de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa. Tras la implementación, los resultados de laboratorio mostraron una reducción significativa en los niveles de color, cobre y surfactantes, logrando cumplir con los estándares establecidos por la AAA. Además, el sistema de pretratamiento prolongó la vida útil de las membranas y optimizó la eficiencia del proceso. En conclusión, el proyecto demostró que la ósmosis inversa fue una solución efectiva, replicable y sostenible para la gestión de lixiviados en vertederos con alto impacto ambiental.

## Introducción

En Puerto Rico, la disposición de residuos sólidos depende en gran medida de los vertederos, debido a la limitada infraestructura de reciclaje y tratamiento disponible en la isla. No obstante, estos sitios generan lixiviados, líquidos altamente contaminantes que resultan del paso del agua a través de los residuos. El vertedero de Fajardo, que recibe anualmente grandes volúmenes de desechos, ha enfrentado serios incumplimientos con la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), particularmente en los niveles de contaminantes como cobre, zinc, níquel y color. En 2024, la AAA se negó a aceptar el lixiviado debido a estas concentraciones elevadas, lo que evidenció la urgente necesidad de implementar un sistema de tratamiento eficiente.

Ante este escenario, el proyecto propuso el diseño e instalación de una planta de tratamiento basada en ósmosis inversa, tecnología ampliamente respaldada por estudios científicos por su capacidad de remover contaminantes a nivel molecular. Este sistema incluye un pretratamiento con cloruro de polialuminio (PAC), así como filtración por arena y carbón activado, garantizando una mayor eficiencia y cumplimiento normativo.

Este proyecto tiene como objetivos:

- Cumplir con las regulaciones de la AAA**, enfocándose en parámetros críticos como el color y los metales pesados (cobre, níquel y zinc).
- Mejorar la sostenibilidad ambiental**, evitando la contaminación de cuerpos de agua y suelos circundantes.
- Optimizar la eficiencia operativa** del sistema de tratamiento para asegurar viabilidad económica y energética.
- Desarrollar un modelo escalable** que pueda ser replicado en otros vertederos de Puerto Rico que enfrenten problemáticas similares.

Esto representa una solución técnica y ambientalmente responsable para la gestión de lixiviados, alineada con los esfuerzos de conservación y sostenibilidad de la isla.

## Metodología

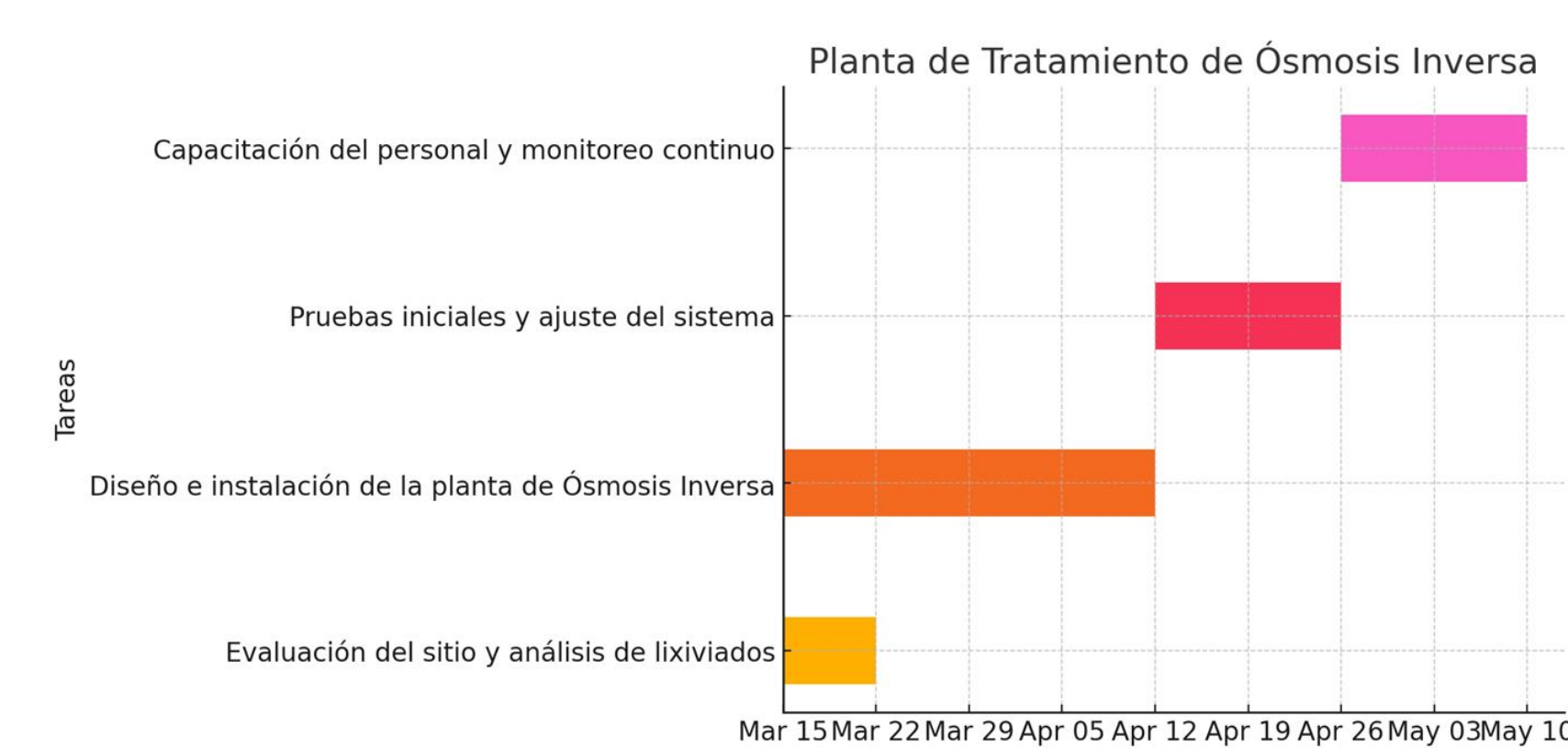


Figura 1  
Itinerario del proyecto

En primer lugar, se realizó una evaluación detallada del sitio para determinar el volumen y la composición del lixiviado, mediante la recolección y análisis de muestras de agua.

- Se diseñó la planta y se construyó por fases

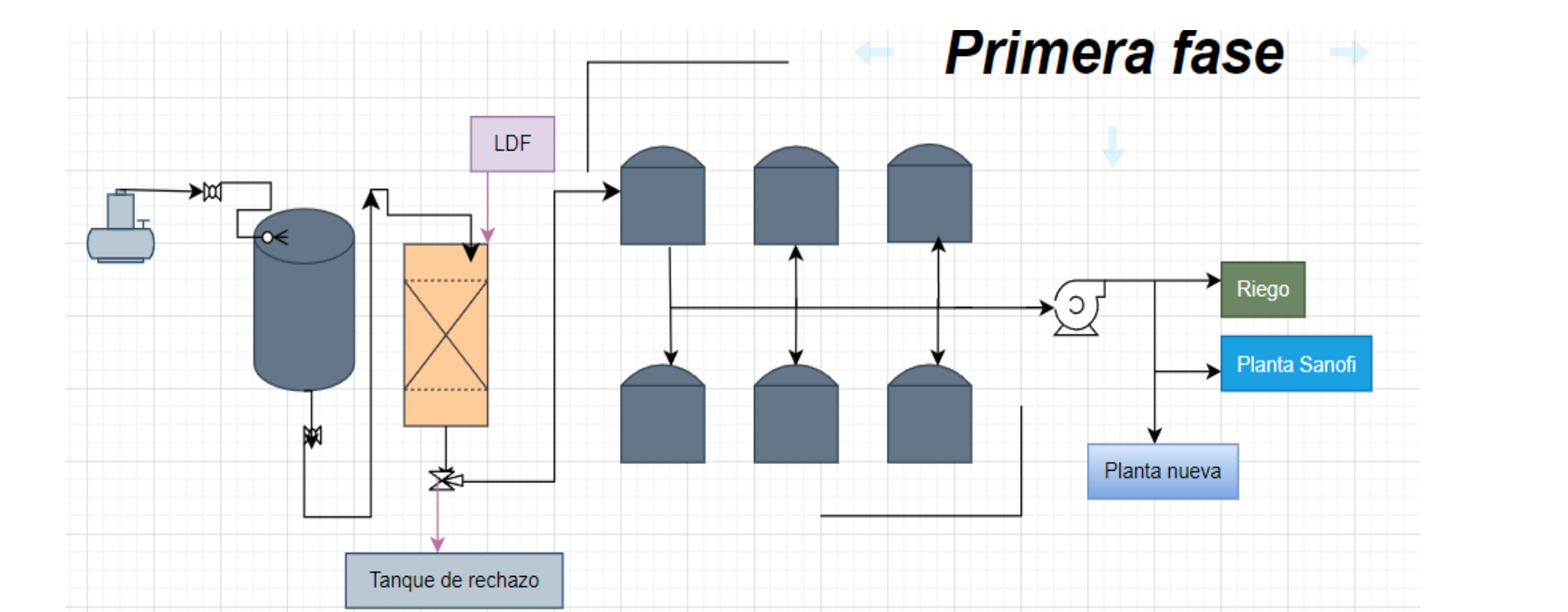


Figura 2  
Tanques externos

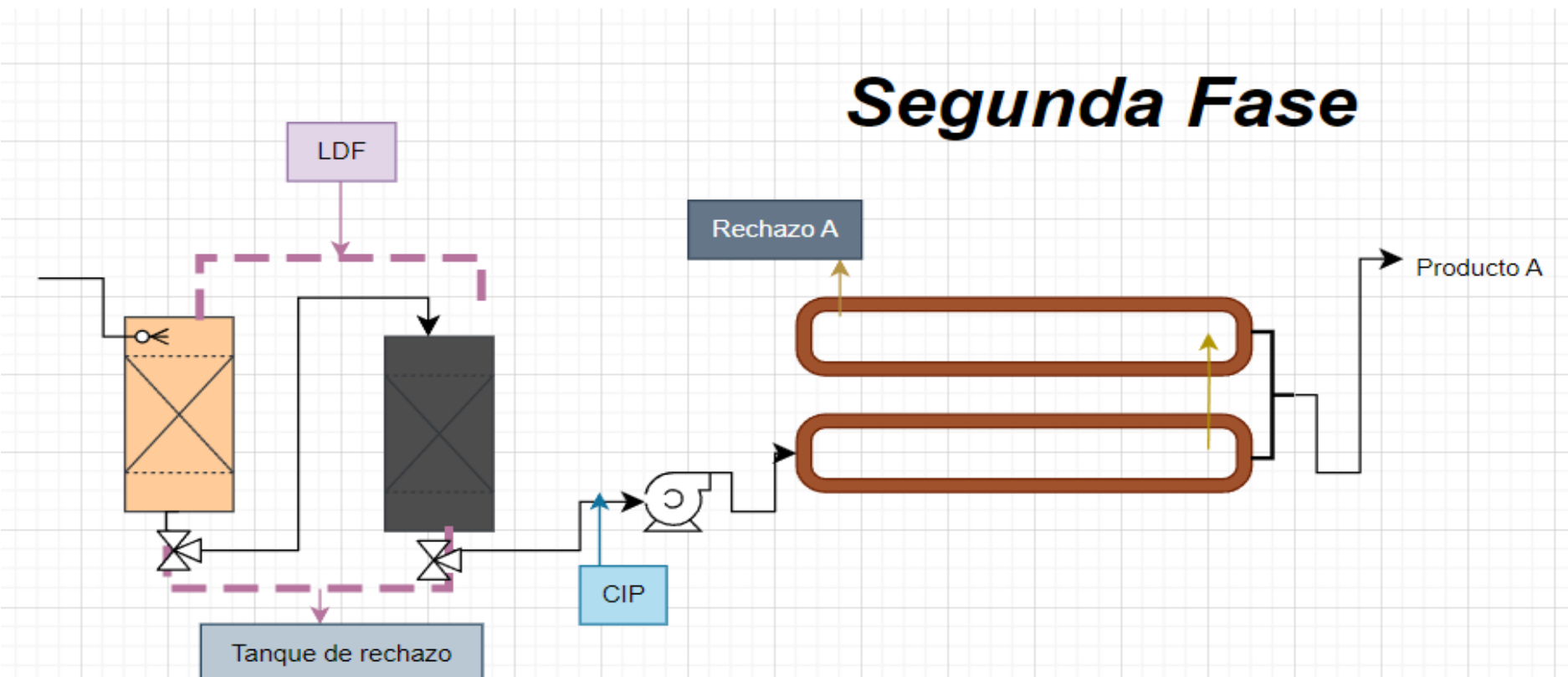


Figura 3  
Tren 1 Nanofiltración

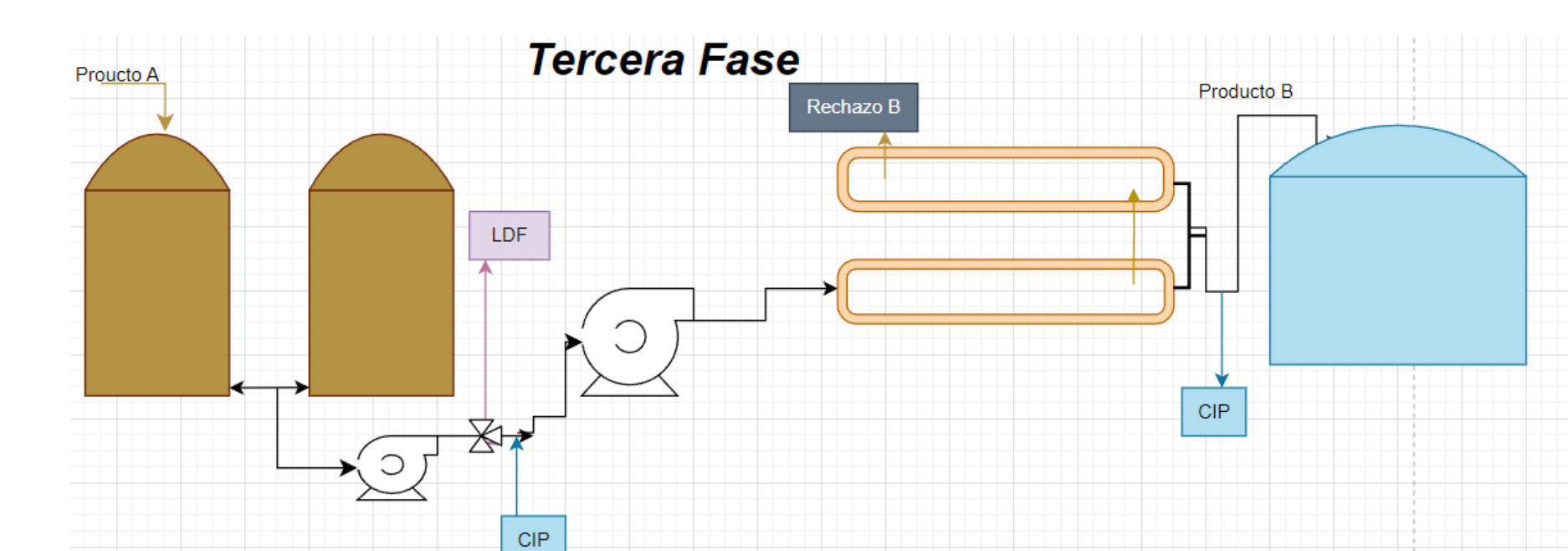


Figura 4  
Tren 2 osmosis inversa

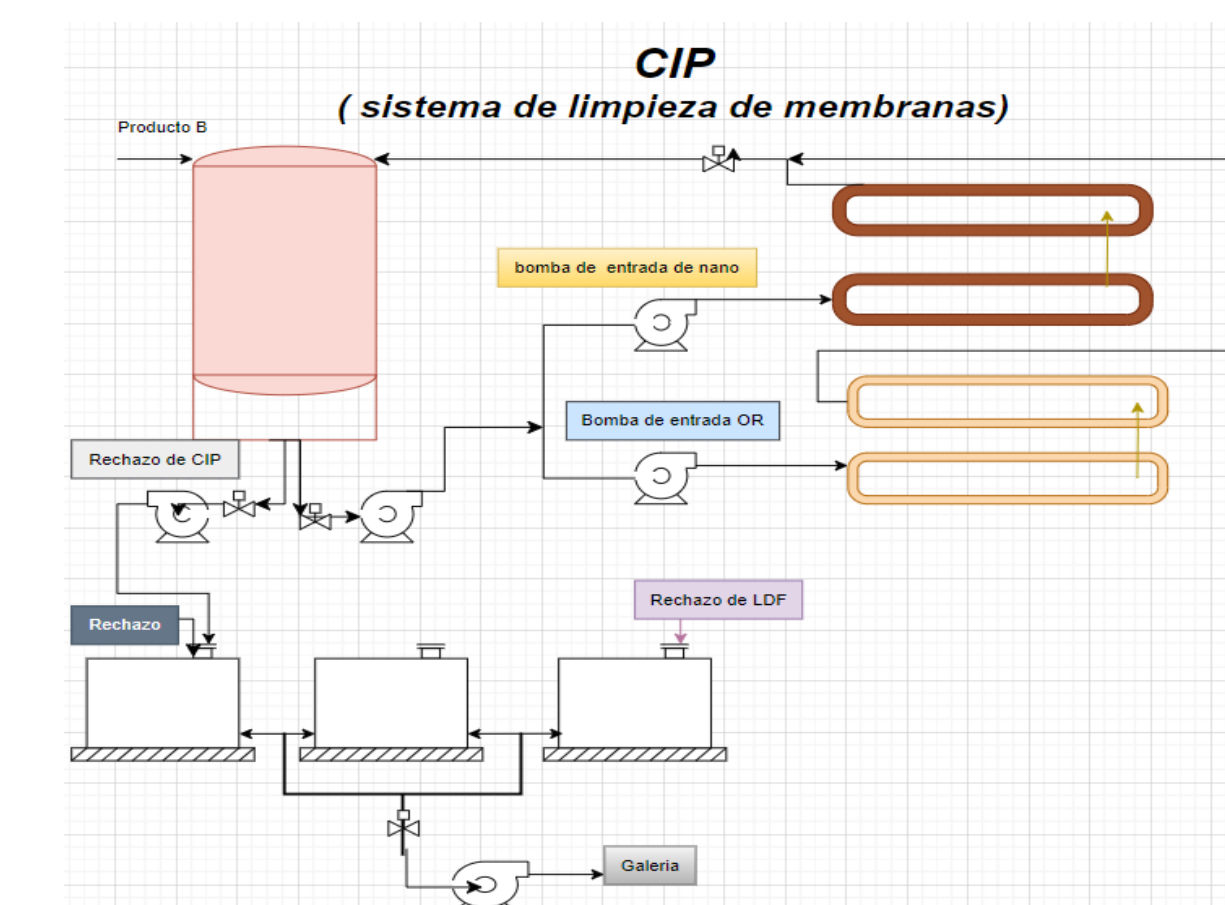


Figura 5  
Sistema de limpieza de membranas

## Resultados

La Figura 6 presenta una comparación entre los niveles de contaminantes registrados en el lixiviado del vertedero de Fajardo durante julio de 2024 y los resultados del muestreo realizado en 2025. Esta comparación evidenció una reducción significativa en los principales parámetros analizados tras la implementación del sistema de tratamiento por ósmosis inversa.

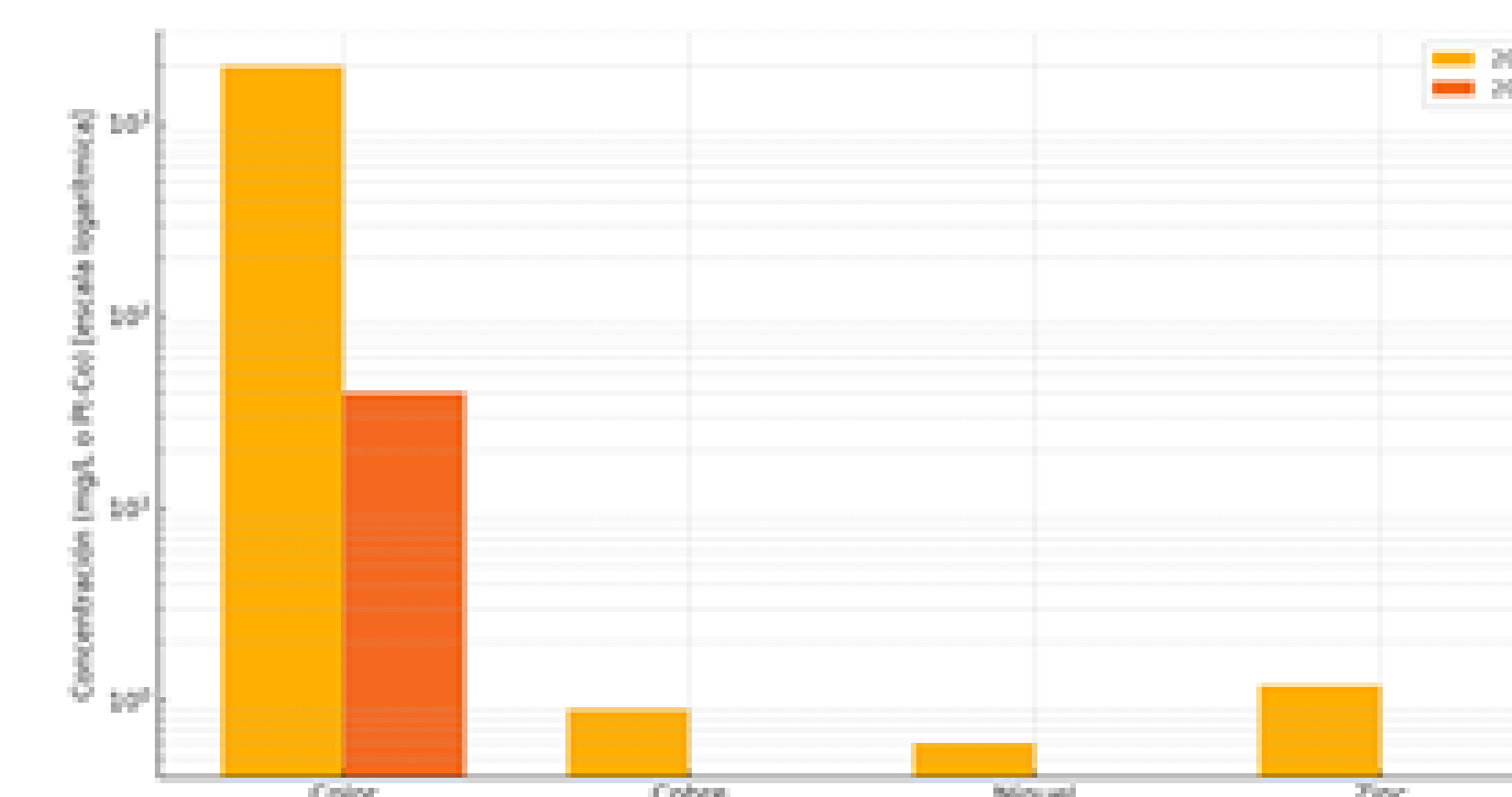


Figura 6  
Composición de contaminantes 2024 y 2025

El color, que en 2024 alcanzó un valor de 2000 Pt-Co, disminuyó a 40 Pt-Co en 2025, lo que representó una mejora del 98% en la calidad visual y química del agua.

La Figura 7 muestra la diferencia visual entre el lixiviado sin tratar, de apariencia oscura, y el efluente tratado mediante nanofiltración y ósmosis inversa, evidenciando la efectividad del sistema de tratamiento. Asimismo, los metales pesados como el cobre, níquel y zinc, que anteriormente se encontraban presentes en concentraciones detectables, no fueron reportados en el análisis más reciente, indicando que se encontraban por debajo del límite de detección.



Figura 7  
Comparación visual del Lixiviado crudo, Pretratado y Filtrado por Osmosis inversa

## Conclusiones

La planta de tratamiento mediante ósmosis inversa logró una eliminación significativa de los contaminantes presentes en el lixiviado. El sistema no solo cumplió con los estándares regulatorios, sino que también demostró ser una solución replicable y sostenible para otros vertederos en Puerto Rico.

- Se sobrepasaron los estándares de pureza de agua establecidos por la AAA** – llevando a los índices de contaminación: color 98% menos, concentración de cobre a 0% y metales pesados (Zinc y Níquel) 0%.
- Se Mejoró la Sostenibilidad Ambiental** – Minimizando el impacto ecológico de las operaciones del vertedero mediante la implementación de un sistema de tratamiento avanzado evitando la contaminación de los cuerpos de agua cercanos.
- Se Optimizó la Eficiencia Operativa** – al diseñar y optimizar la planta de tratamiento de OI para procesar eficientemente los lixiviados del vertedero al implementar un pretratamiento.
- Se Desarrolló un Modelo Escalable** – Ya que este sistema puede adaptarse para su uso en otros vertederos que enfrenten desafíos similares de incumplimiento en Puerto Rico y más allá.

## Agradecimientos

Agradecimientos al Dr. Héctor J. Cruzado por su asesoría, al personal técnico de Conwaste administradores del vertedero de Fajardo, además patrocinadores del proyecto, y a la Universidad Politécnica de Puerto Rico por la oportunidad de crecimiento.

## Referencias

- S. Renou et al., "Landfill leachate treatment: Review and opportunity," *J. Hazard. Mater.*, vol. 150, no. 3, pp. 468–493, 2008. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>
- P. Kjeldsen et al., "Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 4, pp. 297–336, 2002. Available: <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>
- H. A. Aziz et al., "Physico-chemical removal of COD, ammonia and heavy metals from landfill leachate using activated carbon, limestone and zeolite," *Bioresour. Technol.*, vol. 90, no. 1, pp. 71–79, 2004. Available: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00150-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00150-7)
- United States Environmental Protection Agency (EPA), *Leachate Treatment and Management*, Office of Research and Development, Rep. EPA600/r14140, 2014. Available: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/epa600r14140.pdf>
- G. Tchobanoglous, H. Theisen, and S. Vigil, *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1993.
- L. Yang, Q. Jin, and Z. Dang, "Application of polyaluminum chloride for treating leachate from municipal solid waste landfill: A review," *Desalin. Water Treat.*, vol. 52, no. 22–24, pp. 4045–4052, 2014. Available: <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.847041>
- RisingSun Membrane Technology Co., Ltd., *Technical Specifications for SG-RO1-8040, SG-NF3-8040 Membranes*. RisingSun Membranes, Available: <https://www.risingsunmembrane.com>