

Armando L. Márquez Fontánez  
 Consejero: Héctor J. Cruzado PhD, PE  
 Maestría en Ingeniería Gerencial  
 Graduate Project EXPO, Febrero 2026

## Abstracto

El manejo de aguas residuales hospitalarias representa un reto ambiental y de salud pública debido a la posible presencia de residuos farmacéuticos, contaminantes emergentes y microorganismos resistentes a antibióticos. En Puerto Rico, donde estas aguas son tratadas principalmente mediante sistemas convencionales, existe preocupación sobre la efectividad de las prácticas actuales de manejo y cumplimiento regulatorio. Este proyecto analizó el manejo de aguas residuales en el Hospital CDT de Juncos, Puerto Rico, con el objetivo de identificar brechas operacionales, técnicas y regulatorias, y proponer mejoras orientadas a reducir el impacto ambiental potencial. El estudio se desarrolló mediante la metodología DMAIC, utilizando un enfoque documental y comparativo. Se evaluaron diversas prácticas operacionales y se aplicó un Índice de Prioridad de Mejora (IPM) para jerarquizar las áreas de intervención según el impacto ambiental y el nivel de cumplimiento. Los resultados identificaron la capacitación del personal y el monitoreo de descargas como las áreas de mayor prioridad de mejora.

## Introducción

Las instalaciones hospitalarias generan aguas residuales con características distintas a las de origen residencial debido a la presencia de residuos farmacéuticos, agentes químicos, patógenos y otros contaminantes emergentes. En Puerto Rico, donde gran parte de las aguas residuales hospitalarias son descargadas al sistema de alcantarillado sanitario y tratadas en plantas de tratamiento convencionales, existe una preocupación creciente sobre la efectividad de los sistemas actuales para mitigar dichos riesgos. En un estudio reciente sobre la presencia de bacterias resistentes a antibióticos en aguas superficiales de Puerto Rico, se encontró que múltiples fuentes de contaminación contribuyen a la proliferación de estos microorganismos y sus efectos negativos en la salud pública [1]. Los autores también discuten que la eliminación inadecuada de medicamentos promueve la resistencia bacteriana en cuerpos de agua [1]. El objetivo del proyecto fue proponer mejoras que fortalezcan el cumplimiento regulatorio y reduzcan el impacto ambiental potencial. Para alcanzar este objetivo, se aplicó la metodología DMAIC como marco estructurado de análisis y mejora. Como caso de estudio se analizó el Hospital CDT de Juncos, una instalación de servicios de salud ubicada en el municipio de Juncos, Puerto Rico.

## Metodología

El proyecto se desarrolló utilizando la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), la cual se empleó como una herramienta estructurada para la identificación de problemas y la propuesta de mejoras en el manejo de aguas residuales del Hospital CDT de Juncos.

### Definir

Se estableció el problema principal del estudio, se delimitaron los objetivos y se definió el alcance del análisis, el cual se enfocó en aspectos operacionales, técnicos y regulatorios. Esta fase permitió contextualizar la situación actual del CDT dentro del marco ambiental y normativo de Puerto Rico.

### Medir

Se recopiló información relacionada con las prácticas actuales de manejo de aguas residuales en el CDT como prácticas de manejo de desechos y protocolos escritos, entre otros. Esta información se obtuvo mediante revisión documental y análisis comparativo con prácticas reportadas en otros hospitales. No se realizó muestreo directo de efluentes, ya que el estudio se diseñó como un análisis documental y de gestión.

### Analizar

La información recopilada fue evaluada para identificar brechas entre las prácticas actuales del CDT y las mejores prácticas reportadas en otras instituciones hospitalarias. Este análisis permitió priorizar áreas críticas en función del nivel de cumplimiento y el impacto ambiental potencial. Se recopiló información acerca de las prácticas operacionales por parte del personal del CDT de Juncos y de otros hospitales y se muestra la comparativa entre el nivel de cumplimiento y el impacto ambiental en la *Tabla 1* en donde se puede apreciar que la separación de residuos peligrosos, la capacitación del personal y el monitoreo de descargas presentan el nivel más alto de impacto ambiental.

Por otra parte, se pudo identificar que el CDT logra manejar los residuos farmacéuticos con el mayor nivel de cumplimiento. De igual modo se muestra la comparación entre nivel de cumplimiento y el impacto ambiental en la *Figura 1* en donde se puede apreciar la gran diferencia entre cuánto impacta ambientalmente el manejo de residuos farmacéuticos con relación al nivel de cumplimiento documentado.

Para priorizar las áreas de intervención, se calculó un Índice de Prioridad de Mejora (IPM) con la *Ecuación (1)*, la cual integra el impacto ambiental potencial y el nivel de cumplimiento de cada práctica operacional.

$$IPM = \text{Impacto} \times (4 - \text{CUMPLIMIENTO}) \quad (1)$$

Utilizando la *Ecuación (1)*, se obtuvieron resultados los cuales fueron colocados en la *Tabla 2* para realizar un “ranking” de prioridad más alta.

Tabla 1  
 Comparativa Entre Impacto Ambiental Y Nivel De Cumplimiento

Práctica Operacional	Situación Actual CDT Juncos	Mejor Práctica (Otros Hospitales)	Nivel de Cumplimiento (1-3)	Impacto Ambiental (1-3)
Manejo de residuos farmacéuticos	Recolección y tratamiento especializado	Recolección y tratamiento especializado	3	1
Descarga de líquidos clínicos	Sin pretratamiento	Neutralización previa	2	2
Separación de residuos peligrosos	Parcial	Separación total (RCRA)	2	3
Capacitación del personal	Ocasional	Entrenamiento anual documentado	1	3
Monitoreo de descargas	No documentado	Monitoreo periódico	1	3
Protocolos escritos (SOPs)	Limitados	SOPs actualizados	2	2

Prácticas de manejo entre CDT y otros hospitales tomando en consideración el nivel de cumplimiento y el impacto ambiental.

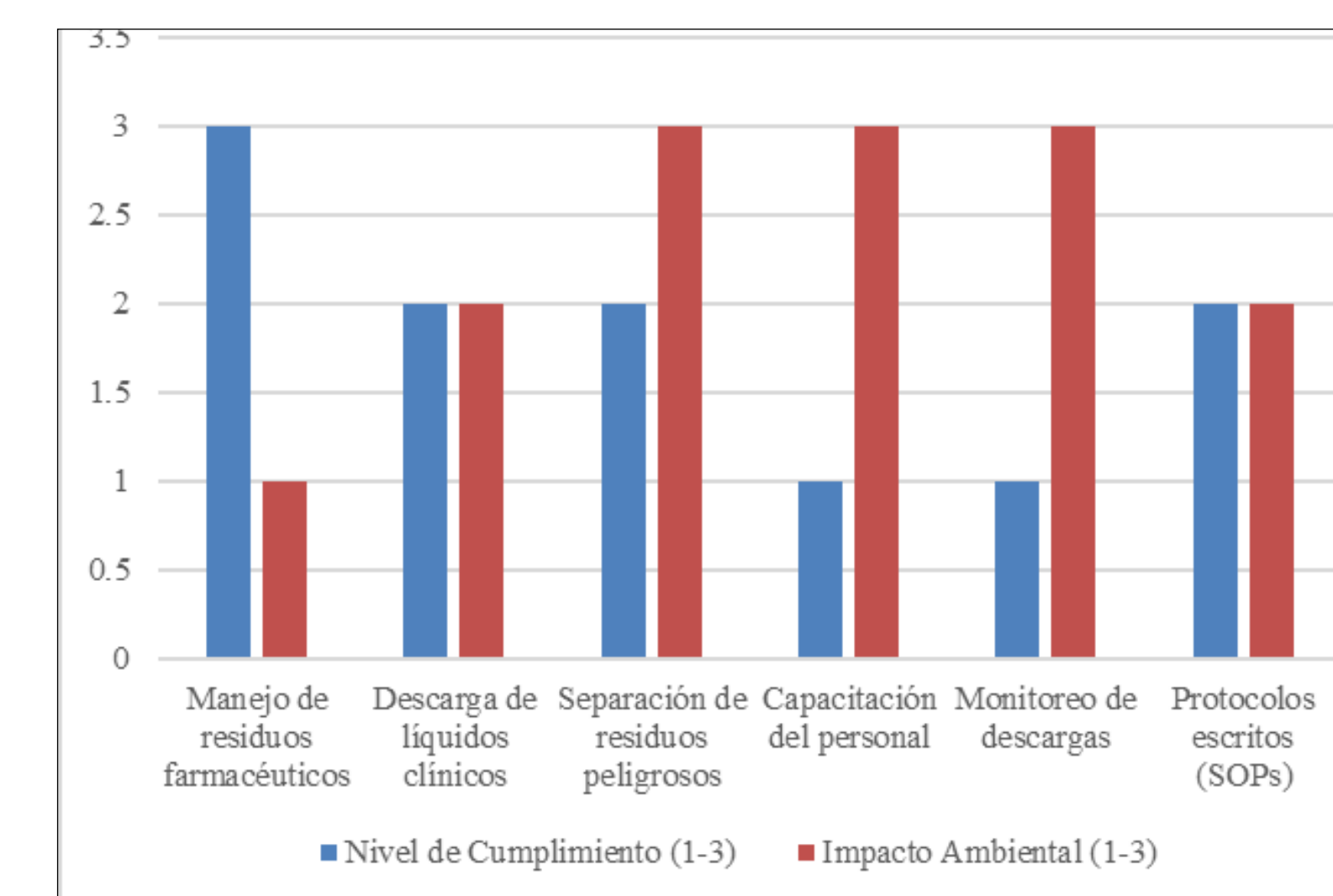


Figura 1  
 Nivel de Cumplimiento vs. Impacto Ambiental

Tabla 2  
 Ranking

Prácticas de Manejo	Puntuación
Capacitación del personal	9
Monitoreo de descargas	9
Separación de residuos peligrosos	6
Descarga de líquidos clínicos	4
SOPs	4
Residuos farmacéuticos	1

Puntuaciones obtenidas listadas en orden de prioridad.

## Mejorar y Controlar

Se formularon recomendaciones para mejorar el manejo de aguas residuales y para identificar mecanismos que faciliten el seguimiento y control de las prácticas propuestas, con el objetivo de fortalecer el cumplimiento regulatorio a largo plazo. Las recomendaciones fueron capacitar al personal para manejar los desechos de manera más productiva y eficiente, se recomendó tener un mejor monitoreo de las descargas realizadas y prestar mayor atención a la separación de residuos peligrosos.

## Conclusión

El análisis realizado permitió identificar deficiencias relevantes en las prácticas de manejo de aguas residuales del Hospital CDT de Juncos. La aplicación de la metodología DMAIC facilitó un enfoque estructurado para evaluar la situación actual, identificar brechas y priorizar acciones correctivas de manera objetiva. Asimismo, el uso del IPM permitió integrar variables ambientales y operacionales en un solo indicador cuantitativo, fortaleciendo el análisis y la justificación de las propuestas de mejora. Los resultados muestran que la capacitación del personal y el monitoreo de descargas presentan los valores de IPM más altos, indicando que estas prácticas representan las áreas de mayor riesgo ambiental y requieren atención inmediata. En contraste, el manejo de residuos farmacéuticos presentó el menor valor de IPM, reflejando un mayor nivel de cumplimiento.

Como trabajo futuro, se recomienda evaluar alternativas de tratamiento descentralizado de aguas residuales en instalaciones de salud que no cuenten con sistemas de pretratamiento, tales como la viabilidad técnica y regulatoria de sistemas sépticos u otras tecnologías complementarias, con el fin de mejorar el control de las descargas y reducir el impacto ambiental potencial.

## Referencias

- [1] N. Alonso Arocho. (May 31, 2023). "The unattended public health crisis: antibiotic resistant bacteria in Puerto Rico's surface waters and its possible negative effects on public health" (\*[IN]Genios – Revista de Investigación\*, vol. 9, no. 2, May 31, 2023). [Online]. <https://www.ingeniosupr.com/vol-9-nm-2/2023/5/31/the-unattended-public-health-crisis-antibiotic-resistant-bacteria-in-puerto-ricos-surface-waters-and-its-possible-negative-effects-on-public-health>
- [2] Y. Lin, M. Sevillano-Rivera, T. Jiang, G. Li, I. Cotto, S. Vosloo, C. M. Carpenter, P. Padilla, I. Y. Rosario-Pabón, C. V. Vega, J. F. Cordero, A. N. Alshawabkeh. (2020). "Impact of Hurricane Maria on drinking water quality in Puerto Rico" (\*Environmental Science & Technology\*, vol. 54, no. 15, pp. 9495–9509, 2020). [Online]. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01655>
- [3] C. J. Rodríguez-Sierra, I. Mansilla-Rivera y J. F. Bauzá-Ortega. (2025). "Passive sampling of contaminants of emerging concern in a Caribbean urban estuary in Puerto Rico" (Marine Pollution Bulletin\*, vol. 213, 117674). [Online]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X25001493>
- [4] U.S. Environmental Protection Agency. (Dec 1, 2025) "National Primary Drinking Water Regulations (NPDWR)," U.S. EPA, Ground Water and Drinking Water. [Online]. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>