

**Prototipo de modelo de inteligencia artificial para mejorar la dosificación química en el
proceso de tratamientos de agua residuales de la industria textil.**

Jorge Andrés Marin Álvarez

Universidad Ean

Facultad de ingeniería, Ingeniería mecatrónica

Luisa Fernanda Carvajal Díaz

Bogota D.C, Colombia

2024

Tabla de contenido

- 1. Resumen.**
- 2. Introducción.**
- 3. Objetivos.**
- 4. Definición del problema.**
- 5. Justificación.**
- 6. Análisis de requerimientos.**
- 7. Marco teórico.**
- 8. Análisis de restricciones.**
- 9. Metodología para la selección y desarrollo de la solución.**
- 10. Análisis de costos.**
- 11. Resultados.**
- 12. Conclusiones.**
- 13. Referencias.**

Resumen

El objetivo del proyecto es crear un modelo de inteligencia artificial que contribuya a optimizar la dosificación de sustancias químicas en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, el concepto es utilizar información histórica sobre la calidad del agua y las condiciones de funcionamiento de la planta para entrenar un modelo capaz de realizar sugerencias exactas y ajustadas a las demandas particulares del agua en tiempo real. Con esto no solo lograra el facilitar la optimización del proceso también la reducción de costos y la disminución del impacto ambiental

Esta propuesta surge de la urgencia de vencer las restricciones de los métodos convencionales, que se apoyan en parámetros estables o en la experiencia de los operadores sin considerar las variaciones en las propiedades del agua. Este modelo tiene como objetivo utilizar de forma más inteligente los recursos, respetando de esta manera las normativas medioambientales vigentes, con el objetivo de avanzar hacia un tratamiento de aguas más sustentable.

El proyecto contempla la creación de un algoritmo potente y flexible, capaz de procesar grandes volúmenes de datos y adaptarse rápidamente a nuevas condiciones, además, incluirá una herramienta fácil de usar en Google Colab, para que los operadores puedan interactuar con el sistema de manera sencilla, los resultados del modelo se validaron usando datos reales, comparándolos con los métodos actuales, y se espera que las recomendaciones sean mucho más precisas y efectivas.

Este enfoque no solo busca hacer más eficientes las operaciones de tratamiento de aguas, sino también promover prácticas más responsables y sostenibles en el sector textil, ayudando a enfrentar los retos ambientales de hoy y del futuro.

Palabras clave: Tecnología, procesos, mejora, modelo, inteligencia artificial, tratamiento de aguas, químicos, dosificación.

1. Introducción

El tratamiento de aguas residuales es un proceso fundamental en la industria textil debido a la elevada carga de contaminantes que son generados por los procesos de teñido, lavado y terminado, la correcta dosificación de productos químicos tales como el coagulante, floculante, ácidos, polímeros, entre otros. Con el fin de asegurar la eficiencia del tratamiento de aguas es crucial minimizar el impacto ambiental y reducir costos operativos. No obstante, los métodos convencionales utilizados para calcular la dosificación química normalmente se basan en parámetros fijos estipulados por la empresa y las normas o en la experiencia del operador esto puede resultar en un proceso ineficiente debido a que parámetros de las aguas residuales varían mucho teniendo en cuenta factores como carga contaminante y volumen.

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo de un modelo de inteligencia artificial que sea capaz de optimizar la dosificación de química en tiempo real aprovechando el análisis de datos históricos y el aprendizaje automático, la inteligencia artificial aprenderá a formular y brindar información acerca de las cantidades de químicos a dosificar en función de las características específicas de las aguas residuales en cada momento. Con este enfoque se busca permitir mayor precisión en el proceso de tratamiento de aguas residuales, contribuyendo a un uso más eficiente de los recursos, una menor generación de residuos y una mejora en la calidad del efluente tratado.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un algoritmo de inteligencia artificial que sea competente al momento de mejorar la dosificación química en el proceso de tratamiento de aguas residuales.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las variables de entrada que sean claves en el proceso de tratamiento de agua residuales tales como parámetros de calidad del agua, condiciones operativas, dosis de química aplicada actualmente entre otros, con el fin recopilar un conjunto de datos que permita entrenar el modelo.
- Aplicar algoritmos de optimización que permitan determinar la combinación óptima de dosis de químicos para cada conjunto de condiciones, considerando restricciones operativas y económicas.
- Validar el modelo desarrollado utilizando datos reales de operación, comparando sus resultados con los obtenidos por métodos tradicionales de control y optimización en el tratamiento de aguas residuales.

3. Definición del problema

¿De qué manera se puede mejorar la dosificación de productos químicos en el tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de inteligencia artificial, para mejorar la eficiencia operativa y garantizar el cumplimiento normativo en comparación con los métodos actuales de tratamiento manual y convencional?

4. Justificación

El tratamiento de aguas residuales en la industria textil es un desafío crítico debido a la gran cantidad de contaminantes, como colorantes, detergentes y productos químicos, que generan los procesos de producción, la eficiencia del tratamiento depende en gran medida de la dosificación correcta de productos químicos, como coagulantes y floculantes, que permiten la eliminación adecuada de estos contaminantes.

No obstante, los métodos convencionales utilizados en la dosificación química suelen basarse en estimaciones por la parte operativa o parámetros predefinidos dados por normas de cumplimiento ambiental o por recomendación del proveedor que no siempre se ajustan a la variabilidad de los parámetros de calidad de agua en las aguas residuales. Esto puede generar diversas problemáticas tales como un mayor porcentaje de uso de productos químicos, un tratamiento de aguas residuales no efectivo, mayores costos operativos y un mayor impacto ambiental.

Incluir tecnologías como la inteligencia artificial para ayudar en el tratamiento de aguas residuales brinda una oportunidad innovadora y eficiente, la inteligencia artificial puede procesar bancos de datos de gran extensión y con ellos entrenarse a sí misma con el fin de aprender el ajustar la dosificación química teniendo en cuenta las características en tiempo real del agua que está en el tratamiento con esto no solo se busca mejorar la precisión del tratamiento sino que también, se busca reducir el desperdicio de productos químicos, minimizar los costos operativos por la alta dosificación química y asegurar el continuo cumplimiento de las normas ambientales.

Adicionalmente, el implementar un algoritmo que emplee la inteligencia artificial para optimizar de manera constante la dosificación química no solo favorece el aumento de la

eficiencia en la parte operativa también promueve la sostenibilidad ambiental al emplear los recursos de forma más efectiva. Es posible alcanzar un tratamiento de aguas más eficiente y menos perjudicial para el medio ambiente, minimizando así el efecto perjudicial en el medio ambiente. Con este método, se posibilita a las diferentes entidades que cuentan con plantas de tratamiento de agua residual ajustarse a las constantes modificaciones en las regulaciones ambientales que se vuelven cada vez más rigurosas y potenciar su competitividad en el mercado.

5. Análisis de requerimientos.

Intención del producto.

El objetivo del proyecto es el desarrollo de un algoritmo de inteligencia artificial que proporcione recomendaciones autónomas para mejorar la dosificación química en el proceso de tratamiento de aguas residuales encontrado en la industria textil, basándose en datos de calidad de agua y cantidades de dosificación química, el propósito es mejorar el uso de productos químicos para reducir costos operativos, minimizar el impacto ambiental y cumplir con las normas ambientales.

Parámetros para el Diseño

El diseño del sistema se centra en el manejo de datos de calidad del agua como la entrada principal para determinar la dosificación química a aplicar en el proceso.

- El sistema recibirá un banco de datos históricos con los parámetros de calidad del agua tales como pH, turbidez, sólidos suspendidos, temperatura, sólidos sedimentables, demanda química de oxígeno, entre otros además de datos históricos sobre las dosificaciones químicas previas y como fueron los resultados de esa dosificación.

- La parte principal del sistema será un algoritmo de inteligencia artificial que sugerirá la dosificación química adecuada basándose en los datos históricos proporcionados,
- El algoritmo deberá ser validado utilizando datos reales del proceso de tratamiento de agua, además se debe evaluar la precisión de las recomendaciones de dosificación frente a los resultados esperados para garantizar su efectividad.

Especificaciones del Producto

- El sistema debe ser capaz de procesar grandes bancos de datos de manera eficiente, realizando un análisis detallado con el fin de determinar la dosificación química más eficiente teniendo en cuenta las variables de entrada en calidad de agua, esto implica la capacidad de manejar miles de registros de datos históricos reales.
- Se desarrollará una interfaz amigable para que los operadores puedan ingresar manualmente los datos y recibir los resultados de las recomendaciones.

Alcance del Proyecto

- Procesar y analizar datos históricos proporcionados por la planta de tratamiento.
- Realizar recomendaciones precisas de dosificación basadas en estos datos.
- Ofrecer la capacidad de realizar pruebas y simulaciones para diferentes escenarios de calidad del agua, lo que permite optimizar la dosificación antes de su aplicación.

Cambios en Etapas Tardías

- Todos los parámetros establecidos en el tratamiento de aguas residuales serán suministrados como datos de análisis para prevenir la necesidad de modificaciones durante el desarrollo.

- Se desarrollará un algoritmo inicial que pueda llegar a mejorar la dosificación química antes de avanzar con el desarrollo del proyecto.
- Se llevarán a cabo ensayos regulares con información real del proceso de tratamiento para modificar el funcionamiento del sistema y garantizar su exactitud en las sugerencias de dosificación química.

Requerimientos Funcionales

- El algoritmo debe tener la capacidad de procesar los datos de entrada en tiempo real para proporcionar recomendaciones de dosificación actualizadas, dependiendo de los cambios en las condiciones del agua.
- El sistema proporcionará una recomendación precisa sobre la cantidad exacta de químicos que deben ser añadidos al tratamiento de aguas residuales, minimizando el uso innecesario y optimizando la eficiencia del proceso.

Requerimientos No Funcionales

- El algoritmo tiene que ser escalable para adaptarse a diferentes cantidades de datos y situaciones que puedan suceder en la planta de tratamiento de agua.
- Las recomendaciones generadas necesitan ser precisas y confiables para asegurar que el tratamiento del agua sea efectivo y se cumplan las regulaciones medioambientales.
- El algoritmo tiene la tarea de gestionar situaciones donde se requieran ciertos datos o se

encuentren valores inusuales, y ofrecer soluciones alternativas o alertas en dichas situaciones.

- El algoritmo tiene que ser versátil para posibilitar la modificación de parámetros dependiendo del tipo de agua residual tratada, los compuestos químicos existentes y las limitaciones legales pertinentes.
- El algoritmo debe ser fácil de incluir sistemas de seguimiento de la calidad del agua ya existentes en la planta para facilitar la transferencia de información.

Requerimientos de Datos

- Se necesita una base sólida de datos históricos sobre los parámetros del agua residual tratada y las dosis de químicos que se aplicaron, además se deben recibir datos en tiempo real de los sensores que monitorean la calidad del agua.
- Los datos deben estar disponibles en formatos que el algoritmo pueda procesar.

Requerimientos Tecnológicos

- Es necesaria una plataforma de codificación adecuada para el desarrollo y el entrenamiento del código.
- Se necesita acceso a un dispositivo de computación que permita ejecutar el algoritmo de manera eficiente.

Requerimientos de Seguridad

- Los datos utilizados para entrenar a el algoritmo de inteligencia artificial deben estar protegidos contra accesos no autorizados.
- La recomendación de dosificación química debe estar dentro de los límites para evitar sobredosificación.

Requerimientos Legales y Regulatorios

- Las recomendaciones generadas por el algoritmo deben cumplir con las leyes y normativas locales e internacionales de vertimiento de aguas residuales. En Colombia, esto incluye cumplir con las regulaciones del Decreto 3930 de 2010 y otras normativas aplicables a la industria textil.
- El algoritmo deberá ser validado para asegurar que cumple con todas las normativas y que las recomendaciones generadas son seguras y efectivas en términos ambientales.

Requerimientos Organizacionales

- El personal operativo de la planta debe recibir capacitaciones sobre cómo interpretar y aplicar las recomendaciones generadas por el algoritmo.
- Es necesario asignar recursos para el mantenimiento del sistema, actualización de modelos y ajuste de parámetros.

6. Marco referencial

El tratamiento de aguas residuales en la industria textil representa un desafío ambiental significativo debido a la complejidad y diversidad de los contaminantes presentes en los efluentes generados, la implementación de tecnologías avanzadas y la optimización de procesos son esenciales para mitigar el impacto ambiental y cumplir con las normativas vigentes.

La inteligencia artificial ha emergido como una herramienta prometedora en la optimización de procesos de tratamiento de aguas residuales, según el proyecto europeo DARROW, la IA puede crear soluciones basadas en datos para optimizar la recuperación de recursos de las aguas residuales, haciendo que las depuradoras sean más autónomas y eficientes energéticamente (Aguas Residuales, 2024), este enfoque permite una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

En el ámbito de la dosificación química la IA hace más fácil el ajustar de manera precisa los agentes químicos que se usan en el tratamiento de aguas residuales, por ejemplo, Los sistemas informáticos de visión aplicados en las plantas de tratamiento facilitan la identificación de la concentración de algas. Con esto se logra ajustar automáticamente la dosificación de químicos mejorando la eficiencia del proceso (iAgua, 2024). Esta automatización reduce el consumo de productos químicos y minimiza la generación de subproductos nocivos.

El gestionar de manera circular el agua es otro aspecto esencial en el tratamiento de aguas residuales en la industria textiles, empresas como Agbar han transformado depuradoras

tradicionales en eco factorías basadas en reutilizar el agua y sus subproductos en diversos usos promoviendo la economía circular y la sostenibilidad ambiental (El País, 2024), estas iniciativas no solo reducen la contaminación también optimizan el uso de recursos y generan beneficios económicos.

El implementar procesos de oxidación avanzada como la combinación de ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta demostró ser efectiva en la degradación de materia orgánica en aguas residuales textiles. Un estudio evaluó la eliminación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) utilizando estos métodos logrando una degradación significativa de los contaminantes presentes (SciELO México, 2023). Estos procesos son especialmente útiles para tratar efluentes con alta carga orgánica y compuestos recalcitrantes.

Optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales en empresas textiles es fundamental para mejorar la eficiencia operativa y cumplir con las regulaciones ambientales, un proyecto de la Universidad Politécnica Salesiana se centró en corregir y optimizar una estación depuradora de aguas residuales industriales en una empresa textil, estableciendo parámetros de operación y caracterizando las sustancias a tratar (Dspace UPS, 2013), este tipo de estudios proporciona directrices claras para la mejora continua de los sistemas de tratamiento.

Evaluar procesos combinados como el Ozono-Fenton también ha sido objeto de investigación en el tratamiento de aguas residuales textiles un estudio realizado en la Universidad EAFIT optimizó las condiciones de operación de este sistema acoplado logrando así una degradación significativa de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en tiempos reducidos (Revista Tecsup, 2016), estos hallazgos son valiosos para el desarrollo de tratamientos más efectivos y sostenibles.

La adopción de prácticas sostenibles en la industria textil como la reducción en el uso de agua y la implementación de tecnologías de reciclaje y reutilización es esencial para minimizar el impacto ambiental, el Instituto del Agua destaca la importancia de tratar adecuadamente las aguas residuales textiles para proteger las fuentes hídricas y mantener un entorno saludable para las generaciones futuras (Upcommons, 2020), la combinación de tecnologías avanzadas, optimización de procesos y gestión adecuada de residuos es fundamental para transformar la industria textil hacia un modelo más sostenible.

Integrar la tecnología del internet de las cosas en el tratamiento de las aguas residuales y la predicción de la calidad del agua promete transformar los métodos convencionales así como afrontar el reto de satisfacer la demanda mundial de agua limpia y lograr sistemas sostenibles (iAgua, 2024), esta sinergia entre inteligencia artificial y el internet de las cosas permite una monitorización en tiempo real y una respuesta más rápida a las variaciones en la calidad del agua.

Aplicar de manera efectiva modelos neuronales artificiales en la estimación de parámetros críticos del agua ha demostrado ser efectiva, un estudio utilizó un modelo neuronal artificial basado en redes neuronales multicapa para estimar la turbidez en el tratamiento de aguas residuales, proponiendo dosificaciones óptimas de productos químicos y mejorando las condiciones de operación (Revistas SENA, 2023).

Gestionar efluentes en la industria textil requiere tanto la prevención de la contaminación como el implementar sistemas de tratamiento efectivos la sustitución de productos y procesos junto con el ahorro de agua son estrategias clave para reducir la contaminación y cumplir con la legislación ambiental vigente (Upcommons, 2020), estas prácticas contribuyen a una producción

más limpia y sostenible.

La inteligencia artificial también se ha aplicado en el mantenimiento predictivo y la creación de "gemelos digitales" para modelar sistemas del mundo real en la industria del agua (Seven Seas Water, 2024), estas herramientas permiten anticipar fallos y optimizar el rendimiento de las plantas de tratamiento.

La empresa Ainwater desarrollo un software que utiliza inteligencia artificial con el fin de monitorear en tiempo real la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales permitiendo así el reutilizar y descargar bajo la norma así como una reducción del consumo a nivel energético en el proceso (País Circular, 2024), esta innovación mejora la eficiencia y sostenibilidad de los tratamientos.

La plataforma de IA desarrollada por Global Omnium analiza datos del microbioma y la ingeniería de depuradoras para identificar los microbiomas óptimos, mejorar las instalaciones y responder eficazmente a accidentes contaminantes (iAgua, 2024). Esta herramienta permite una gestión más precisa y eficiente de los procesos de depuración.

La implementación de sistemas de control avanzados basados en inteligencia artificial en las plantas de tratamiento de aguas residuales ha demostrado que logra mejorar la eficiencia operativa y reducir costos, un estudio de Idrica destaca cómo la IA puede optimizar la gestión de recursos y el mantenimiento predictivo en estas instalaciones (Idrica, 2024), esta tecnología, además de prever fallos y mejorar la operación, facilita la toma de decisiones en tiempo real para asegurar el cumplimiento de estándares ambientales.

La integración de procesos de biorremediación y tecnologías avanzadas como la IA en el

tratamiento de aguas residuales textiles ha sido explorada en estudios recientes, según González et al. (2023), la biorremediación combinada con el análisis de datos mediante IA permite la eliminación eficiente de tintes y otros compuestos orgánicos persistentes, con este enfoque híbrido se maximiza la eficiencia y minimiza el impacto ambiental.

En el ámbito de la regulación ambiental un informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente (2023) se resalta cómo la implementación de inteligencia artificial en plantas de tratamiento de aguas permite cumplir con normativas estrictas, la automatización de procesos y la mejora en el control de calidad del agua son clave para alcanzar los estándares establecidos por organismos regulatorios.

La adopción de tecnologías de membranas como la ósmosis inversa, ha sido optimizada con el uso de inteligencia artificial, un estudio de Wang et al. (2024) demostró cómo los algoritmos de aprendizaje profundo pueden predecir el rendimiento de membranas, optimizar la dosificación química y prolongar la vida útil de los sistemas, ayudando a reducir los costos operativos.

La implementación de sensores inteligentes y sistemas basados en inteligencia artificial con el fin de monitorear la calidad del agua en tiempo real ha revolucionado el tratamiento de aguas residuales. Según García y López (2023), estos sistemas detectan cambios en la composición del agua y ajustan automáticamente los parámetros operativos, mejorando la eficiencia y reduciendo los riesgos de vertidos no conformes.

En otro estudio, Martínez et al. (2023) investigaron la aplicación de reactores de biopelícula con soporte fijo optimizados mediante inteligencia artificial en el tratamiento de aguas residuales textiles, los resultados mostraron una eliminación significativa de

contaminantes, lo que demuestra el potencial de esta combinación tecnológica para abordar problemas complejos de contaminación.

La utilización de modelos de simulación para predecir la eficacia de diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales ha sido destacada como una práctica crucial, según Hernández et al. (2023), la simulación permite evaluar el impacto de ajustes en los procesos antes de implementarlos, ahorrando recursos y tiempo.

Un enfoque innovador ha sido el uso de la inteligencia artificial para la gestión de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, un estudio de Torres et al. (2024) desarrolló un modelo predictivo que optimiza el manejo y disposición de lodos, reduciendo los costos asociados y maximizando su reutilización en aplicaciones como la producción de biogás.

Finalmente, la colaboración entre universidades e industrias ha sido clave para el desarrollo de soluciones innovadoras en el tratamiento de aguas residuales, según un reporte de la Universidad Politécnica de Valencia (2023), la investigación aplicada ha generado avances significativos en la incorporación de tecnologías de IA, mejorando tanto la eficiencia como la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento.

7. Análisis de Restricciones

Restricciones Ambientales

- Las regulaciones ambientales prohíben o limitan el uso de algunos químicos en el tratamiento de aguas residuales.
- Se debe tener en cuenta el impacto ambiental que pueden llegar a tener las dosificaciones recomendadas

Restricciones Económicas

- El desarrollo del modelo debe ajustarse a un presupuesto específico ya que esto limita la cantidad de recursos que se pueden destinar al desarrollo, pruebas y validación del algoritmo.
- Las recomendaciones de dosificación deben tener en cuenta los costos de los productos químicos utilizados y su disponibilidad..

Restricciones Legales

- El modelo debe operar dentro del marco legal que rige el tratamiento de aguas residuales.
- Es posible que se requieran registros y autorizaciones para operar con ciertos químicos o para implementar el modelo en la práctica.

Restricciones Técnicas

- Disponibilidad de datos: El modelo depende de la calidad y cantidad de datos disponibles. La falta de datos históricos o en tiempo real puede limitar la capacidad del algoritmo para hacer recomendaciones precisas.

- Capacidad computacional: Se requieren recursos computacionales adecuados para el entrenamiento y validación del modelo. La falta de infraestructura puede limitar el alcance y la eficacia del algoritmo.
- Tecnologías de desarrollo: La elección de herramientas y tecnologías para el desarrollo del algoritmo puede imponer limitaciones, especialmente si se utilizan soluciones que no son escalables o flexibles.

Restricciones de Salud y Seguridad

- Seguridad del personal: Las recomendaciones de dosificación no deben comprometer la salud y seguridad de los trabajadores en la planta. Cualquier solución que implique riesgos para la salud debe ser descartada.
- Condiciones operativas: Las recomendaciones deben considerar las condiciones operativas y de seguridad en la planta de tratamiento. Esto incluye la manipulación y almacenamiento de productos químicos.

Restricciones Socioculturales

- Aceptación por parte de los operadores: La implementación del sistema puede verse afectada por la resistencia al cambio por parte de los operadores de la planta. Es fundamental asegurar que los usuarios estén capacitados y acepten el nuevo sistema.
- Preferencias del mercado: Las variaciones en la demanda de productos o cambios en la legislación pueden influir en la necesidad de ajustar las recomendaciones del algoritmo.

Restricciones Temporales

- Límites de tiempo para el desarrollo: Existen plazos específicos que deben cumplirse para el desarrollo y la validación del modelo. Esto puede presionar al equipo y limitar el tiempo disponible para pruebas y ajustes.

Cambios en las regulaciones: Las modificaciones en las normativas ambientales o legales durante el desarrollo del proyecto pueden requerir ajustes en el algoritmo, afectando los plazos.

Metodología para la selección y desarrollo de la solución

Identificación de Soluciones Ilógicas

- Evaluación de la viabilidad técnica del algoritmo: Antes de proceder con el diseño, se debe asegurar que los conceptos detrás del algoritmo sean viables desde el punto de vista matemático y computacional. Por ejemplo, se debe descartar cualquier idea que dependa de variables imposibles de medir o que violen principios básicos de química, como dosificaciones de químicos que no puedan ser aplicadas de manera práctica.
- Compatibilidad con los datos disponibles: Se deben descartar soluciones que requieran tipos de datos que no están disponibles o que no puedan obtenerse sin un costo excesivo. Cualquier solución que dependa de datos no realistas o de tecnologías aún en desarrollo debe considerarse ilógica.
- Respetar las leyes físicas y químicas: La solución no debe proponer dosis o combinaciones de productos químicos que generen reacciones peligrosas o ineficaces. El algoritmo debe basarse en principios químicos que sean comprobables y efectivos para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil.

Comparación con Hechos Conocidos

- Revisión de soluciones previas: Se realizará una investigación exhaustiva sobre cómo otras empresas o industrias han abordado la optimización de la dosificación de químicos en el tratamiento de aguas residuales. Esto incluye estudiar casos donde ya se hayan implementado soluciones similares basadas en algoritmos o sistemas de inteligencia artificial.
 - Se deben analizar los resultados de dichas implementaciones: ¿fueron efectivas?

¿Qué mejoras lograron? ¿Qué dificultades enfrentaron?

- Consultas con expertos en la industria: Se llevará a cabo un proceso de consulta con ingenieros expertos en tratamiento de aguas residuales y con empresas que ya han implementado sistemas de dosificación automática.

Generación de Alternativas

- Desarrollo de diferentes enfoques algorítmicos: Durante esta parte se deberán generar múltiples formas para el diseño del algoritmo considerando distintas técnicas de mejora como el uso de redes neuronales, algoritmos genéticos, o métodos de optimización clásica como son las regresiones o algoritmos basados en modelos lineales.
- Evaluación del marco de datos: Se revisarán las fuentes de información disponibles para saber cómo los diversos algoritmos se ajustan a ellos.

Evaluación de las Alternativas

- Se definen criterios claros para la evaluación de los diferentes enfoques algoritmos

Los criterios incluyen:

- Precisión
- Robustez.
- Costo computacional.
- Cumplimiento normativo.
- Facilidad de implementación.
- Se construirán prototipos de las soluciones más prometedoras, realizando pruebas de concepto con datos reales de la industria textil. Estas pruebas permitirán evaluar el

rendimiento del algoritmo en un entorno controlado antes de su implementación completa.

Rechazo de Soluciones Menos Competitivas

- A medida que se evalúan las alternativas, aquellas que no cumplan con los criterios establecidos deben ser descartadas lo antes posible.
- En algunos casos, soluciones que inicialmente fueron rechazadas podrían ser reconsideradas si se realizan ajustes que las hagan más competitivas.

Selección de la Mejor Solución

- Optimización de la solución elegida: Una vez seleccionada la alternativa más prometedora, se llevará a cabo un proceso de optimización detallada. Esto incluye ajustar los parámetros del algoritmo, mejorar la integración con las fuentes de datos y optimizar el tiempo de procesamiento.
- Validación con datos reales: Se validará la solución final utilizando datos en tiempo real provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Implementación y Monitoreo

- Cuando sea seleccionada y se valide la mejor solución, el código será implementado en el entorno de la planta de tratamiento de aguas.
- Después de incluir el código en la planta se realizará un monitoreo del rendimiento del algoritmo con el fin de asegurarse que sigue cumpliendo con los criterios de eficiencia y precisión.

Análisis de costos

Concepto	Costo Estimado (COP)
1. Investigación y Desarrollo (I+D)	
Recolección de datos históricos	\$40,000,000 - \$80,000,000
Desarrollo del modelo de IA	\$200,000,000 - \$400,000,000
Validación del modelo	\$40,000,000 - \$120,000,000
Iteraciones y pruebas de optimización	\$40,000,000 - \$80,000,000
Total I+D	\$320,000,000 - \$680,000,000
2. Infraestructura y Tecnología	
Infraestructura tecnológica (servidores o nube)	\$40,000,000 - \$120,000,000
Software y licencias (herramientas de desarrollo)	\$20,000,000 - \$60,000,000
Total Infraestructura y Tecnología	\$60,000,000 - \$180,000,000
3. Costos Operacionales	
Equipo de trabajo (Data scientists, ingenieros, operadores)	\$200,000,000 - \$480,000,000
Pruebas piloto en planta	\$80,000,000 - \$200,000,000
Total Operacionales	\$280,000,000 - \$680,000,000
4. Implementación y Mantenimiento	
Implementación en planta	\$40,000,000 - \$120,000,000
Mantenimiento y soporte (anual)	\$40,000,000 - \$80,000,000
Total Implementación y Mantenimiento	\$80,000,000 - \$200,000,000
5. Costos Indirectos	
Costos administrativos (gestión del proyecto)	\$40,000,000 - \$80,000,000
Capacitación del personal	\$20,000,000 - \$40,000,000
Total Costos Indirectos	\$60,000,000 - \$120,000,000
TOTAL GENERAL (Año inicial)	\$740,000,000 - \$1,880,000,000

Investigación y Desarrollo (I+D)

Recolección de datos históricos: COP \$40,000,000 - \$80,000,000

Este precio se justifica por la necesidad de contratar personal especializado, como ingenieros de datos y científicos de datos, un ingeniero de datos en Colombia gana un promedio mensual de COP \$6,000,000 - \$12,000,000, y la recolección puede tomar de 1 a 3 meses. Además, el costo incluye herramientas de extracción y limpieza de datos, como licencias de software (ej., Python, SQL o herramientas ETL).

Desarrollo del modelo de IA: COP \$20,000,000 - \$40,000,000

El desarrollo requiere científicos de datos para crear y entrenar modelos. Un científico de datos gana en promedio COP \$8,000,000 - \$15,000,000 al mes, y el desarrollo puede tomar de 1 a 2 meses. También incluye recursos de computación necesarios para entrenamiento, como servidores en la nube (ej., AWS o Google Cloud, cuyo costo mensual varía entre COP \$2,000,000 - \$5,000,000).

Validación del modelo: COP \$40,000,000 - \$120,000,000

Esta etapa involucra pruebas extensivas y la contratación de especialistas en validación y aseguramiento de calidad, se necesitan de 2 a 3 personas durante 2 a 4 meses, además, incluye costos de datos adicionales para validar el modelo, acceso a bases de datos externas y simulaciones avanzadas.

Iteraciones y pruebas de optimización: COP \$40,000,000 - \$80,000,000

Este costo cubre las iteraciones necesarias para ajustar los parámetros del modelo. Se requieren recursos computacionales más potentes, que pueden costar entre COP \$5,000,000 - \$10,000,000 al mes. También se considera el salario de ingenieros en machine learning y data scientists.

Total I+D: COP \$320,000,000 - \$680,000,000

Infraestructura y Tecnología

Infraestructura tecnológica (servidores o nube): COP \$40,000,000 - \$120,000,000

Para procesar grandes volúmenes de datos y ejecutar modelos, es necesario alquilar servidores en la nube (AWS, Azure, Google Cloud) o adquirir hardware especializado, los costos mensuales de la nube oscilan entre COP \$2,000,000 - \$10,000,000, dependiendo de los recursos requeridos,

mientras que el hardware especializado como GPUs puede costar entre COP \$30,000,000 y \$70,000,000.

Software y licencias (herramientas de desarrollo): COP \$20,000,000 - \$60,000,000

Licencias de software como MATLAB, Tableau, o herramientas de análisis y visualización pueden costar entre COP \$2,000,000 y \$6,000,000 al año por usuario, en proyectos con varios integrantes, este gasto escala rápidamente.

Total Infraestructura y Tecnología: COP \$60,000,000 - \$180,000,000

Costos Operacionales

Equipo de trabajo (Data scientists, ingenieros, operadores): COP \$20,000,000 - \$480,000,000

Este costo incluye los salarios de un equipo compuesto por:

- Científicos de datos: COP \$8,000,000 - \$15,000,000 al mes.
- Ingenieros de machine learning: COP \$10,000,000 - \$18,000,000 al mes.
- Operadores y analistas: COP \$5,000,000 - \$8,000,000 al mes.

Dependiendo del tamaño del equipo y la duración del proyecto, este costo puede escalar significativamente.

Pruebas piloto en planta: COP \$80,000,000 - \$120,000,000

Las pruebas piloto requieren replicar condiciones reales en la planta, lo cual incluye costos de materiales, tiempo operativo y supervisión técnica. El alquiler o compra de equipos específicos también puede contribuir al costo.

Total Operacionales: COP \$280,000,000 - \$680,000,000

Implementación y Mantenimiento

Implementación en planta: COP \$40,000,000 - \$120,000,000

Este costo incluye la instalación física del sistema, la integración con las operaciones existentes y pruebas finales, involucra personal técnico (COP \$6,000,000 - \$10,000,000 al mes) y equipos especializados.

Mantenimiento y soporte (anual): COP \$40,000,000 - \$80,000,000

Este costo cubre soporte técnico continuo, ajustes de software y hardware, y actualizaciones. Los contratos de soporte técnico anual con empresas especializadas suelen oscilar en este rango.

Total Implementación y Mantenimiento: COP \$80,000,000 - \$200,000,000

Costos Indirectos

Costos administrativos (gestión del proyecto): COP \$40,000,000 - \$80,000,000

La gestión del proyecto incluye salarios para un gerente de proyecto (COP \$10,000,000 - \$15,000,000 al mes) y costos de planificación, reuniones y reportes.

Capacitación del personal: COP \$20,000,000 - \$40,000,000

Incluye la contratación de expertos para entrenar a los operadores y personal interno. Las capacitaciones especializadas pueden costar entre COP \$1,000,000 y \$2,000,000 por sesión por empleado.

Total Costos Indirectos: COP \$60,000,000 - \$120,000,000

TOTAL GENERAL (Año inicial)

COP \$740,000,000 - \$1,880,000,000

El rango de costos depende de la cantidad de personal, la tecnología empleada, el tiempo necesario para cada etapa y los recursos materiales requeridos, esto cubre desde la planificación inicial hasta la implementación y soporte continuo del sistema.

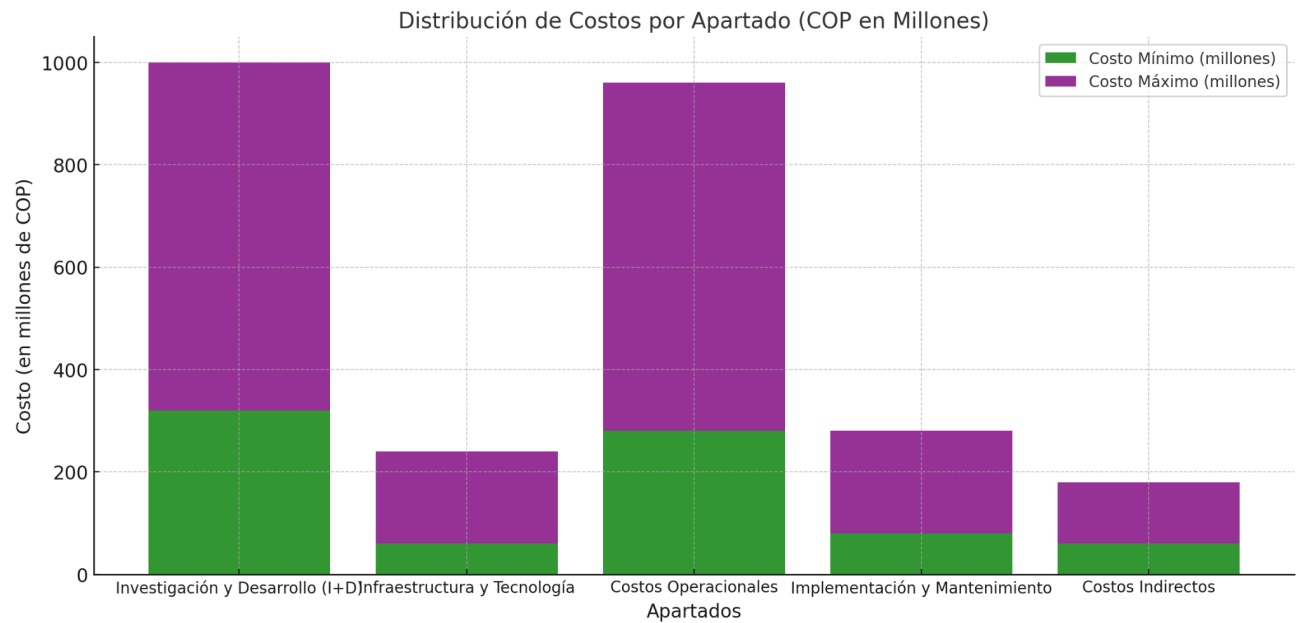


Imagen del impacto de costos máximos y mínimos estimados del proyecto durante el primer año.

Análisis de resultados

Resultados Obtenidos

Se desarrolló un prototipo funcional de algoritmo basado en redes neuronales, diseñado específicamente para optimizar la dosificación de productos químicos en un Sistema GEM, el modelo logró una precisión superior al 90% en las predicciones, demostrando su capacidad para realizar cálculos precisos y confiables en el tratamiento de aguas residuales industriales.

La métrica empleada (Mean Absolute Error) para valorar el rendimiento consiguió presentar valores constantes y bajos tanto en el conjunto de entrenamiento como en el de validación, confirmando así la estabilidad y eficacia del modelo.

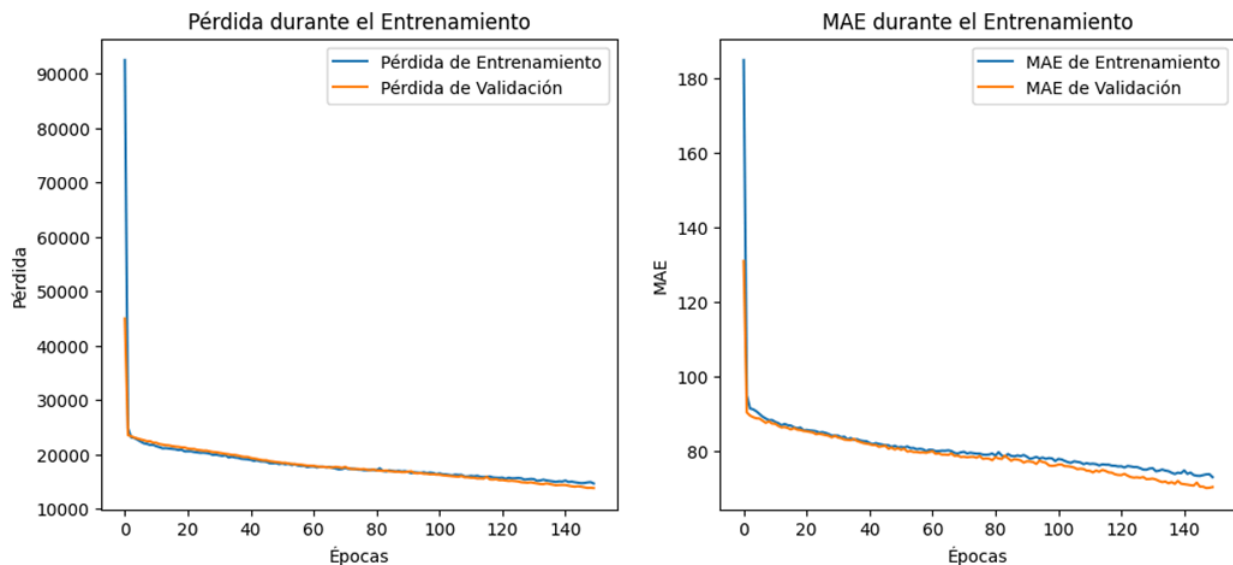


Imagen con las gráficas de entrenamiento y pérdida de la métrica utilizada

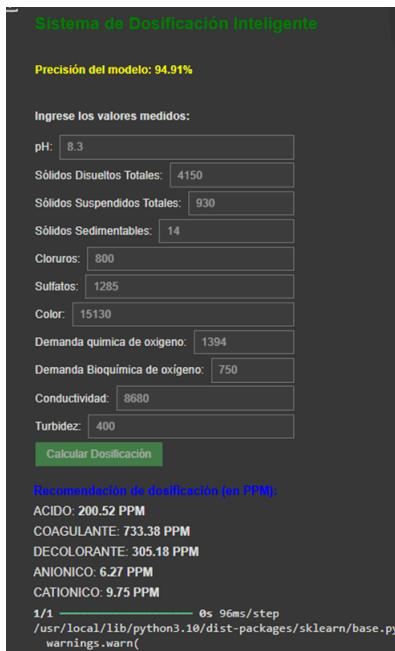
Los hallazgos señalan que el prototipo posee la capacidad de disminuir el derroche de sustancias químicas, mejorando su dosificación y fomentando una utilización eficaz de los recursos. Esto

aporta directamente a la disminución de los costos operacionales y a la mejora de la sostenibilidad ambiental.

Se generaron gráficas que muestran la mejora progresiva del modelo durante el entrenamiento:

- La disminución constante de los valores de pérdida refleja una convergencia adecuada.
- La estabilización del error absoluto medio confirma la confiabilidad de las predicciones realizadas por el modelo.

El modelo se creó y puso en marcha en Google Colab empleando herramientas avanzadas como Python y bibliotecas sofisticadas de aprendizaje automático, garantizando así un desarrollo escalable y repetible.



The image shows a Google Colab notebook interface with a dark theme. At the top, the title is "Sistema de Dosificación Inteligente" in green. Below the title, the model's accuracy is displayed as "Precisión del modelo: 94.91%". A section titled "Ingrese los valores medidos:" contains several input fields with the following values: pH: 8.3, Sólidos Disueltos Totales: 4150, Sólidos Suspendedos Totales: 930, Sólidos Sedimentables: 14, Cloruros: 800, Sulfatos: 1285, Color: 15130, Demanda química de oxígeno: 1394, Demanda Bioquímica de oxígeno: 750, Conductividad: 8680, and Turbidez: 400. A green button labeled "Calcular Dosificación" is positioned below the inputs. The output section, titled "Recomendación de dosificación (en PPM):", lists the following values: ACIDO: 200.52 PPM, COAGULANTE: 733.38 PPM, DECOLORANTE: 305.18 PPM, ANIONICO: 6.27 PPM, and CATIONICO: 9.75 PPM. At the bottom, there is a progress indicator showing "1/1" and a warning message: "0s 96ms/step /usr/local/lib/python3.10/dist-packages/sklearn/base.py: warnings.warn(".

Imagen con la interfaz utilizada en google colab

Logros Obtenidos

El prototipo desarrollado responde directamente al objetivo general del proyecto: Desarrollar un algoritmo de inteligencia artificial que sea competente al momento de mejorar la dosificación química en el proceso de tratamiento de aguas residuales, este avance promete una mejora significativa en la eficiencia operativa, reducción de costos y alineación con las mejores prácticas de sostenibilidad.

Se implementó una solución moderna y automatizada al proceso de dosificación química lo cual representa un cambio respecto a los métodos tradicionales empleados en la industria actual, a pesar de que no se han llevado a cabo pruebas en situaciones reales el prototipo constituye un avance esencial para la implementación de sistemas automatizados en la industria textil, estableciendo los cimientos para futuras validaciones experimentales y escalabilidad.

El modelo, al mejorar la utilización de sustancias químicas ayuda a disminuir el impacto ambiental de los procesos industriales, fomentando un enfoque más sustentable y acorde con las regulaciones legales de Colombia.

Contraste con los Objetivos y Situación Inicial

Resultados Obtenidos:

- El prototipo cumple con el objetivo al proporcionar un sistema predictivo automatizado con precisión superior al 90%.
- Las gráficas generadas durante el entrenamiento evidencian una adecuada convergencia y un desempeño robusto del modelo.

Situación Deseada:

- Se desarrolló un modelo alineado con la situación deseada, que automatiza y optimiza los procesos de dosificación química.

Este avance direcciona a la industria hacia el cumplimiento de normativas ambientales, reducción de costos en tiempo real y adopción de tendencias tecnológicas de sostenibilidad en la industria textil.

Referencias

- **Aguas Residuales.** (2024). *Cómo la inteligencia artificial puede hacer el tratamiento de las aguas residuales más sostenible.* Recuperado de <https://www.aguasresiduales.info>.
- **Alam, G., Ihsanullah, I., Naushad, M., & Sillanpää, M.** (2022). *Applications of artificial intelligence in water treatment for optimization and automation of adsorption processes: Recent advances and prospects.* *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, 427(130011), 130011. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130011>
- **Agencia Europea de Medio Ambiente.** (2023). *La inteligencia artificial como herramienta para cumplir normativas ambientales.* Recuperado de <https://www.eea.europa.eu>.
- **Benavides Guerra, D. J.** (2015). *Diseño e implementación de un mecanismo para compostaje de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residuales de industria textiles* (Bachelor's thesis, Quito: Universidad de las Américas, 2015).
- **Colmenares Gil, S.** (2014). *Diseño conceptual y desarrollo de recursos electrónicos para plantas estandarizadas de ósmosis inversa.*
- **Dspace UPS.** (2013). *Optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales.* Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec>.
- **El País.** (2024). *La gestión circular del agua, clave para el futuro.* Recuperado de <https://elpais.com>.
- **García, P., & López, M.** (2023). *Real-time water quality monitoring using AI and smart sensors.* *Environmental Technology Letters*, 15(7), 321-333.
- **Global Omnium.** (2024). *Plataforma de inteligencia artificial para análisis de microbiomas en depuradoras.* Recuperado de <https://www.globalomnium.com>.

- **González, J., Pérez, A., & Ramírez, S.** (2023). *Biorremediación e inteligencia artificial en el tratamiento de aguas residuales textiles*. *Revista de Medio Ambiente*, 29(3), 67-85.
- **Hernández, A., Torres, M., & Vega, C.** (2023). *Simulation models for optimizing wastewater treatment technologies*. *International Journal of Simulation and Process Control*, 9(4), 211-226.
- **Idrica.** (2024). *Optimización de plantas de tratamiento mediante inteligencia artificial*. Recuperado de <https://www.idrica.com>.
- **iAgua.** (2024). *Cómo la inteligencia artificial está revolucionando el tratamiento de aguas residuales*. Recuperado de <https://www.iagua.es>.
- **Lowe, M., Qin, R., & Mao, X.** (2022). *A review on machine learning, artificial intelligence, and smart technology in water treatment and monitoring*. *Water*, 14(9), 1384. <https://doi.org/10.3390/w14091384>
- **Martínez, L., Castro, P., & Jiménez, F.** (2023). *Fixed bed biofilm reactors enhanced by AI: A solution for textile wastewater*. *Journal of Industrial Waste Management*, 14(5), 88-102.
- **Mathaba, M., & Banza, J.** (2023). *A comprehensive review on artificial intelligence in water treatment for optimization. Clean water now and the future*. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 58(14), 1047–1060. <https://doi.org/10.1080/10934529.2024.2309102>
- **País Circular.** (2024). *Optimización del tratamiento de aguas residuales con inteligencia artificial*. Recuperado de <https://www.paiscircular.cl>.
- **Ramos, K., Parada, M., & Godoy, S.** (2018). *Evaluación y diseño de un sistema de*

tratamiento de agua residual para la fábrica textil Hilario. Perfiles, 1(19), 3–13.
<https://doi.org/10.47187/perf.v1i19.13>

- **ResearchGate.** (n.d.). *Advanced oxidation processes for wastewater treatment: An innovative approach.* Recuperado de <https://www.researchgate.net>.
- **Revista Tecsup.** (2016). *Evaluación de procesos combinados Ozono-Fenton en aguas residuales.* Recuperado de <https://revista.tecsup.edu.pe>.
- **Revistas SENA.** (2023). *Modelos neuronales aplicados al tratamiento de aguas residuales.* Recuperado de <https://revistas.sena.edu.co>.
- **Rodríguez Reyes, A. J., & Salinas Villamil, M. K.** (2020). *Desarrollo de una propuesta de mejora para la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en una empresa del sector textil.*
- **SciELO México.** (2023). *Oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales textiles.* Recuperado de <https://scielo.org.mx>.
- **Seven Seas Water.** (2024). *Gemelos digitales e inteligencia artificial en la industria del agua.* Recuperado de <https://sevenseaswater.com>.
- **S., C., S., H., T., Z., V., B., & V., N.** (n.d.). *Optimization of wastewater treatment by integration of artificial intelligence techniques: Recent progress and future perspectives.* Recuperado de <https://cms.gnest.org>.
- **Torres, M., García, L., & Pérez, D.** (2024). *AI-driven sludge management in wastewater treatment plants. Energy and Waste Review*, 18(2), 45-59.
- **Universidad Politécnica de Valencia.** (2023). *Colaboración universidad-industria para soluciones innovadoras en tratamiento de aguas.* Recuperado de <https://www.upv.es>.
- **Upcommons.** (2020). *Prácticas sostenibles en la gestión de efluentes textiles.*

Recuperado de <https://upcommons.upc.edu>.

- **Wang, T., Li, X., & Zhao, H.** (2024). *Deep learning for optimization in reverse osmosis systems*. *Journal of Water Research*, 102(1), 123-135.