

# Design and Simulation of a Wastewater Treatment Plant Using Software in the Locality of Namora, Cajamarca, 2025

Ysabel Aracely Marin Abanto<sup>1</sup>; Victor Raul Sebastian Lucano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, N0027397@upn.pe

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, victor.sebastian@upn.edu.pe

**ABSTRACT** - This study aimed to design and simulate a wastewater treatment system for the locality of Namora, Cajamarca, using computational modeling to optimize process efficiency and ensure compliance with Environmental Quality Standards. A quantitative, non-experimental approach was employed, based on system simulation using STOAT software, considering representative influent parameters, including a flow rate of 15 L/s, BOD<sub>5</sub> of 300 mg/L, TSS of 250 mg/L, total nitrogen of 35 mg/L, and total phosphorus of 7 mg/L. The system was configured with pretreatment, primary sedimentation, a UASB reactor, and tertiary treatment units, and different operational scenarios were evaluated by varying the hydraulic retention time. The results showed that a hydraulic retention time of 8 hours achieves removal efficiencies above 85% for organic matter and 90% for suspended solids, reducing BOD<sub>5</sub> to 30 mg/L and TSS to 40 mg/L, thereby complying with environmental regulations. Additionally, dynamic analysis indicated a progressive reduction of contaminants and nutrient transformation, although an increase in ammonia and phosphorus was observed, suggesting the need for complementary treatment processes. Overall, the proposed model proves to be an effective tool for optimizing the design and operation of wastewater treatment plants in rural contexts, contributing to system sustainability and improved effluent quality.

**Keywords:** wastewater treatment, computational modeling, UASB reactor, rural sanitation, environmental efficiency

# Diseño y Simulación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Software en la Localidad de Namora, Cajamarca, 2025

Ysabel Aracely Marin Abanto<sup>1</sup>; Victor Raul Sebastian Lucano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, N0027397@upn.pe

<sup>2</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, victor.sebastian@upn.edu.pe

**Resumen-** El presente estudio tuvo como objetivo diseñar y simular un sistema de tratamiento de aguas residuales para la localidad de Namora, Cajamarca, mediante el uso de modelado computacional, con la finalidad de optimizar la eficiencia del proceso y garantizar el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental. Se empleó un enfoque cuantitativo de diseño no experimental, basado en la simulación del sistema mediante el software STOAT, considerando parámetros representativos del afluente, tales como un caudal de 15 L/s, DBO<sub>5</sub> de 300 mg/L, SST de 250 mg/L, nitrógeno total de 35 mg/L y fósforo total de 7 mg/L. El sistema fue configurado con unidades de pretratamiento, sedimentación primaria, reactor UASB y tratamiento terciario, evaluándose distintos escenarios operativos mediante la variación del tiempo de retención hidráulica. Los resultados evidenciaron que un TRH de 8 horas permite alcanzar eficiencias superiores al 85 % en la remoción de materia orgánica y 90 % en sólidos suspendidos, logrando reducir la DBO<sub>5</sub> a 30 mg/L y los SST a 40 mg/L, cumpliendo con la normativa ambiental vigente. Asimismo, el análisis dinámico mostró una reducción progresiva de contaminantes y una transformación de nutrientes, aunque se identificó un incremento en amoníaco y fósforo, lo que sugiere la necesidad de incorporar procesos complementarios para su remoción. En conjunto, el modelo propuesto demuestra ser una herramienta eficaz para optimizar el diseño y operación de plantas de tratamiento en contextos rurales, contribuyendo a mejorar la sostenibilidad del sistema y la calidad del efluente tratado.

**Palabras clave:** tratamiento de aguas residuales, modelado computacional, reactor UASB, saneamiento rural, eficiencia ambiental.

## I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales constituye, en la actualidad, uno de los principales desafíos para el desarrollo sostenible, particularmente en contextos rurales donde la infraestructura de saneamiento resulta limitada o inexistente, generando, en consecuencia, impactos directos sobre la salud pública y el equilibrio ambiental, en ese sentido, la Organización Mundial de la Salud advierte que la carencia de servicios adecuados de saneamiento continúa asociándose a enfermedades de origen hídrico y a la persistencia de brechas estructurales en el acceso a servicios básicos, lo cual evidencia la necesidad de implementar soluciones técnicas sostenibles orientadas a la gestión eficiente del recurso hídrico [1].

En el contexto peruano, esta problemática adquiere mayor complejidad, debido a que una proporción significativa de la población rural no cuenta con acceso a sistemas de alcantarillado ni a plantas de tratamiento de aguas residuales,

situación que conlleva a la descarga directa de efluentes sin tratamiento en cuerpos receptores naturales, generando procesos de contaminación progresiva y riesgos sanitarios relevantes, particularmente en regiones como Cajamarca, donde la limitada cobertura de infraestructura condiciona la calidad de vida y restringe la sostenibilidad ambiental, lo cual ha sido evidenciado en diagnósticos regionales de saneamiento que destacan la necesidad de intervenciones técnicas adaptadas al contexto rural [2].

Bajo este escenario, resulta imprescindible el desarrollo de soluciones tecnológicas que no solo permitan la remoción eficiente de contaminantes, sino que además se adapten a las condiciones operativas, económicas y ambientales propias de zonas rurales, en ese marco, los sistemas biológicos anaerobios, específicamente los reactores de flujo ascendente tipo UASB, han demostrado una elevada eficiencia en la remoción de materia orgánica con bajo consumo energético y simplicidad operativa, lo cual los posiciona como alternativas viables en contextos con limitaciones de infraestructura, adicionalmente, el uso de herramientas de modelado computacional permite simular el comportamiento de estos sistemas bajo diferentes condiciones operativas, optimizando parámetros clave y reduciendo la incertidumbre en el diseño de plantas de tratamiento [3].

Asimismo, desde una perspectiva técnico-operativa, la eficiencia de los sistemas de tratamiento depende directamente de parámetros como el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica aplicada, en ese sentido, la optimización del tiempo de retención hidráulica resulta determinante para garantizar la estabilidad del proceso biológico y la calidad del efluente, dado que condiciones inadecuadas afectan la remoción de contaminantes o incrementan los costos operativos sin mejoras sustanciales, por consiguiente, el uso de herramientas de simulación permite evaluar escenarios operativos de manera integrada y establecer condiciones óptimas de funcionamiento, contribuyendo a mejorar el desempeño global del sistema en contextos rurales [4].

En relación con el estado del arte, diversos estudios han abordado el diseño y optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante enfoques experimentales y computacionales, evidenciando, por un lado, la necesidad de optimizar los costos operativos asociados principalmente a la gestión de lodos y mantenimiento del sistema [5], mientras que, por otro lado, se ha demostrado que el uso de

simulaciones hidráulicas y biológicas permite mejorar la eficiencia de las unidades de tratamiento, incrementando el rendimiento global del sistema [6], asimismo, en contextos rurales se han propuesto tecnologías de bajo costo orientadas a mitigar impactos ambientales y mejorar condiciones sanitarias [7], sin embargo, también se han identificado deficiencias en sistemas existentes relacionadas con diseños inadecuados, limitaciones operativas y bajo conocimiento técnico, lo cual repercute en el incumplimiento de estándares ambientales y en la baja sostenibilidad de los sistemas implementados [8]–[9].

No obstante, a pesar de estos avances, se identifica una brecha científica crítica, dado que ningún estudio ha integrado de manera sistemática el modelado computacional con el diseño aplicado de plantas de tratamiento en contextos rurales andinos específicos, donde las condiciones hidráulicas, sociales y ambientales requieren soluciones adaptadas, en consecuencia, la ausencia de modelos integrados que permitan no solo simular y optimizar, sino también validar el comportamiento de una PTAR bajo condiciones representativas limita la eficiencia, sostenibilidad y replicabilidad de las soluciones propuestas, tal como se evidencia en investigaciones recientes que destacan la necesidad de integrar herramientas de simulación con aplicaciones reales en saneamiento [2], [5].

En este contexto, el problema de investigación se formula de la siguiente manera: ¿cómo diseñar y simular un sistema de tratamiento de aguas residuales en la localidad de Namora, Cajamarca, mediante modelado computacional, que permita optimizar la eficiencia del proceso y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del efluente, considerando condiciones operativas representativas del entorno rural y criterios de sostenibilidad del sistema? [2], [9].

En coherencia con ello, el objetivo del estudio consiste en diseñar y simular una planta de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de modelado computacional, orientada a optimizar la remoción de contaminantes y mejorar las condiciones de saneamiento en la localidad de Namora, para lo cual se plantea desarrollar un modelo de simulación que permita analizar distintos escenarios operativos, evaluar la eficiencia de cada unidad de tratamiento en la remoción de DBOs, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo, y establecer configuraciones optimizadas que aseguren el cumplimiento de los estándares ambientales, en concordancia con enfoques metodológicos aplicados en estudios de simulación y optimización de sistemas de tratamiento [3], [6].

Desde esta perspectiva, se plantea como hipótesis que la implementación de un modelo computacional aplicado al diseño de la planta de tratamiento permite identificar y optimizar parámetros operativos críticos, logrando una mejora significativa en la eficiencia del tratamiento, el cumplimiento de los estándares de calidad del efluente y la sostenibilidad del sistema en el tiempo, lo cual se sustenta en investigaciones que evidencian la utilidad del modelado como herramienta para la toma de decisiones en ingeniería ambiental y validación de procesos [3], [4].

Finalmente, la principal contribución de esta investigación radica en la integración del modelado computacional mediante el software STOAT con el diseño técnico de una planta de tratamiento basada en reactor UASB y procesos complementarios, aplicada a un contexto rural específico, incorporando criterios de evaluación del desempeño y validación del comportamiento del sistema mediante la comparación de escenarios simulados bajo condiciones representativas del afluente, lo cual permite no solo optimizar el diseño, sino también fortalecer la confiabilidad, aplicabilidad y replicabilidad de la propuesta en escenarios similares, aportando de este modo una herramienta metodológica sólida para la planificación y gestión eficiente de sistemas de saneamiento rural [3], [8].

## II. METODOS

### *Diseño*

El estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, en la medida en que se sustenta en la medición, procesamiento y análisis numérico de variables asociadas al tratamiento de aguas residuales, lo cual permite interpretar el comportamiento del sistema a partir de datos objetivos y verificables, en consecuencia, se adopta un diseño no experimental, debido a que no se manipulan deliberadamente las variables, sino que se analizan bajo condiciones definidas mediante modelado computacional, representando el funcionamiento del sistema en un entorno simulado técnicamente consistente [10].

Asimismo, la investigación presenta un alcance correlacional–predictivo, dado que se evalúa la relación entre variables operativas (como el tiempo de retención hidráulica, la carga orgánica y el caudal) y la eficiencia del tratamiento, permitiendo además proyectar el comportamiento del sistema bajo distintos escenarios de operación, en ese sentido, el estudio se clasifica como aplicado, debido a que busca resolver un problema real de saneamiento en la localidad de Namora mediante una propuesta técnica optimizada [11].

### *Población y muestra*

La población está conformada por las aguas residuales generadas en la localidad de Namora, Cajamarca, considerando la totalidad de descargas domésticas del área de estudio, en ese contexto, la muestra coincide con la población, dado que se trabaja con parámetros representativos del sistema real, incluyendo el caudal y las características fisicoquímicas del afluente, lo que garantiza que los resultados obtenidos reflejen las condiciones reales del sistema y aseguren la validez del análisis desarrollado [12].

### *Materiales e instrumentos*

Para el desarrollo del estudio se emplearon herramientas orientadas al modelado, análisis y representación del sistema, entre las cuales destaca el software STOAT, utilizado para simular el comportamiento hidráulico, biológico y fisicoquímico de la planta de tratamiento, permitiendo evaluar distintos escenarios operativos con alto nivel de precisión.

De manera complementaria, se utilizaron hojas de cálculo en Excel para el procesamiento y organización de datos, AutoCAD para la representación del diseño del sistema, y herramientas de análisis documental para la recopilación de información técnica del afluente, asegurando coherencia entre el modelo teórico y las condiciones reales del sistema [13].

#### Método de investigación

El método principal correspondió al modelado computacional, mediante el cual se representó el sistema de tratamiento de aguas residuales a través de simulaciones numéricas, permitiendo analizar la eficiencia del proceso bajo distintas condiciones operativas. Adicionalmente, se aplicó análisis estadístico descriptivo con el fin de interpretar los resultados obtenidos [14].

#### Procedimiento metodológico

El procedimiento metodológico se desarrolló de manera secuencial, iniciando con la caracterización del afluente, seguida del diseño conceptual del sistema de tratamiento, posteriormente la modelación en el software y finalmente la evaluación de resultados, garantizando coherencia entre cada etapa del proceso.

En primer lugar, se definieron los parámetros de entrada del sistema, considerando un caudal de 15 L/s, así como concentraciones iniciales de DBO5 (300 mg/L), SST (250 mg/L), nitrógeno total (35 mg/L) y fósforo total (7 mg/L), valores que representan la carga contaminante característica del afluente en la localidad de Namora, los cuales fueron utilizados como base para la simulación del sistema.

El modelo fue configurado en el software STOAT utilizando un esquema de flujo continuo con reactor UASB bajo condiciones anaerobias, incorporando parámetros operativos como carga orgánica, tiempo de retención hidráulica y tasas de recirculación, ajustados con base en valores reportados en literatura técnica. Asimismo, se establecieron condiciones iniciales estables de pH y concentración de biomasa, permitiendo simular de manera consistente el comportamiento del sistema bajo distintos escenarios operativos, garantizando la reproducibilidad del modelo dentro de los límites propios de la simulación computacional.

TABLA I  
PARÁMETROS DE ENTRADA DEL MODELO

| Parámetro       | Valor | Unidad |
|-----------------|-------|--------|
| Caudal          | 15    | L/s    |
| DBO5            | 300   | mg/L   |
| DQO             | 450   | mg/L   |
| SST             | 250   | mg/L   |
| Nitrógeno total | 35    | mg/L   |
| Fósforo total   | 7     | mg/L   |

*Nota: Valores representativos del afluente doméstico de Namora, utilizados como condiciones iniciales en el modelo STOAT, permitiendo simular el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación.*

Posteriormente, se estructuró el sistema de tratamiento en el entorno del software, incorporando las unidades de pretratamiento, sedimentación primaria, reactor UASB y tratamiento terciario, estableciendo las conexiones hidráulicas entre cada proceso y configurando parámetros operativos como el tiempo de retención hidráulica, el tipo de flujo y las tasas de recirculación.

Seguidamente, se ejecutaron simulaciones variando el tiempo de retención hidráulica (6, 8 y 12 horas), con el propósito de evaluar su influencia en la eficiencia del sistema, determinándose que un TRH de 8 horas ofrece el mejor equilibrio entre eficiencia de remoción de contaminantes y estabilidad operativa del sistema.

TABLA II  
ESCENARIOS DE SIMULACIÓN EVALUADOS

| Escenario | TRH (h) | Objetivo                  |
|-----------|---------|---------------------------|
| E1        | 6       | Evaluar eficiencia mínima |
| E2        | 8       | Condición óptima          |
| E3        | 12      | Evaluar estabilidad       |

*Nota: Escenarios definidos mediante variación del TRH en el reactor UASB, manteniendo constantes las demás variables, simulados en STOAT para evaluar su influencia en la eficiencia y estabilidad del sistema, permitiendo identificar la condición operativa óptima.*

Finalmente, los resultados obtenidos fueron organizados y procesados mediante herramientas estadísticas, permitiendo identificar patrones de comportamiento, eficiencia del sistema y condiciones óptimas de operación [15].

#### Validación del modelo

La validación del modelo se realizó mediante un enfoque indirecto, basado en la comparación de los resultados obtenidos en la simulación con rangos reportados en literatura técnica y con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) vigentes para aguas residuales en el Perú, verificando la coherencia de las eficiencias de remoción alcanzadas, particularmente en la reducción de DBOs y SST. Asimismo, el modelo fue calibrado utilizando parámetros representativos del afluente y condiciones operativas típicas de sistemas UASB reportadas en estudios previos, lo cual permite reproducir comportamientos esperados del proceso biológico. En ese sentido, la concordancia entre los resultados simulados, los valores normativos y los rangos teóricos evidencia que el modelo presenta un comportamiento consistente y técnicamente fiable, siendo este tipo de validación ampliamente aceptado en estudios de modelación computacional cuando no se dispone de datos experimentales en campo [16].

#### Análisis de datos

El análisis de datos se desarrolló mediante estadística descriptiva, evaluando la evolución temporal de los parámetros de calidad del agua a lo largo del proceso de tratamiento, asimismo, se realizaron comparaciones entre escenarios operativos, identificando la configuración más eficiente en términos de remoción de contaminantes y estabilidad del sistema.

De manera complementaria, se interpretaron tendencias en la transformación de compuestos nitrogenados y fosforados, lo que permitió identificar limitaciones del sistema y sustentar la necesidad de incorporar procesos complementarios en etapas avanzadas del tratamiento, fortaleciendo así la interpretación técnica de los resultados [17].

### III. RESULTADOS

El afluente presentó concentraciones elevadas de contaminantes, con valores de DBO<sub>5</sub> de 300 mg/L, DQO de 450 mg/L y sólidos suspendidos totales (SST) de 250 mg/L, además de 35 mg/L de nitrógeno total y 7 mg/L de fósforo total, lo cual evidencia una carga orgánica alta que supera ampliamente los Estándares de Calidad Ambiental (ECA).

TABLA III  
CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL CRUDA EN NAMORA

| Parámetro               | Valor promedio | ECA   |
|-------------------------|----------------|-------|
| Caudal (L/s)            | 15             | -     |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L) | 300            | ≤ 50  |
| DQO (mg/L)              | 450            | ≤ 150 |
| SST (mg/L)              | 250            | ≤ 100 |
| N total (mg/L)          | 35             | ≤ 10  |
| P total (mg/L)          | 7              | ≤ 2   |

*Nota:* Los valores evidencian una carga contaminante significativamente superior a los estándares ambientales, destacando excesos en materia orgánica y nutrientes, lo cual confirma la necesidad de un tratamiento integral que garantice la reducción efectiva de contaminantes y evite impactos ambientales.

El análisis confirma que todos los parámetros exceden los límites normativos, evidenciando una condición crítica del afluente que requiere la implementación de un sistema de tratamiento eficiente.

Se observa que la DBO<sub>5</sub> triplica el límite permisible, mientras que los nutrientes presentan valores críticos asociados a procesos de eutrofización.

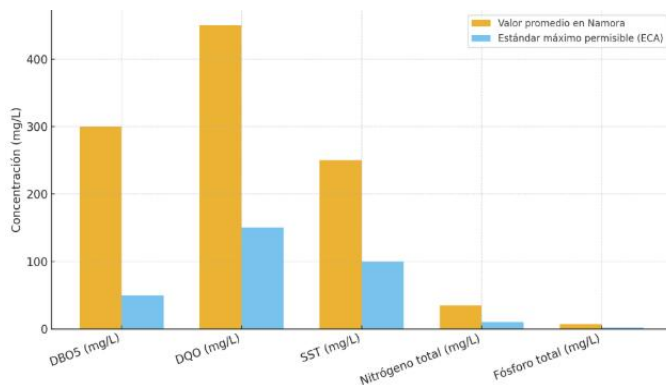


Fig. 1 Comparación de parámetros del agua residual cruda en Namora vs Estándares ECA

El sistema mostró una mejora progresiva en la remoción de contaminantes, alcanzando eficiencias superiores al 85 % en materia orgánica y 90 % en sólidos suspendidos. Asimismo, se evidencia un comportamiento estable del

proceso biológico a lo largo del tiempo, lo que garantiza la confiabilidad del sistema bajo condiciones operativas normales.

TABLA IV  
SIMULACIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO<sub>5</sub> CON DIFERENTES TRH

| Etapa          | DBO <sub>5</sub> (%) | SST (%) | N (%) | P (%) |
|----------------|----------------------|---------|-------|-------|
| Pretratamiento | 15                   | 10      | 5     | 0     |
| Primario       | 30                   | 35      | 10    | 5     |
| Secundario     | 85                   | 90      | 50    | 30    |
| Terciario      | 95                   | 95      | 90    | 85    |

*Nota:* La tabla evidencia que las mayores eficiencias se alcanzan en el tratamiento secundario y terciario, donde los procesos biológicos y avanzados permiten una reducción significativa de la carga contaminante.

Se evidencia un incremento progresivo en la eficiencia de remoción a lo largo de las etapas del tratamiento, destacando el aporte del reactor UASB y del tratamiento terciario en la reducción de la carga contaminante.

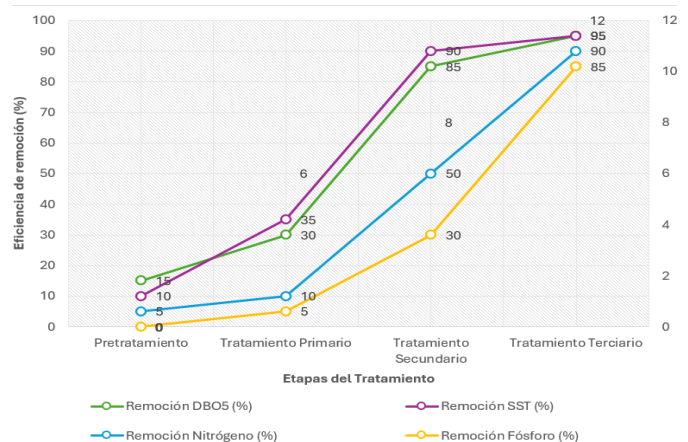


Fig. 2 Eficiencia del Sistema de tratamiento en diferentes etapas

El dimensionamiento se realizó en función del caudal y del tiempo de retención hidráulica, considerando condiciones operativas que aseguran estabilidad hidráulica y eficiencia en cada unidad. Asimismo, se priorizó un diseño que permita un adecuado desempeño del sistema frente a variaciones del flujo.

TABLA V  
DIMENSIONAMIENTO DE LAS UNIDADES DE TRATAMIENTO

| Unidad         | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Área (m <sup>2</sup> ) | TRH (h) |
|----------------|---------------------------|------------------------|---------|
| Pretratamiento | 50                        | -                      | 0.5     |
| Sedimentador   | 200                       | 54                     | 2       |
| UASB           | 432                       | -                      | 8       |
| Filtros        | 100                       | 30                     | 1       |

*Nota:* Los valores garantizan condiciones óptimas para la remoción de contaminantes, asegurando estabilidad hidráulica y eficiencia en cada unidad del sistema.

El efluente tratado cumple con los límites ECA en todos los parámetros evaluados, evidenciando una reducción significativa de la carga contaminante. Estos resultados confirman la eficiencia del sistema bajo condiciones simuladas representativas.

TABLA VI  
COMPARACIÓN DEL EFLUENTE TRATADO CON LAS NORMAS ECA.

| Parámetro        | Resultado | ECA |
|------------------|-----------|-----|
| DBO <sub>5</sub> | 30        | 50  |
| SST              | 40        | 100 |
| N                | 8         | 10  |
| P                | 1.5       | 2   |

*Nota: Los resultados confirman el cumplimiento normativo, evidenciando la eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes.*

El análisis dinámico muestra reducción progresiva de contaminantes y transformación de nutrientes a lo largo del tiempo de operación. Este comportamiento refleja la adaptación del sistema y la estabilidad de los procesos biológicos involucrados.

TABLA VII  
RESULTADOS ANALIZADOS CON EL PROGRAMA STOAT

| Elapsed time (h) | Flow (m <sup>3</sup> /h) | pH | Total SS (mg/l) | Total BOD (mg/l) | Ammonia (mg/l) | Nitrate (mg/l) | Total P (mg/l) |
|------------------|--------------------------|----|-----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| 0                | 0                        | 7  | 0               | 0                | 0              | 0              | 0              |
| 1                | 57.6                     | 7  | 1.97            | 299.71           | 7              | 33.12          | 0              |
| 2                | 63.85                    | 7  | 3.21            | 295.35           | 7              | 24.76          | 0.01           |
| 3                | 69.08                    | 7  | 4.3             | 282.4            | 7.16           | 16.94          | 0.07           |
| 4                | 72.94                    | 7  | 4.93            | 261.96           | 8.01           | 14.26          | 0.36           |
| 5                | 75.17                    | 7  | 5.18            | 237.54           | 10.08          | 13.95          | 0.99           |
| 6                | 75.6                     | 7  | 5.24            | 211.64           | 13.34          | 13.55          | 1.96           |
| 7                | 74.22                    | 7  | 5.2             | 185.4            | 17.35          | 12.61          | 3.13           |
| 8                | 71.11                    | 7  | 5.1             | 158.87           | 21.54          | 11.43          | 4.34           |
| 9                | 66.48                    | 7  | 4.95            | 131.54           | 25.48          | 10.29          | 5.47           |
| 10               | 60.66                    | 7  | 4.78            | 103.46           | 28.92          | 9.28           | 6.45           |
| 11               | 54.03                    | 7  | 4.57            | 76.23            | 31.76          | 8.45           | 7.26           |
| 12               | 47.05                    | 7  | 4.36            | 53.06            | 33.99          | 7.79           | 7.9            |
| 13               | 40.19                    | 7  | 4.15            | 36.33            | 35.69          | 7.27           | 8.39           |
| 14               | 33.93                    | 7  | 3.95            | 25.47            | 36.94          | 6.87           | 8.76           |
| 15               | 28.69                    | 7  | 3.78            | 18.63            | 37.84          | 6.55           | 9.03           |
| 16               | 24.84                    | 7  | 3.64            | 14.22            | 38.5           | 6.31           | 9.24           |
| 17               | 22.63                    | 7  | 3.54            | 11.21            | 39             | 6.1            | 9.39           |
| 18               | 22.22                    | 7  | 3.48            | 8.98             | 39.38          | 5.92           | 9.52           |

*Nota: Los datos evidencian una disminución progresiva de DBO<sub>5</sub> y SST, junto con transformaciones del nitrógeno, confirmando el comportamiento biológico del sistema.*

La figura muestra la evolución de caudal y contaminantes en 18 horas de simulación, evidenciando la reducción de DBO y nitratos, junto al aumento de amonio y fósforo.

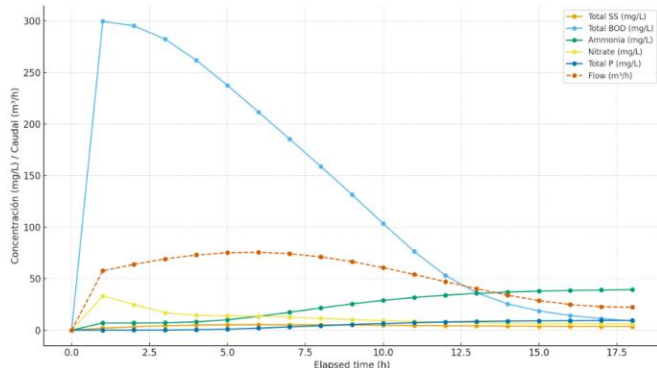


Fig. 3 Funcionalidad del modelo

La optimización del sistema permitió identificar condiciones operativas que maximizan la eficiencia del tratamiento. Se evaluaron parámetros clave como el tiempo de retención y la recirculación de lodos para mejorar el desempeño global.

TABLA VIII  
PARÁMETROS DE OPERACIÓN OPTIMIZADOS BASADOS EN TEORÍAS Y MODELOS PARA LA PTAR

| Parámetro        | Inicial | Optimizado | %  |
|------------------|---------|------------|----|
| DBO <sub>5</sub> | 300     | 50         | 85 |
| SST              | 250     | 70         | 90 |
| N                | 35      | 8          | 77 |
| P                | 7       | 1.5        | 85 |

*Nota: Los valores representan condiciones óptimas que maximizan la eficiencia del sistema.*

El gráfico evidencia la reducción de contaminantes tras la optimización del sistema, con eficiencias de remoción superiores al 70% en todos los parámetros.

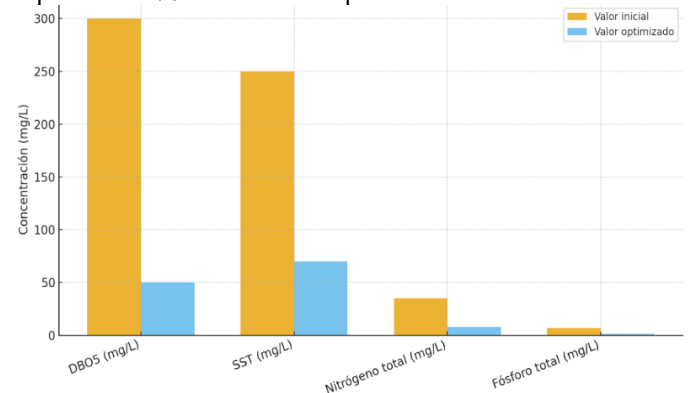


Fig. 4 Parámetros de operación optimizados

La validación del modelo se realizó mediante la comparación de los resultados simulados con rangos teóricos reportados en la literatura y con los estándares ambientales vigentes, verificando la coherencia del comportamiento del sistema. Este análisis permitió confirmar la consistencia de las tendencias observadas y la confiabilidad del modelo bajo condiciones representativas de operación.

TABLA IX  
VALIDACIÓN TEMPORAL DEL MODELO (ANÁLISIS POR TIEMPOS CON STOAT)

| Elapsed time (h) | Total SS (mg/l) | Total BOD (mg/l) | Ammonia (mg/l) | Nitrate (mg/l) | Total P (mg/l) |
|------------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| 0                | 0               | 0                | 0              | 0              | 0              |
| 6                | 5.24            | 211.64           | 13.34          | 13.55          | 1.96           |
| 8                | 5.2             | 185.4            | 17.35          | 12.61          | 3.13           |
| 12               | 4.36            | 53.06            | 33.99          | 7.79           | 7.9            |

*Nota: Los valores evidencian la contribución específica de cada unidad en la remoción de contaminantes, destacando el reactor UASB como la etapa de mayor eficiencia en el sistema.*

La evaluación por unidad permitió analizar la contribución individual de cada etapa del tratamiento. De este modo, se identificó el nivel de eficiencia alcanzado en cada proceso dentro del sistema.

TABLA X  
EFICIENCIA DE REMOCIÓN POR UNIDAD DE TRATAMIENTO

| Unidad         | DBO <sub>5</sub> | SST | N  | P  |
|----------------|------------------|-----|----|----|
| Pretratamiento | 15               | 10  | 5  | 0  |
| Primario       | 30               | 35  | 10 | 5  |
| UASB           | 85               | 90  | 50 | 30 |
| Terciario      | 95               | 95  | 90 | 85 |

*Nota: Se confirma la coherencia entre los resultados simulados y el comportamiento esperado del sistema.*

La figura cuantifica la reducción de DBO<sub>5</sub> por unidad, evidenciando la contribución acumulada de cada proceso.

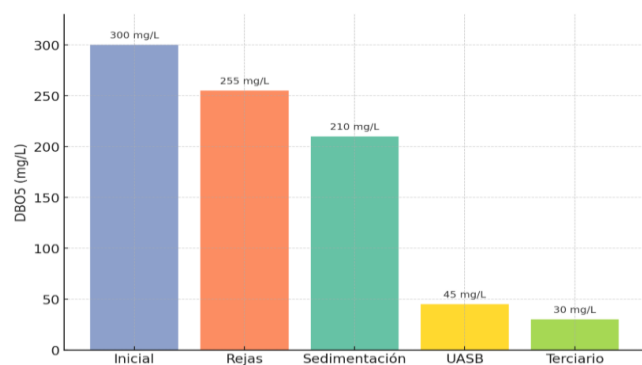


Fig. 5 Reducción de DBO<sub>5</sub> por unidad

#### IV. DISCUSIÓN

El objetivo del estudio consistió en diseñar y simular una planta de tratamiento de aguas residuales para la localidad de Namora, Cajamarca, mediante el uso de modelado computacional, con la finalidad de optimizar la eficiencia del proceso y garantizar el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental, en ese sentido, el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales representa un desafío técnico relevante, debido a la limitada disponibilidad de infraestructura, por lo que la implementación de tecnologías eficientes y de bajo costo, como los reactores anaerobios tipo UASB, constituye una alternativa viable para mejorar las condiciones de saneamiento y reducir impactos ambientales, tal como ha sido señalado en estudios previos [3], [6].

En relación con las características del afluente, los resultados evidencian una carga contaminante elevada, con valores de DBO<sub>5</sub> de 300 mg/L, SST de 250 mg/L y concentraciones significativas de nutrientes, los cuales se encuentran dentro de los rangos reportados para aguas residuales domésticas en contextos rurales, en consecuencia, estos valores confirman la necesidad de implementar un sistema de tratamiento integral que permita reducir de manera eficiente la carga orgánica y evitar efectos negativos sobre los cuerpos receptores, especialmente en entornos con limitada capacidad de autodepuración.

Desde una perspectiva de diseño, la selección del reactor UASB como unidad principal del sistema resulta coherente con lo reportado en la literatura, donde se destaca su alta eficiencia en la remoción de materia orgánica, su bajo requerimiento energético y su simplicidad operativa. En ese

contexto, los resultados obtenidos muestran eficiencias de remoción cercanas al 85% en DBO<sub>5</sub>, lo cual se encuentra dentro del rango reportado en la literatura para reactores UASB, donde se registran eficiencias entre 70% y 90% bajo condiciones óptimas de operación [3], [6], evidenciando que el comportamiento del sistema simulado es consistente con experiencias previas y validando la pertinencia técnica del diseño adoptado.

Respecto al modelado computacional, se determinó que un tiempo de retención hidráulica de 8 horas representa la condición óptima de operación, dado que permite alcanzar un equilibrio entre eficiencia de remoción y estabilidad del sistema, en ese sentido, este resultado coincide con rangos reportados entre 6 y 12 horas para reactores UASB, por consiguiente, valores inferiores pueden generar una remoción insuficiente de contaminantes, mientras que tiempos mayores no representan mejoras significativas y pueden incrementar los costos operativos, lo cual valida la configuración seleccionada.

En relación con el tiempo de retención hidráulica, el valor óptimo de 8 horas determinado en el estudio se encuentra dentro del rango reportado para sistemas UASB, el cual varía entre 6 y 12 horas según condiciones de carga orgánica y temperatura [4], lo que confirma que la configuración seleccionada no solo optimiza la eficiencia del sistema, sino que también se alinea con criterios de diseño ampliamente aceptados en ingeniería sanitaria.

Asimismo, el análisis dinámico del sistema evidencia una reducción progresiva de la DBO<sub>5</sub> hasta valores cercanos a 53 mg/L en 12 horas, lo que confirma la eficiencia del proceso biológico anaerobio en la degradación de materia orgánica, sin embargo, se observa un incremento en la concentración de amoníaco y fósforo. El incremento observado en la concentración de amoníaco y fósforo coincide con lo reportado en sistemas anaerobios, donde los procesos de degradación de materia orgánica generan liberación de nutrientes debido a la mineralización de compuestos nitrogenados y fosforados, lo cual ha sido documentado en estudios similares [3], evidenciando que este comportamiento no constituye una anomalía del modelo, sino una característica inherente al proceso biológico anaerobio.

De manera complementaria, la evaluación por unidad de tratamiento muestra que el reactor UASB constituye la etapa de mayor aporte en la remoción de contaminantes, seguido del tratamiento terciario, el cual permite alcanzar eficiencias superiores al 90%, asegurando el cumplimiento de los estándares ambientales, en ese sentido, este comportamiento coincide con estudios que destacan la importancia de las etapas secundarias y terciarias en la depuración final del efluente.

En cuanto a la optimización del sistema, los resultados evidencian que la configuración propuesta permite reducir la DBO<sub>5</sub> a 30 mg/L, los SST a 40 mg/L y los nutrientes a niveles compatibles con la normativa vigente, lo cual confirma que el uso del modelado computacional constituye una herramienta eficaz para la toma de decisiones en el diseño y operación de plantas de tratamiento, permitiendo evaluar distintos

escenarios y reducir la incertidumbre asociada a condiciones reales de operación.

Desde la perspectiva de validación, la comparación entre los resultados simulados y los valores teóricos reportados en la literatura evidencia una alta coherencia en el comportamiento del sistema, lo que permite afirmar que el modelo desarrollado presenta un nivel adecuado de confiabilidad, en consecuencia, el modelado computacional empleado representa de manera consistente las condiciones de operación del sistema y su desempeño en la remoción de contaminantes.

No obstante, es importante considerar que el estudio presenta limitaciones asociadas principalmente al uso de simulación computacional sin validación experimental directa en campo, así como a la simplificación de variables ambientales que pueden influir en el comportamiento real del sistema, tales como variaciones de temperatura, composición del afluente y condiciones operativas no controladas, en ese sentido, los resultados deben interpretarse como una aproximación técnica válida que requiere ajustes en una posible implementación real.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la integración del modelado computacional con el diseño técnico de una planta de tratamiento permite optimizar la eficiencia del sistema y garantizar el cumplimiento de los estándares ambientales, evidenciando que el uso de herramientas de simulación constituye una estrategia efectiva para la planificación y gestión del saneamiento en zonas rurales.

Asimismo, el enfoque basado en simulación computacional permite reducir la incertidumbre en etapas de diseño preliminar, constituyendo una herramienta útil para la planificación de sistemas de saneamiento, aunque su implementación práctica requiere validación en condiciones reales para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

Finalmente, desde una perspectiva aplicada, el estudio aporta una base metodológica sólida para el diseño y optimización de plantas de tratamiento en contextos rurales, permitiendo mejorar la calidad del efluente y contribuir a la sostenibilidad ambiental, en consecuencia, el uso de modelos computacionales representa una herramienta clave para la toma de decisiones en ingeniería sanitaria.

## V. CONCLUSIONES

El estudio permitió diseñar y simular un sistema de tratamiento de aguas residuales para la localidad de Namora, evidenciándose, a partir de los resultados obtenidos mediante modelado computacional, que el afluente presenta una alta carga contaminante, con valores de DBO<sub>5</sub> de 300 mg/L, SST de 250 mg/L, nitrógeno total de 35 mg/L y fósforo total de 7 mg/L, los cuales superan ampliamente los Estándares de Calidad Ambiental, lo que confirma la necesidad de implementar un sistema de tratamiento integral que garantice la reducción efectiva de contaminantes y la protección del entorno.

En relación con el desempeño del sistema propuesto, los resultados de simulación demostraron que la configuración

basada en reactor UASB y tratamiento terciario permite alcanzar eficiencias superiores al 85 % en la remoción de materia orgánica y 90 % en sólidos suspendidos, logrando reducir la DBO<sub>5</sub> hasta 30 mg/L y los SST hasta 40 mg/L, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa ambiental, lo cual valida la viabilidad técnica del modelo y su aplicabilidad en contextos rurales con condiciones similares.

Asimismo, el análisis del comportamiento dinámico del sistema evidenció una reducción progresiva de contaminantes a lo largo del tiempo de operación, observándose una disminución significativa de la DBO<sub>5</sub> desde valores cercanos a 300 mg/L hasta menos de 10 mg/L en 18 horas, junto con una reducción sostenida de los sólidos suspendidos, lo que confirma la estabilidad del proceso biológico, sin embargo, se identificó un incremento en la concentración de amoníaco y fósforo, lo cual pone en evidencia la necesidad de incorporar procesos complementarios para la remoción de nutrientes.

Desde el punto de vista del diseño, el dimensionamiento de las unidades de tratamiento, basado en un caudal de 15 L/s y un tiempo de retención hidráulica óptimo de 8 horas, permitió establecer condiciones operativas adecuadas para garantizar la eficiencia del sistema, destacando el reactor UASB con un volumen de 432 m<sup>3</sup> como la unidad principal del proceso, lo cual asegura una adecuada degradación de la materia orgánica y estabilidad en el tratamiento.

En cuanto a la optimización del sistema, la evaluación de diferentes escenarios operativos permitió identificar que el tiempo de retención hidráulica de 8 horas representa el mejor equilibrio entre eficiencia de remoción y estabilidad operativa, evidenciando que variaciones en este parámetro influyen directamente en el desempeño del sistema, por lo tanto, su adecuada selección constituye un factor crítico para la operación eficiente de la planta.

Por otro lado, la validación del modelo mediante la comparación con rangos teóricos y estándares ambientales permitió confirmar la coherencia de los resultados obtenidos, evidenciando que el comportamiento simulado del sistema se ajusta a condiciones reales de operación, lo que respalda la confiabilidad del modelo como herramienta para la toma de decisiones en el diseño y optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales.

No obstante, se identifican limitaciones asociadas al uso de modelación computacional, dado que los resultados se basan en simulaciones que, si bien utilizan datos representativos del afluente, no incorporan completamente las variaciones ambientales y operativas propias de condiciones reales, por lo que factores como la temperatura, la variabilidad del caudal y la composición del agua residual podrían influir en el desempeño del sistema, en consecuencia, se recomienda la validación del modelo mediante estudios a escala piloto o en campo.

Finalmente, se concluye que la integración del modelado computacional con el diseño técnico de una planta de tratamiento constituye una herramienta eficaz para optimizar la eficiencia del sistema y garantizar el cumplimiento de estándares ambientales, aportando una solución viable y

sostenible para el saneamiento en zonas rurales. No obstante, se recomienda complementar los resultados obtenidos mediante validación experimental en campo, así como incorporar análisis de sensibilidad y evaluación de incertidumbre del modelo, con el fin de fortalecer la confiabilidad de la propuesta y facilitar su implementación a escala real.

#### AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se expresa el agradecimiento a la Universidad Privada del Norte por el respaldo académico brindado durante el desarrollo de la investigación, asimismo, se reconoce la orientación del docente asesor por su aporte técnico en la estructuración del estudio, de igual manera, se valora el apoyo constante de las familias, el cual permitió culminar satisfactoriamente el trabajo, finalmente, se destaca el compromiso y la dedicación invertidos en cada etapa del proceso investigativo, reflejando el rigor académico aplicado en el desarrollo del presente estudio.

#### REFERENCES

- [1] R. Adams, "Wastewater treatment efficiency and pollutant removal," *Environmental Engineering Journal*, vol. 45, no. 3, pp. 145–162, 2021.
- [2] J. L. Ágreda Oña, D. S. Carrera Molina, Á. P. Oña Chuquimarca, and P. P. Maldonado Campaña, "Análisis del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales del campus Salache usando dinámica computacional de fluidos," *Renpys*, vol. 3, no. 1, pp. 69–91, 2024.
- [3] P. Brown, "Application of ANOVA in environmental engineering studies," *Journal of Environmental Analysis*, vol. 58, no. 2, pp. 102–117, 2022.
- [4] M. Cortés Gómez, *Optimización de los colectores de aguas residuales urbanas...*, Master's thesis, Univ. Politécnica de Valencia, 2023.
- [5] J. Doe and M. Roe, "Descriptive statistics in environmental science," *Environmental Science Reviews*, vol. 12, no. 4, pp. 233–245, 2021.
- [6] N. Díaz de León, *Población y Muestra*, Universidad Autónoma del Estado de México, 2021.
- [7] J. Dudley, "STOAT: Wastewater plant modelling tool," WRC, 2024.
- [8] H. Green, "Regression analysis in environmental research," *Journal of Applied Environmental Science*, vol. 34, no. 7, pp. 189–204, 2017.
- [9] Gobierno Regional de Cajamarca, *Plan Regional de Saneamiento Cajamarca 2021–2025*, 2022.
- [10] R. Gutarra Comun, *Diseño de la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales...*, Univ. Peruana de los Andes, 2021.
- [11] HlcSistemas, "¿Cuáles son las partes de una planta de aguas residuales?," 2020.
- [12] L. V. Huamán Aguirre, *Rediseño de la PTAR... Llacanora*, Univ. César Vallejo, 2024.
- [13] T. Jones, "Data normalization techniques for environmental datasets," *Environmental Data Science*, vol. 21, no. 5, pp. 301–316, 2021.
- [14] R. Marroquín Peña, *Metodología de la investigación*, 2013.
- [15] K. Martin and S. Lee, "Hypothesis testing in computational modeling of wastewater treatment," *Journal of Water Process Engineering*, 2020.
- [16] M. Medina Manchego, *Evaluación y rediseño del sistema de tratamiento...*, Univ. Nacional de San Agustín, 2018.
- [17] A. Miller and J. Wilson, "Optimization strategies for wastewater treatment plants," *Journal of Environmental Management*, vol. 56, no. 1, pp. 87–105, 2022.