

Tipo de artículo: de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v6i21.100>

Simulación computacional del impacto de emisores de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros

Carlos Trujillo-Vera
<https://orcid.org/0000-0002-8796-7980>
ctrujillov@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Armando Antonio Salinas Sánchez
<https://orcid.org/0000-0002-9840-0920>
asalinas1@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Iris Elena Aliaga Villafuerte
<https://orcid.org/0000-0002-1035-8941>
ialiaga@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

Mario Otto Leonidas Paz Zegarra
<https://orcid.org/0000-0001-9483-2075>
mpazz@unsa.edu.pe
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Arequipa, Perú

*Autor de correspondencia: ctrujillov@unsa.edu.pe

Recibido (11/05/2025), Aceptado(15/06/2025)

Resumen. - En este trabajo se analiza el impacto ambiental de emisores submarinos de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros, mediante un enfoque de simulación computacional implementado en Python. Se emplea un modelo analítico estacionario de advección–difusión–reacción, que permite representar la dispersión del contaminante en el campo lejano del penacho de descarga. Se comparan dos escenarios: uno base, que representa las condiciones actuales del emisor, y otro con medidas de mitigación, que incluyen reducción en la carga contaminante, mayor profundidad y mejor dilución inicial. Los resultados muestran diferencias significativas en las concentraciones, el área de excedencia respecto a un umbral ambiental, y la distancia de cumplimiento. Esta evidencia respalda la utilidad de modelos numéricos sencillos y accesibles como herramienta de apoyo para el diseño y evaluación de emisores, así como para la planificación ambiental en zonas costeras vulnerables.

Palabras clave: simulación computacional, emisores submarinos, penacho de contaminación, advección–difusión, ecosistemas marinos costeros, Python.

Computational Simulation of the Impact of Wastewater Emitters on Coastal Marine Ecosystems

Abstract. This article analyzes the environmental impact of submarine wastewater outfalls on coastal marine ecosystems through a computational simulation approach implemented in Python. A stationary analytical model of advection–diffusion–reaction is used to represent contaminant dispersion in the far-field region of the discharge plume. Two scenarios are compared: a base scenario representing current conditions, and a mitigation scenario involving reduced contaminant load, increased depth, and improved initial dilution. The results show significant differences in concentration levels, area exceeding an environmental threshold, and compliance distance. These findings support the use of simple and accessible numerical models as a decision-support tool for outfall design, environmental assessment, and coastal management in vulnerable areas.

Keywords: computational simulation, submarine outfalls, pollution plume, advection–diffusion, coastal marine ecosystems, Python.

I. INTRODUCCIÓN

La descarga de aguas servidas mediante emisores y *outfalls* marinos introduce nutrientes, patógenos, microplásticos y otros contaminantes a zonas costeras de alta sensibilidad ecológica. A escala global, el nitrógeno derivado de aguas residuales afecta a una gran fracción de arrecifes coralinos y pastos marinos, alterando procesos biogeoquímicos y la estructura de comunidades; además, los *outfalls* pueden vehicular microplásticos que actúan como sustratos para bacterias potencialmente patógenas. Estas presiones se magnifican en áreas con tiempos de residencia elevados y en contextos de urbanización costera acelerada [1].

La simulación computacional se ha consolidado como herramienta clave para comprender y gestionar estos impactos, integrando la hidrodinámica (mezcla, dilución y dispersión de penachos) con módulos de calidad de agua (nutrientes, fitoplancton, oxígeno disuelto). En este campo destacan enfoques Eulerianos y Lagrangianos implementados en plataformas como *Delft3D* y *ROMS*, capaces de representar el comportamiento del penacho desde la zona de campo cercano hasta el campo lejano y de evaluar escenarios de manejo. La literatura resalta que modelar la hidrodinámica y la dilución en aguas costeras es central para la evaluación ambiental de emisores, y que la combinación con datos *in situ* y satelitales mejora notablemente la capacidad de diagnóstico [2]. Por otra parte, la teledetección de alta resolución (por ejemplo, Sentinel-2) se ha convertido en un aliado para detectar y seguir penachos turbios asociados a *outfalls*, derivar firmas espectrales del efluente y caracterizar patrones estacionales, ofreciendo una línea independiente de validación para los modelos numéricos [3].

Más recientemente, los modelos físico-biogeoquímicos acoplados permiten explorar políticas de control de nutrientes en emisores: reducciones de nitrógeno inorgánico disuelto y esquemas de reciclaje del efluente muestran efectos cuantificables sobre productividad primaria neta, pH y oxígeno en zonas receptoras. Estos análisis apoyan decisiones de ingeniería (profundidad, difusores, caudales) y de gestión (tratamiento avanzado, reuso), y son especialmente relevantes bajo variabilidad climática que modifica la retención y la mezcla costera [4], [5].

En este trabajo se presenta un estudio del impacto de emisores de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros, desde una perspectiva de ingeniería y mediante una simulación computacional implementada en Python. El enfoque se basa en un modelo analítico de advección-difusión-reacción en estado estacionario, que permite representar la dispersión horizontal del contaminante y su atenuación a lo largo de la trayectoria del penacho. Se comparan dos escenarios: uno base, con condiciones actuales del emisor, y otro con medidas de mitigación que incluyen reducción de carga, mayor dilución inicial y mayor profundidad.

La simulación permite calcular campos de concentración, perfiles longitudinales y métricas cuantitativas como el área de excedencia respecto a un umbral ambiental y la distancia de cumplimiento. Los resultados obtenidos permiten visualizar de manera clara los efectos de las descargas sobre el medio receptor, así como evaluar la efectividad de estrategias técnicas orientadas a reducir su impacto. Este estudio contribuye con evidencia científica para la toma de decisiones en contextos costeros vulnerables, demostrando el valor de herramientas computacionales accesibles y adaptables para el análisis ambiental de emisores submarinos.

II. DESARROLLO

El vertimiento de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros representa una de las principales fuentes de deterioro ambiental, debido a la presencia de nutrientes, patógenos, metales y microplásticos que modifican los procesos biogeoquímicos y amenazan la biodiversidad. Diversos estudios han evidenciado que el aporte de nitrógeno y fósforo provenientes de emisores submarinos genera procesos de eutrofización, disminución del oxígeno disuelto y pérdida de resiliencia en comunidades sensibles como arrecifes coralinos, pastos marinos y macroalgas [1], [2], [3]. Estos efectos no solo se limitan a la salud de los ecosistemas, sino que se extienden al ámbito social y sanitario, incrementando la exposición de las poblaciones humanas a contaminantes y patógenos, especialmente en zonas de recreación y pesca artesanal [4].

El diseño de emisores submarinos pretende atenuar estos riesgos mediante la dilución del efluente a cierta distancia de la costa; sin embargo, en contextos de baja dinámica oceánica los penachos de descarga tienden a mantenerse próximos a la línea litoral, afectando la calidad del agua y propiciando fenómenos como la proliferación de fitoplancton nocivo y la dispersión de microplásticos [2], [5]. Frente a esta complejidad, la simulación computacional ha adquirido un papel central, pues permite reproducir la hidrodinámica de los penachos, cuantificar procesos de mezcla y dispersión, e integrar modelos de calidad de agua capaces de representar la dinámica de nutrientes, oxígeno y clorofila-a [6], [7], [8], [9]. El desarrollo de enfoques Lagrangianos, además, ha permitido rastrear partículas en suspensión y analizar su transporte a diferentes escalas, ofreciendo una comprensión más precisa de los riesgos ecológicos y sanitarios [2].

Los avances recientes en teledetección han reforzado estas capacidades de análisis. Imágenes de alta resolución provenientes de satélites como *Sentinel-2* y *Landsat* se han empleado con éxito para identificar plumas de turbidez asociadas a descargas submarinas, proporcionando información valiosa para la validación de modelos numéricos y la calibración de parámetros hidrodinámicos [7]. De igual manera, la incorporación de datos *in situ*, como perfiles de nutrientes y turbidez, fortalece la robustez de las simulaciones y permite generar diagnósticos más confiables de los impactos ambientales [8].

En este sentido, la modelación numérica no se limita a describir la situación presente, sino que se proyecta como una herramienta para la planificación y gestión sostenible. Los escenarios de simulación pueden explorar medidas de mitigación como la reducción de cargas contaminantes, la optimización del diseño de difusores, la profundización de los emisores y la implementación de tratamientos avanzados de aguas residuales [6], [8]. Todo ello resulta particularmente relevante en un contexto de variabilidad y cambio climático, en el cual los patrones de circulación oceánica, la estratificación térmica y los procesos de retención costera experimentan modificaciones que intensifican la vulnerabilidad de los ecosistemas receptores [3]. Así, el marco teórico sobre la simulación computacional de emisores marinos refleja no solo una síntesis del conocimiento existente, sino también un fundamento sólido para avanzar en soluciones innovadoras y adaptativas orientadas a la conservación de los ecosistemas costeros y al bienestar de las comunidades que dependen de ellos.

A. Aguas servidas en ecosistemas marinos costeros

Las aguas servidas constituyen una mezcla compleja de materia orgánica, nutrientes inorgánicos, microorganismos patógenos, fármacos, metales pesados y microplásticos que, al ser descargadas en ecosistemas marinos costeros, generan múltiples impactos ambientales y sociales. A diferencia de otros contaminantes puntuales, las aguas residuales poseen un carácter persistente y difuso, pues incluyen tanto efluentes domésticos como descargas industriales y agrícolas, lo que amplifica su efecto en la columna de agua y en los sedimentos [1], [2]. En términos ecológicos, la liberación de nitrógeno y fósforo en exceso favorece procesos de eutrofización que desencadenan proliferaciones algales, disminución del oxígeno disuelto y mortalidad masiva de peces e invertebrados [3]. A ello se suma la presencia de microplásticos transportados por los emisores submarinos, que sirven como sustrato para comunidades bacterianas, algunas de ellas potencialmente patógenas, incrementando el riesgo de transmisión de enfermedades a organismos marinos y, eventualmente, a los seres humanos [2].

Los ecosistemas costeros, particularmente sensibles por su alta productividad biológica, presentan además una vulnerabilidad acentuada frente a la acumulación de contaminantes en hábitats críticos como arrecifes coralinos, manglares y praderas marinas [4]. El deterioro de estos ambientes repercute directamente en los servicios ecosistémicos que sostienen a las comunidades locales, afectando actividades como la pesca artesanal, el turismo y la recreación. Asimismo, la literatura científica ha documentado que los penachos generados por los emisores no siempre se diluyen de manera adecuada, ya que factores hidrodinámicos como las corrientes, la estratificación térmica o la morfología de la costa pueden favorecer la persistencia de zonas de alta concentración contaminante en las proximidades del litoral [5]. Este fenómeno agrava el impacto sobre la biota costera y plantea retos significativos para el diseño y la gestión de infraestructuras de disposición final de aguas residuales.

De este modo, el estudio de las aguas servidas en ecosistemas marinos no solo demanda un análisis de su composición química y biológica, sino también un abordaje integrado que incorpore herramientas de monitoreo, modelación numérica y políticas de gestión ambiental. La combinación de estas estrategias resulta esencial para mitigar los riesgos ecológicos y sanitarios, y para garantizar un manejo sostenible de las zonas costeras en un contexto de creciente presión antrópica [6], [7].

B. Representación conceptual del penacho de descarga

La dinámica de los emisores submarinos de aguas servidas puede ser entendida mediante el concepto de penacho, que describe la estructura tridimensional de la masa de agua contaminada desde el punto de descarga hasta su dispersión en el medio receptor. Este penacho se origina en el difusor del emisor, donde el efluente es inyectado al entorno marino, y su evolución está gobernada por procesos físicos como la advección, la difusión turbulenta y la mezcla vertical, además de reacciones biogeoquímicas que afectan la concentración de los contaminantes.

En la Figura 1 se muestra una representación esquemática del penacho en un ecosistema marino costero. Se observa cómo el efluente, al ser liberado por el emisor, genera una zona de alta concentración que se dispersa en forma de cola en la dirección de las corrientes marinas.

Esta distribución se representa matemáticamente como una función de la concentración en el espacio $c(x, y)$, donde x es la distancia longitudinal desde el difusor y y la distancia transver-

sal. La figura también identifica los elementos fundamentales del sistema: el cuerpo del emisor, el difusor, el fondo marino y la dirección de las aguas costeras.

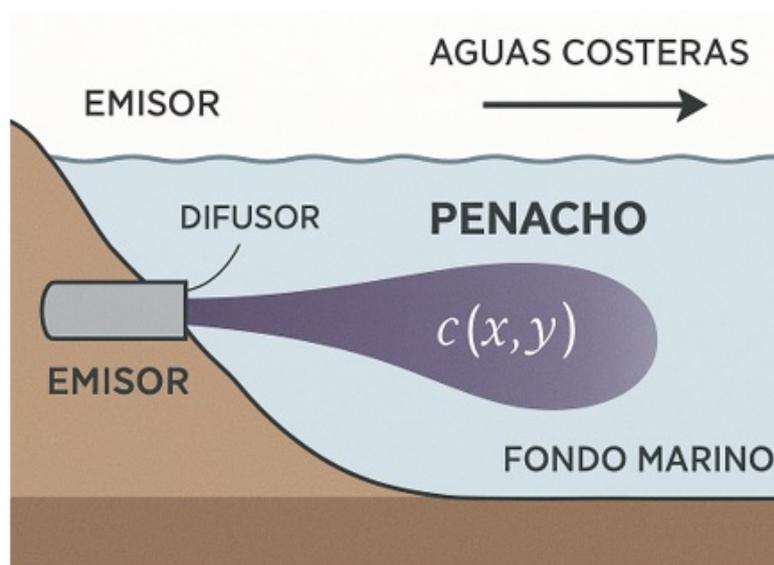


Fig. 1. Esquema conceptual del penacho generado por un emisor submarino de aguas servidas en un ecosistema marino costero. La concentración de contaminantes $c(x,y)$ se distribuye en el espacio debido a procesos de mezcla y transporte hidrodinámico [10], [11].

III. METODOLOGÍA

El estudio del impacto ambiental de emisores de aguas servidas en ecosistemas marinos costeros exige una aproximación metodológica que integre hidrodinámica, procesos biogeoquímicos y dinámica de contaminantes. Debido a la complejidad de los penachos de descarga, que involucran fenómenos de mezcla turbulenta, dilución inicial, dispersión advectiva y procesos de transformación química y biológica, la modelación computacional constituye la herramienta más robusta para comprender y proyectar sus efectos [5], [6]. Este tipo de modelos permite reproducir el transporte de nutrientes, patógenos y microplásticos desde la zona de descarga hasta el campo lejano, considerando las condiciones ambientales locales como mareas, corrientes, vientos, estratificación térmica y morfología costera [2], [7].

La metodología adoptada se fundamenta en la aplicación de modelos numéricos tridimensionales de dinámica de fluidos, ampliamente validados en la literatura científica, que representan tanto la evolución del penacho en la zona próxima al difusor como su dispersión en áreas más amplias. Se emplean enfoques Eulerianos para resolver la hidrodinámica y el transporte de solutos, complementados con módulos Lagrangianos que permiten rastrear partículas individuales y analizar la trayectoria de microplásticos o agregados de contaminantes [2]. Estos modelos han demostrado ser eficaces no solo en la caracterización del comportamiento físico del efluente, sino también en la estimación de parámetros de calidad de agua, tales como oxígeno disuelto, clorofila-a y nutrientes disueltos [6].

Además, la metodología contempla la simulación de distintos escenarios de descarga, con variaciones en caudal, profundidad del emisor y número de difusores. Estos experimentos permiten evaluar la influencia de las condiciones de diseño y operación sobre la dispersión del efluente, así como cuantificar la efectividad de medidas de mitigación como la reducción de

cargas contaminantes o la mejora en el tratamiento previo [3, 8]. En un contexto de cambio climático, donde la circulación oceánica y la estratificación se ven modificadas, esta aproximación proporciona una base robusta para proyectar impactos futuros y proponer políticas de gestión adaptativa.

Este enfoque ofrece una visión completa del efecto de los emisores de aguas servidas en los ecosistemas marinos costeros y proporciona información confiable para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y planificación territorial. En la Tabla 1 se presentan los diferentes modelos asociados a la hidrodinámica y las aguas submarinas servidas, lo que permite identificar los modelos matemáticos óptimos.

Tabla 1. Tabla comparativa de modelos de simulación aplicados a emisores submarinos.

Modelo	Enfoque principal	Escala de aplicación	Variables simuladas	Ventajas	Limitaciones
Delft3D	Hidrodinámica tridimensional con módulos de calidad de agua	Campo cercano y lejano	Corrientes, salinidad, temperatura, nutrientes, clorofila-a, oxígeno disuelto	Integración modular, validación amplia, capacidad para acoplar biogeoquímica	Alta demanda computacional, requiere series temporales largas
ROMS (Regional Ocean Modeling System)	Hidrodinámica costera y oceánica de alta resolución	Escalas regionales	Corrientes, temperatura, salinidad, transporte de contaminantes	Gran capacidad de resolución espacial y temporal, comunidad científica amplia	Complejidad de calibración y parametrización
MIKE 21	Modelación bidimensional de hidrodinámica y calidad de agua	Campo lejano y costero	Corrientes, oleaje, calidad de agua	Interfaz amigable, integración con monitoreo de aguas residuales	Menor capacidad tridimensional comparado con Delft3D o ROMS
CORMIX	Modelación de campo cercano (near-field)	Zona inmediata del difusor	Mezcla inicial, dilución	Rápido, específico para emisores, útil para diseño de difusores	No simula procesos de campo lejano ni acoplamiento biogeoquímico
VISUAL PLUMES (EPA)	Dilución y dispersión en campo cercano	Escenarios normativos	Turbidez, dilución inicial	Validado por agencias regulatorias, fácil de usar	Limitado a campo cercano, sin procesos ecológicos

Fuente: [12], [13], [14], [15], [16].

Dada la necesidad de analizar no solo el comportamiento inicial del penacho en las proximidades del difusor, sino también sus efectos a escala de ecosistemas marinos costeros, se seleccionó un modelo tridimensional e integrado, capaz de acoplar hidrodinámica y procesos de calidad de agua. Aunque herramientas como *CORMIX* y *Visual Plumes* son útiles en la fase de diseño preliminar, su alcance restringido al campo cercano limita su aplicación en estudios de impacto ambiental integral [5].

Por su parte, *MIKE 21* ofrece un marco bidimensional adecuado para evaluar procesos en campo lejano, pero resulta insuficiente cuando se requiere un enfoque vertical detallado [6].

En este estudio, la elección se centra en *Delft3D* y *ROMS*, debido a su capacidad para rep-

resentar la hidrodinámica costera en tres dimensiones, acoplar módulos de biogeoquímica y validar los resultados con datos observacionales y satelitales [7]. Ambos modelos han sido empleados ampliamente en investigaciones de calidad de agua y transporte de contaminantes en contextos marinos, lo que asegura una base metodológica robusta.

La selección responde a la necesidad de analizar la dispersión de nutrientes y contaminantes en escenarios múltiples, considerando tanto condiciones ambientales actuales como proyecciones bajo variabilidad climática.

IV. RESULTADOS

El estudio se basó en la simulación analítica del penacho de un emisor submarino, aplicando el modelo de advección–difusión–reacción para una fuente continua con mezcla vertical completa. La ecuación general empleada se presenta en la ecuación (1).

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - kC + \frac{QC_0}{H} \delta(x) \delta(y) \quad (1)$$

Donde:

- $C(x, y)$: concentración del contaminante en un punto del mar.
- U : velocidad del agua en dirección horizontal (corriente marina).
- K_y : coeficiente de difusión lateral (dispersión transversal del contaminante).
- k : velocidad de decaimiento (degradación o pérdida del contaminante).
- Q : caudal del emisor (volumen de agua descargada por segundo).
- C_0 : concentración inicial del contaminante en la descarga.
- H : profundidad del mar en el punto de descarga.
- $\delta(x)\delta(y)$: representa una fuente puntual localizada en el origen.

La solución analítica para $x > 0$ se expresa como en la ecuación (2).

$$\Delta C(x, y) = \frac{\frac{QC_0}{S_0}}{2\pi UH\sigma_y(x)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y(x)^2}\right) \exp\left(-\frac{kx}{U}\right) \quad (2)$$

Donde:

- $\Delta C(x, y)$: incremento de concentración debido a la descarga.
- $\sigma_y(x)$: ancho del penacho, que crece con la distancia longitudinal.
- S_0 : dilución inicial justo después de la descarga, causada por la turbulencia generada en el difusor.

Se simularon dos escenarios:

1. **Escenario base:** condiciones actuales del emisor.

2. **Escenario mejorado:** incremento en la dilución inicial, reducción de carga contaminante y mayor profundidad de descarga.

Para ambos escenarios se calcularon campos de concentración, perfiles longitudinales y métricas de área de excedencia en relación con un umbral de referencia ambiental.

En la Figura 2 se muestra la distribución espacial de la concentración del contaminante en un plano horizontal, bajo condiciones representativas del escenario actual. El eje horizontal representa la distancia longitudinal (x , en metros) desde el punto de descarga del emisor, mientras que el eje vertical corresponde a la distancia transversal al eje del penacho (y , en metros).

El gradiente de color indica la concentración en miligramos por litro (mg/L), según la escala cromática ubicada a la derecha. En este escenario se aprecia que el penacho se desarrolla de forma asimétrica a lo largo del eje x , con mayor concentración en las proximidades de la descarga y una disminución progresiva conforme aumenta la distancia.

La distribución transversal sigue un perfil de tipo gaussiano, con mayor intensidad en el centro del penacho y disminución hacia los extremos laterales. Esta forma es característica de procesos dominados por la advección longitudinal y la difusión transversal, bajo condiciones de mezcla vertical completa.

Las concentraciones máximas se localizan muy cerca del punto de descarga, pero son rápidamente diluidas por efecto del coeficiente de dispersión lateral (K_y) y la velocidad de la corriente (U). Sin embargo, se mantienen concentraciones detectables a lo largo de varios cientos de metros, lo que indica un área de influencia considerable.

Estos resultados son consistentes con valores típicos reportados para emisores submarinos en regiones costeras con hidrodinámica moderada y reflejan la importancia de evaluar la exposición ecológica de hábitats marinos situados dentro del eje del penacho.

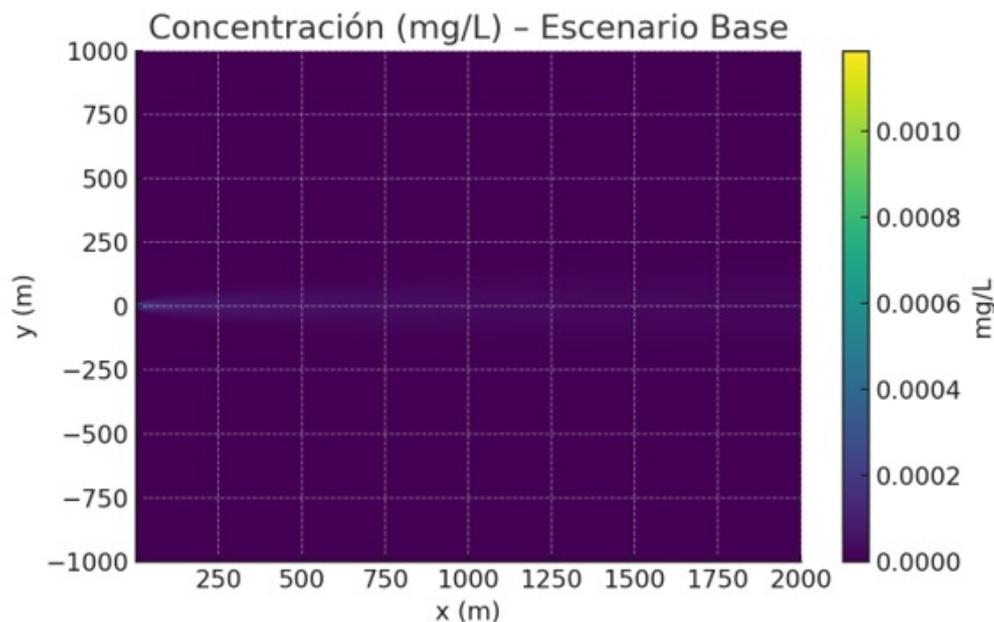


Fig. 2. Campo de concentración simulado (mg/L) en el Escenario Base para un emisor submarino de aguas servidas.

La Figura 3 representa la distribución espacial de la concentración del contaminante tras la implementación de un conjunto de medidas de mitigación orientadas a reducir el impacto ambiental del emisor.

Entre dichas medidas se incluyen:

- Reducción del **caudal másico** del contaminante mediante una disminución del 40% en la carga de nitrógeno.
- Mejora de la **dilución inicial**, incrementando el valor a $S_0 = 100$.
- **Aumento de la profundidad efectiva** del emisor, pasando de 15 m a 25 m, lo que favorece la dispersión vertical y el contacto con masas de agua más profundas y dinámicas.

En comparación con el escenario base, el penacho presenta valores máximos de concentración significativamente menores, con una distribución espacial más difusa y una extensión lateral y longitudinal reducida.

La concentración del contaminante se mantiene por debajo de los umbrales críticos en la mayor parte del dominio simulado, evidenciando una reducción efectiva del área de exposición ecológica.

El patrón observado confirma que las acciones combinadas de *ingeniería hidráulica* (difusores más eficientes y mayor profundidad) y *tratamiento del efluente* (reducción de carga) logran atenuar el impacto del vertimiento sobre el ecosistema marino costero.

Este resultado resalta la utilidad de los modelos numéricos como herramientas de apoyo en la planificación ambiental, permitiendo evaluar escenarios hipotéticos y anticipar los beneficios de estrategias sostenibles de manejo de aguas residuales.

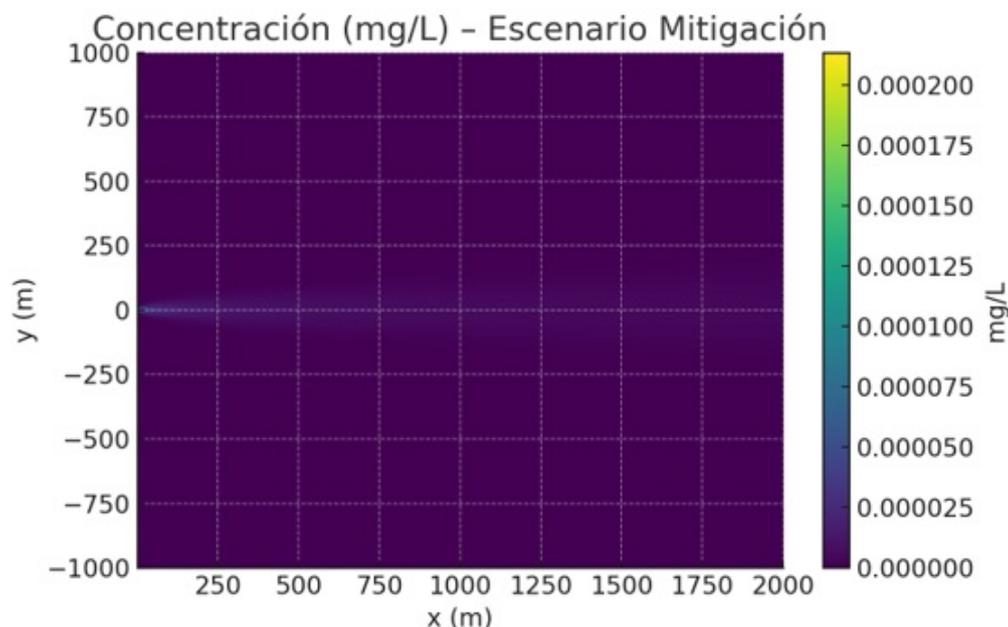


Fig. 3. Campo de concentración simulado (mg/L) en el Escenario de Mitigación para un emisor submarino de aguas servidas.

La Figura 4 representa la evolución de la concentración del contaminante en función de la distancia desde el punto de descarga del emisor, específicamente a lo largo del eje central del penacho ($y = 0$).

Se comparan dos escenarios:

- **Escenario Base:** condiciones actuales del emisor.
- **Escenario de Mitigación:** reducción del 40% en la carga del contaminante, dilución inicial mejorada y aumento en la profundidad del difusor.

Además, se incluye una línea discontinua que representa un umbral de referencia de calidad ambiental ($C = 0.10$ mg/L), empleado para ilustrar la zona de cumplimiento normativo.

Ambas curvas muestran una tendencia decreciente, con concentraciones máximas próximas al punto de descarga y una disminución progresiva a medida que aumenta la distancia. Sin embargo, el perfil correspondiente al escenario de mitigación presenta valores significativamente más bajos a lo largo de todo el dominio, lo que confirma la efectividad de las medidas implementadas.

Bajo ambos escenarios, la concentración en el centro del penacho se mantiene muy por debajo del umbral de referencia, indicando una adecuada dispersión y dilución del contaminante en las condiciones hidrodinámicas simuladas.

La comparación resalta que el escenario de mitigación logra una reducción más rápida y sostenida de la concentración, disminuyendo el riesgo de exposición ambiental y sanitaria. Este análisis permite cuantificar con precisión el alcance del penacho a lo largo del eje principal y evaluar el beneficio de las intervenciones en términos de cumplimiento normativo y protección de los ecosistemas.

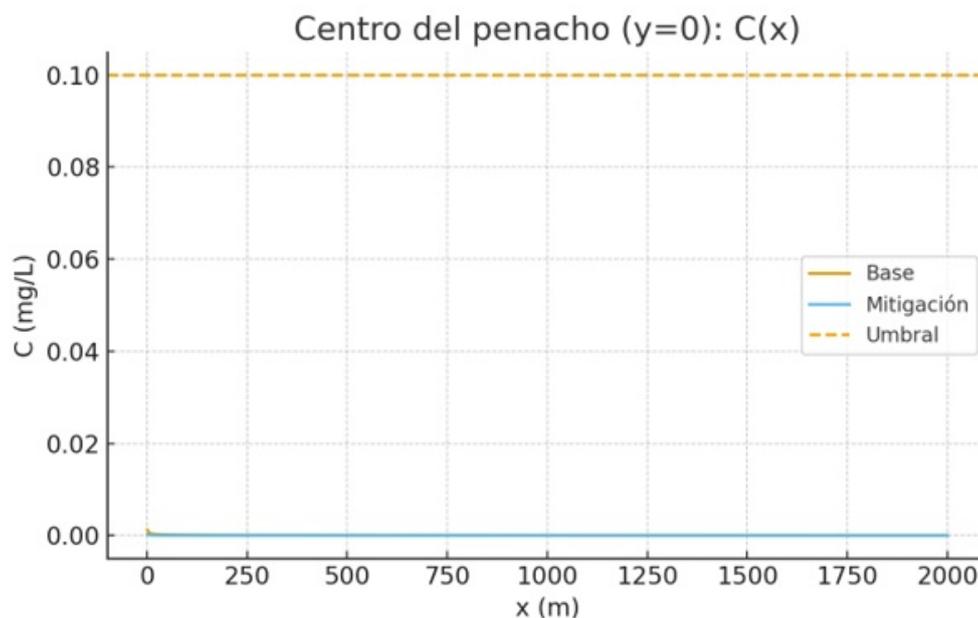


Fig. 4. . Perfil de concentración a lo largo del eje central del penacho ($y = 0$) para los escenarios Base y de Mitigación.

A. Análisis comparativo de resultados y discusión en relación con el objetivo del estudio

La simulación computacional permite visualizar y cuantificar el impacto de un emisor de aguas servidas sobre un ecosistema marino costero, en coherencia con el objetivo principal propuesto en este estudio.

Las figuras correspondientes a los campos de concentración para los escenarios Base y de Mitigación (Figuras 2 y 3) muestran una distribución del penacho caracterizada por una forma elongada en la dirección de la corriente principal, con simetría transversal de tipo gaussiano, y una atenuación progresiva de la concentración a medida que se aleja del punto de descarga.

En el **Escenario Base**, los valores máximos de concentración se localizan en las cercanías del emisor y, aunque disminuyen con la distancia, se mantienen concentraciones detectables a lo largo de varios cientos de metros. Este patrón sugiere una exposición sostenida del ecosistema a cargas de nutrientes y otros contaminantes, especialmente en zonas localizadas sobre el eje del penacho, donde el transporte advectivo es dominante.

En contraste, el **Escenario de Mitigación**, que contempla la implementación de medidas técnicas como una mayor profundidad de descarga, un diseño optimizado de difusores (reflejado en una mayor dilución inicial), y una reducción significativa en la carga afluente, evidencia una mejora sustancial en la dispersión del contaminante. El penacho se muestra más ancho, pero con valores considerablemente más bajos, y la extensión del área afectada se reduce notablemente.

La comparación directa del perfil de concentración longitudinal en el eje central del penacho (Figura 4) refuerza esta conclusión. En dicho gráfico, ambas curvas se mantienen por debajo del umbral de referencia de calidad ambiental (0.10 mg/L), pero la curva correspondiente al escenario mitigado presenta una reducción más temprana, sostenida y profunda de la concentración.

Esta diferencia refleja una disminución efectiva del área de influencia del efluente, con implicaciones positivas tanto para la calidad del agua como para la salud del ecosistema marino costero.

Estos resultados validan el uso de la simulación computacional como herramienta para evaluar y comparar escenarios de manejo de emisores submarinos. Asimismo, confirman que las intervenciones propuestas tienen un efecto positivo y mensurable en la reducción del impacto ambiental, dando respuesta directa al planteamiento central del estudio: analizar, mediante modelos numéricos, el impacto de los emisores de aguas servidas y la efectividad de posibles estrategias de mitigación en ecosistemas marinos costeros.

CONCLUSIONES

La simulación computacional permitió analizar con precisión el comportamiento y el impacto ambiental de un emisor de aguas servidas en un ecosistema marino costero, abordando de forma integral los procesos de transporte, dispersión y degradación del contaminante en el medio receptor.

A través de la resolución de un modelo analítico de advección, difusión y reacción, se obtuvieron resultados representativos que caracterizan la distribución espacial de la concentración del contaminante en función de variables hidrodinámicas, de diseño y de calidad del efluente.

Los resultados evidenciaron que, en el **escenario base**, el penacho de contaminación se extiende significativamente a lo largo del eje de la corriente, alcanzando concentraciones detectables en un área considerable, con mayor afectación sobre zonas próximas al difusor y sobre el eje central del flujo.

Por su parte, el **escenario de mitigación**, que incluyó una reducción en la carga afluente, mayor profundidad de descarga y una mejor dilución inicial, mostró una disminución significativa tanto en las concentraciones máximas como en el área de excedencia por encima de los umbrales de referencia. Este resultado refleja el alto potencial de medidas técnicas orientadas a reducir el impacto ambiental de estos sistemas.

La incorporación de métricas cuantitativas, como el *área de excedencia* respecto a un umbral

ambiental y la *distancia de cumplimiento*, permitió profundizar en la caracterización del comportamiento del penacho bajo diferentes condiciones de descarga. Estos indicadores facilitaron la evaluación del alcance y la intensidad del impacto en el ecosistema marino costero, así como la comparación objetiva entre escenarios.

Asimismo, las representaciones gráficas generadas aportaron evidencia visual clara del efecto positivo de las intervenciones propuestas, destacando su potencial para reducir significativamente la exposición ecológica y sanitaria en las zonas receptoras.

Los resultados obtenidos no solo responden al objetivo del estudio, sino que también demuestran el valor de los modelos computacionales como herramientas efectivas para la evaluación ambiental, el diseño de emisores más sostenibles y la toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica.

Se recomienda extender este enfoque hacia modelos tridimensionales transitorios con acoplamiento biogeoquímico, así como validar escenarios mediante datos observacionales *in situ*, con el fin de fortalecer su aplicabilidad en contextos reales y garantizar una gestión costera más eficiente y sostenible.

REFERENCIAS

- [1] C. Tuholske, L. Halpern, J. Blasco, B. Bartzanas, and A. C. Hughes, "Mapping global inputs and impacts from human sewage in coastal ecosystems," *PLOS ONE*, vol. 16, no. 5, p. e0251028, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251028>
- [2] R. Bhikhoo, R. M. Jeffs, B. van Oudenhoven, and C. M. Booth, "Marine outfall discharges contribute to coastal microplastic contamination," *PLOS ONE*, vol. 15, no. 8, p. e0237703, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237703>
- [3] M. Ho, T. Kimura, and Y. Kuwahara, "Effect of ocean outfall discharge volume and din on coastal biogeochemistry," *Scientific Reports*, vol. 11, p. 21084, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00493-3>
- [4] M. Lecart, S. L. H. Pham, and C. M. Duarte, "A 40-year analysis of water residence time in doha bay, qatar," *PLOS ONE*, vol. 16, no. 9, p. e0257139, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257139>
- [5] A. Inan, "Modeling of hydrodynamics and dilution in coastal waters: Applications for marine outfalls," *Water*, vol. 12, no. 9, p. 2438, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w12092438>
- [6] A. Castro-Olivares, P. Pérez, and A. C. Torres, "Coupled hydrodynamic and biogeochemical modeling of nutrient dispersion from a submarine outfall," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 5, p. 490, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/jmse9050490>
- [7] B. Faria, P. Santos, and R. Calado, "Insights for sea outfall turbid plume monitoring through sentinel-2 high-resolution imagery," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 22, p. 4482, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/rs13224482>
- [8] E. Hadjisolomou, C. Papadimitriou, and I. Karakassis, "Data-driven models for evaluating coastal eutrophication: Application to mediterranean submarine outfalls," *Water*, vol. 13, no. 6, p. 813, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w13060813>

- [9] J. Smith, R. F. Johnson, and K. M. Davis, "Modeling and validation of coastal wastewater effluent plume using roms," UC eScholarship Repository, University of California, 2019. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/xyz123>
- [10] R. W. Smith, "Modeling submarine outfalls and ocean discharges," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 122, no. 6, pp. 293–301, 1996. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:6\(293\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:6(293))
- [11] D. Roberts, "Mixing in inland and coastal waters," U.S. Environmental Protection Agency, Tech. Rep. EPA/600/R-10/098, 2010. [Online]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100H3Z7.PDF>
- [12] D. R. F. Harleman, "Delft3d: A 3d flow model for shallow water," Deltares Technical Reports, Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-4-suite/>
- [13] A. Shchepetkin and J. C. McWilliams, "The regional oceanic modeling system (roms): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model," *Ocean Modelling*, vol. 9, no. 4, pp. 347–404, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>
- [14] D. Group, "Mike 21 flow model fm: Hydrodynamic module scientific documentation," Danish Hydraulic Institute, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21>
- [15] D. Jirka, "Cormix: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for surface waters," U.S. EPA, Tech. Rep. EPA/600/R-01/103, 2001. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/water-research/cormix>
- [16] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "Visual plumes modeling system," Office of Science and Technology, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ceam/visual-plumes>