



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL
HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL TANCAT DE LA
PIPA (VALENCIA) CON EL PROGRAMA WASP.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

AUTOR/A: Montoya Matías, Kevin

Tutor/a: Asensi Dasí, Enrique Javier

Cotutor/a: Martín Monerris, Miguel

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

Trabajo Fin de Máster
***MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA
DEL HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL
TANCAT DE LA PIPA (VALENCIA) CON EL
PROGRAMA WASP***

Autor
KEVIN MONTOYA MATÍAS

Tutor
DR. ENRIQUE JAVIER ASENSI DASÍ

Cotutor/es
DR. MIGUEL MARTÍN MONERRIS

Septiembre, 2025



Datos del Proyecto

Título del TFM en español: MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL TANCAT DE LA PIPA (VALENCIA) CON EL PROGRAMA WASP

Título del TFM en inglés: MODELING THE WATER QUALITY OF THE TANCAT DE LA PIPA SURFACE FLOW WETLAND (VALENCIA) USING THE WASP PROGRAM

Título del TFM en Valenciano: MODELACIÓ DE LA QUALITAT DE L'AIGUA DE L'ESTANY DE FLUX SUPERFICIAL TANCAT DE LA PIPA (VALÈNCIA) AMB EL PROGRAMA WASP

Alumno: KEVIN MONTOYA MATÍAS

Tutor: DR. ENRIQUE JAVIER ASENSI DASÍ

Cotutor/es: DR. MIGUEL MARTÍN MONERRIS

Fecha de Lectura:



RESUMEN ESPAÑOL

Los humedales mediterráneos, como la Albufera de Valencia, juegan un papel fundamental en la mejora de la calidad del agua y en la conservación de la biodiversidad, si bien se enfrentan a una presión ambiental bastante elevada. Este trabajo estudia el Tancat de la Pipa, un humedal artificial restaurado que actúa como filtro natural para los contaminantes que llegan a la laguna. El objetivo principal es analizar y modelar el comportamiento del Tancat de la Pipa bajo distintas condiciones hidrológicas, usando el programa WASP 8.32 como herramienta principal; para ello, se recopilaron datos sobre la calidad del agua, se desarrollaron y calibraron modelos hidrodinámicos y de temperatura, y se llevaron a cabo simulaciones de diferentes escenarios de contaminación. Los resultados obtenidos muestran que el humedal es capaz de reducir las concentraciones de nutrientes y materia orgánica, aunque su efectividad varía en función del caudal y de la cantidad de contaminantes que recibe. También se discuten las limitaciones del modelo y cómo factores externos, como las lluvias intensas, pueden influir en el sistema. Finalmente, se proponen recomendaciones para la gestión y conservación del humedal, y se sugieren posibles líneas de investigación para seguir mejorando su funcionamiento en el futuro.

RESUMEN VALENCIANO

Els aiguamolls mediterranis, com l'Albufera de València, tenen un paper fonamental en la millora de la qualitat de l'aigua i en la conservació de la biodiversitat, tot i que es troben sotmesos a una pressió ambiental molt elevada. En aquest treball s'estudia el Tancat de la Pipa, un aiguamoll artificial restaurat que actua com a filtre natural per als contaminants que arriben a la llacuna. L'objectiu principal és analitzar i modelitzar el comportament del Tancat de la Pipa sota diferents condicions hidrològiques, utilitzant el programa WASP 8.32 com a eina principal. Per a això, s'han recollit dades sobre la qualitat de l'aigua, s'han desenvolupat i calibrat models hidrodinàmics i de temperatura, i s'han simulat diversos escenaris de contaminació. Els resultats obtinguts mostren que l'aiguamoll és capaç de reduir les concentracions de nutrients i matèria orgànica, encara que la seua eficàcia varia segons el cabal i la quantitat de contaminants que rep. També es comenten les limitacions del model i com factors externs, com ara les pluges intenses, poden influir en el sistema. Finalment, es



proposen recomanacions per a la gestió i la conservació de l'aiguamoll, i es suggereixen possibles línies d'investigació per a continuar millorant el seu funcionament en el futur.

ABSTRACT

Mediterranean wetlands, such as the Albufera of Valencia, play a key role in improving water quality and conserving biodiversity, although they are under significant environmental pressure. This study focuses on Tancat de la Pipa, a restored artificial wetland that acts as a natural filter for pollutants entering the lagoon. The main aim is to analyze and model the behavior of Tancat de la Pipa under different hydrological conditions, using WASP 8.32 as the main tool. To achieve this, water quality data were collected, hydrodynamic and temperature models were developed and calibrated, and several pollution scenarios were simulated. The results show that the wetland can reduce concentrations of nutrients and organic matter, although its effectiveness depends on the flow and the amount of pollutants received. The limitations of the model are also discussed, as well as how external factors, such as heavy rainfall, can influence the system. Finally, recommendations are made for the management and conservation of the wetland, and possible future research lines are suggested to further improve its performance.

Palabras Clave Español: humedal artificial, calidad del agua, modelización, eutrofización, gestión ambiental, WASP.

Palabras Clave Valenciano: aiguamoll artificial, qualitat de l'aigua, modelització, eutrofització, gestió ambiental

Palabras Clave Inglés: artificial wetland, water quality, modelling, eutrophication, environmental management



ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE GRÁFICOS	8
ÍNDICE DE TABLAS	9
1. Introducción	11
2. Justificación	13
3. Objetivos	16
4. Marco Teórico	17
4.1. Objetivos de Sostenibilidad	17
4.2. Sistemas de Alcantarillado Combinado	19
4.3. Fundamentos y funcionamiento de los humedales artificiales de flujo superficial	20
4.4. Evotranspiración	21
4.5. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)	23
4.6. CONDUCTIVIDAD COMO TRAZADOR NATURAL	24
4.6.1. Ecuación General de Advección-Dispersión-Reacción (ADR)	27
4.6.2. MODELO DE TEMPERATURA WASP	29
4.6.2.1. Ecuación de la concentración de energía en el agua	29
4.6.2.2. Temperatura (Heat Model WASP)	30
• Balance neto de calor	31
• Radiación solar de onda corta	31



• Pérdidas de Calor por evaporación	31
• Intercambio de Calor por Conducción.....	32
• Intercambio de Calor con el Sedimento.....	32
4.6.3. MODELO DE CALIDAD.....	33
4.6.3.1. Módulo Avanzado de Eutrofización (EUTRO).....	33
4.6.3.2. Sólidos Suspendidos Totales (TSS)	34
4.6.3.3. Amonio (NH_4^+).....	35
4.6.3.4. Oxígeno Disuelto (OD)	36
4.7. Calibración y validación de modelos	37
5. Metodología.....	39
5.1. Zona de estudio	39
5.2. Características generales del humedal el Tancat de la Pipa	41
5.3. Estaciones Meteorológicas	45
5.3.1. Red SIAR	46
5.3.2. AVAMET	47
5.3.3. Calibración/Validación.....	49
5.4. Análisis Estadístico	49
6. Selección de modelo hidrodinámico del Tancat de la Pipa	52
6.1. Modelo CSTR (tanque de mezcla completa)	53
6.2. Modelo TIS (tanques en serie)	53



6.3.	Justificación y ajuste del coeficiente de difusión entre agua y sedimento	55
6.4.	Selección de Modelo Hidrodinámico	57
6.5.	Segmentación de los modelos	57
7.	Modelo de Temperatura.....	61
7.1.1.1.	Datos tomados de AVAMET	61
7.1.1.2.	Datos tomados de la Red SIAR.....	64
7.2.	Calibración Modelo de Temperatura – Junio 2023	65
7.3.	Validación del Modelo T.....	69
8.	Modelación de contaminantes	71
8.1.	Amonio (NH_4^+).....	71
8.2.	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	72
9.	Discusión	75
10.	Conclusiones	77
11.	Referencias	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 1.	Sistema de alcantarillado combinado	19
Imagen 2.	Sección transversal y longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial	21
Imagen 3.	Ejemplo de Segmentación WASP (Lago Ontario - con número de segmentos indicado).....	24
Imagen 4.	Balance de energía térmica considerado en la modelación de temperatura de	



cuerpos de agua superficiales con WASP	30
Imagen 5. Mapa de L'Albufera.....	39
Imagen 6. Ubicación Geográfica – Tancat de la Pipa	41
Imagen 7. Esquema del Tancat de la Pipa y su conexión con l'Albufera de Valencia.....	43
Imagen 8. Estación Propiedad Ministerio - Picassent	47
Imagen 9. València l'Albufera/Tancat de la Pipa	47
Imagen 10. Ubicación de la TPCW, áreas circundantes y puntos de descarga de desbordamiento de alcantarillado combinado (CSO).....	52
Imagen 11. Configuraciones Hidrodinámicas Evaluadas para el Desarrollo del Nuevo Modelo en la Sección F4 del Tancat de la Pipa.	54

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Modelo CSTR y Modelo flujo Pistón para Evento 1 (Calibración) - Junio 2023..	58
Gráfico 2 Modelo CSTR y Modelo flujo Pistón para Evento 1 (Validación) - Junio 2023	60
Gráfico 3. Velocidad del viento registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento febrero 2023	61
Gráfico 4. Temperatura del aire en el humedal Tancat de la Pipa – Evento febrero 2023	62
Gráfico 5. Humedad relativa registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento febrero 2023	62
Gráfico 6. Velocidad del viento registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento junio 2023	63
Gráfico 7. Temperatura del aire en el humedal Tancat de la Pipa – Evento junio 2023	63



Gráfico 8. Humedad relativa registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento junio 2023	64
Gráfico 9. Radiación Solar registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento febrero 2023	64
Gráfico 10. Radiación Solar registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento junio 2023	65
Gráfico 11. Ajuste del modelo de temperatura para el evento de calibración – Junio 2023... 66	66
Gráfico 12. Dispersión y ajuste lineal entre temperaturas observadas y simuladas en el evento de calibración – Junio 2023, con $R^2 = 0,72$	66
Gráfico 13. Ajuste del modelo de temperatura para el evento de validación – Noviembre 2023	70
Gráfico 14. Relación entre temperaturas observadas y simuladas para el evento de validación – Noviembre 2023 ($R^2 = 0,86$).....	71
Gráfico 16. Evento 1, Amonio (NH_4^+).....	72
Gráfico 17. Evento 1, Sólidos Suspendidos Totales	73
Gráfico 18 Dispersión y ajuste para el Amonio (NH_4^+) en Evento Febrero 2023	74
Gráfico 19 Dispersión y ajuste para Sólidos Suspendidos Totales en Evento Febrero 2023..	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características hidráulicas del humedal Tancat de la Pipa	44
Tabla 2 Resultados de la calibración del modelo para el evento de referencia en el Tancat de la Pipa.....	59
Tabla 3 Resultados de Validación	60
Tabla 4 Parámetros ambientales para el Evento 1	65



Tabla 5 Resultados estadísticos de la simulación de temperatura del agua para el evento de calibración - Junio 2023	66
Tabla 6. Parámetros ambientales para el Evento 2.....	69
Tabla 7. Resultados estadísticos de la simulación de temperatura del agua para el evento de calibración - Junio 2023	70
Tabla 8. Indicadores Estadísticos - Amonio.....	72
Tabla 8. Indicadores Estadísticos - SST	73

1. Introducción

La región mediterránea siempre ha destacado por la riqueza de sus humedales, que no solo son espacios de gran valor ecológico, sino que también cumplen funciones muy útiles para la sociedad. Entre esas funciones, la mejora de la calidad del agua y la conservación de la biodiversidad suelen ser las más mencionadas. Sin embargo, en los últimos años se ha notado que estos ecosistemas enfrentan retos cada vez más difíciles, sobre todo por la presión que ejercen las actividades humanas y los cambios en el clima. Muchas veces, la situación se vuelve más complicada de lo que parece a simple vista, ya que intervienen factores que no siempre se pueden controlar o predecir.

En el caso de la Albufera de Valencia, se observa claramente cómo un humedal puede pasar de ser un entorno próspero y lleno de vida a encontrarse en una situación delicada. El crecimiento de la ciudad, la agricultura intensiva y las lluvias fuertes han hecho que la cantidad de contaminantes que llega a la laguna aumente. Esto ha cambiado el equilibrio del ecosistema, afectando tanto a la calidad del agua como a las especies que dependen de ella. Lo que antes era un espacio con aguas limpias y gran diversidad, ahora enfrenta problemas serios de eutrofización y pérdida de vegetación sumergida.

Para intentar frenar este deterioro, se han puesto en marcha diferentes iniciativas, y una de las más interesantes es la restauración de espacios como el Tancat de la Pipa. Este lugar, que en el pasado era un campo de arroz, fue transformado en un humedal artificial que actúa como un filtro natural. La iniciativa consiste en pasar el agua por este humedal, para que se retengan y se reduzcan parte de los contaminantes antes de que lleguen a la Albufera. Aunque el concepto es sencillo, su funcionamiento real es bastante complejo y depende de muchos factores, tanto internos como externos.

Estudiar el Tancat de la Pipa resulta especialmente útil porque permite analizar cómo responde un humedal restaurado ante diferentes situaciones, sobre todo cuando hay episodios de lluvias intensas o aumentan los aportes de contaminantes. Para entender bien este comportamiento, la modelación matemática se convierte en una herramienta clave. El programa WASP 8.32, permite simular distintos escenarios y observar cómo varía la calidad del agua en función de los cambios en el caudal o en la carga contaminante.

El desarrollo de modelos de calidad del agua no solo ayuda a predecir lo que puede pasar en el futuro, sino que también sirve para identificar los puntos débiles del sistema y pensar en posibles mejoras. Por ejemplo, se puede analizar cómo influye el tiempo de

retención del agua en la reducción de nutrientes o qué pasa cuando se producen lluvias muy intensas en poco tiempo. Este tipo de información es muy valiosa para quienes tienen que tomar decisiones sobre la gestión del humedal.

Aunque existen registros periódicos sobre la calidad del agua en el Tancat de la Pipa, estos datos no bastan para entender lo que ocurre dentro del humedal. El movimiento y la retención de los contaminantes pueden variar considerablemente de un día para otro, y hay procesos que solo se pueden captar mediante simulaciones detalladas. Por eso, la modelación dinámica se presenta como una alternativa interesante para complementar la información obtenida en campo.

El propósito principal de este trabajo es estudiar cómo funciona el humedal Tancat de la Pipa y evaluar hasta qué punto puede reducir la carga de contaminantes que recibe, especialmente en momentos de lluvias intensas o cuando aumentan las escorrentías urbanas y agrícolas. Para conseguir esto, se desarrollaron varios modelos que simulan el comportamiento del humedal bajo diferentes condiciones, utilizando el programa WASP 8.32. El trabajo incluyó la recolección de datos, la calibración de modelos hidrodinámicos y de temperatura, y la simulación del transporte y transformación de contaminantes.

A lo largo del estudio surgieron algunos desafíos, como la dificultad para ajustar con precisión los modelos y el impacto de factores externos que no siempre se pueden prever. Sin embargo, pese a estas dificultades, se consiguió obtener información que ayuda a comprender mejor el funcionamiento del humedal y a identificar áreas que podrían mejorarse en trabajos futuros.

2. Justificación

La realización de este trabajo responde a la necesidad de entender mejor cómo funcionan los humedales artificiales en contextos donde la contaminación ambiental es cada vez mayor. En la actualidad, la Albufera de Valencia atraviesa una situación complicada debido a la acumulación de contaminantes, sobre todo después de episodios de lluvias intensas y por la influencia de la agricultura y la ciudad. El Tancat de la Pipa, al ser un humedal restaurado, se ha convertido en un espacio clave para intentar mejorar la calidad del agua antes de que llegue a la laguna, pero todavía quedan muchas dudas sobre su eficacia real en diferentes situaciones.

A pesar de que existen mediciones periódicas sobre la calidad del agua en el Tancat de la Pipa, estos datos no siempre permiten saber con precisión cómo se comportan los contaminantes dentro del humedal. El tiempo que tarda el agua en atravesar el sistema y la variabilidad de las entradas hacen que los procesos internos sean difíciles de seguir solo con registros mensuales. Por eso, se ve la necesidad de buscar herramientas que permitan simular y analizar el comportamiento del humedal en distintos escenarios, sobre todo cuando se producen cambios bruscos en el caudal o en la carga contaminante.

La modelación matemática, y en particular el uso del programa WASP 8.32, ofrece la posibilidad de acercarse a la realidad del Tancat de la Pipa de una manera más detallada. Mediante la simulación de diferentes situaciones, es posible observar cómo varían las concentraciones de nutrientes y materia orgánica en función de las condiciones del momento; esto permite identificar los puntos fuertes y débiles. El estudio no se limita solo al ámbito académico, ya que los resultados también pueden tener implicaciones prácticas para la gestión ambiental de la Albufera. Si se logra demostrar que el Tancat de la Pipa puede disminuir los picos de contaminación, esto aportaría una solución concreta a un problema que afecta tanto la biodiversidad como la calidad del agua de la laguna. Asimismo, este trabajo puede servir como referencia para la restauración y manejo de otros humedales en contextos similares.

Una motivación adicional para este trabajo es la escasez de estudios que analicen el comportamiento del Tancat de la Pipa bajo condiciones extremas, como lluvias intensas o aumentos súbitos en la escorrentía urbana y agrícola. Estas situaciones suelen ser las más complejas y, al mismo tiempo, las más difíciles de abordar con métodos tradicionales. La modelación dinámica ayuda a anticipar la respuesta del humedal frente a estos eventos, posibilitando la planificación de estrategias de gestión más adecuadas.

El uso de modelos para representar el humedal contribuye también a entender mejor las limitaciones y potencialidades de sistemas restaurados como este. Predecir cómo reaccionará el Tancat de la Pipa ante cambios ambientales no es sencillo, debido a factores como la temperatura, la velocidad del agua o la cantidad de materia orgánica que influyen en su comportamiento. Por eso, este trabajo reconoce las incertidumbres presentes y sostiene que los resultados deben interpretarse con precaución, aunque muestra el valor de contar con una herramienta que permite explorar distintos escenarios posibles.

La elección del Tancat de la Pipa como objeto de estudio responde a su papel relevante dentro del sistema de la Albufera y la buena cantidad de información disponible sobre su funcionamiento. Al tratarse de un humedal restaurado, resulta un caso valioso para analizar cómo estos espacios pueden influir en la mejora ambiental, especialmente en áreas con alta presión humana. Su diseño y ubicación también contribuyen a que sea posible recoger datos de calidad y desarrollar simulaciones con mayor precisión.

Este trabajo apunta a aportar datos útiles para quienes toman decisiones relacionadas con la gestión del agua y la conservación de humedales. Con un mejor entendimiento del comportamiento del Tancat de la Pipa, es posible ajustar las estrategias de manejo para lograr que el sistema responda mejor y sea más resistente a cambios futuros. Estos avances pueden traducirse en beneficios concretos tanto para la Albufera como para la biodiversidad que depende de ella.

Por último, el estudio reconoce la necesidad continua de aprender sobre la restauración ecológica y la gestión de los recursos hídricos, pues cada humedal presenta desafíos propios. Los resultados obtenidos pueden servir de base para futuras investigaciones o para aplicar modelos semejantes en otras regiones. Aunque el camino tiene complejidades, la experiencia ganada ayuda a ampliar el conocimiento y aporta insumos para proteger estos ecosistemas que son tan importantes.

Un problema importante que empeora la situación ambiental en el humedal y en la Albufera es el efecto de las escorrentías provenientes de áreas urbanas y agrícolas. Cuando ocurren lluvias fuertes o tormentas repentinas, como las llamadas DANA, el agua que corre por la superficie arrastra una gran cantidad de contaminantes desde zonas urbanizadas y campos de cultivo. Entre estos contaminantes se encuentran nutrientes, sólidos en suspensión, pesticidas y otros productos químicos. Estas escorrentías provocan un aumento rápido y significativo de la contaminación en el humedal, lo que en ocasiones supera su capacidad natural para limpiarse y afecta negativamente tanto la calidad del agua como la salud de los

ecosistemas que dependen de él.

Además, la escorrentía difusa genera un efecto acumulativo y prolongado en la contaminación, ya que no se concentra en un solo lugar, sino que se extiende sobre grandes áreas a través de la infiltración y el transporte de sustancias químicas y sedimentos. Esta situación empeora por la impermeabilización del suelo en las ciudades y el uso frecuente de fertilizantes en la agricultura, lo que dificulta el control y la predicción del movimiento de estos contaminantes. Por esta razón, comprender y modelar con detalle el comportamiento de estas escorrentías en el humedal resulta esencial para poder crear estrategias que permitan manejar y reducir su impacto, asegurando que el Tancat de la Pipa siga funcionando como una barrera efectiva contra la degradación ambiental de la Albufera.

3. Objetivos

El propósito principal de este trabajo es analizar y modelar la calidad del agua en el humedal de flujo superficial Tancat de la Pipa, situado en Valencia, empleando el programa WASP 8.32. Con este análisis, se busca comprender el funcionamiento del humedal y valorar hasta qué punto puede disminuir el impacto del escurrimiento procedente de zonas urbanas y agrícolas que termina llegando a la Albufera de Valencia.

Para poder alcanzar este objetivo general, se han planteado varios objetivos específicos que guían el desarrollo del estudio:

- Realizar simulaciones que permitan observar cómo se comporta hidráulicamente el subsector F4 del humedal bajo diferentes condiciones de entrada de agua.
- Ajustar y comprobar la validez de los modelos hidrodinámicos, empleando para ello la conductividad como indicador natural del movimiento del agua.
- Elaborar un modelo de temperatura que integre tanto datos meteorológicos de la AEMET y Red SIAR como registros experimentales tomados en el propio humedal.
- Desarrollar y calibrar un modelo para simular la dinámica y transformación del amonio (NH_4^+) y sólidos suspendidos totales (TSS), evaluando la capacidad depuradora del humedal en distintos escenarios.
- Incluir la perspectiva de sostenibilidad ambiental alineando el estudio con los ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres) para promover la gestión y conservación del humedal, ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), Y ODS 13 (Acción por el clima).

4. Marco Teórico

4.1. Objetivos de Sostenibilidad

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) forman un marco mundial que invita a enfrentar diferentes retos ambientales y sociales. Entre estos, el ODS 6 se enfoca en el acceso al agua limpia y al saneamiento, mientras que el ODS 15 se orienta hacia la protección de los ecosistemas terrestres. Estos dos objetivos resultan muy relevantes al analizar espacios como el humedal del Tancat de la Pipa, pues en ellos la gestión del agua y la protección de la naturaleza están estrechamente ligadas. Las metas propuestas tienen sentido, aunque en cada lugar influyen diversos factores que complican o limitan su avance; este reconocimiento contribuye a tener una perspectiva más realista sobre los desafíos ambientales.

El ODS 6 aspira a que todas las personas puedan disponer de agua de calidad. En ese sentido, los humedales juegan un rol valioso como filtros naturales que reducen la cantidad de contaminantes que llegan a cuerpos de agua mayores, tales como lagos y ríos. Identificar la función que cumple el Tancat de la Pipa ofrece una oportunidad para pensar en la importancia de cuidar estos sistemas, recordando que aunque fueron creados por la acción humana, dependen de condiciones naturales que cambian y pueden presentar incertidumbres. Esta realidad refuerza la idea de que el manejo ambiental exige un aprendizaje continuo y la comprensión de sus límites.

Por su parte, el ODS 15 invita a proteger las áreas naturales y la vida que en ellas existe. Los humedales restaurados no solo conservan su función de filtrado, sino que también sirven de refugio para muchas especies y mantienen relaciones que sugieren equilibrio. Sin embargo, este equilibrio está condicionado por presiones como la expansión urbana y el cambio climático. Cualquier acción para conservar estos sitios debería considerar que los procesos naturales son variables y que las soluciones deben ser cuidadosas y sensibles al contexto. Reconocer estas situaciones favorece una mirada más reflexiva y atenta frente a la naturaleza.

Relacionar el estudio del Tancat de la Pipa con estos objetivos muestra que no es suficiente abordar solo aspectos técnicos. También hay que pensar en cómo factores sociales y ambientales interactúan en la conservación y el uso responsable del humedal. La modelación matemática puede ofrecer datos y escenarios que ayudan a prepararse, aunque es claro que los modelos simplifican realidades complejas que varían en el tiempo y el espacio. Por esta razón, los resultados deben interpretarse como aproximaciones que orientan, pero que no reemplazan otros saberes o estrategias.

Cuando se conecta la mirada global de los ODS con una experiencia local como la del Tancat de la Pipa, se puede estimar el esfuerzo que implica conservar un humedal que presta servicios ambientales imprescindibles. El conocimiento generado por medio del modelado permite tomar referencia para otras iniciativas donde se suman el saber técnico y el contexto particular, buscando una gestión ajustada a las condiciones específicas. Esta mezcla de elementos anima a seguir aprendiendo y a adaptar las acciones conforme se avanza.

El camino para mejorar la calidad del agua y proteger ecosistemas no es sencillo, sobre todo en zonas mediterráneas donde ocurren fenómenos como lluvias intensas y cambios climáticos poco previsibles. Mantener una actitud abierta frente a dudas y dificultades aporta una visión más equilibrada y realista. Este enfoque invita a continuar explorando y considerando alternativas que promuevan la conservación del humedal, conscientes de sus limitaciones y posibilidades.

Los objetivos ODS 11 y 13 también tienen un lugar importante cuando se piensa en humedales como el Tancat de la Pipa. El ODS 11 habla de ciudades y zonas donde las personas viven, buscando que sean lugares abiertos para todos, seguros y que puedan resistir cambios sin perder su valor. En este contexto, al ver cómo la expansión de las ciudades y el tratamiento del agua usada afectan al humedal, surge la idea de buscar formas de disminuir esos efectos negativos. Esto lleva a pensar en cómo lograr que la vida en la ciudad y la naturaleza puedan coexistir de manera más equilibrada, lo que implica entender bien las situaciones sociales y ambientales y aprender de los errores para mejorar los esfuerzos que se hagan.

En cuanto al ODS 13, pone la mirada en la acción frente a los cambios en el clima. Reconoce que fenómenos como tormentas fuertes y periodos de sequía no son iguales que antes y que estos cambios alteran el comportamiento del humedal. Estos eventos pueden afectar la forma en que el humedal filtra y limpia el agua que pasa por él. Por eso, conocer bien cómo se relacionan estas situaciones es clave para pensar en cuidar el humedal de forma que pueda afrontar esos cambios y riesgos que aún no se entienden completamente. La información que se obtiene de las herramientas de modelado puede ayudar a imaginar maneras de adaptarse a estas nuevas circunstancias.

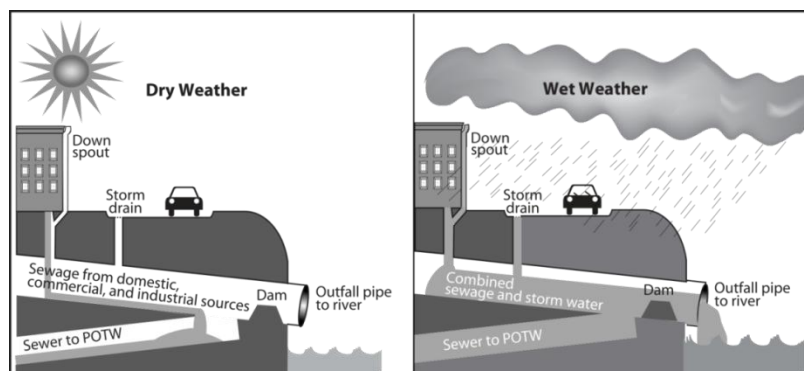
Al poner en relación los objetivos globales con lo que sucede en el Tancat de la Pipa, se ve que proteger estos espacios requiere ampliar la mirada y ser conscientes de que no es un asunto sencillo. La gestión del humedal no queda solo en soluciones técnicas, sino que implica la participación de diferentes personas, la consideración de condiciones que cambian con el tiempo y un esfuerzo continuo que valore el humedal por lo que es y por las

dificultades que enfrenta. Aceptar que el tema es complejo y que hay muchas dudas ayuda a entender mejor y a crear propuestas que respondan con más realidad a las necesidades tanto del ambiente como de las comunidades que lo rodean.

4.2. Sistemas de Alcantarillado Combinado

Los sistemas de alcantarillado combinado (CSO, por sus siglas en inglés) constituyen una infraestructura común en muchas ciudades, diseñada para transportar conjuntamente aguas residuales y pluviales. Aunque esta solución fue inicialmente económica y práctica, presenta serias limitaciones cuando se producen episodios de lluvias intensas. Durante estos eventos, el volumen de agua excede la capacidad del sistema y de las plantas de tratamiento, lo que provoca desbordamientos que liberan directamente contaminantes al medio ambiente (Paton & Haacke, 2021). Estos desbordamientos contienen una mezcla de materia orgánica, nutrientes, metales pesados y patógenos, que afectan la calidad de los cuerpos de agua receptores y ponen en riesgo tanto la biodiversidad como la salud pública (Ladislav et al., 2012).

Imagen 1. Sistema de alcantarillado combinado



Fuente: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (2019)

En el caso concreto de Valencia, la situación se agrava debido a la combinación de infraestructuras envejecidas y un crecimiento urbano acelerado. La mezcla de aguas residuales con pluviales en un mismo sistema, sumada a la impermeabilización del suelo y la acumulación de residuos sólidos, aumenta la frecuencia y el volumen de desbordamientos, generando impactos ambientales significativos (Martin-Moreno et al., 2025). Estos episodios no solo contaminan suelos y aguas superficiales, sino que también dificultan la gestión urbana y aumentan la vulnerabilidad de las comunidades más desfavorecidas (Galvez-Hernandez, Dai, & Muntaner, 2025).

La contaminación difusa urbana no se queda atrás y añade un problema extra. Es una mezcla complicada de contaminantes químicos y biológicos que llegan con las aguas

pluviales y pueden acumularse en las plantas acuáticas y los sedimentos, lo que trastoca la función natural de los humedales y reduce su capacidad para limpiarse solos (Terzakis et al., 2008; Ladislav et al., 2012). Este lío no se arregla con soluciones simples, sino que pide enfoques que combinen la gestión de infraestructuras con soluciones que vayan más allá, apostando por la naturaleza misma para filtrar y tratar esas escorrentías antes de que lleguen a zonas protegidas.

4.3. Fundamentos y funcionamiento de los humedales artificiales de flujo superficial

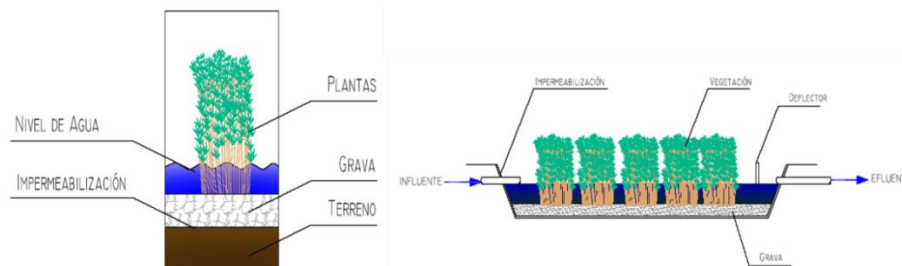
Los humedales artificiales de flujo superficial buscan imitar, en un ambiente controlado, los procesos que ocurren naturalmente en humedales, ciénagas o pantanos. En estos sistemas, el agua circula lentamente sobre la superficie del sustrato, atravesando la vegetación emergente que crece en ellos, lo que permite que las partículas sólidas se asienten y que microorganismos diversos degraden los contaminantes presentes (Shutes, 2001). La vegetación no solo actúa como un filtro físico, sino que también crea un hábitat para bacterias y protozoos que juegan un papel fundamental en la eliminación de materia orgánica y nutrientes. Esta interacción entre plantas, microorganismos y el medio físico conforma un sistema complejo que, aunque parezca sencillo a primera vista, depende de múltiples factores para funcionar correctamente. Se han convertido en una alternativa que, más allá de lo técnico, conecta con la necesidad urgente de encontrar soluciones sostenibles para tratar el agua contaminada en entornos urbanos y rurales. No son solo sistemas que retienen contaminantes; son espacios vivos donde la naturaleza hace su trabajo, aunque con la ayuda del ser humano.

Estos humedales aprovechan procesos naturales para filtrar nutrientes, materia orgánica y otros elementos que, si llegan sin control a lagunas o ríos, pueden causar daños irreparables, y además ofrecen un refugio para la biodiversidad local, creando pequeños ecosistemas que enriquecen el paisaje y aportan valor social y ambiental. Su bajo consumo energético y mantenimiento sencillo los hacen especialmente atractivos para zonas donde las infraestructuras tradicionales no son viables o resultan demasiado costosas.

Estos humedales suelen tener una profundidad baja, generalmente menor a 0,4 metros, y están diseñados para que el agua fluya desde un punto de entrada hasta uno de salida, recorriendo áreas que pueden abarcar varias hectáreas. La lámina de agua que se mantiene sobre el sustrato permite un contacto prolongado entre el agua y las raíces de las plantas, facilitando procesos como sedimentación, filtración, adsorción y transformaciones biológicas

(Luederitz et al., 2001). Por ejemplo, la materia orgánica se elimina principalmente por sedimentación y por la actividad bacteriana, que puede ser aerobia o anaerobia según las condiciones locales dentro del humedal. Esto significa que el sistema no solo retiene contaminantes, sino que también los transforma, aunque la eficiencia de estos procesos puede variar según factores como la temperatura, el caudal y la composición del agua influente.

Imagen 2. *Sección transversal y longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial*



Fuente: IAGUA (Salas Rodríguez, 2018)

Un aspecto que merece atención especial es la eliminación de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, que suelen estar presentes en el agua contaminada. El nitrógeno, que puede encontrarse en formas orgánicas o amoniacales, se transforma mediante procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación, que dependen de la presencia de diferentes comunidades bacterianas en el humedal. La poda periódica de la vegetación puede mejorar estos procesos, ya que ayuda a mantener un ciclo activo de nutrientes y evita la acumulación excesiva de biomasa (Luederitz et al., 2001). En cuanto al fósforo, su reducción se produce principalmente por adsorción al sustrato, aunque esta eliminación suele ser limitada y depende mucho de las características del suelo y del agua que entra al sistema.

Los humedales artificiales de flujo superficial no solo cumplen una función depuradora, sino que también aportan un valor ecológico importante al ofrecer refugio y hábitats para una gran variedad de fauna y flora, lo que contribuye a mantener la biodiversidad local. Sin embargo, su diseño y operación no están exentos de retos. La calidad y cantidad del agua que entra puede variar mucho, y factores como el clima o la forma en que se gestiona el sistema influyen directamente en su rendimiento (Bernal & Mitsch, 2011). Por ejemplo, al estar el agua expuesta directamente al aire, la evaporación puede ser considerable, lo que se vuelve un problema serio en zonas con poca agua o durante sequías prolongadas.

4.4. Evotranspiración

La evapotranspiración es un proceso fundamental en el ciclo hidrológico de los

humedales, que integra la evaporación del agua superficial y la transpiración de la vegetación. En humedales artificiales de flujo superficial, la evapotranspiración puede representar una pérdida significativa de agua, afectando tanto el balance hídrico como la capacidad de depuración del sistema (Allen et al., 1998). Comprender la evapotranspiración es esencial para modelar con precisión la dinámica de los recursos hídricos y anticipar cambios asociados a variaciones climáticas locales.

El método estándar para estimar la evapotranspiración potencial es el Penman-Monteith, desarrollado bajo criterios físicos que integran variables meteorológicas como radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento (Allen et al., 1998). Este enfoque permite calcular un valor de evapotranspiración que representa la demanda atmosférica máxima, ajustado para condiciones ideales en un cultivo o vegetación referencial. A partir de este valor se pueden elaborar estimaciones más realistas en ambientes específicos, mediante coeficientes de cultivo y correcciones locales.

En los humedales artificiales, la presencia de vegetación emergente incrementa la transpiración, sumándose al componente evaporativo de las masas de agua expuestas. Esta vegetación moderadamente densa actúa como una superficie transpirable, donde la humedad capturada en raíces y hojas retorna a la atmósfera, contribuyendo a la evapotranspiración total (Vymazal, 2010). Al mismo tiempo, la vegetación genera microclimas que afectan los flujos de vapor y reducen la velocidad del viento en la superficie, modulando la evaporación directa.

Respecto a la superficie libre de agua, el proceso de evaporación está influenciado especialmente por la radiación solar neta, que aporta la energía necesaria para el cambio de estado del agua. En verano y en climas mediterráneos, donde las temperaturas y la insolación son elevadas, la evaporación puede ser el proceso dominante en la balanza hídrica del humedal (Allen et al., 1998). En invierno, los valores decrecen significativamente debido a menores temperaturas y duración de la radiación.

La variabilidad estacional de la evapotranspiración debe considerarse al modelar humedales restaurados, ya que influye en la disponibilidad de agua para procesos biogeoquímicos y para la fauna asociada al ecosistema. Por ejemplo, en verano el déficit hídrico producido puede provocar concentración de contaminantes en el agua remanente y afectar la salud vegetal y microbiana del sistema, aspectos cruciales para la eficiencia de depuración (Vymazal, 2010).

La parametrización de la evapotranspiración en modelos hidrológicos requiere el uso de datos meteorológicos precisos y representativos del área de estudio. Variables como

temperatura del aire, humedad, radiación y velocidad del viento pueden obtenerse de estaciones cercanas o de redes meteorológicas regionales, siendo base indispensable para calcular la evapotranspiración sobre la superficie del humedal y ajustar la gestión del recurso hídrico (Allen et al., 1998).

Modelos integrados, como los incluidos en WASP, suelen incorporar cálculos de evapotranspiración apoyados en la formulación de Penman-Monteith, adaptados a las características del humedal y su vegetación específica (Vymazal, 2010). Esto garantiza una evaluación más precisa del balance de agua, indispensable para simular escenarios de carga contaminante y resolver estrategias de manejo sostenible para la conservación y funcionalidad del humedal.

La importancia práctica de cuantificar y modelar la evapotranspiración permite anticipar condiciones extremas, como sequías o aumentos repentinos en la temperatura, que afectan la dinámica hídrica y biológica del humedal. Así, la integración de estos procesos en la modelación juega un rol clave para asegurar un diseño y operación eficiente de humedales restaurados, promoviendo tanto la calidad del agua como la biodiversidad asociada (Allen et al., 1998; Vymazal, 2010).

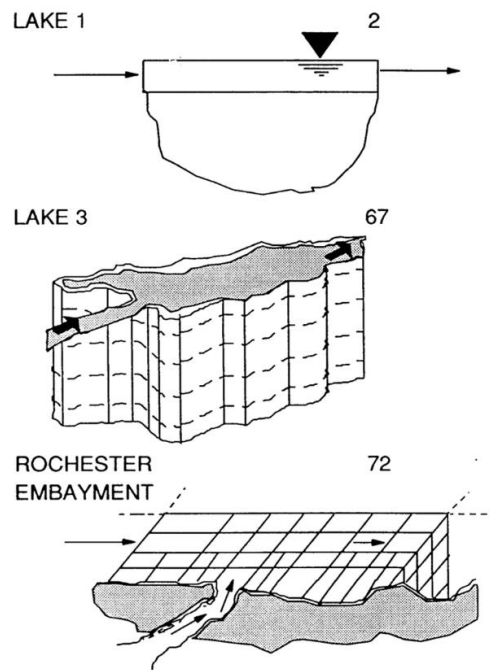
4.5. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)

El programa WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) es una herramienta desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) que se ha convertido en un referente para el análisis de la calidad del agua en diferentes tipos de ecosistemas acuáticos, como ríos, lagos y embalses. Desde que apareció en los años setenta, WASP ha ido evolucionando para adaptarse a las nuevas necesidades de quienes estudian y gestionan el medio ambiente, permitiendo abordar una gran variedad de problemas relacionados con la contaminación del agua (DiToro et al., 1983).

WASP es muy utilizado porque facilita la simulación de la calidad del agua en ambientes superficiales. Permite analizar cómo se comportan los contaminantes, los nutrientes y otras sustancias importantes en cuerpos de agua como ríos, lagos, embalses e incluso humedales. Una de sus ventajas principales es que se puede ajustar a distintas situaciones y escalas, ya que integra procesos físicos, químicos y biológicos que influyen en la calidad del agua. Además, gracias a su estructura modular, el usuario puede elegir los módulos que necesita según el caso, lo que hace posible simular escenarios complejos y estudiar diferentes opciones de gestión ambiental.

En lo que respecta al movimiento del agua, WASP cuenta con un módulo hidrodinámico que permite representar cómo circula el agua dentro del sistema que se está estudiando. Este módulo utiliza información sobre caudales, pendientes, la forma del canal y las condiciones de entrada y salida para calcular el desplazamiento del agua. A través de la división del sistema en segmentos o celdas, el programa puede simular el transporte y la dispersión de contaminantes, considerando procesos como la advección, la difusión y la sedimentación. Así, WASP logra reflejar tanto los cambios en el tiempo como en el espacio de la calidad del agua, lo que resulta especialmente útil para analizar el comportamiento de humedales de flujo superficial. De esta manera, es posible estudiar cómo afectan los eventos extremos, como lluvias intensas, y evaluar la capacidad del sistema para retener y eliminar contaminantes.

Imagen 3. Ejemplo de Segmentación WASP (Lago Ontario - con número de segmentos indicado).



Fuente: Wool et al. (2020)

4.6.CONDUCTIVIDAD COMO TRAZADOR NATURAL

Cuando se habla de trazadores naturales en sistemas acuáticos, la conductividad eléctrica suele ser uno de los primeros ejemplos que se vienen a la mente, sobre todo porque es relativamente sencillo medirla y porque refleja la cantidad de sales disueltas en el agua, lo que puede variar bastante dependiendo de las fuentes y de los procesos que ocurren en el sistema. En muchos estudios, la conductividad se ha usado como una especie de “huella” que permite seguir el movimiento del agua, identificar mezclas entre corrientes de diferente origen o incluso detectar aportes de contaminantes. Por ejemplo, si en un embalse entra agua con una

conductividad distinta a la que ya está ahí, esa diferencia puede ser aprovechada para observar cómo se va mezclando y desplazando a lo largo del tiempo y el espacio (Flores Martínez, 2019). Esta propiedad, que en principio parece tan simple, se vuelve muy útil cuando no se pueden añadir trazadores artificiales por cuestiones ambientales o de presupuesto, o cuando se busca un método que no altere el sistema que se está estudiando.

La conductividad, al responder de forma rápida a los cambios en la composición del agua, se convierte en una herramienta bastante práctica para quienes necesitan datos en tiempo real o para quienes quieren hacer un seguimiento detallado de un evento puntual, como una descarga o una lluvia intensa. Hay casos en los que, por ejemplo, la entrada de agua de lluvia o de una fuente externa con baja conductividad permite ver cómo se diluye el agua del sistema principal y cómo se distribuyen los solutos, lo que ayuda a calibrar modelos hidrodinámicos o de calidad del agua de manera más realista (Huseby et al., 2005). A veces, la conductividad también se usa para comparar diferentes modelos de mezcla, como el de flujo pistón o el de reactor completamente mezclado, y ver cuál de ellos representa mejor el comportamiento observado en la realidad. Esto es especialmente útil cuando se busca predecir la dispersión de contaminantes o el transporte de nutrientes, ya que el modelo elegido puede cambiar mucho las conclusiones del estudio.

Otra cosa que se debe tener en cuenta es que la conductividad no depende solo de la cantidad de sales, sino también de la temperatura, la presencia de ciertos iones y hasta de procesos biológicos que pueden modificar la composición del agua. Por ejemplo, si hay actividad microbiana intensa o si se producen reacciones químicas como la precipitación de sales, la conductividad puede variar sin que necesariamente haya habido un cambio en el flujo o en la mezcla de aguas (Mattle et al., 2001). Esto hace que interpretar los datos de conductividad requiera cierto cuidado y, en ocasiones, sea recomendable complementar la información con otros parámetros, como el pH, la concentración de oxígeno disuelto o incluso la presencia de ciertos nutrientes, para tener una imagen más completa de lo que está pasando en el sistema.

En estudios realizados en tanques, embalses y ríos, la conductividad ha servido para comparar cómo distintos modelos representan la mezcla de aguas. Por ejemplo, se ha visto que el modelo de flujo pistón puede describir mejor ciertos sistemas donde el agua se mueve en una sola dirección y la mezcla es limitada, mientras que el modelo de reactor completamente mezclado es más adecuado cuando el agua tiende a mezclarse completamente en poco tiempo (Guzhñay Mejía, 2023). Estas comparaciones no solo ayudan a elegir el

modelo más adecuado para describir la dinámica interna del sistema, sino que también permiten ajustar los parámetros del modelo para que las simulaciones se parezcan más a lo que realmente ocurre. En algunos casos, se han realizado experimentos controlados donde se introduce agua con una conductividad diferente y se mide cómo cambia a lo largo del tiempo en distintos puntos del sistema, lo que da información muy valiosa para la calibración y validación de los modelos.

Sin embargo, la experiencia muestra que, aunque la conductividad es un trazador bastante útil, su interpretación puede ser complicada, sobre todo en sistemas donde hay muchos factores que pueden influir en su valor. Por ejemplo, en embalses donde hay aportes de diferentes fuentes, procesos de evaporación o incluso actividad biológica intensa, los cambios en la conductividad pueden deberse a una combinación de factores y no solo a la mezcla de aguas (Rodríguez Juárez, 2019). Por eso, muchas veces se recomienda analizar los resultados con cierto cuidado y, si es posible, apoyarse en observaciones adicionales o en la experiencia previa en sistemas similares. Al final, aunque no es una herramienta perfecta, la conductividad se ha consolidado como una de las opciones más prácticas y accesibles para quienes buscan entender la dinámica interna de cuerpos de agua y ajustar modelos que permitan predecir su comportamiento, siempre y cuando se tenga presente la complejidad y la incertidumbre que pueden estar involucradas en cada caso (Flores Martínez, 2019; Huseby et al., 2005; Mattle et al., 2001; Guzhñay Mejía, 2023; Rodríguez Juárez, 2019).

Cuando se empieza a leer sobre modelos hidrodinámicos, lo primero que aparece es la idea de que estos modelos sirven para representar cómo se mueve el agua en distintos sistemas, ya sea en ríos, lagos, embalses o incluso en humedales construidos. La hidrodinámica es el estudio del movimiento del agua y, aunque a veces parece algo abstracto, en realidad es fundamental para entender procesos como la mezcla de contaminantes, el transporte de sedimentos o la distribución de nutrientes en un cuerpo de agua (Losada et al., 1995). Los modelos hidrodinámicos pueden ser desde muy sencillos, con solo unas cuantas ecuaciones, hasta muy complejos, usando simulaciones en tres dimensiones y considerando un montón de variables al mismo tiempo. Esta variedad hace que se puedan adaptar a diferentes necesidades, desde estudios rápidos hasta investigaciones muy detalladas.

En muchos casos, la elección del tipo de modelo hidrodinámico depende de lo que se quiere estudiar y de los datos que se tienen disponibles. Por ejemplo, para sistemas donde el flujo es predominantemente en una sola dirección y la mezcla transversal es baja, el modelo de flujo pistón suele ser una buena opción, porque simula el avance del agua como si fuera

una “ola” que empuja todo hacia adelante sin mezclar demasiado (Giácoman Vallejos et al., 2003). Por otro lado, cuando se trata de sistemas donde el agua se mezcla de manera más uniforme, como en tanques o lagunas pequeñas, el modelo de reactor completamente mezclado (CSTR) puede representar mejor la realidad. Hay ocasiones en las que se combinan ambos enfoques, usando modelos de compartimentos para representar zonas con diferentes grados de mezcla.

La importancia de los modelos hidrodinámicos radica en que permiten anticipar cómo se comportará el sistema bajo diferentes condiciones. Por ejemplo, si se quiere saber qué pasaría si entra una descarga de contaminantes en un río, el modelo puede ayudar a predecir hasta dónde llegará esa descarga y cuánto tiempo tardará en diluirse (Rajar et al., 1997). En humedales artificiales, los modelos hidrodinámicos ayudan a diseñar el flujo del agua para maximizar la eliminación de contaminantes, lo que es clave para que el sistema funcione bien (Ramírez, 2011). Además, estos modelos son útiles para evaluar el impacto de obras hidráulicas, como presas o canales, y para planificar estrategias de manejo y conservación de recursos hídricos.

4.6.1. Ecuación General de Advección-Dispersión-Reacción (ADR)

El modelo WASP se basa en el principio de balance de masa para simular el destino y transporte de contaminantes en cuerpos de agua, resolviendo ecuaciones diferenciales que dependen del tiempo y del espacio. De manera general, la evolución espacial y temporal de la concentración de un contaminante se describe mediante la ecuación de Advección-Dispersión-Reacción (ADR), que contempla los procesos físicos, químicos y biológicos fundamentales que afectan al soluto. El módulo de temperatura de WASP resuelve sus ecuaciones considerando tanto la conservación de masa como la de energía, permitiendo así simular los intercambios de calor entre el cuerpo de agua y la atmósfera o la superficie.

La ecuación ADR explica cómo varía la concentración C de un contaminante en función del tiempo t y la posición espacial, típicamente a lo largo de tres dimensiones. Este cambio se debe a varios procesos simultáneos:

- **Advección:** el transporte del soluto impulsado por el movimiento del agua con una velocidad media v . Es decir, el contaminante es arrastrado siguiendo la corriente del flujo.
- **Dispersión:** la mezcla y difusión del contaminante causada tanto por la turbulencia y el

flujo irregular (dispersión mecánica) como por el movimiento molecular espontáneo (difusión molecular). Esto se representa con un coeficiente de dispersión DD que combina ambos efectos.

- Reacciones: cambios en la concentración provocados por procesos químicos, físicos o biológicos, como la degradación, transformación o producción de la sustancia, incluidos sumideros y fuentes internas, indicados mediante $R_x R_x$.
- Cargas externas: entradas de masa al sistema que pueden ser puntuales o difusas, representadas por $SLSL$, que aumentan la concentración en ciertos puntos.

La forma general tridimensional de la ecuación se expresa así:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_k \quad (I)$$

Donde:

- C : Concentración del parámetro de calidad de agua [mg l^{-1}] o [g m^{-3}].
- t : Tiempo [d].
- U_x, U_y, U_z : Velocidad del agua: longitudinal (U_x), lateral (U_y) y vertical (U_z) [m d^{-1}].
- D_x, D_y, D_z : Coeficiente de transporte difusivo: longitudinal (D_x), lateral (D_y) y vertical (D_z) [$\text{m}^2 \text{d}^{-1}$].
- S_k : Término fuente sumidero, cuando es positivo es fuente y cuando es negativo es sumidero [$\text{g m}^{-3} \text{d}^{-1}$].

Para resolver esta ecuación, WASP divide el cuerpo de agua en varios compartimentos o segmentos discretos, aplicando un enfoque conocido como “modelo de caja” o “modelado por compartimentos”. Esto implica que el volumen total se subdivide en secciones, y el programa calcula la concentración en cada una considerando el flujo de masa hacia y desde segmentos vecinos y las reacciones internas. El método numérico empleado suele ser el de diferencias finitas o volúmenes finitos, lo que permite aproximar las derivadas espaciales y temporales para obtener soluciones que evolucionan paso a paso en tiempo y espacio.

Este enfoque numérico es esencial para captar la complejidad del transporte y transformación de contaminantes en sistemas reales, donde el flujo y las condiciones no son uniformes. Gracias a esta discretización, WASP puede simular la dinámica de múltiples

contaminantes, sus interacciones y la influencia de diferentes procesos ambientales o antropogénicos, proporcionando una herramienta flexible y potente para gestión y análisis de la calidad del agua.

4.6.2. MODELO DE TEMPERATURA WASP

El módulo de temperatura en WASP utiliza una ecuación de balance de calor que es análoga a la ecuación general de advección-dispersión-reacción (ADR) empleada para contaminantes, con la particularidad de que la variable de concentración CC cambia de representar una concentración química a representar la concentración de calor en el agua. Esta transformación permite modelar el transporte y la distribución del calor en la columna de agua, incorporando procesos físicos de advección, dispersión y fuentes o sumideros de energía térmica.

4.6.2.1. Ecuación de la concentración de energía en el agua

El balance de calor en un pequeño volumen de agua considera tanto el transporte de energía térmica por el movimiento del agua (advección) como su dispersión dentro del agua por difusión y turbulencia. Para describir esto se usa la ecuación de Advección-Dispersión-Reacción (ADR), adaptada para el transporte de calor. En este caso, las reacciones internas originales son sustituidas por intercambios de calor con el ambiente, incluyendo radiación solar, radiación de onda larga, calor sensible, evaporación, conducción con el fondo y aportes de agua o lluvia.

Así, la ecuación ADR permite simular cómo cambia la temperatura en el agua a lo largo del tiempo y el espacio, integrando tanto el movimiento físico del calor como las interacciones energéticas con el entorno. Aunque el modelo ayuda a entender estos procesos, reconocer que el sistema es complejo y que ciertos factores pueden dificultar su precisión es parte del análisis.

La energía térmica, o contenido de calor H , se relaciona con la temperatura T de la siguiente manera:

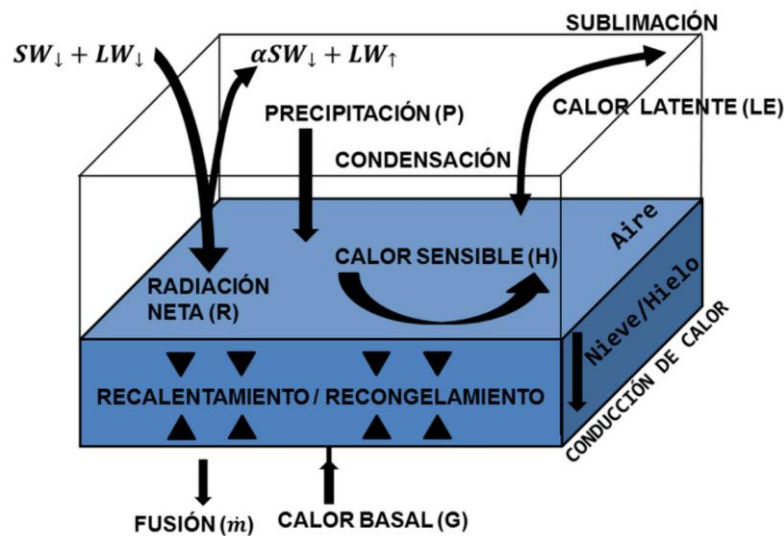
$$H = V(\rho_w C_w T) = VC_h$$

Donde:

- H es el contenido total de calor (Joules),
- V es el volumen de agua considerado (m^3),

- ρ_w es la densidad del agua (kg/m^3),
- C_w es el calor específico del agua a presión constante ($\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$),
- T es la temperatura del agua en grados Celsius,
- $C_h = \rho_w C_w T$ es la concentración de calor, es decir, la cantidad de energía térmica por unidad de volumen (J/m^3).

Imagen 4. Balance de energía térmica considerado en la modelación de temperatura de cuerpos de agua superficiales con WASP



Fuente: Gualco et al. (2018)

4.6.2.2. Temperatura (Heat Model WASP)

El modelo térmico de WASP considera el balance total de energía que experimenta el cuerpo de agua, integrando intercambios de calor en la superficie y en el fondo. Para el intercambio superficial, el flujo neto de energía térmica H_n se calcula mediante la suma de las principales fuentes y sumideros térmicos:

$$H_n = H_s + H_a + H_e + H_c - (H_{sr} + H_{ar} + H_{br})$$

Donde:

- H_s es la radiación solar de onda corta incidente (W/m^2),
- H_a es la radiación solar de onda larga incidente (W/m^2),
- H_e es la pérdida de calor por evaporación (W/m^2),
- H_c es la conducción de calor por convección (W/m^2),
- H_{sr} es la radiación solar de onda corta reflejada (W/m^2),

- H_{ar} es la radiación solar de onda larga reflejada (W/m^2),
- H_{br} es la radiación emitida por la superficie del agua (W/m^2).

Estos términos representan el balance energético en la interfaz aire-agua, afectando directamente la temperatura superficial del cuerpo de agua.

- **Balance neto de calor**

El balance neto de calor H_n se relaciona con la variación de temperatura en el volumen de agua V mediante:

$$V\rho_w C_w \left(\frac{\partial t}{\partial T} \right) = H_n A_s$$

Donde:

- A_s es el área superficial del cuerpo de agua (m^2),
- $\frac{\partial T}{\partial t}$ es la tasa de cambio temporal de la temperatura del agua.

- **Radiación solar de onda corta**

La radiación solar de onda corta que penetra en la columna de agua se atenúa según la profundidad z de acuerdo con la Ley de Beer-Lambert:

$$H_s(z) = (1 - \beta)H_{se}e^{-\eta z}$$

Con:

- $H_s(z)$ la radiación a profundidad z ,
- β la fracción de radiación absorbida en la superficie,
- H_{se} la radiación solar de onda corta en la superficie,
- η el coeficiente de atenuación (m^{-1}).

- **Pérdidas de Calor por evaporación**

Las pérdidas de calor por evaporación se calculan como función de la velocidad del

viento y la presión de vapor, usando:

$$H_e = f(w) \cdot (e_s - e_a)$$

Donde:

- $f(w) = a + bW^c$ es una función empírica de la velocidad del viento W (a 2 m sobre la superficie),
- e_s es la presión de vapor de saturación en la superficie del agua,
- e_a es la presión de vapor atmosférica,

Con coeficientes empíricos a, b, c determinados experimentalmente.

• Intercambio de Calor por Conducción

El intercambio de calor por conducción se estima mediante:

$$H_c = C_c \cdot f(w) \cdot (T_s - T_a)$$

Donde:

- C_c es el coeficiente de transferencia de calor (coeficiente de Bowen),
- T_s y T_a son la temperatura superficial del agua y del aire respectivamente.

• Intercambio de Calor con el Sedimento

Finalmente, el intercambio de calor con el sedimento se modela por conducción térmica a través de la interfaz agua-sedimento, expresado como:

$$H_{sw} = -K_{sw}(T_w - T_s)$$

Donde:

- H_{sw} es la tasa de intercambio de calor sedimento-agua,
- K_{sw} es el coeficiente de intercambio térmico,
- T_w y T_s son las temperaturas del agua y del sedimento.

Este conjunto de ecuaciones permite simular de forma realista la evolución térmica en el humedal, esencial para comprender su respuesta a factores meteorológicos, hidrológicos y su efecto sobre procesos biogeoquímicos (Wool & Ambrose, 2008; Ambrose et al., 2016).

4.6.3. MODELO DE CALIDAD

El programa WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) dispone de un módulo avanzado para el modelado de procesos de eutrofización, diseñado para simular la dinámica de nutrientes, materia orgánica y contaminantes en cuerpos de agua superficiales. Este módulo integra procesos físicos, químicos y biológicos fundamentales para predecir la calidad del agua en sistemas complejos como humedales artificiales de flujo superficial.

El modelo trabaja bajo un enfoque por compartimentos, donde cada segmento representa un volumen de agua con variables de estado que incluyen las concentraciones de los principales contaminantes y biomasa microbiana. La evolución temporal y espacial de estos parámetros se calcula resolviendo las ecuaciones de balance de masa que contemplan transporte hidráulico (advección y dispersión) y transformaciones biogeoquímicas específicas.

En el contexto de la modelación aplicada al humedal Tancat de la Pipa, dos parámetros destacan por su relevancia ambiental y por ser representados en WASP mediante cinéticas específicas: los sólidos suspendidos totales (TSS) y el amonio (NH_4^+).

4.6.3.1. Módulo Avanzado de Eutrofización (EUTRO)

El Módulo Avanzado de Eutrofización (EUTRO) forma parte del programa WASP y sirve para estudiar cuerpos de agua con exceso de nutrientes, como los humedales artificiales que reciben escorrentías. Este módulo simula cómo se relacionan elementos como el oxígeno disuelto, los ciclos del carbono, nitrógeno y fósforo, y la evolución del fitoplancton. Entre las variables que analiza están el oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea, distintas formas de nitrógeno y fósforo, la biomasa de fitoplancton medida mediante clorofila-a y también los sólidos suspendidos inorgánicos. Aunque esto puede parecer complicado, es una forma de entender cómo estos factores se afectan entre sí y cómo influyen en la calidad del agua.

El módulo EUTRO no ve los contaminantes como partes aisladas, sino como componentes que forman un ciclo en el proceso de eutrofización. Por ejemplo, el amonio no es solo un contaminante que se debe eliminar, sino que también es un nutriente que puede

favorecer el crecimiento del fitoplancton. Cuando el fitoplancton muere y se descompone, aporta materia orgánica que se relaciona con los sólidos suspendidos totales. Esto muestra cómo estos elementos están conectados y cómo interactúan dentro del ecosistema acuático, aunque el sistema sigue siendo complejo y todavía hay muchos aspectos que no se comprenden completamente.

En este estudio, se optó por centrarse en tres contaminantes principales del módulo EUTRO: el amonio (NH_4^+), los sólidos suspendidos totales (SST) y el oxígeno disuelto. La elección responde a que estos parámetros son fundamentales para entender la eutrofización y que son relevantes para el humedal analizado. El amonio indica la cantidad de nitrógeno disponible, los sólidos suspendidos representan tanto materia particulada como fuente de materia orgánica relacionada con procesos biológicos, y el oxígeno disuelto es crucial para la vida acuática y para las reacciones químicas que ocurren en el agua. Estas variables permiten tener una visión inicial del comportamiento del humedal, aunque reconocen que hay otras variables importantes para estudiar más adelante.

El análisis de estas tres variables representa una manera de aproximarse a la complejidad del sistema, sin complicar demasiado el estudio. El humedal responde a muchos factores y esas interacciones pueden ser difíciles de simular con exactitud. Este enfoque busca dar una base que sirva para entender mejor cómo funcionan ciertos procesos y para apoyar la gestión ambiental y la evaluación de la calidad del agua. La comprensión que se obtiene no es completa ni definitiva, pero es un paso para seguir explorando cómo se pueden cuidar y conservar estos espacios.

4.6.3.2. Sólidos Suspendidos Totales (TSS)

Los sólidos suspendidos totales comprenden partículas sólidas dispersas en el agua que no se disuelven y afectan la turbidez y la calidad del medio acuático. En humedales de flujo superficial, su reducción se produce principalmente por sedimentación, un proceso que puede modelarse mediante una cinética de primer orden, proporcional a la concentración de TSS en el agua.

La tasa de sedimentación r_s puede expresarse como:

$$r_s = k_s \cdot [\text{TSS}]$$

Donde:

- r_s : Tasa de sedimentación de sólidos suspendidos ($mg L^{-1} día^{-1}$),
- k_s : Constante de sedimentación ($día^{-1}$),
- $[TSS]$: Concentración de sólidos suspendidos totales en agua ($mg L^{-1}$).

Este modelo permite representar la disminución gradual de partículas suspendidas por asentamiento a medida que el agua fluye a través del humedal.

4.6.3.3. Amonio (NH_4^+)

El amonio, una forma inorgánica del nitrógeno, resulta de la mineralización de materia orgánica y es usado como nutriente, aunque en concentraciones elevadas puede afectar negativamente la biota acuática. Su transformación en sistemas acuáticos está mediada principalmente por la nitrificación, un proceso biológico sensible a factores ambientales como la temperatura y el oxígeno disuelto.

La velocidad del proceso de nitrificación r_{nit} se puede describir mediante una tasa de primer orden corregida por temperatura y limitada por la concentración de oxígeno disuelto, como:

$$r_{nit} = k_{nit} \cdot \theta_{nit}^{T-20} \cdot [NH_4^+] \cdot \frac{DO}{K_{0a} + DO}$$

Donde:

- r_{nit} : Tasa de nitrificación ($día^{-1}$),
- k_{nit} : Constante de nitrificación a 20 °C ($día^{-1}$),
- θ_{nit} : Coeficiente de corrección por temperatura, derivado de la relación de Arrhenius (adimensional),
- T : Temperatura del agua (°C),
- NH_4^+ : Concentración de amonio ($mg L^{-1}$),
- DO : Concentración de oxígeno disuelto en el agua ($mg L^{-1}$),
- K_{0a} : Constante de semisaturación de oxígeno disuelto ($mg L^{-1}$).

Este esquema refleja cómo la nitrificación aumenta a medida que la temperatura se aproxima o supera los 20 °C y se limita cuando la concentración de oxígeno disuelto es baja, siguiendo una función tipo Michaelis-Menten para el oxígeno.

Además del proceso de nitrificación, el amonio también está sujeto a otros mecanismos que afectan su concentración, como la mineralización (transformación de materia orgánica en amonio) y la desnitrificación (reducción de nitratos a nitrógeno gaseoso). En el contexto específico del modelo aplicado al humedal Tancat de la Pipa, la mineralización no fue considerada explícitamente en el modelo debido a las siguientes razones:

- La disponibilidad y cuantificación de la materia orgánica susceptible de mineralización eran limitadas en los datos experimentales, dificultando su parametrización precisa.
- El principal objetivo fue evaluar la capacidad depuradora del sistema en relación directa con los contaminantes detectados (amonio y sólidos suspendidos), priorizando procesos clave con datos más fiables.
- La mineralización suele tener un efecto más lento y menos perceptible en los escenarios temporales y espaciales analizados, por lo que su exclusión simplifica el modelo sin comprometer significativamente la validez de los resultados para la escala evaluada.

Respecto al oxígeno disuelto (DO), su concentración en el agua se calcula en WASP integrando distintos procesos de reacciones químicas y biológicas, así como transportes físicos, para simular su evolución espacial y temporal. WASP considera fuentes y sumideros de oxígeno, incluyendo la reaeración superficial, la producción y consumo biológico, y la transferencia por advección y dispersión. El modelo puede incorporar datos meteorológicos y parámetros específicos del sistema para estimar la tasa de transferencia de oxígeno desde la atmósfera al agua (reaeración), calculada usualmente mediante fórmulas empíricas que dependen de la velocidad del viento, la temperatura y la turbulencia del agua.

4.6.3.4. Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto se considera una de las variables más significativas para entender cómo está funcionando un ecosistema acuático. La cantidad que hay en el agua depende de muchos procesos, algunos que aportan oxígeno y otros que lo consumen. En este contexto, el programa WASP, específicamente su módulo EUTRO, intenta simular este equilibrio complejamente, teniendo en cuenta las diversas interacciones naturales que influyen sobre el

oxígeno en el agua. Este enfoque posibilita observar cómo cambian las condiciones del oxígeno en función de los distintos factores presentes, sin pretender cubrir todos los detalles que pueden intervenir.

La ecuación que representa el balance del oxígeno en el agua busca mostrar cada uno de esos procesos que afectan su concentración. Esta regla matemática integra contribuciones que provienen de fuentes físicas como la mezcla o la entrada directa de agua, y de procesos biogeoquímicos como la producción mediante fotosíntesis o la demanda que generan organismos vivos al descomponer materia orgánica. Asumir que todas estas influencias se pueden condensar en una fórmula permite hacer simulaciones que aporten un panorama general, aunque es una simplificación de la compleja realidad.

La fórmula del balance integral del oxígeno disuelto en el agua se expresa así:

$$\frac{\partial[OD]}{\partial t} = \textit{Advección} + \textit{Dispersión} + \textit{Intercambio Aire - Agua} + \textit{Fotosíntesis}$$

– *Respiración* – *Demanda Bioquímica de Oxígeno*
– *Otras pérdidas y procesos*

Donde cada término representa un efecto que puede aumentar o disminuir la concentración de oxígeno. Por ejemplo, la advección y la dispersión son procesos físicos que mueven el oxígeno a través del agua, mientras que la fotosíntesis genera oxígeno y la respiración o demanda producen su consumo. La complejidad de estos fenómenos y la variedad de factores que influyen impiden un conocimiento total, haciendo que estas ecuaciones sirvan como aproximaciones útiles, pero no definitivas.

Dicha representación del balance del oxígeno es una herramienta para observar tendencias y hacer predicciones sobre la calidad del agua en diferentes escenarios. Se reconoce que el comportamiento real del oxígeno puede variar según condiciones específicas no siempre capturadas en el modelo. Por eso, interpretar con precaución los resultados y apoyarse en datos de campo sigue siendo fundamental para acercarse a una comprensión más realista del ecosistema acuático.

4.7. Calibración y validación de modelos

Cuando se empieza a trabajar con modelos ambientales, como los hidrodinámicos, enseguida aparecen los conceptos de calibración y validación, que en realidad son pasos imprescindibles para que el modelo tenga sentido y no se quede solo en la teoría. La calibración consiste en ajustar los parámetros internos del modelo para que los resultados que

se obtienen se parezcan lo máximo posible a los datos reales que se han medido en campo o en el laboratorio. Muchas veces este proceso se siente como un trabajo de prueba y error, porque hay que ir cambiando valores, ejecutando el modelo y comparando los resultados, hasta que las curvas simuladas se acercan bastante a las observadas. Por otro lado, la validación sería como la prueba definitiva: aquí se trata de comprobar si el modelo, después de calibrarlo, es capaz de predecir datos nuevos que no se usaron en la calibración, y si sigue funcionando igual de bien.

La validación, por su parte, es fundamental para saber si el modelo es confiable. No basta con que el modelo se ajuste bien a los datos con los que fue calibrado, porque podría estar simplemente “memorizando” esos datos y no ser capaz de predecir situaciones nuevas. Por eso, la validación se hace con datos independientes de otro periodo, y se compara de nuevo la salida del modelo con las observaciones (Thacker et al., 2004). Si el modelo sigue funcionando bien, se puede tener más confianza en sus resultados. Si no, puede ser necesario volver a calibrar o incluso replantear la estructura del modelo.

Por último, es importante mencionar que la calibración y validación no son procesos que se hagan una sola vez. A medida que se dispone de nuevos datos o que cambian las condiciones del sistema, puede ser necesario recalibrar el modelo o validar de nuevo sus resultados. Así, el modelo se mantiene actualizado y sigue siendo útil para responder a nuevas preguntas o para adaptarse a cambios inesperados en el entorno (Ferreira et al., 2021). Esta flexibilidad es una de las razones por las que los modelos siguen siendo herramientas tan valiosas en el estudio y gestión de sistemas ambientales.

5. Metodología

5.1. Zona de estudio

El Tancat de la Pipa se encuentra dentro del Parque Natural de la Albufera de Valencia, en un lugar que antiguamente fue un campo de arroz. Este sitio ha cambiado con el tiempo para convertirse en un humedal artificial que sirve como un filtro natural para el agua que llega a la laguna principal. Su ubicación entre el Canal del Puerto de Catarroja y la desembocadura del Barranco del Poyo le da un papel clave en la conexión entre zonas urbanas y espacios naturales, lo que implica una interacción constante entre actividades humanas y procesos ecológicos. Reconocer esta ubicación ayuda a entender la complejidad de su funcionamiento y los retos que enfrenta para mantener la calidad del agua y la biodiversidad local, a pesar de las presiones ambientales crecientes. Esta comprensión refleja un esfuerzo por valorar cómo espacios modificados pueden seguir aportando a la conservación, aunque no sin dificultades.

Imagen 5. Mapa de L'Albufera



Fuente: Google Earth (2025)

Este no es solo un sistema para tratar el agua; se ha convertido en un refugio imprescindible para la fauna local. Desde que se restauró, la diversidad de aves acuáticas ha crecido bastante, y muchas de ellas, protegidas o en peligro, han encontrado en este humedal un lugar seguro para anidar y alimentarse (Rodrigo et al, s.f.). Este valor ecológico ha

impulsado la participación de organizaciones como Acció Ecologista-Agró y SEO/BirdLife, que colaboran en la gestión de la reserva mediante monitoreos de biodiversidad y actividades de educación ambiental. En este sentido, la coordinación que tiene lugar entre dichas entidades y los ayuntamientos tanto de Valencia como de Catarroja, ha sido indispensable para poder garantizar que el humedal se mantenga en las mejores condiciones para que la comunidad pueda valorarle y reconocerle.

El proyecto también ha dedicado un esfuerzo especial a acercar el humedal a la comunidad, construyendo infraestructuras que facilitan tanto el acceso como la comprensión del entorno natural. Con senderos diseñados para recorrer el espacio sin dañarlo, observatorios para la observación de aves y un centro de interpretación, se busca que la gente pueda entender por qué es tan vital proteger estos ecosistemas, especialmente en áreas urbanas o periurbanas donde la conexión con la naturaleza suele ser más limitada (Rodrigo, Calero, Rojo, & Segura, s.f.). Esta labor educativa no es un simple complemento, sino una pieza fundamental para despertar conciencia y fomentar el apoyo social, aspectos indispensables para asegurar que la conservación perdure en el tiempo.

Sin embargo, la gestión del Tancat continúa enfrentándose a múltiples desafíos de relevancia, entre los cuales se puede mencionar que la calidad del agua que entra es variable de acuerdo a la época del año y a las condiciones climáticas que se presenten, así como también se tiene la presencia de especies que son consideradas invasoras, tales como el cangrejo rojo o la carpa común, que pueden llegar a alterar en gran medida el equilibrio ecológico (Rodrigo, Calero, Rojo, & Segura, s.f.). Mantener la vegetación y controlar la acumulación de sedimentos requiere un monitoreo constante para evitar que el sistema pierda su capacidad de filtración o que se generen desequilibrios que afecten a la fauna local. Por eso, el humedal también funciona como un espacio experimental donde se prueban y ajustan estrategias de manejo que pueden servir de ejemplo para otros humedales similares en la región.

Aunque el camino no es fácil, la experiencia acumulada en el Tancat de la Pipa demuestra que con trabajo constante y colaboración entre diferentes actores se puede mantener un espacio vivo que aporta valor ecológico, social y educativo. La conexión que se logra con la comunidad a través de la educación ambiental y la participación activa es fundamental para que este tipo de proyectos perduren y sigan siendo un refugio para la biodiversidad en medio de un paisaje cada vez más presionado por la urbanización.

El Tancat de la Pipa representa mucho más que un humedal artificial; es un espacio que refleja la complejidad y las posibilidades de la restauración ambiental en un entorno

mediterráneo sometido a fuertes presiones. Su diseño combina elementos naturales y humanos para crear un sistema que no solo mejora la calidad del agua, sino que también aporta valor ecológico y social, sin perder de vista que su éxito depende de una gestión constante y comprometida (Martín et al., 2013; Pardo & Armengol Díaz, 2010).

En el caso del humedal Tancat de la Pipa, situado en el Parque Natural de la Albufera de Valencia, la historia es un buen ejemplo de cómo un espacio puede reinventarse para cumplir funciones ecológicas esenciales. Antes era un arrozal, pero hoy funciona como un filtro natural que mejora la calidad del agua que llega a la laguna principal, que durante años ha sufrido problemas de eutrofización y contaminación difusa. Este humedal no solo retiene nutrientes y materia orgánica, sino que también ayuda a mitigar la escorrentía urbana, que en episodios de lluvia intensa arrastra contaminantes que pueden afectar gravemente el ecosistema, por lo que cumple una doble función que lo hace especialmente valioso en un entorno tan sensible y presionado.

Este humedal, además, tiene un valor añadido que no siempre se mide en términos de calidad del agua. Es un refugio para la fauna local, un lugar donde aves y otras especies encuentran un espacio para vivir y reproducirse. La recuperación de estos hábitats es vital para mantener la biodiversidad regional, que se ve amenazada por la urbanización y la contaminación. Por eso, el Tancat de la Pipa no solo mejora el agua, sino que también aporta un valor ecológico y social que trasciende su función original, conectando con la comunidad y generando conciencia ambiental.

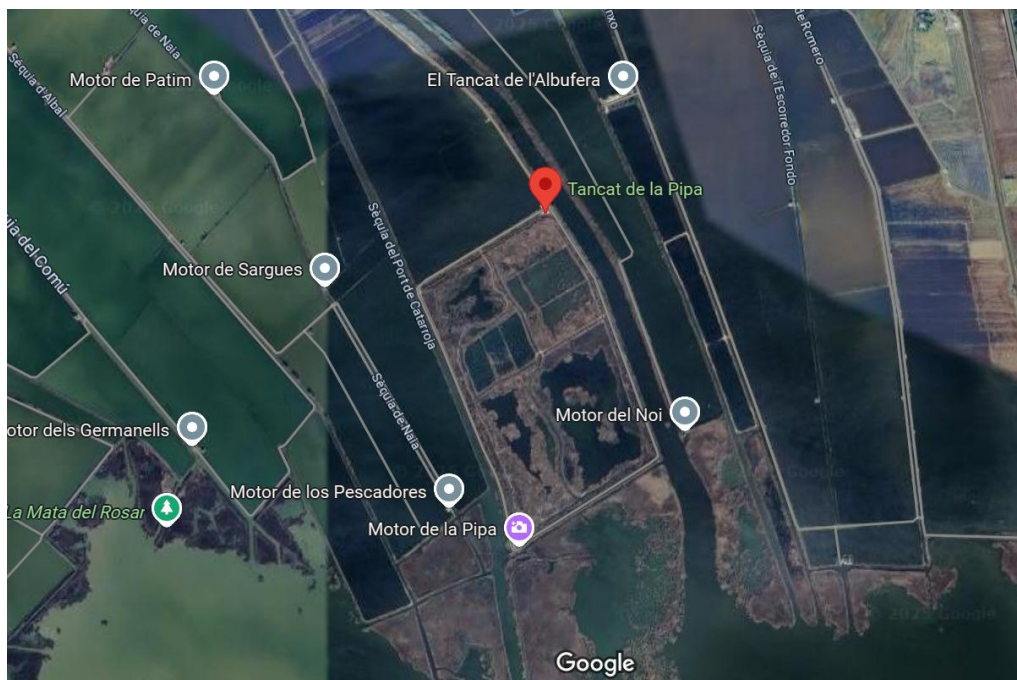
La Albufera de Valencia, uno de los humedales costeros más importantes del Mediterráneo, ha visto cómo la presión ambiental no para de crecer en las últimas décadas. El avance urbano, junto con los vertidos agrícolas y las escorrentías que arrastran todo tipo de contaminantes, ha hecho que la laguna reciba cada vez más nutrientes y materia orgánica, lo que empeora la eutrofización y la calidad del agua (Boluda et al., 2002). Cuando llegan episodios de lluvia intensa, como esas tormentas conocidas como DANA, la cosa se complica aún más, porque la entrada masiva de contaminantes por cauces como el Barranco del Poyo y la Acequia del Puerto de Catarroja se dispara, poniendo en serio peligro la salud del ecosistema (Martin-Moreno et al., 2025). En la Imagen 5 se puede observar el mapa de L'Albufera, que contextualiza geográficamente esta área tan sensible ambientalmente.

5.2. Características generales del humedal el Tancat de la Pipa

El humedal Tancat de la Pipa ha experimentado una transformación significativa en

poco más de una década, pasando de ser un campo de arroz a convertirse en una reserva natural dentro del Parque Natural de la Albufera de Valencia. Esta transformación fue el resultado de un proyecto de restauración ecológica impulsado en 2007 por la Confederación Hidrográfica del Júcar, que convirtió aproximadamente 40 hectáreas de cultivo en un humedal de flujo superficial con el objetivo de mejorar la calidad del agua y fomentar la biodiversidad local (Rodrigo, Calero, Rojo, & Segura, s.f.). Este humedal, que se encuentra ubicado en la orilla norte de la laguna (imagen 6), específicamente entre el Canal del Puerto de Catarroja y la desembocadura del Barranco del Poyo, ha estado en funcionamiento desde ese entonces, actuando como un filtro natural en el que se retienen los nutrientes y los contaminantes antes de que el agua pueda llegar a alcanzar la laguna principal.

Imagen 6. *Ubicación Geográfica – Tancat de la Pipa*



Fuente: Google Earth (2025)

En este sentido, el diseño del Tancat de la Pipa tiene una combinación de varias lagunas permanentes, las cuales cuentan con áreas de vegetación emergente, en las que prosperan algunas especies típicas de los humedales mediterráneos, como el carrizo (*Phragmites australis*), el junco (*Juncus* sp.) y el lirio amarillo (*Iris pseudacorus*) (Rodrigo & Carabal, 2020). Estas plantas no solo actúan como barreras naturales que retienen sólidos y materia orgánica, sino que también crean un ambiente ideal para la actividad de microorganismos encargados de descomponer contaminantes, contribuyendo así a la depuración del agua.

Asimismo, la presencia de vegetación sumergida, como *Ceratophyllum submersum*, contribuye a la oxigenación del agua y al mantenimiento del equilibrio ecológico. La configuración del humedal permite que el agua fluya lentamente a través de diversos ambientes, favoreciendo procesos naturales de sedimentación y transformación biológica que reducen la carga contaminante.

Imagen 7. Esquema del Tancat de la Pipa y su conexión con l'Albufera de Valencia



Fuente: Sala de Prensa, Confederación Hidrográfica del Júcar C.A. (2021)

El esquema del Tancat de la Pipa, ilustrado en la Imagen 7, muestra claramente las diferentes partes que componen este humedal y su conexión con la laguna principal de l'Albufera de Valencia. Este esquema destaca las entradas de agua, las zonas de diferentes lagunas y canales internos, y la salida que desemboca hacia la Albufera, evidenciando cómo el flujo superficial atraviesa el humedal para realizar su función depuradora. Dentro del humedal, se identifican varios sectores, siendo el sector F4 uno de ellos, que corresponde a un área específica de estudio en este Trabajo Fin de Máster (TFM) debido a sus características hidráulicas particulares y su relevancia en el comportamiento general del sistema.

Las características hidráulicas generales del humedal se presentan en la Tabla 1, donde se detallan datos como la superficie total, el volumen útil, los caudales de entrada medio y máximo, el tiempo de retención hidráulica, entre otros parámetros esenciales para comprender el funcionamiento del Tancat de la Pipa. Estos datos permiten interpretar cómo el humedal

actúa en la retención y tratamiento del agua contaminada, y sirven como base para la modelación hidrodinámica focalizada especialmente en el sector F4.

Tabla 1. *Características hidráulicas del humedal Tancat de la Pipa*

Dato	Valor	Unidad de medida
Superficie total	~40	ha
Superficie de lámina de agua	~22	ha
Volumen útil	~100,000	m ³
Caudal de entrada medio anual	2,000–2,500	m ³ /día
Caudal máximo de entrada	10,000	m ³ /día
Tiempo de retención hidráulica	4–7	días
Número de sectores principales	2	-
Longitud aproximada	1,200	m
Ancho medio	300	m
Profundidad media	0.4	m
Afluentes principales	Barranco del Poyo, Acequia del Puerto de Catarroja	-
Tipo de flujo	Superficial	-

Fuente: Gargallo Bellés, S. (2017). Modelación de la calidad de las aguas en los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS) <https://hdl.handle.net/10251/78215>

La Tabla 1 muestra las características hidráulicas principales del humedal Tancat de la Pipa. Su superficie total abarca alrededor de 40 hectáreas, de las cuales unas 22 están cubiertas por la lámina de agua. El volumen útil del humedal es aproximadamente 100,000 metros cúbicos. En cuanto a los caudales, el promedio anual de entrada de agua se sitúa entre 2,000 y 2,500 metros cúbicos por día, aunque en momentos de mayor actividad este caudal puede alcanzar hasta 10,000 metros cúbicos diarios. El tiempo que tarda el agua en recorrer y permanecer dentro del sistema oscila entre cuatro y siete días.

El humedal está dividido en dos sectores principales, con una longitud aproximada de 1,200 metros y un ancho medio de 300 metros. La profundidad promedio del agua se mantiene cerca de 0.4 metros. Los principales afluentes que abastecen esta zona son el Barranco del Poyo y la Acequia del Puerto de Catarroja. El flujo del agua se realiza de manera superficial, sin profundizar en capas subterráneas.

Particular atención merece el subsector denominado F4, cuya longitud fue medida directamente en el terreno como 140 metros, lo que brindó un dato más preciso sobre esta

parte específica del humedal. La altura media del agua en esta sección es de aproximadamente 0.3 metros, reflejando las condiciones más comunes durante los periodos monitoreados. Este subsector cubre una superficie próxima a los 25,900 metros cuadrados, cifra que ayuda a calcular el volumen total y entender mejor las características propias del sistema. Sumado a esto, la altura del sedimento fue estimada en 0.1 metros a partir de observaciones de campo y referencias anteriores relacionadas con la composición del lecho.

Con base en estas mediciones, se calculó que el volumen útil del sector F4 está cerca de los 7,770 metros cúbicos. Este cálculo es relevante para el análisis de masas, ya que permite visualizar cuánta agua está realmente disponible para transportar y transformar los contaminantes que llegan al humedal.

Dentro del sector F4 se identifican tres zonas independientes que forman parte de su configuración interna. Cada una de estas áreas presenta particularidades en sus características hidráulicas, lo cual influye en la conducta del flujo y en cómo se lleva a cabo el tratamiento del agua. La entrada del agua contaminada conecta con áreas externas, distribuyéndose a cada una de las tres zonas de manera diferenciada. Cada zona dispone de una salida propia, lo que genera un patrón de flujo que no es estricto ni uniforme, sino que muestra cierta heterogeneidad espacial. Esta condición afecta la capacidad del humedal para procesar y depurar el agua que recibe.

La existencia de múltiples entradas y salidas lleva a que el contacto entre el agua y las plantas, así como con los sedimentos, se prolongue. Esta situación es relevante, ya que favorece procesos naturales de sedimentación y descomposición biológica de contaminantes, que son fundamentales para el funcionamiento del humedal en esta área clave. Esto convierte al sector F4 en un foco especial dentro del estudio, dado que aporta datos valiosos para comprender el comportamiento general del sistema en cuestión.

5.3.Estaciones Meteorológicas

Para modelar correctamente los procesos ambientales en el humedal Tancat de la Pipa, resulta necesario contar con datos meteorológicos confiables y bien obtenidos. Estos datos ayudan a entender las condiciones del clima que afectan aspectos como la temperatura del agua, la evaporación y otros fenómenos que influyen en la calidad del agua y en el comportamiento del humedal.

En la Comunidad Valenciana, existen varias estaciones meteorológicas que registran

información climática importante, incluyendo variables como temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar. Para este estudio se eligieron dos fuentes principales por su fácil acceso y porque representan bien la zona de interés: la Red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) y AVAMET (Associació Valenciana de Meteorologia).

La Red SIAR ofrece datos de estaciones oficiales regionales, destacando la estación de Picassent, que está cerca y tiene condiciones climáticas parecidas a las del humedal. Por otro lado, AVAMET dispone de una estación instalada directamente en el Tancat de la Pipa, que aporta mediciones locales que reflejan el microclima específico del lugar. Se debe utilizar preferentemente la información meteorológica proporcionada por AVAMET, por ser la más representativa de la zona de estudio. Los datos necesarios que no se miden en esta estación se obtienen complementariamente de la estación más próxima de la Red SIAR, en Picassent. Esta combinación permite contar con un conjunto de datos completo y adecuado para la modelación precisa del humedal.

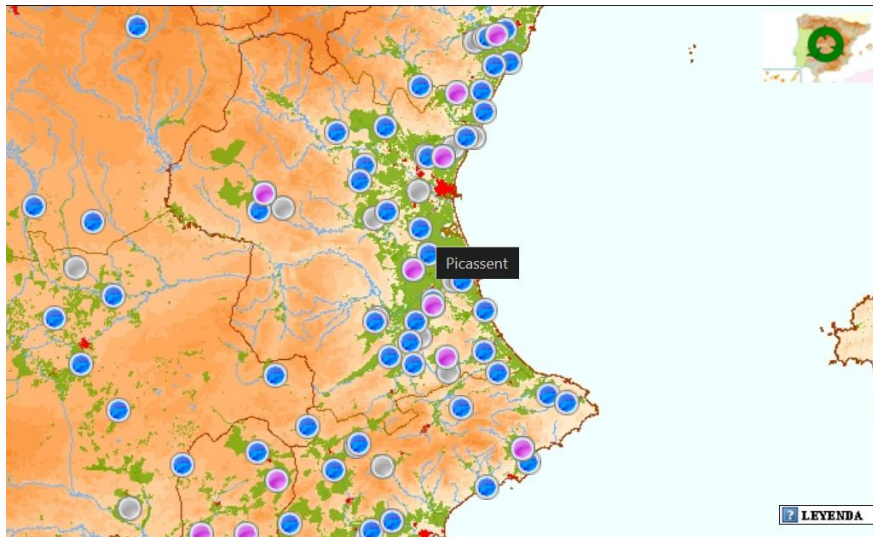
Aunque esta combinación es útil, también hay que considerar que el clima y los ambientes naturales pueden ser complejos y variables, por lo que los datos siempre deben interpretarse con cierta cautela.

5.3.1. Red SIAR

Para la obtención de datos de radiación solar, se recurrió a la Red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) debido a la confiabilidad y continuidad de sus registros, así como a la cobertura geográfica que ofrece en la Comunidad Valenciana. Aunque no existe una estación SIAR ubicada directamente en el Tancat de la Pipa, se utilizaron los datos de la estación de Picassent, propiedad del Ministerio de Agricultura, por ser la más cercana y presentar condiciones climáticas similares a las del área de estudio. La razón principal para recurrir a esta estación es que la estación de AVAMET, ubicada directamente en el humedal, no mide radiación solar. Esta decisión permitió contar con valores representativos de radiación (W/m^2) necesarios para la modelación de los procesos de intercambio de calor en el humedal. La estación meteorológica de Picassent aportó valores diarios cada media hora de radiación solar, que fueron incorporados al modelo como parámetros de entrada para el cálculo de los intercambios de calor en la interfase aire-agua. La selección de la estación de Picassent se justificó por su proximidad geográfica al área de estudio y por presentar condiciones climáticas similares, lo que permitió una aproximación

adecuada a las condiciones reales de radiación incidente sobre el humedal durante el período analizado (ver Imagen 8).

Imagen 8. Estación Propiedad Ministerio - Picassent

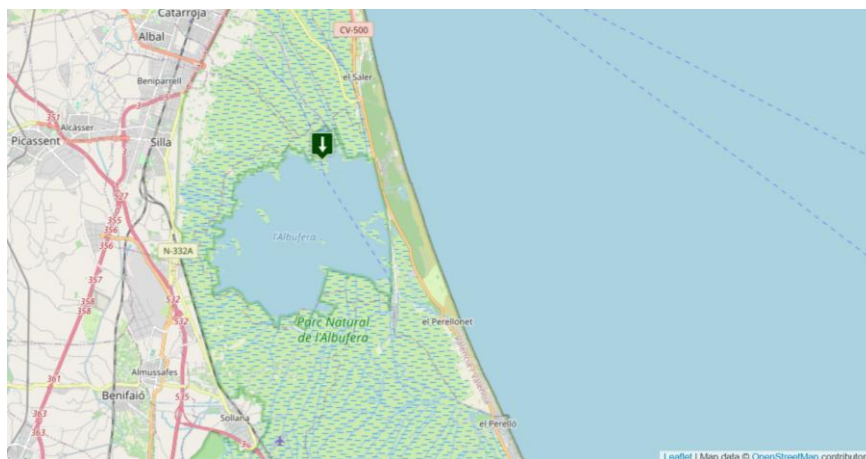


Fuente: SIAR (2025)

5.3.2. AVAMET

En cuanto a los parámetros meteorológicos como velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa, se optó por utilizar los datos proporcionados por AVAMET (Associació Valenciana de Meteorologia), ya que esta red cuenta con una estación meteorológica instalada directamente en el Tancat de la Pipa. Esta proximidad geográfica garantiza que los registros obtenidos reflejan fielmente las condiciones microclimáticas específicas del humedal, lo que resulta fundamental para una modelación precisa de los procesos de evaporación y transferencia de calor en el sistema.

Imagen 9. València l'Albufera/Tancat de la Pipa



Fuente: AVAMET / Acció Ecologista Agró (2018)

Disponer de datos locales fue algo fundamental para tratar de entender mejor cómo se daba el intercambio de calor entre el agua y el aire en el humedal. La velocidad del viento influye de manera directa en procesos como la evaporación y la convección, mientras que la temperatura del aire y la humedad relativa marcan las diferencias térmicas que controlan cómo se mueve el calor en la superficie del agua. El hecho de contar con estos datos permitió que el modelo de temperatura pudiera reflejar de manera más cercana las condiciones reales del microclima que rodea al Tancat de la Pipa, haciendo que la simulación fuera más acorde con lo que ocurre en el lugar. Se reconoce que captar con precisión todos los detalles es complejo, pero esta información ayudó a mejorar la aproximación.

Los datos sobre precipitación se tomaron directamente de la estación meteorológica de AVAMET que está dentro del mismo humedal, lo que dio un acceso a registros confiables y específicos del área que se estudia. Por otro lado, la evaporación se calculó basándose en datos meteorológicos usando un modelo que combina factores como la radiación solar, la temperatura, la humedad y la velocidad del viento. Estos cálculos fueron clave para intentar simular cómo se mueve el agua en el humedal y cómo se equilibran las pérdidas y ganancias de agua. Aunque estos métodos no capturan todos los matices, se considera que aportan un soporte importante para entender el comportamiento hídrico.

Sobre los registros de conductividad, temperatura y contaminantes, estos fueron aportados por el grupo de investigación “Soluciones basadas en la naturaleza” del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universitat Politècnica de València (UPV), que realizó campañas directamente en el humedal. Los datos para calibrar el modelo corresponden a junio de 2023, mientras que para la validación se usaron los datos de noviembre de 2023. Este detalle temporal buscó cubrir diferentes condiciones y así evaluar mejor la respuesta del modelo. Se reconoce que aunque estos datos son valiosos, la complejidad y variabilidad del ecosistema siguen siendo un reto para lograr una representación totalmente fiel.

La combinación de estos datos de campo, obtenidos específicamente para el Tancat de la Pipa, permitió ajustar y comprobar el modelo tratando de acercarse lo más posible a la realidad observada durante los periodos estudiados. Aunque siempre queda cierta incertidumbre en las simulaciones, se logró que las predicciones fueran bastante cercanas a lo que realmente sucede. Este proceso de integración es un paso más en el aprendizaje continuo para entender cómo funcionan sistemas tan complejos como este humedal.

5.3.3. Calibración/Validación

La escogencia de los eventos para calibrar y validar el modelo buscó reflejar las condiciones reales de las corrientes de agua y la calidad observada en el humedal. Tal como se explicó en la introducción, se trabajó sobre periodos lluviosos para entender cómo el Tancat de la Pipa maneja las escorrentías que llegan desde zonas urbanas y agrícolas, las cuales afectan la calidad del agua. Estos momentos con lluvias intensas resultan clave para observar cómo el humedal reacciona ante un aumento brusco de contaminantes y cambios repentinos en el caudal. Entender esta reacción no es sencillo, pero es fundamental para aproximarse al comportamiento real del sistema con la herramienta que se dispone.

Se eligieron dos episodios de lluvia que habían sido estudiados con mediciones en el mismo humedal. Los datos tomados en estos momentos ayudaron a analizar con detalle cómo fluye y se mezcla el agua dentro del humedal y cómo interactúa con los contaminantes presentes. Esta elección buscó asegurar que el modelo pudiera mostrar la realidad de diferentes situaciones, aunque se reconocen las dificultades para captar todos los detalles en un ambiente tan complejo.

Las informaciones del evento ocurrido en junio de 2023, que representa condiciones normales de caudal y temperatura propias del verano, se usaron para ajustar el modelo hidrodinámico y de calidad del agua. Por otro lado, los datos del evento de noviembre de 2023, con un clima más propio del otoño y diferente al anterior, sirvieron para probar que el modelo fuera capaz de reproducir bien el comportamiento del humedal en escenarios distintos. Esta estrategia representa un intento por abarcar la diversidad de condiciones que puede tener el sistema, aunque siempre queda algo de incertidumbre en la precisión.

Al calibrar el modelo con datos de un evento y validarlo con otro, se apunta a un control más riguroso de la capacidad del modelo para prever cambios y transformar datos en simulaciones realistas. Este enfoque sirve para evaluar cómo se comporta el humedal frente a distintas situaciones vinculadas al clima e hidrología. Aun así, se reconoce que cada nuevo escenario trae sus propios retos y que la dificultad para modelar estos sistemas naturales sigue siendo considerable.

5.4. Análisis Estadístico

Para evaluar la precisión y el rendimiento del modelo WASP en la simulación de la calidad del agua en el humedal Tancat de la Pipa, se emplean las siguientes métricas

estadísticas.

Media de la Suma del Cuadrado de los Residuos (MSE - Mean Squared Error)

El Error Cuadrático Medio (MSE) mide el promedio de los cuadrados de los errores, es decir, la diferencia cuadrada promedio entre los valores predichos por el modelo y los valores observados. Es sensible a errores grandes.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad (\text{II})$$

Donde:

- n : Número total de observaciones.
- O_i : Valor observado en el punto i .
- P_i : Valor predicho por el modelo en el punto i .

Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE - Root Mean Squared Error)

La Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) es la raíz cuadrada del MSE. Proporciona una medida del error promedio en las mismas unidades que la variable de respuesta, lo que facilita su interpretación. Un valor de RMSE más bajo indica un mejor ajuste del modelo.

La fórmula es:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (\text{III})$$

Donde:

- n : Número total de observaciones.
- O_i : Valor observado en el punto i .
- P_i : Valor predicho por el modelo en el punto i .

Coefficiente de Nash-Sutcliffe (NSE - Nash-Sutcliffe Efficiency) o Índice de Nash

El Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), a menudo denominado simplemente Índice de Nash, es una métrica ampliamente utilizada para evaluar la bondad del ajuste de modelos hidrológicos. Mide qué tan bien la gráfica de los datos simulados se ajusta a la gráfica de los datos observados. Los valores pueden variar de $-\infty$ a 1. Un valor de 1 indica un ajuste perfecto, mientras que valores cercanos a 0 sugieren que el modelo es tan preciso como el promedio de los datos observados. Valores negativos indican que el promedio de los datos observados es un mejor predictor que el modelo.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Donde:

- n : Número total de observaciones.
- O_i : Valor observado en el punto i .
- P_i : Valor predicho por el modelo en el punto i .
- \bar{O} : Media de los valores observados.

Coefficiente de Determinación (R^2)

El Coeficiente de Determinación (R^2) es una medida estadística que representa la proporción de la varianza en la variable dependiente que es predecible a partir de la(s) variable(s) independiente(s). En el contexto de la evaluación de modelos, indica qué tan bien las predicciones del modelo se ajustan a los datos observados. Un R^2 de 1 indica que el modelo explica toda la variabilidad de la variable de respuesta alrededor de su media, mientras que un R^2 de 0 indica que el modelo no explica ninguna de esta variabilidad.

La fórmula es:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Donde:

- n : Número total de observaciones.
- O_i : Valor observado en el punto i .
- P_i : Valor predicho por el modelo en el punto i .
- \bar{O} : Media de los valores observados.

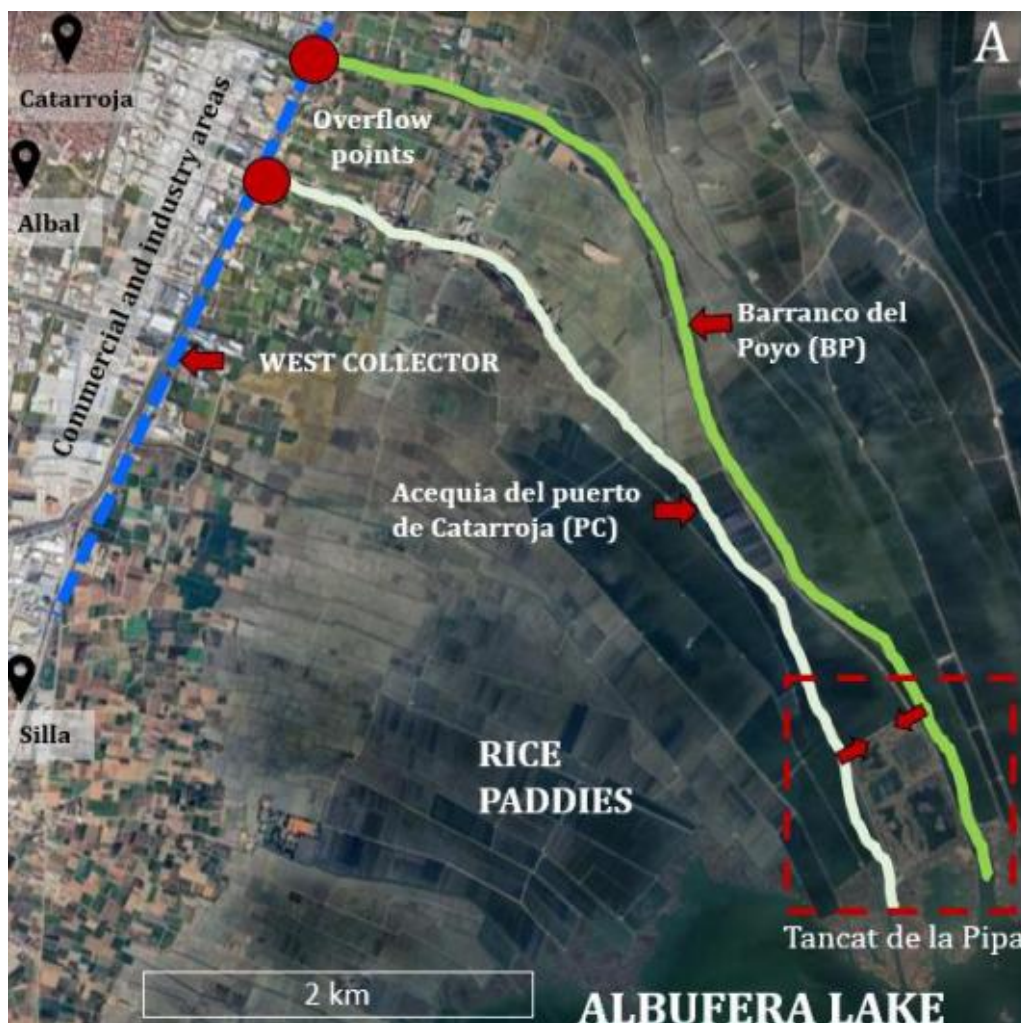
La Albufera de Valencia, donde se ubica el humedal, está sometida a una presión ambiental creciente, especialmente debido a episodios de lluvias intensas, como las denominadas DANA, que generan escorrentías urbanas y agrícolas cargadas de contaminantes. Estas escorrentías arrastran nutrientes, sólidos suspendidos y otros agentes contaminantes que afectan la calidad del agua y la salud del ecosistema.

El estudio se centró en analizar cómo el Tancat de la Pipa funciona como filtro natural para estas escorrentías, reduciendo la carga contaminante que llega a la laguna principal. Para

ello, se seleccionaron específicamente dos eventos de lluvia: uno en junio de 2023 para calibrar el modelo y otro en noviembre de 2023 para validarlo, ambos representativos de épocas y condiciones hidrológicas distintas.

A continuación, se presenta una imagen que muestra la ubicación del Tancat de la Pipa, las áreas circundantes y los puntos de descarga de desbordamiento de alcantarillado combinado (CSO), que son fuentes importantes de escorrentías contaminadas gestionadas por el humedal.

Imagen 10. Ubicación de la TPCW, áreas circundantes y puntos de descarga de desbordamiento de alcantarillado combinado (CSO).



Fuente: Martínez-Biosca et al. (2020)

6. Selección de modelo hidrodinámico del Tancat de la Pipa

Para representar el movimiento interno del agua dentro del humedal Tancat de la Pipa se han considerado diferentes modelos hidrodinámicos que permiten simular los procesos de mezcla y transporte, siendo más adecuados para describir el comportamiento global del flujo

de agua y los procesos fisicoquímicos asociados a la dispersión y mezcla.

Los modelos evaluados en este estudio buscan reproducir la dinámica interna del agua mediante enfoques clásicos que simplifican el comportamiento hidráulico del humedal para facilitar la calibración y la interpretación de resultados. Los dos principales enfoques seleccionados fueron el modelo de tanque de mezcla completa (CSTR) y el modelo de tanques en serie (TIS).

6.1. Modelo CSTR (tanque de mezcla completa)

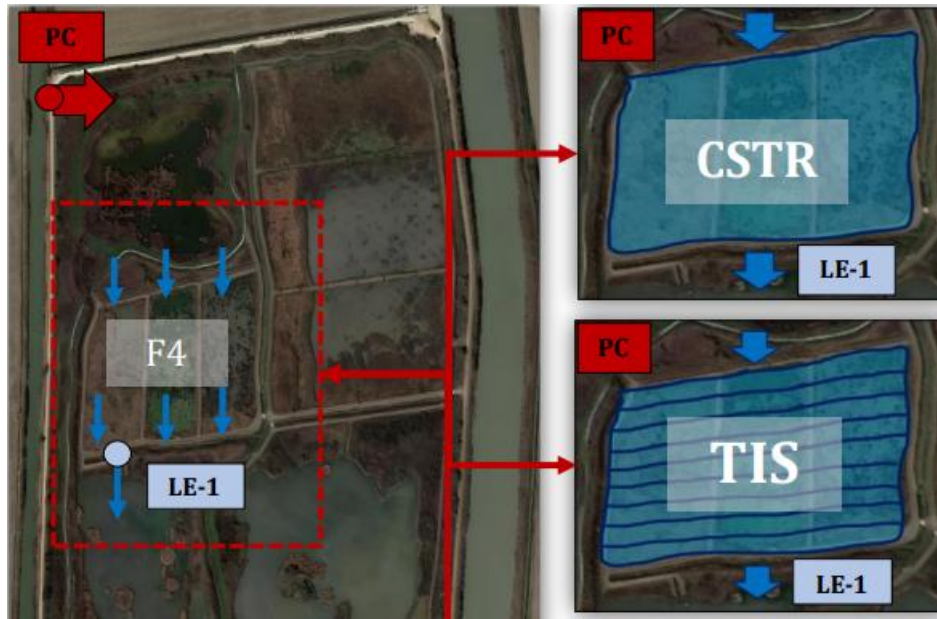
Este modelo asume que el humedal se comporta como un único tanque perfectamente mezclado, es decir, que la concentración de cualquier constituyente es homogénea en todo el volumen. En este contexto, no existen gradientes espaciales de concentración dentro del sistema, por lo que el agua que sale tiene la misma composición que la del interior. Este planteamiento es sencillo y sirve como referencia básica, pero puede subestimar las heterogeneidades presentes en sistemas más complejos.

6.2. Modelo TIS (tanques en serie)

El modelo de tanques en serie simula el humedal como una cadena de varios tanques CSTR conectados en serie, reproduciendo un comportamiento que se aproxima más al flujo tipo pistón. Aquí, el agua avanza secuencialmente por cada segmento, y la concentración varía a lo largo de los mismos, permitiendo captar procesos de mezcla parcial y retardos en la dispersión. Este modelo es útil para representar sistemas donde el flujo tiene cierta dirección preferente y la mezcla no es instantánea, lo que se ajusta mejor a la dinámica observada en humedales superficiales.

En el presente estudio, la modelación con el modelo TIS se llevó a cabo evaluando diferentes números de segmentos, que correspondían a la segmentación física y funcional del humedal. Cada segmentación representa un subvolumen en el que se aplican balance de masa y parámetros hidrodinámicos propios. Esta metodología facilita la calibración del modelo para encontrar la configuración que mejor reproduzca las observaciones experimentales, validando así la capacidad descriptiva del modelo para el sistema real (ver apartado de segmentación de modelos).

Imagen 11. Configuraciones Hidrodinámicas Evaluadas para el Desarrollo del Nuevo Modelo en la Sección F4 del Tancat de la Pipa.



Fuente: Martínez-Biosca et al. (2020)

La conductividad eléctrica es un parámetro ampliamente utilizado como trazador natural en estudios hidrodinámicos de cuerpos de agua, debido a que refleja la concentración de sales disueltas en el agua y responde de manera rápida a los cambios en la composición química del medio. En sistemas acuáticos complejos, como humedales de flujo superficial, la conductividad proporciona una señal indirecta pero fiable para seguir el movimiento, la mezcla y la dispersión del agua, sin requerir la adición de sustancias externas que pudieran alterar el equilibrio del ecosistema.

El uso de la conductividad eléctrica como trazador natural facilita una evaluación detallada de los procesos de transporte en el humedal, ya que permite cuantificar la dispersión y mezcla del agua a escala espacial y temporal. Esto es posible porque los incrementos o disminuciones en la conductividad se asocian a aportes o diluciones de agua con diferente composición iónica, lo que se traduce en patrones claros en el tiempo y en el espacio durante la circulación hidrodinámica. Esta característica la convierte en una herramienta excelente para verificar y calibrar modelos hidrodinámicos que simulan la dinámica del agua y la calidad ambiental del sistema.

En el caso particular del humedal Tancat de la Pipa, ubicado dentro del Parque Natural de la Albufera de Valencia, no es posible la introducción de trazadores artificiales para el estudio hidrodinámico debido a la condición de protección ambiental del área, que impide

alterar el ecosistema con sustancias externas. Por ello, se ha optado por utilizar un enfoque natural, basado en la medición de la conductividad del agua durante un evento de lluvia.

Durante estos episodios pluviométricos, se observa una disminución significativa en la conductividad del agua en el humedal, atribuida a la menor conductividad propia del agua de lluvia en comparación con las aguas habituales de entrada. Este fenómeno permite utilizar la variación en la conductividad como un trazador capaz de revelar la dinámica interna del humedal durante el evento.

Para ilustrar este comportamiento, se presentan en próximos apartados las gráficas experimentales de la conductividad tanto del agua de entrada como del agua de salida del humedal durante dos eventos monitoreados, demostrando claramente la influencia de la lluvia en la conductividad y el movimiento del agua dentro del sistema.

6.3. Justificación y ajuste del coeficiente de difusión entre agua y sedimento

El objetivo principal de este apartado es determinar el modelo hidrodinámico que mejor describa el comportamiento hidráulico del humedal Tancat de la Pipa mediante la simulación de la variación de la conductividad del agua durante un evento de lluvia específico. Para ello, se utiliza la conductividad como un trazador natural, considerando las sales responsables como un contaminante conservativo, es decir, cuya masa no se altera en el proceso.

El modelo desarrollado considera el humedal segmentado en varios compartimentos, en cada uno de los cuales se contabilizan las entradas y salidas de caudal internas, las pérdidas de agua por evaporación y las ganancias por precipitación, así como el intercambio iónico entre la columna de agua y el sedimento por difusión. De esta manera, la dinámica de la conductividad en cada segmento se modela a través de una ecuación de balance de masa que integra estos procesos.

La ecuación que describe la evolución de la conductividad C_i en el segmento ii del humedal es la siguiente:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{(Q_{i-1}C_{i-1} - Q_iC_i)}{V_i} + \frac{(P_i - E_i)}{V_i}C_i + \frac{D_s(C_s - C_i)}{h}$$

Donde:

- C_i : Conductividad del agua en el segmento ii [$\mu\text{S}/\text{cm}$ o equivalente].
- Q_{i-1}, Q_i : Caudales de entrada y salida del segmento i [m^3/d].

- V_i : Volumen del segmento i [m^3].
- P_i : Aporte de agua por precipitación en el segmento i [m^3/d].
- E_i : Pérdida por evaporación en el segmento i [m^3/d].
- D_s : Coeficiente de difusión efectivo entre la columna de agua y el sedimento [m^2/d].
- C_s : Conductividad en el sedimento, asumida constante o con variación conocida.
- h : Espesor de la columna de agua [m].
- t : Tiempo [d].

Esta ecuación incorpora la advección y mezcla entre segmentos, representada por la diferencia entre el caudal entrante con su conductividad y el caudal saliente, el efecto del balance hídrico, que contempla las variaciones de volumen por precipitación y evaporación, afectando la concentración del soluto, y la difusión iónica vertical entre el agua y el sedimento, que modula la concentración mediante un intercambio dependiente del coeficiente de difusión D_s .

Para llevar a cabo estas simulaciones, se utilizaron datos meteorológicos experimentales de precipitación y evaporación correspondientes al evento seleccionado. La precipitación se obtuvo de estaciones meteorológicas oficiales cercanas, mientras que la evaporación se estimó mediante el método Penman-Monteith, adaptado al microclima del humedal, utilizando variables de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento registradas en la estación localizada en el Tancat de la Pipa.

Respecto al coeficiente de difusión D_s , que es una variable clave del modelo, se realizó su calibración a partir de la comparación entre las conductividades simuladas y las medidas en campaña de campo durante el evento. En la literatura, el rango típico de D_s para la interfase sedimento-agua se encuentra entre 10^{-4} y 10^{-7} $m^2 \cdot d^{-1}$, dependiendo de múltiples factores ambientales y físicos (Gargallo et al., 2016; Hernández-Crespo & Martín, 2013).

En el caso del Tancat de la Pipa, tras la calibración, se obtuvo un valor significativamente menor, alrededor de 7.5×10^{-8} $m^2 \cdot d^{-1}$. Esta reducción en el coeficiente es atribuida a condiciones específicas del sistema, incluyendo la ausencia de eventos de resuspensión de sedimentos, que favorece la formación de una capa límite estancada en la interfaz sedimentaria, así como a la textura fina y compacta del sedimento, con alta tortuosidad y baja porosidad, que ralentizan la difusión. También se considera la posible presencia de biopelículas y material orgánico en el sedimento, que actúan como barreras

biológicas al intercambio iónico.

En conjunto, estos aspectos físicos y biológicos explican el coeficiente de difusión reducido y evidencian que el transporte de conductividad se encuentra dominado por procesos de difusión molecular estricta ligados a la microestructura del sedimento. Este conocimiento es crucial para mejorar las predicciones de los modelos hidrodinámicos y evaluar adecuadamente la capacidad del humedal para intercambiar solutos con los sedimentos.

6.4. Selección de Modelo Hidrodinámico

Para la selección del modelo hidrodinámico que mejor representara el comportamiento del Tancat de la Pipa, se evaluaron diferentes configuraciones, desde un modelo tipo CSTR (tanque de mezcla completa), compuesto por un segmento ($N=1$), hasta modelos TIS (tanque en serie) con distintos números de segmentos ($N=2$ a $N=10$). El criterio principal para determinar la opción más adecuada fue la capacidad del modelo para reproducir los valores de conductividad medidos en los muestreos de campo. La conductividad se empleó como trazador natural debido a que es un parámetro sencillo de medir y responde rápidamente a los procesos de mezcla y a la entrada de contaminantes, lo que la convierte en un indicador fiable para validar la dinámica interna del humedal. Así, la comparación entre los resultados simulados y los datos observados de conductividad permitió seleccionar el modelo que mejor reflejaba la realidad del sistema, garantizando una representación precisa de los procesos de transporte y mezcla en el humedal.

6.5. Segmentación de los modelos

Durante el desarrollo del modelo hidrodinámico para el humedal Tancat de la Pipa, se evaluaron diferentes configuraciones con el objetivo de ajustarse adecuadamente a los datos experimentales de conductividad, que se utilizó como trazador natural por su facilidad de medición y rápida respuesta a mezclas de agua y entradas de contaminantes. Para ello, se probaron varias opciones que abarcaron desde un modelo tipo tanque de mezcla completa (CSTR) con un único segmento hasta modelos tipo tanques en serie (TIS) con diferentes números de compartimentos ($N=1$ a $N=10$).

Para modelar la dispersión y mezcla del agua en la zona analizada, se emplearon dos coeficientes de difusión diferentes según la configuración: el modelo CSTR utilizó un coeficiente de difusión de 8×10^{-8} m²/s, adecuado para condiciones de mezcla homogénea en un solo segmento; mientras que en los modelos TIS con varios segmentos, se aplicó un coeficiente ligeramente menor, 7.5×10^{-8} m²/s, que permitió representar con mayor precisión

la mezcla parcial y la heterogeneidad espacial a lo largo de los compartimentos.

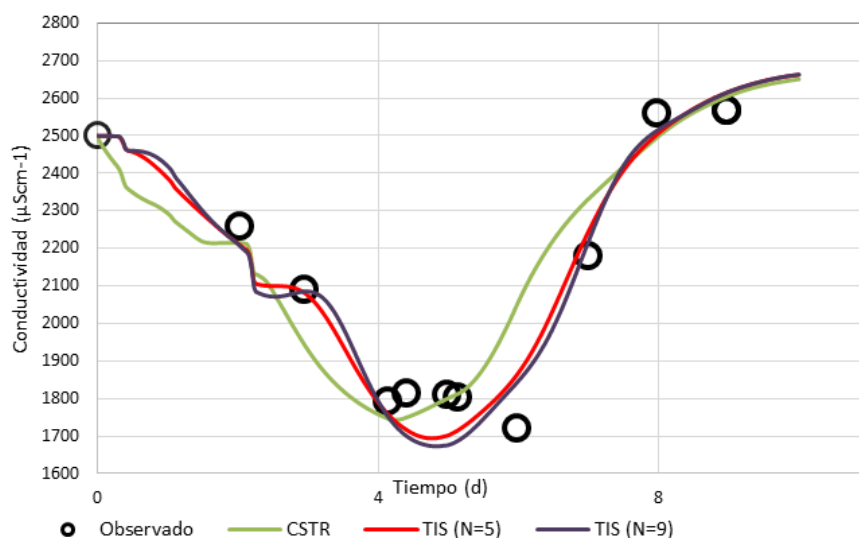
Los resultados obtenidos en la calibración indicaron que los modelos TIS con N=4 y N=5 segmentos presentan el mejor ajuste, alcanzando valores máximos de NSE de 0.9435 y 0.9444, respectivamente, y bajos valores de RMSE (75.2 y 74.57), junto con un coeficiente de determinación R^2 muy elevado (0.9988). Esto evidencia que estos modelos reproducen fielmente el comportamiento hidrodinámico observado en el evento de calibración, superando al modelo CSTR y a otras configuraciones con diferente número de segmentos.

Posteriormente, la validación con datos independientes del evento de noviembre de 2023 corroboró la robustez de los modelos calibrados, demostrando que ambos modelos TIS seleccionados funcionan muy bien con datos de diferentes condiciones hidrológicas y de carga contaminante. Dado que ambos modelos presentan un desempeño estadístico comparable, se optó por el modelo de N=4 segmentos, debido a su menor complejidad computacional y capacidad para representar de manera realista la heterogeneidad del flujo dentro del sub-sector F4.

Esta selección también se alinea con la literatura científica, que reporta valores promedio de N entre 3 y 4 en humedales artificiales de flujo superficial, reflejando un equilibrio adecuado entre detalle y simplicidad para describir estos sistemas. Asimismo, se destaca que aumentar el número de segmentos más allá de este valor puede generar un exceso de suavizado en los resultados, dificultando la captura de las variaciones reales del sistema.

A continuación se muestra gráfica del modelo CSTR 1 segmento, TIS segmento 5 y 9.

Gráfico 1. Modelo CSTR y Modelo flujo Pistón para Evento 1 (Calibración) - Junio 2023



Fuente: Elaboración propia (2025)

Como es posible observar en la gráfica no sabemos con precisión decir a simple vista cual N da el mejor ajuste, por lo que es necesario recurrir a métodos de verificación estadísticos.

Tabla 2. Resultados de la calibración del modelo para el evento de referencia en el Tancat de la Pipa.

Modelo	N	NSE	RMSE	R ²
CSTR	1	0.8490	122.9	0.9967
TIS	2	0.9233	87.6	0.9261
TIS	3	0.9398	77.6	0.9987
TIS	4	0.9435	75.2	0.9988
TIS	5	0.9444	74.57	0.9988
TIS	6	0.9417	76.4	0.9987
TIS	7	0.9412	76.7	0.9987
TIS	8	0.9390	78.1	0.9987
TIS	9	0.9379	78.9	0.9987
TIS	10	0.9354	80.4	0.9986

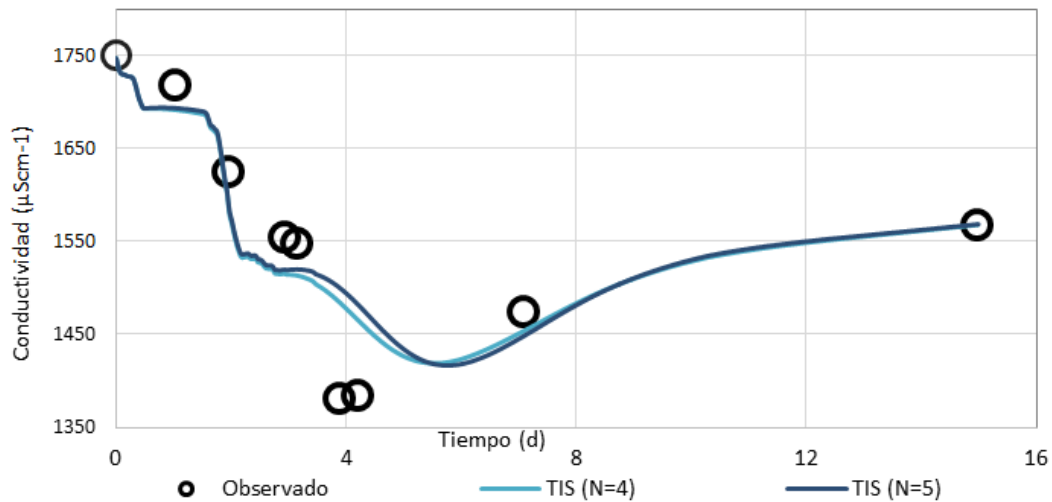
Fuente: Elaboración propia (2025)

A partir de los resultados de la calibración del modelo para el evento de referencia en el Tancat de la Pipa, se observa que los modelos TIS con N=4 y N=5 segmentos son los que presentan el mejor ajuste. Ambos alcanzan los valores más altos de NSE (0.9435 y 0.9444, respectivamente) y los valores más bajos de RMSE (75.2 y 74.57), junto con un coeficiente de determinación (R²) muy elevado (0.9988 en ambos casos). Esto indica que estos modelos reproducen con gran precisión el comportamiento hidrodinámico observado durante el evento de calibración, superando tanto al modelo CSTR como a los TIS con diferente número de compartimentos.

Tras identificar los modelos con mejor desempeño, el siguiente paso consiste en validar su capacidad predictiva bajo condiciones distintas. Para ello, se seleccionó un segundo evento de referencia correspondiente a noviembre de 2023, caracterizado por condiciones hidrológicas diferentes a las del evento de calibración. A continuación, se presentan los resultados de la validación utilizando los modelos previamente calibrados, lo que permite

evaluar su robustez y aplicabilidad en distintos escenarios dentro del humedal.

Gráfico 2. Modelo CSTR y Modelo flujo Pistón para Evento 1 (Validación) - Junio 2023



Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 3. Resultados de Validación

Modelo	N	NSE	RMSE	R ²
TIS	4	0.9435	75.2	0.9988
TIS	5	0.9444	74.57	0.9988

Fuente: Elaboración propia (2025)

Durante la fase de validación correspondiente al mes de noviembre de 2023, se ajustaron y compararon diferentes configuraciones del modelo hidrodinámico, utilizando indicadores estadísticos como el NSE, el RMSE y el R² para evaluar su desempeño frente a los datos reales. Se comprobó que los dos modelos seleccionados previamente (N=4 y N=5) describen muy bien la conductividad en este evento. Una vez calibrados y validados ambos modelos, y dado que ambos funcionan adecuadamente, se optó por el modelo con N=4 segmentos por ser el más sencillo.

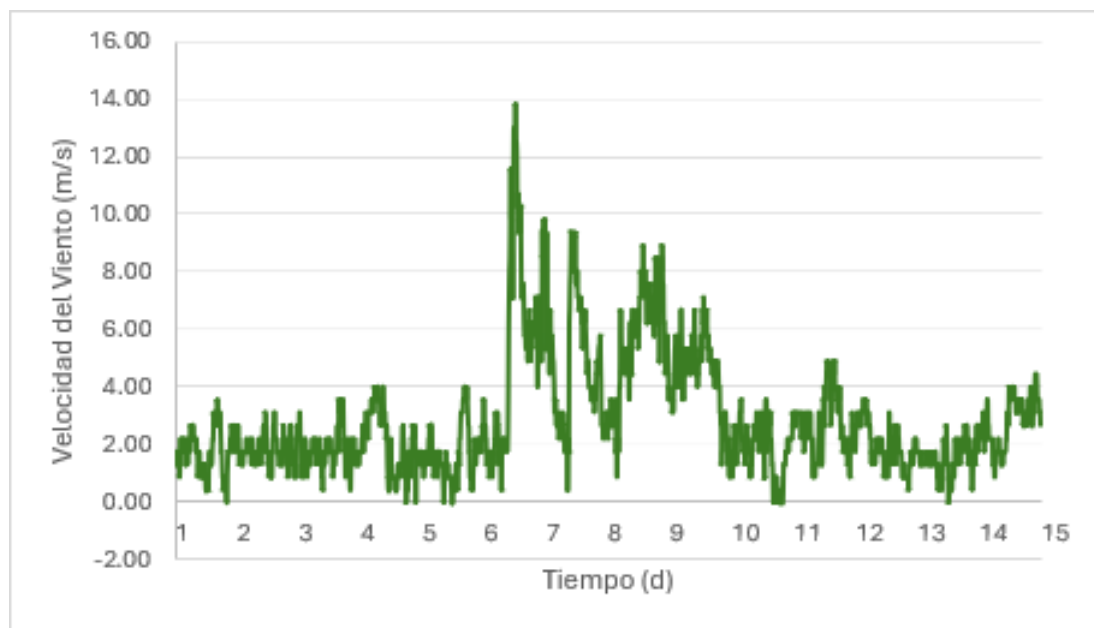
La elección de N=4 se justificó no solo por su buen desempeño estadístico en la

simulación de conductividad, sino también porque permite representar de manera más realista la heterogeneidad del flujo dentro del sub-sector F4, logrando una simulación más precisa de la dinámica hidráulica. Tal como se señala en la literatura, aumentar el número de segmentos más allá de este valor genera un exceso de suavizado en los resultados, perdiendo capacidad de captar las variaciones reales del sistema. Además, esta configuración coincide con lo reportado en estudios previos sobre humedales de flujo superficial (FWSCWs), donde Kadlec y Wallace (2009) documentaron un valor promedio de $N=3.6$ y Persson et al. (1999) reportaron rangos de N entre 1.3 y 10, dependiendo de la configuración del humedal. Por tanto, la selección de $N=4$ no solo se basa en la calidad del ajuste, sino que también se alinea con la evidencia científica y la experiencia previa en sistemas similares.

7. Modelo de Temperatura

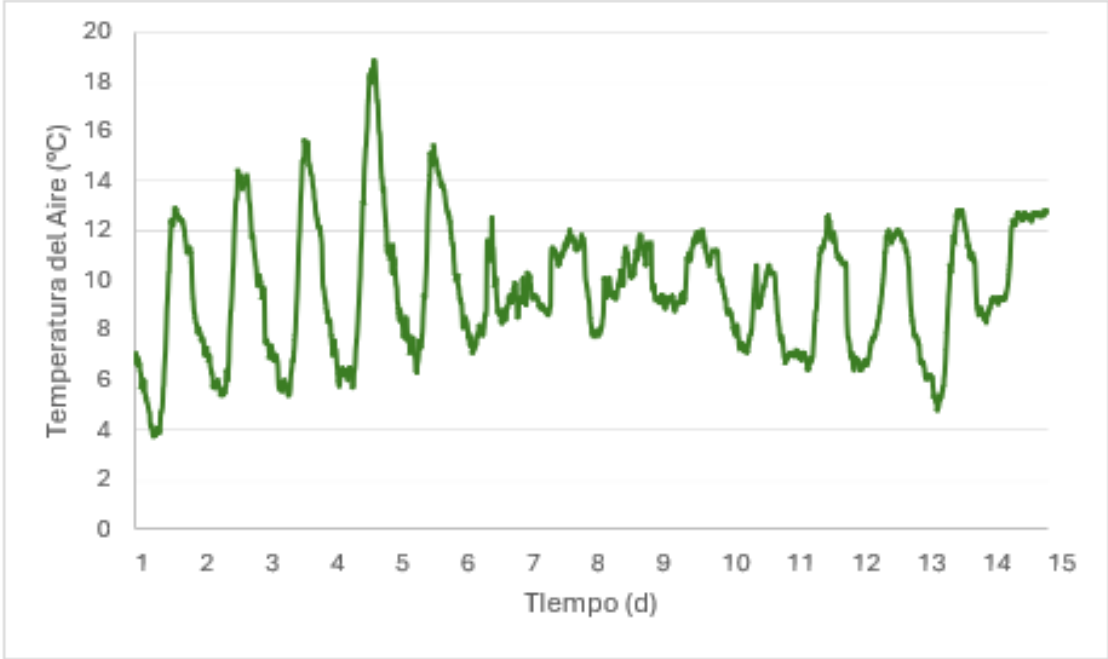
7.1.1.1. Datos tomados de AVAMET

Gráfico 3. *Velocidad del viento registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento febrero 2023*



Fuente: AVAMET (2023)

Gráfico 4. Temperatura del aire en el humedal Tancat de la Pipa – Evento febrero 2023



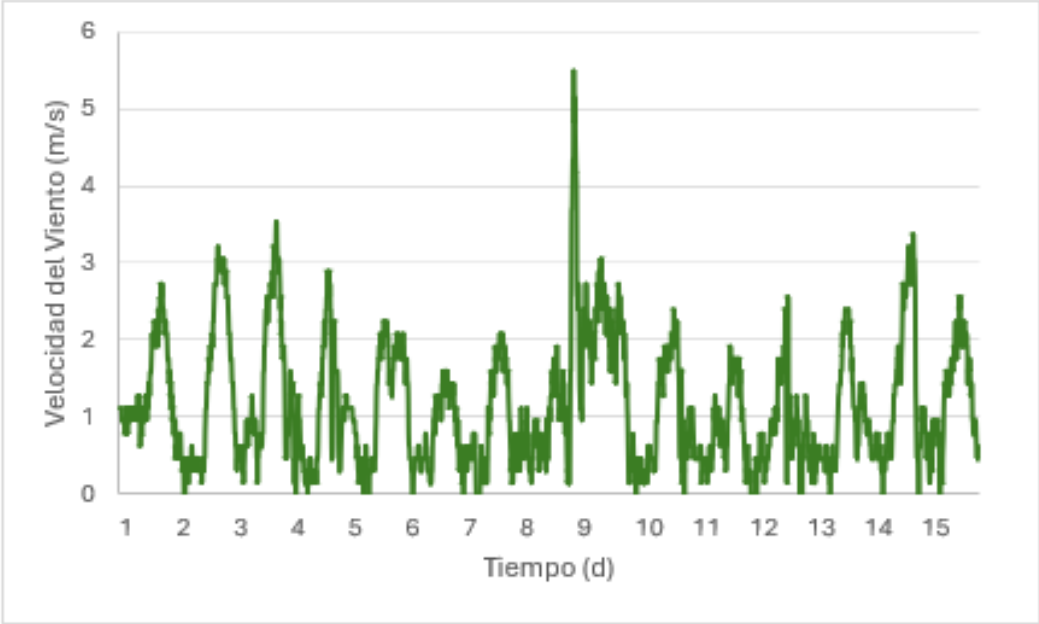
Fuente: AVAMET (2023)

Gráfico 5. Humedad relativa registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento febrero 2023



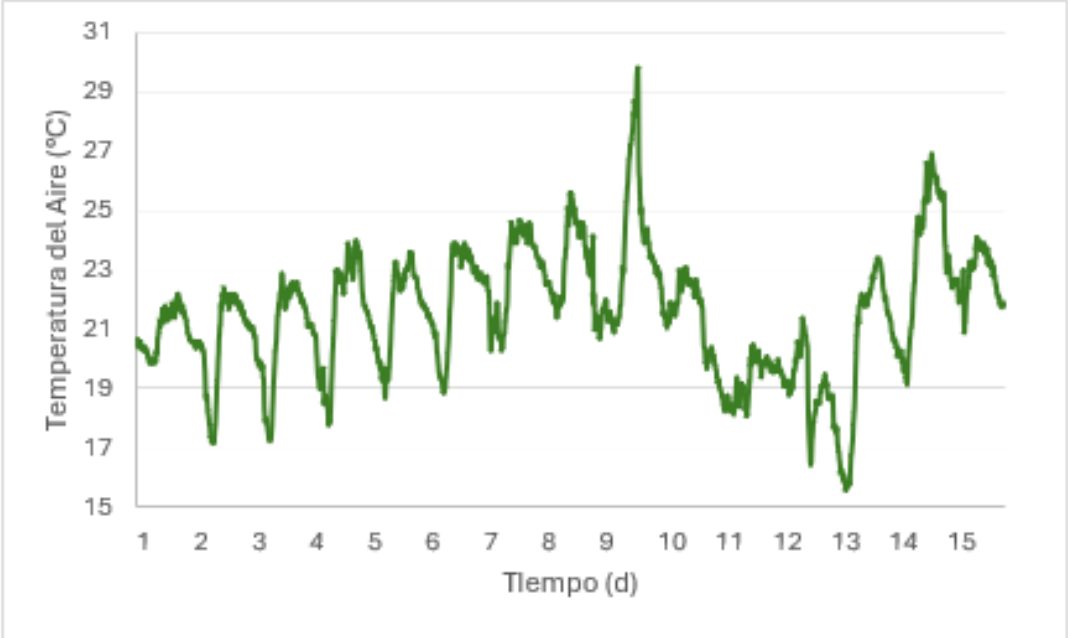
Fuente: AVAMET (2023)

Gráfico 6. Velocidad del viento registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento junio 2023



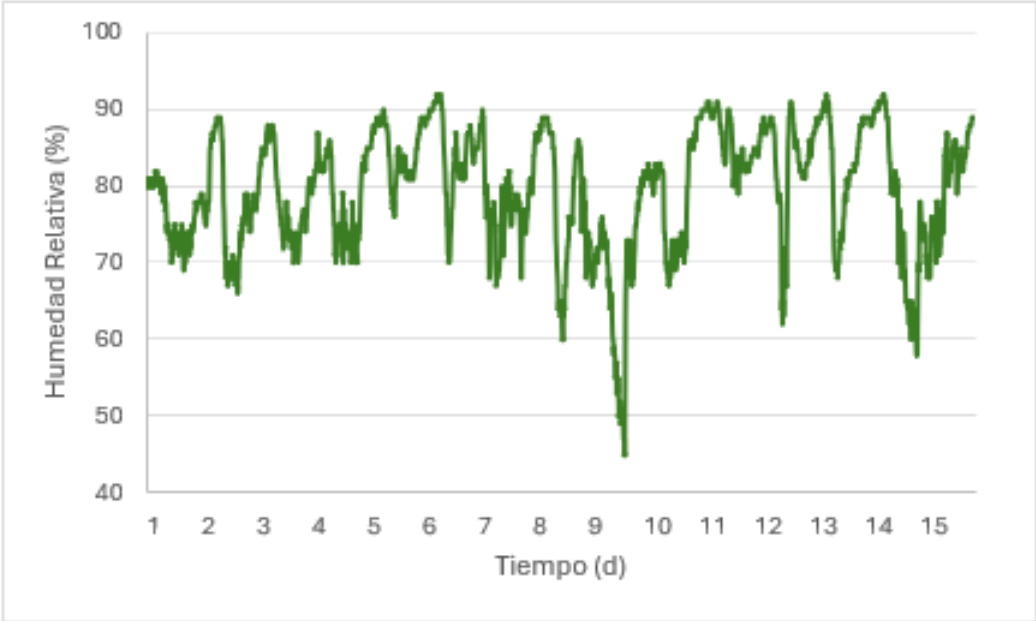
Fuente: AVAMET (2023)

Gráfico 7. Temperatura del aire en el humedal Tancat de la Pipa – Evento junio 2023



Fuente: AVAMET (2023)

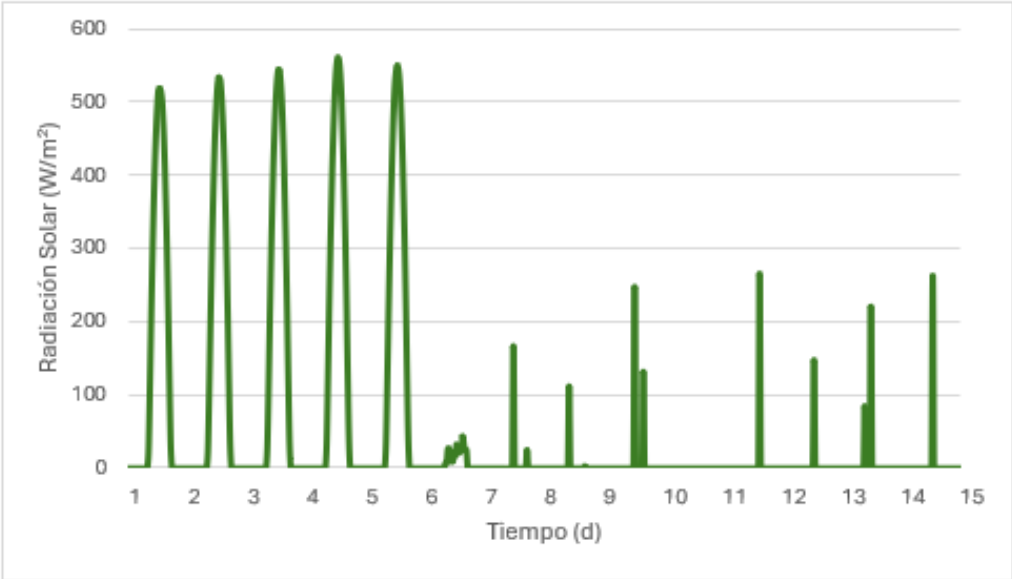
Gráfico 8. Humedad relativa registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento junio 2023



Fuente: AVAMET (2023)

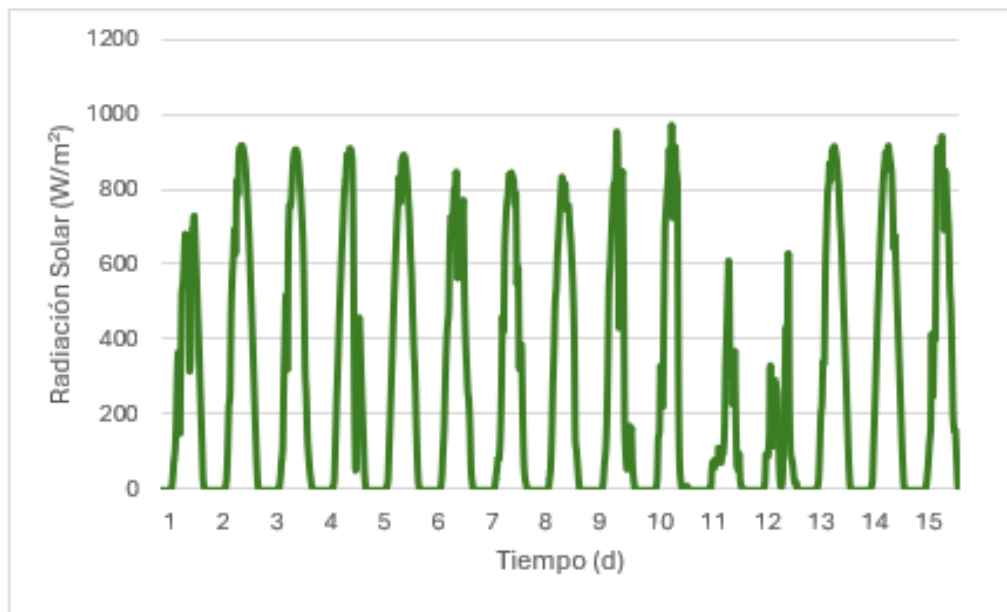
7.1.1.2. Datos tomados de la Red SIAR

Gráfico 9. Radiación Solar registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento febrero 2023



Fuente: Red SIAR (2023)

Gráfico 10. Radiación Solar registrada en el humedal Tancat de la Pipa – Evento junio 2023



Fuente: Red SIAR (2023)

Para este estudio, se recurrió a la siguiente ecuación para calcular la temperatura del punto de rocío:

$$T_d = \frac{240.97 \cdot \ln\left(\frac{e_a}{0.611}\right)}{17.502 - \ln\left(\frac{e_a}{0.611}\right)}$$

Donde:

- T_d : Temperatura del punto de rocío (°C)
- e_a : Presión de vapor de saturación (kPa).

Esta información es esencial para estimar los flujos de calor latente y sensible entre el agua y la atmósfera, procesos que condicionan la evolución térmica del humedal.

7.2. Calibración Modelo de Temperatura – Junio 2023

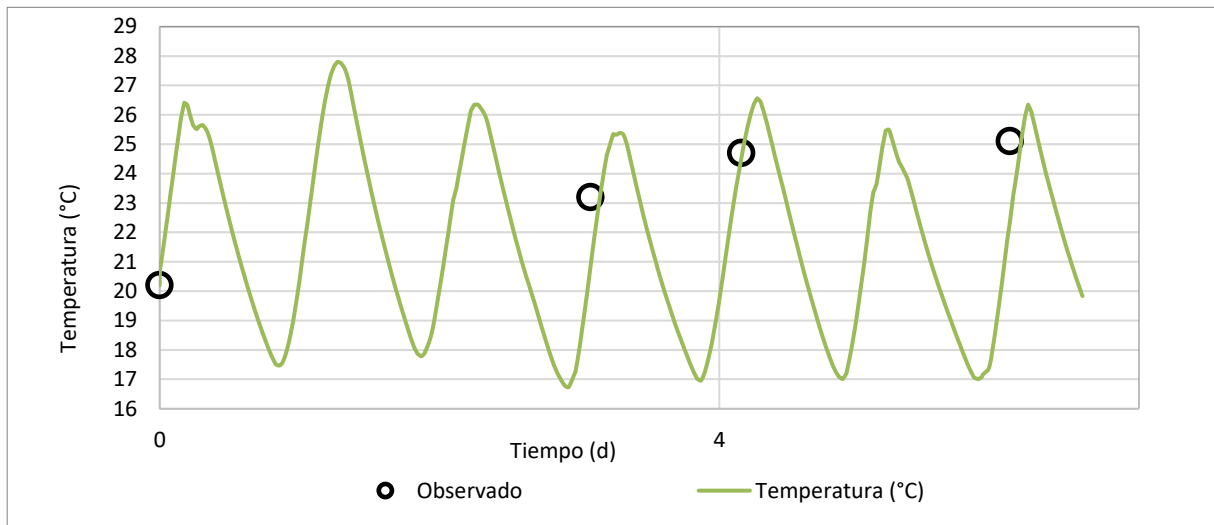
Tabla 4

Parámetros ambientales para el Evento 1

Dato	Valor	Medida
Temperatura de agua de entrada	20.2	°C
Coefficiente de intercambio de calor del fondo	1.2	W/m2 °C
Temperatura del sedimento	26	°C
Fracción de suelo cubierto	0.2	Algunas nubes dispersas

Fuente: Elaboración propia (2025)

Gráfico 11. Ajuste del modelo de temperatura para el evento de calibración – Junio 2023



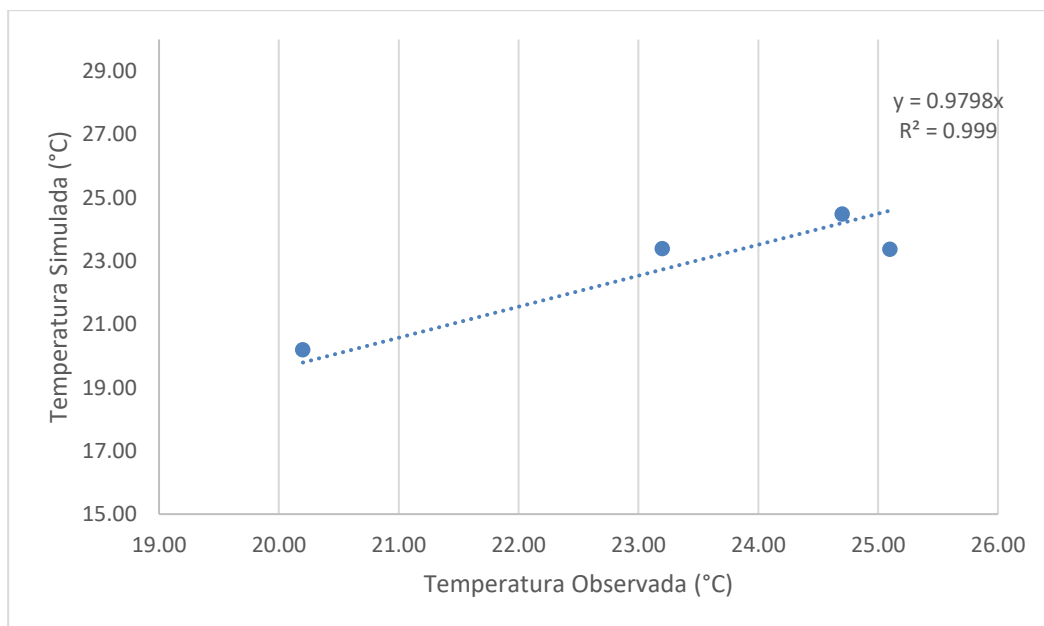
Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 5. Resultados estadísticos de la simulación de temperatura del agua para el evento de calibración - Junio 2023

Modelo	N	NSE	RMSE	R ²
Temperatura	4	0.842	0.918	0.7211

Fuente: Elaboración propia (2025)

Gráfico 12. Dispersión y ajuste lineal entre temperaturas observadas y simuladas en el evento de calibración – Junio 2023, con $R^2 = 0,72$



Fuente: Elaboración propia (2025)

Para la calibración del modelo de temperatura se partió del modelo hidrodinámico segmentado con $N=4$ compartimentos, que aporta una representación adecuada de la heterogeneidad del flujo interno del humedal. En la Tabla 4 se presentan los parámetros ambientales utilizados para el Evento 1 de junio de 2023. La temperatura de entrada del agua con un valor de $20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ corresponde a datos experimentales medidos directamente en el humedal durante el periodo de estudio. La temperatura del sedimento, fijada en $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, fue calculada siguiendo recomendaciones bibliográficas, tomando como referencia la temperatura media del aire y ajustándola en función de la fracción de cielo cubierto, que en este caso fue de 0.2, correspondiente a algunas nubes dispersas medidas también experimentalmente durante el evento. El coeficiente de intercambio de calor del fondo, establecido en $1.2\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, corresponde a un valor bibliográfico utilizado para ajustar el balance térmico del sistema, asegurando una simulación realista de las condiciones de intercambio entre la columna de agua y el sedimento.

Los resultados de la calibración, ilustrados en el Gráfico 11, muestran un buen ajuste entre las temperaturas simuladas y observadas a lo largo del evento de junio de 2023. El modelo reproduce adecuadamente las tendencias térmicas diarias y responde a las variaciones ambientales relevantes del período. En la Tabla 5, los parámetros estadísticos sustentan esta afirmación, con un coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.842, que indica un buen desempeño del modelo en capturar la dinámica térmica; un error cuadrático medio (RMSE) de $0.918\text{ }^{\circ}\text{C}$, que refleja un bajo error promedio; y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.7211, que indica que más del 72% de la variabilidad en la temperatura observada es explicada por el modelo.

Finalmente, en el Gráfico 12 se observa la dispersión y el ajuste lineal entre las temperaturas simuladas y observadas, representando en los ejes T simulada ($^{\circ}\text{C}$) y T observada ($^{\circ}\text{C}$). La recta ajustada que pasa por el origen muestra un alto valor de $R^2=0.72$, evidenciando una correlación fuerte y significativa entre ambos conjuntos de datos. La ecuación de ajuste lineal $y=a\cdot x$, con a cercano a 1, refleja que la pendiente de la recta es próxima a la unidad, lo que indica que la magnitud de las temperaturas simuladas es muy similar a la de las observadas, confirmando así la precisión y validez del modelo calibrado para representar la dinámica térmica del humedal durante este periodo. Este resultado permite confiar en las simulaciones y su uso para análisis posteriores y toma de decisiones en la gestión ambiental del Tancat de la Pipa.

Calibración del modelo de temperatura

Para la calibración del modelo de temperatura se partió del modelo hidrodinámico segmentado con $N=4$ compartimentos, que aporta una representación adecuada de la heterogeneidad del flujo interno del humedal. En la Tabla 4 se presentan los parámetros ambientales utilizados para el Evento 1 de junio de 2023. La temperatura de entrada del agua con un valor de $20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ corresponde a datos experimentales medidos directamente en el humedal durante el periodo de estudio. La temperatura del sedimento, fijada en $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, fue calculada siguiendo recomendaciones bibliográficas, tomando como referencia la temperatura media del aire y ajustándola en función de la fracción de cielo cubierto, que en este caso fue de 0.2, correspondiente a algunas nubes dispersas medidas también experimentalmente durante el evento. El coeficiente de intercambio de calor del fondo, establecido en $1.2\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, corresponde a un valor bibliográfico utilizado para ajustar el balance térmico del sistema, asegurando una simulación realista de las condiciones de intercambio entre la columna de agua y el sedimento.

Los resultados de la calibración, ilustrados en el Gráfico 11, muestran un buen ajuste entre las temperaturas simuladas y observadas a lo largo del evento de junio de 2023. El modelo reproduce adecuadamente las tendencias térmicas diarias y responde a las variaciones ambientales relevantes del período. En la Tabla 5, los parámetros estadísticos sustentan esta afirmación, con un coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.842, que indica un buen desempeño del modelo en capturar la dinámica térmica; un error cuadrático medio (RMSE) de $0.918\text{ }^{\circ}\text{C}$, que refleja un bajo error promedio; y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.7211, que indica que más del 72% de la variabilidad en la temperatura observada es explicada por el modelo.

Finalmente, en el Gráfico 12 se observa la dispersión y el ajuste lineal entre las temperaturas simuladas y observadas, representando en los ejes T simulada ($^{\circ}\text{C}$) y T observada ($^{\circ}\text{C}$). La recta ajustada que pasa por el origen muestra un alto valor de $R^2=0.72$, evidenciando una correlación fuerte y significativa entre ambos conjuntos de datos. La ecuación de ajuste lineal $y=a\cdot x$, con a cercano a 1, refleja que la pendiente de la recta es próxima a la unidad, lo que indica que la magnitud de las temperaturas simuladas es muy similar a la de las observadas, confirmando así la precisión y validez del modelo calibrado para representar la dinámica térmica del humedal durante este periodo. Este resultado permite confiar en las simulaciones y su uso para análisis posteriores y toma de decisiones en la gestión ambiental del Tancat de la Pipa.

7.3. Validación del Modelo T

Tras la calibración del modelo de temperatura para el evento de junio 2023, se procedió a aplicar el modelo seleccionado (TIS, N=4) a un segundo evento, correspondiente a noviembre de 2023. Este evento se caracteriza por condiciones ambientales y meteorológicas distintas, lo que permite evaluar la robustez y capacidad predictiva del modelo bajo escenarios contrastantes.

A continuación, se presentan los parámetros ambientales utilizados como condiciones de entrada para la simulación de temperatura en el Evento 2.

Tabla 6. *Parámetros ambientales para el Evento 2*

Dato	Valor	Medida / Observación
Temperatura de agua de entrada	9.1	°C
Coefficiente de intercambio de calor del fondo	1.2	W/m ² ·°C
Temperatura del sedimento	13	°C
Fracción de suelo cubierto	1	Cielo cubierto de nubes

Fuente: Elaboración propia (2025)

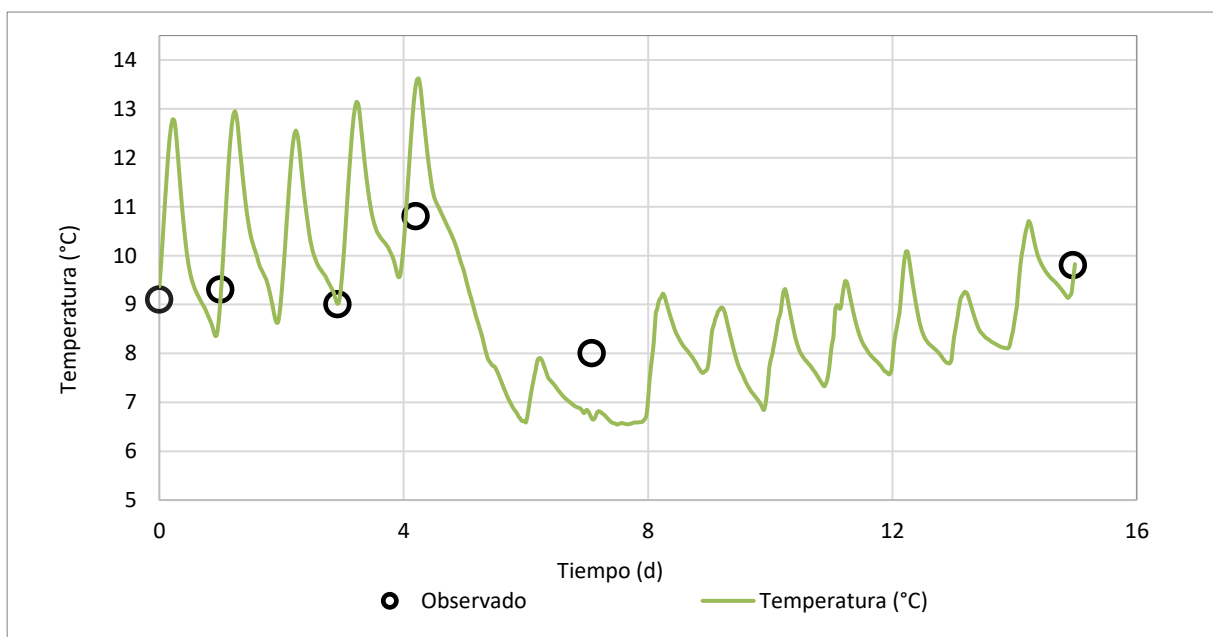
En la aplicación del modelo seleccionado basado en el enfoque de tanques en serie (TIS) con N=4 segmentos para el evento de noviembre de 2023, se utilizaron parámetros ambientales ajustados para reflejar las condiciones de otoño, notablemente diferentes a las del evento de calibración en junio. En la Tabla 6, se observa que la temperatura de agua de entrada disminuyó a 9.1 °C, mientras que el coeficiente de intercambio de calor del fondo se mantuvo constante en 1.2 W/m²·°C, igual que en la calibración previa. La temperatura del sedimento, ajustada a 13 °C, corresponde a la temperatura media del aire en este periodo, como se esperaba dada la influencia directa de las condiciones atmosféricas sobre el sustrato en esta estación. La fracción de suelo cubierto aumentó a 1, lo que indica un cielo completamente cubierto — un dato experimental que refleja la nubosidad media durante el evento, evidenciando un incremento significativo respecto al 0.2 registrado en junio con algunas nubes dispersas. Este dato experimental es clave para capturar el impacto de la radiación solar disminuida en el balance térmico del sistema.

Los resultados mostrados en el Gráfico 13 confirman que el modelo es capaz de reproducir con precisión la evolución térmica del humedal bajo estas condiciones otoñales, adecuándose a las variaciones ambientales específicas del periodo. En la Tabla 7 se presentan los

indicadores estadísticos que avalan esta afirmación: un coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.68 indica un adecuado ajuste, aunque algo inferior al logrado en la calibración; un RMSE de 0.48 °C muestra un error promedio reducido; y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.8604 revela que más del 86% de la variabilidad observada en la temperatura del agua es explicado por el modelo.

La comparación entre las temperaturas observadas y simuladas, ilustrada en el Gráfico 12, muestra una relación lineal fuerte y clara, con un $R^2=0.86$, superior al evento de junio. Esta correlación indica que, a pesar de las diferencias estacionales y meteorológicas, el modelo TIS con $N=4$ segmentos mantiene una robustez y capacidad predictiva destacables. Así, la simulación refleja bien la dinámica térmica del humedal, validando la aplicabilidad del modelo en escenarios con condiciones contrastantes y reforzando su utilidad para el análisis y la toma de decisiones en la gestión ambiental del Tancat de la Pipa.

Gráfico 13. Ajuste del modelo de temperatura para el evento de validación – Noviembre 2023



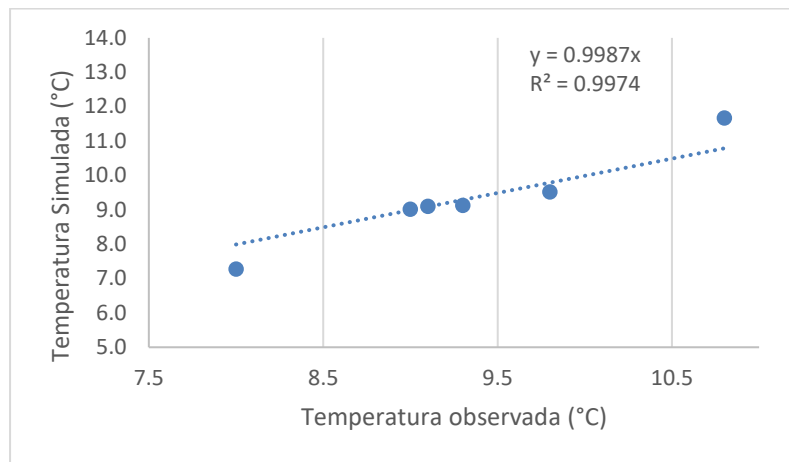
Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 7. Resultados estadísticos de la simulación de temperatura del agua para el evento de calibración - Junio 2023

Modelo	N	NSE	RMSE	R^2
Temperatura	4	0.68	0.48	0.8604

Fuente: Elaboración propia (2025)

Gráfico 14. *Relación entre temperaturas observadas y simuladas para el evento de validación – Noviembre 2023 ($R^2 = 0,86$)*



Fuente: Elaboración propia (2025)

8. Modelación de contaminantes

Una vez calibrados y validados los modelos hidrodinámico y de temperatura, se realizó una primera aproximación a la modelación de la calidad del agua mediante el estudio del comportamiento del amonio (NH_4^+) y de los sólidos suspendidos totales (SST) en el humedal artificial de flujo superficial Tancat de la Pipa, centrando la simulación en el evento registrado en febrero de 2023[EA1].

8.1. Amonio (NH_4^+)

El modelo desarrollado para el amonio en el humedal Tancat de la Pipa fue capaz de describir adecuadamente el aumento brusco inicial de la concentración y el descenso posterior después de alcanzar el valor máximo, aunque no logró captar con precisión las concentraciones finales aproximadas de 0.3 mg N/L al término del evento. Esto refleja ciertas limitaciones en la capacidad predictiva del modelo respecto a la dinámica completa del amonio.

Inicialmente, el modelo se enfocó en un esquema sencillo que contemplaba únicamente la nitrificación y la difusión entre la columna de agua y el sedimento. No se incluyó la desnitrificación, la mineralización del nitrógeno orgánico soluble o en suspensión, ni otros procesos biogeoquímicos relacionados, lo que limita su precisión actual. Se sugiere para trabajos futuros ampliar el modelo incorporando todas las variables del ciclo del nitrógeno (nitrógeno orgánico soluble y en suspensión, amonio y nitrato) y los procesos que les afectan. Además, sería oportuno modelar el oxígeno disuelto para integrar procesos como la aireación, oxidación de materia orgánica y nitrificación, así como considerar la influencia

del fitoplancton y la vegetación del humedal en la dinámica de nutrientes. Estas mejoras permitirían alcanzar una representación más completa y precisa del ciclo biogeoquímico del amonio en humedales superficiales.

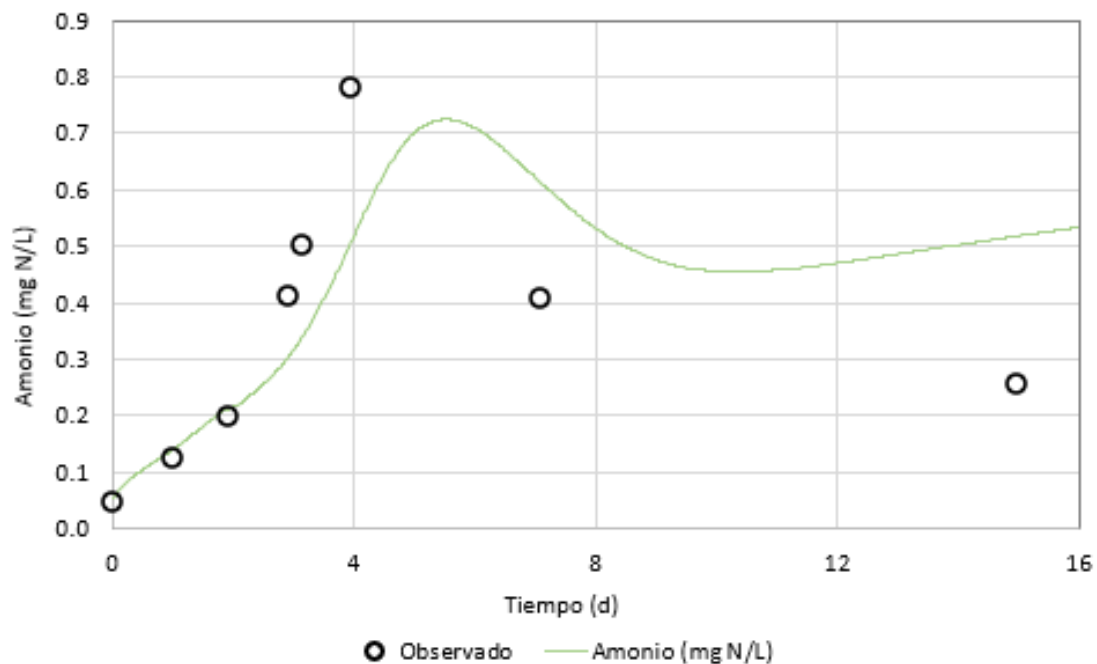
Tabla 8. *Indicadores Estadísticos - Amonio*

Parámetro	NSE	RMSE	R ²
Amonio	0.42	0.147	0.7979

Fuente: Elaboración propia, 2025

Esta aproximación inicial constituye un marco valioso para comprender la dinámica del amonio en el humedal y señala la necesidad de incorporar procesos biogeoquímicos más complejos para futuras simulaciones más realistas y precisas.

Gráfico 15. *Evento 1, Amonio (NH₄⁺)*



Fuente: Elaboración propia (2025)

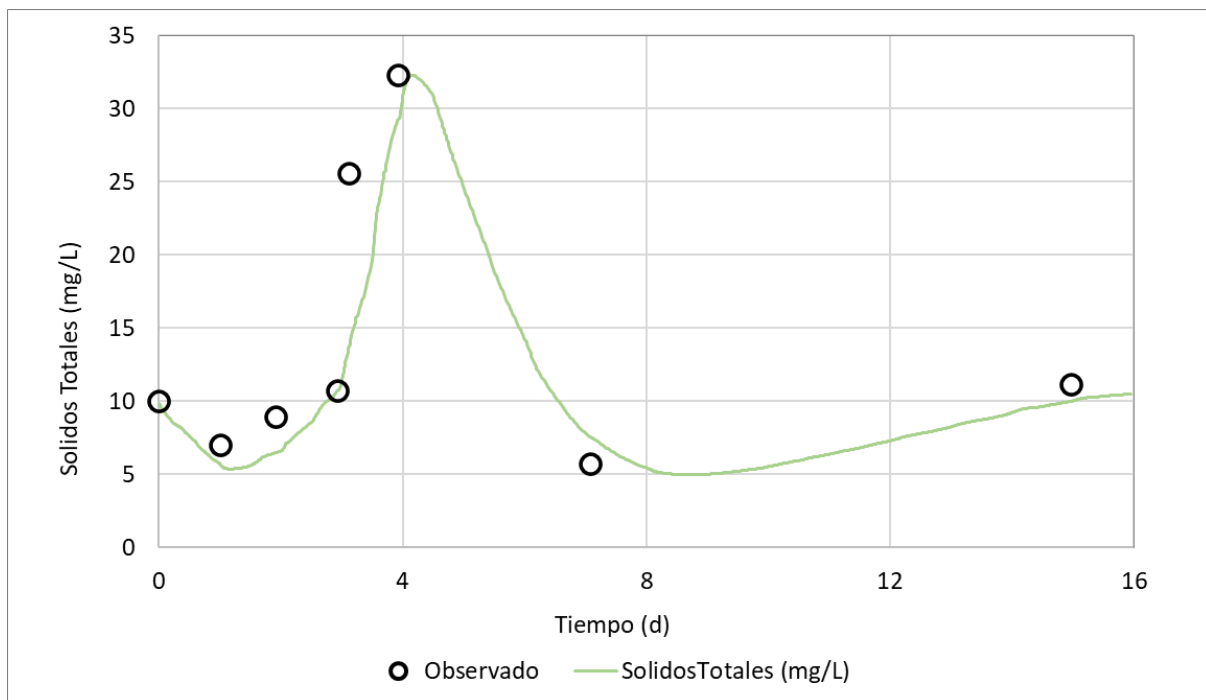
8.2.Sólidos Suspendidos Totales (SST)

En contraste con el amonio, la simulación de los SST mostró un desempeño excelente, con NSE de 0.95, RMSE de 2.056 mg/L y un coeficiente de determinación R² de 0.989, indicando un muy buen ajuste entre datos simulados y observados. Esto demuestra la capacidad del modelo para reproducir con alta precisión los procesos físicos de transporte, sedimentación y retención de partículas en suspensión dentro del humedal.

El modelo segmentado en cuatro compartimentos (TIS N=4) permitió una representación espacial y temporal adecuada del comportamiento de los SST, captando fielmente la evolución de concentración desde la entrada hasta la salida del humedal.

El modelo segmentado en cuatro compartimentos (TIS N=4) permitió una adecuada representación espacial y temporal del comportamiento de los SST, captando fielmente la evolución de concentración desde la entrada hasta la salida del humedal (ver Gráfico 2).

Gráfico 16. *Evento 1, Sólidos Suspendidos Totales*



Fuente: Elaboración propia (2025)

Los indicadores estadísticos para el Evento Febrero 2023 reflejan la calidad del ajuste del modelo para ambos contaminantes, como se muestra en la Tabla siguiente y en gráficos de dispersión:

Tabla 9. *Indicadores Estadísticos - SST*

Parámetro	NSE	RMSE	R ²
SST	0.95	2.056	0.9894

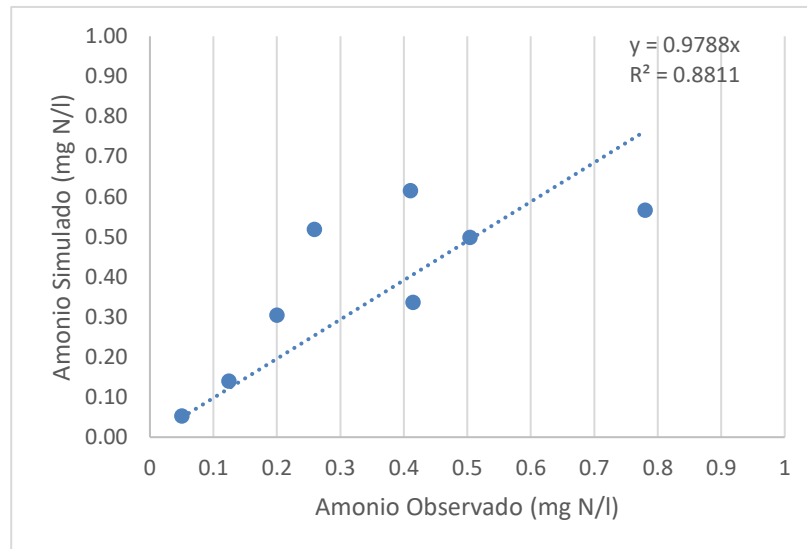
Fuente: Elaboración propia, 2025

Los gráficos de dispersión con los valores observados vs. simulados complementan el

análisis y evidencian el buen ajuste en SST y las limitaciones en amonio (ver Gráficos 9 y 10).

Gráfico 17

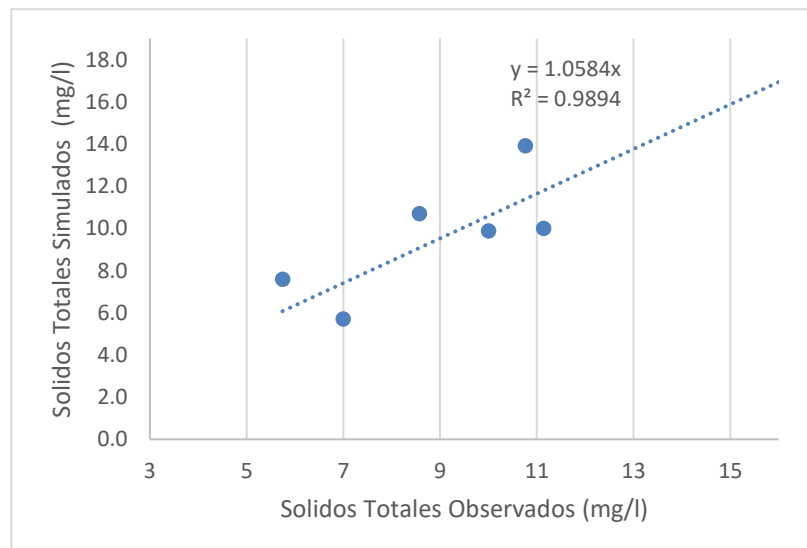
Dispersión y ajuste para el Amonio (NH_4^+) en Evento Febrero 2023



Fuente: Elaboración propia (2025)

Gráfico 18

Dispersión y ajuste para Sólidos Suspendidos Totales en Evento Febrero 2023



Fuente: Elaboración propia (2025)

La modelación realizada aporta una primera aproximación significativa para comprender el comportamiento del humedal Tancat de la Pipa frente a distintos contaminantes, destacando una adecuada simulación de parámetros con procesos

principalmente físicos, como los sólidos suspendidos totales.

En cambio, la modelación de contaminantes con procesos biogeoquímicos complejos, como el amonio, presenta limitaciones importantes que requieren la incorporación de mecanismos adicionales y una calibración más específica para mejorar la precisión y utilidad del modelo en futuras investigaciones.

9. Discusión

Los resultados obtenidos en la modelación hidrodinámica del humedal Tancat de la Pipa presentan similitudes con lo reportado en estudios previos sobre humedales artificiales de flujo superficial. Por ejemplo, como indican Kadlec y Wallace (2009), el uso del modelo de tanques en serie con un número limitado de segmentos muestra un buen ajuste para representar la mezcla interna del agua. En este trabajo, la selección de cuatro segmentos en el modelo TIS ofrece valores de NSE y RMSE que se acercan a los reportados en la literatura para humedales de características similares, aunque con cierta variabilidad que puede estar relacionada con condiciones ambientales particularizadas.

El coeficiente de difusión ajustado en el modelo hidrodinámico es significativamente menor que los valores típicos reportados para interfaces sedimento-agua (Gargallo Bellés, 2017; Hernández-Crespo & Martín, 2023). Esta diferencia sugiere que el sistema presenta restricciones físicas al intercambio iónico. La posible presencia de una capa límite estancada y la microestructura del sedimento podrían explicar la reducción del transporte de conductividad hacia la columna de agua, tal como se discute en Boudreau (1996). Este hallazgo indica que los procesos de difusión molecular tienen mayor relevancia y menor contribución la mezcla mecánica en este humedal.

Los modelos de temperatura desarrollados para el humedal Tancat de la Pipa reflejan comportamientos coherentes con los principios de transferencia de calor en cuerpos de agua poco profundos, tal como describen Gualco et al. (2018). La inclusión de variables meteorológicas locales, como radiación solar y velocidad del viento, permite reproducir con precisión los patrones de elevación y descenso térmico en el humedal. No obstante, el ajuste presenta algunas limitaciones debido a la variabilidad microclimática que no es totalmente captada por las estaciones meteorológicas disponibles. La respuesta térmica del humedal resulta muy sensible a estos factores, que influyen tanto en la temperatura del agua como en la evapotranspiración, la cual es fundamental para modelar procesos biogeoquímicos y de calidad del agua, dado que muchos procesos de transformación dependen directamente de la

temperatura del agua.

En cuanto a la modelación de contaminantes, los resultados para amonio y sólidos suspendidos totales (SST) coinciden con tendencias observadas en humedales mediterráneos similares (Martín et al., 2020; Vymazal, 2010). La reducción efectiva y consistente de los SST responde a procesos físicos como sedimentación y adsorción, más directos y fácilmente modelables. En cambio, la respuesta del amonio es más variable debido a la complejidad de los procesos biogeoquímicos involucrados, lo que se refleja en una mayor dispersión en los valores simulados y observados, indicando la necesidad de mejorar el modelo para incorporar El estudio reconoce que la inclusión de más variables y procesos relacionados con el ciclo del nitrógeno podría ofrecer una visión más completa del comportamiento del humedal, aunque esto también implica enfrentar problemas adicionales de modelado. Se percibe que el entendimiento del sistema aún está en desarrollo, y que cada elemento añadido puede cambiar la forma en que se interpretan los resultados. Queda claro que tratar de captar todos los detalles es una tarea compleja que requiere paciencia y esfuerzo constante desde una posición de aprendizaje.

Las etapas de calibración y validación, hechas a partir de datos sacados del campo, muestran que los modelos usados son bastante simples en comparación con la realidad cambiante del ecosistema. La falta de información detallada en tiempo y espacio limita la precisión con que se puede representar el funcionamiento del humedal. Por ello, los resultados deben verse como aproximaciones generales, que quizá no reflejen situaciones específicas o variables que ocurren en momentos o lugares puntuales, asumiendo con esto la dificultad que implica representar fielmente un sistema natural tan complejo.

A pesar de estas dificultades, el modelo cumple una función valiosa al ofrecer medidas aproximadas que pueden ser útiles para quienes se encargan del cuidado del humedal. La capacidad que tiene para simular diferentes escenarios, como eventos extremos de lluvia, muestra el papel que puede jugar en la anticipación y en la planificación de estrategias que respondan a situaciones diversas. Así, el uso de estas herramientas no se limita a la teoría, sino que tiene implicaciones prácticas para el manejo diario y la conservación activa.

Al contrastar estos resultados con otros trabajos sobre humedales artificiales, se observa una tendencia común: la vegetación y la sedimentación influyen de manera notable en el comportamiento general del sistema. Aunque en este estudio la vegetación no se incorpora de forma directa en los parámetros que describen el movimiento del agua, la aproximación que se hace al seguimiento y dispersión de sustancias parece brindar información relevante y

aplicable para comprender la realidad del humedal. Esta situación refleja la dificultad de introducir todos los factores a la vez, reconociendo que se debe avanzar poco a poco para mejorar el nivel de detalle.

Conviene recordar que la modelación se encuentra todavía en una etapa donde muchas cosas se están aprendiendo y que no puede considerarse una solución definitiva. Los modelos simplifican muchas realidades que son complejas y dependen en gran medida de la calidad y cantidad de datos que se tengan. También están limitados por las suposiciones necesarias para construirlos. Dicha situación hace que el enfoque tenga que ser siempre crítico y abierto, aceptando que se requieren mejoras continuas y la combinación con datos más completos para lograr predicciones que se acerquen un poco más a la realidad y que sirvan en la práctica.

10. Conclusiones

Este trabajo buscó comprender el funcionamiento del humedal artificial Tancat de la Pipa mediante simulaciones numéricas. Aunque el programa WASP entregó información valiosa, la cantidad y calidad de los datos disponibles limitaron el alcance de las conclusiones. Los resultados obtenidos deben tratarse con cuidado, ya que el ecosistema presenta numerosos factores que influyen en su comportamiento y que no siempre se reflejan por completo en el modelo. De este modo, la simulación aporta un complemento útil a la gestión del humedal, pero no reemplaza la importancia de las observaciones directas en campo.

El modelo hidrodinámico empleado, basado en cuatro compartimentos que representan tanques en serie, logró describir de manera adecuada el movimiento del agua dentro del humedal. Los indicadores estadísticos revelaron que esta forma de segmentar el sistema equilibra bien el nivel de detalle con la simplicidad, capturando la variabilidad en el flujo sin complicar demasiado la simulación. La estimación de un coeficiente de difusión más bajo que los rangos habituales parece reflejar particularidades del lugar, como la compactación del sedimento y la falta de mezcla fuerte. Esto señala que cada humedal puede tener características propias que exigen calibraciones ajustadas para un retrato realista.

El análisis térmico mostró que la temperatura del agua responde a factores externos como la radiación solar y el viento. Los resultados del modelo lograron reproducir las tendencias que se observaron en los datos de campo, aunque con el reconocimiento de que disponer de información más detallada tanto en el tiempo como en el espacio podría mejorar la precisión. Comprender cómo varía la temperatura es relevante, ya que incide en procesos físicos y biológicos esenciales para que el humedal mantenga sus funciones.

En relación a los contaminantes, se evidenció que el humedal contribuye a disminuir la concentración de sólidos suspendidos totales, un comportamiento ligado a procesos físicos de sedimentación. Por otro lado, la simulación del amonio mostró resultados parecidos pero con ciertos desfases respecto a las mediciones, probablemente debido a la complejidad de reacciones biológicas y la variabilidad ambiental. Este contraste indica que no todos los contaminantes reaccionan igual y que algunos requieren modelos más específicos y detallados para capturar su comportamiento.

La calidad y cantidad de datos influyeron mucho en el desarrollo y la calibración de los modelos. La falta de registros continuos o con una cobertura espacial adecuada aumentó la incertidumbre en las predicciones. Por eso, se subraya la importancia de contar con mediciones experimentales y de campo que permitan comprender mejor y simular con mayor exactitud las condiciones del sistema.

Sobre los episodios hidrológicos extremos, como lluvias fuertes o aumentos repentinos de escorrentía, el modelo mostró limitaciones para representar totalmente su impacto en el humedal. A pesar de esto, las simulaciones pueden resultar una ayuda valiosa para imaginar posibles escenarios y apoyar la gestión ante eventos especiales, buscando favorecer una respuesta más organizada.

La experiencia obtenida al trabajar con el humedal Tancat de la Pipa muestra que los sistemas naturales no son sencillos y presentan comportamientos que cambian según muchas circunstancias. Aunque las simulaciones ofrecen aproximaciones útiles, siempre habrá incertidumbres y límites en cuanto a cuánto se puede predecir o comprender por completo. Esto indica que se necesita seguir aprendiendo y mejorando la forma en que se modelan estos espacios. Por ahora, el enfoque debe combinar análisis con observación constante y cuidado en la gestión para cuidar un sistema que, aunque parece estable, puede cambiar por influencias externas o internas difíciles de anticipar.

11. Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Recuperado de <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm>
- Anile, A. M., et al. (2000). Cross-validation of numerical schemes for extended hydrodynamical models of semiconductors. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 10(6), 833-

861. <https://www.worldscientific.com/doi/epdf/10.1142/S0218202500000434>

Bernal, S., & Mitsch, W. J. (2011). Integrated stream and wetland restoration: A watershed approach to improved water quality on the landscape. *Ecological Engineering*, 37(1), 25-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.08.022>

Boluda, R., et al. (2002). Application of the Microtox® test and pollution indices to the study of water toxicity in the Albufera Natural Park (Valencia, Spain). *Chemosphere*, 46(2), 355-369. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00092-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00092-3)

Boudreau, B. P. (1996). Diagenetic models and their implementation: Modelling transport and reactions in aquatic sediments. Springer. https://www.researchgate.net/publication/235335761_Diagenetic_models_and_their_implementation_modelling_transport_and_reactions_in_aquatic_sediments

DiToro, D. M., et al. (1983). Documentation for Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) and Model Verification Program (MVP) (EPA-600/3-81-044). U.S. Environmental Protection Agency.

Ernst, M. R., & Owens, J. (2009). Development and application of a WASP model on a large Texas reservoir to assess eutrophication control. *Lake and Reservoir Management*, 25(2), 136-148. <https://doi.org/10.1080/07438140902821389>

Ferreira, D. M., et al. (2021). Calibration of river hydrodynamic models: Analysis from the dynamic component in roughness coefficients. *Journal of Hydrology*, 598, 126136. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169421001839>

Galvez-Hernandez, P., et al. (2025). The DANA disaster: unraveling the political and economic determinants for Valencia's floods devastation. *International Journal for Equity in Health*, 24, 64. <https://doi.org/10.1186/s12939-025-02435-0>

Gargallo Bellés, S. (2017). Modelación de la calidad de las aguas en los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS). Aplicación a los HAFS del Tancat de la Pipa en l'Albufera de Valencia (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de València. <https://hdl.handle.net/10251/78215>

Hernández-Crespo, C., & Martín Monerri, M. (2023). Guía didáctica sobre diseño de

humedales

artificiales. https://www.researchgate.net/publication/372277520_Guia_didactica_sobre_diseño_de_humedales_artificiales

Howitt, R. E. (2005). Agricultural and Environmental Policy Models: Calibration, Estimation and Optimization. [https://aoatools.aua.gr/pilotec/files/bibliography/Agricultural%20and%20Environmental%20Policy%20Models\(Master_Book\)-3976680193](https://aoatools.aua.gr/pilotec/files/bibliography/Agricultural%20and%20Environmental%20Policy%20Models(Master_Book)-3976680193)

Ladislas, S., et al. (2012). Potential of Aquatic Macrophytes as Bioindicators of Heavy Metal Pollution in Urban Stormwater Runoff. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223, 877–888. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0909-3>

Losada, I. J., et al. (1995). Modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos. *Ingeniería del Agua*, 2(1 Extraordinario), 99–118. <https://watermark.silverchair.com/ia19952667.pdf>

Luederitz, V., et al. (2001). Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 18(2), 157–171. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(01\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(01)00075-1)

Maceda-Veiga, A., et al. (2018). Water-quality impacts in semi-arid regions: Can natural ‘green filters’ mitigate adverse effects on fish assemblages? *Water Research*, 144, 628–641. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.077>

Martín, M., et al. (2020). Fifty years of eutrophication in the Albufera lake (Valencia, Spain): Causes, evolution and remediation strategies. *Ecological Engineering*, 155, 105932. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105932>

Martín, M., et al. (2013). The use of free water surface constructed wetland to treat the eutrophicated waters of lake L’Albufera de Valencia (Spain). *Ecological Engineering*, 50, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.029>

Martin-Moreno, J. M., et al. (2025). Devastating “DANA” Floods in Valencia: Insights on Resilience, Challenges, and Strategies Addressing Future Disasters. *Public Health Reviews*, 46, 1608297. <https://doi.org/10.3389/phrs.2025.1608297>

- Meana-Fernández, A., et al. (2017). Selección de perfil hidrodinámico para la construcción de un modelo a escala de una microturbina hidrocínética. GEAMA. https://geama.org/jia2017/wp-content/uploads/ponencias/tema_D/d4.pdf
- Palacio, C. A., & Toro, M. (2002). Metodología para la validación de un modelo hidrodinámico específico en áreas intermareales. Avances en Recursos Hidráulicos, 9, 37-45. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/71633835/Metodologa_para_la_Validacin_de_un_Modelo20211006-30183-1hqb5gt.pdf
- Pardo, M. A., & Armengol Díaz, X. (2010). Zooplankton community from restored peridunal ponds in the Mediterranean region (L'Albufera Natural Park, Valencia, Spain). Limnetica, 29(1), 133-146. <https://ddd.uab.cat/pub/limnetica/02138409v29n1/02138409v29n1p133.pdf>
- Paton, E., & Haacke, N. (2021). Merging patterns and processes of diffuse pollution in urban watersheds: A connectivity assessment. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 8(3), e1525. <https://doi.org/10.1002/wat2.1525>
- Rajar, R., et al. (1997). Hydrodynamic and water quality modelling: case studies. Ecological Modelling, 101(2-3), 209-228. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380097000525>
- Ramírez, S. C. A. (2011). Evaluación hidrodinámica de humedales construidos a escala de laboratorio (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/d366d968-d86f-4102-bcf7-35a1e3afe7dd/content>
- Ratto, M., & Paladino, O. (2000). Analysis of controlled CSTR models with fluctuating parameters and uncertain parameters. Chemical Engineering Journal, 79(1), 13-21. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138589470000139X>
- Rodrigo, M. A., & Carabal, N. (2020). Selecting submerged macrophyte species for replanting in Mediterranean eutrophic wetlands. Global Ecology and Conservation, 24, e01349. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01349>
- Rodrigo, M. A., et al. (s.f.). Tancat de la Pipa: a case study of ecological reallocation-

restoration within the Albufera de València Natural Park. Universidad de Valencia. https://www.researchgate.net/publication/325038829_Management_and_restoration_of_Mediterranean_coastal_lagoons_in_Europe

Sharifi, A., et al. (2016). Improving model prediction reliability through enhanced representation of wetland soil processes and constrained model auto calibration – A paired watershed study. *Journal of Hydrology*, 541(B), 1088-1103. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002216941630511X>

Shutes, R. B. E. (2001). Artificial wetlands and water quality improvement. *Environment International*, 26(5–6), 441-447. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00025-3](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00025-3)

Sun, X. Y., et al. (2012). Three complementary methods for sensitivity analysis of a water quality model. *Environmental Modelling & Software*, 37, 19-29. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815212001375>

Terzakis, S., et al. (2008). Constructed wetlands treating highway runoff in the central Mediterranean region. *Chemosphere*, 72(2), 141-149. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.02.044>

Thacker, B. H., et al. (2004). Concepts of Model Verification and Validation. Los Alamos National Lab., Los Alamos, NM (United States). <https://inis.iaea.org/records/egfyy-d4t03>

Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Water*, 2(3), 530-549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>

Wool, T. A., et al. (s.f.). Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) Version 6.0 DRAFT: User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency – Region 4. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=97385f8bc7bc8979f880d668f2b6564752aaa96b>