

Universidad Nacional
de Educación a Distancia

Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Informática



Universidad
Complutense de Madrid

Facultad de
Informática

Co-simulación orientada a eventos con hardware en el lazo. Aplicación a la monitorización de algas en pantanos

Giordy Alexander Andrade Aimara

Director/a: Segundo Esteban San Román
Co-director/a: José Luis Risco Martín

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario
en Ingeniería de Sistemas y de Control

6 de junio de 2024 / Convocatoria de junio

Autorización

Autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado:



Giordy Alexander Andrade Aimara

Firma del alumno

Agradecimientos

Quisiera agradecer por el apoyo incondicional recibido por toda mi familia, especialmente por mis padres, quienes me han acompañado en cada paso del camino.

Asimismo, me gustaría agradecer la dedicación de mis directores de proyecto, Segundo Esteban San Román y José Luis Risco Martín, cuya orientación ha sido fundamental para mejorar la calidad de esta investigación.

Resumen

La escasez de agua dulce se presenta como uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad en las últimas décadas, debido a múltiples causas como la contaminación, el cambio climático y la sobreexplotación de los recursos hídricos. Es por ello por lo que adquieren cada vez más valor las líneas de investigación correspondientes al monitoreo y conservación de las masas de agua. Se evidencia la problemática correspondiente a la presencia de Afloraciones de Algas y Cianobacterias Nocivas (HACB, del inglés, *Harmful Algal and Cyanobacterial Bloom*) en los entornos acuáticos, afectando tanto al medio ambiente como a la salud de los ecosistemas.

Este trabajo presenta la investigación y el desarrollo de un Sistema de Alerta Temprana (EWS, del inglés, *Early Warning System*) avanzado, denominado DEVS-BLOOM, para el monitoreo y predicción de HACB. La implementación del sistema está basado en los principios de la Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE, del inglés, *Model-based systems engineering*) y emplea el formalismo Especificación del Sistema de Eventos Discretos (DEVS, del inglés, *Discrete Event System Specification*) para la construcción del *software*. El sistema integra tecnologías de Modelado y Simulación (M&S) con una infraestructura basada en las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT, del inglés, *Internet of Things*) por medio de las capas Edge, Cloud y Fog. Esto ha permitido estructurar de manera organizada las conexiones de los distintos subsistemas. Proporcionando con ello, un marco de trabajo robusto y escalable bajo el cual pueden operar de forma paralela las distintas unidades de trabajo involucradas.

La co-simulación entre componentes simulados y reales ha facilitado la validación y la verificación progresiva del sistema para el monitoreo de afloraciones de algas, asegurando la fiabilidad antes de su despliegue. Para ello, se ha validado el funcionamiento de los sistemas mediante la integración de dispositivos reales y sus conexiones con sus sombras digitales. En consecuencia, se ha logrado avanzar en el despliegue de los modelos correspondientes a la predicción e inferencia de afloraciones de algas, así como de las dinámicas de los Vehículos de Superficie Autónomos (USVs, del inglés, *Unmanned Surface Vehicles*). Los resultados obtenidos demuestran que DEVS-BLOOM puede mejorar significativamente la capacidad de respuesta de las autoridades de gestión del agua y facilita su pronta implementación en entornos reales.

Palabras clave: Sistema de alerta temprana (EWS), Monitorización de cianobacterias, Especificación de Sistemas de Eventos Discretos (DEVS), Afloraciones de Algas y Cianobacterias Nocivas (HACB), Ingeniería Basadas en Modelos (MBSE), Co-simulación, Internet de las Cosas (IoT).

Abstract

Freshwater scarcity is one of the greatest challenges facing humanity in recent decades, due to multiple causes such as pollution, climate change and overexploitation of water resources. It is for this reason that the lines of research corresponding to the monitoring and conservation of water bodies are becoming increasingly valuable. The problem of the presence of HACB in aquatic environments, affecting both the environment and the health of ecosystems, is evident.

This work presents the research and development of an advanced system, called DEVS-BLOOM, for the monitoring and prediction of HACB. The implementation of the system is based on the principles of the MBSE and employs the DEVS formalism for the construction of the *software*. The system integrates technologies from M&S with an infrastructure based on IoT technologies through the Edge, Cloud and Fog layers. This has allowed the connections of the different subsystems to be structured in an organised way. This provides a robust and scalable framework under which the various work units involved can operate in parallel.

Co-simulation between simulated and real components has facilitated the validation and progressive verification of the system for monitoring algal blooms, ensuring reliability prior to deployment. To this end, the operation of the systems has been validated by integrating real devices and their connections with their digital shadows. As a result, progress has been made in the deployment of models for the prediction and inference of algal blooms and algal dynamics. The results obtained demonstrate that DEVS-BLOOM can significantly improve the responsiveness of water management authorities and facilitate early deployment in real-world environments.

Keywords: Early Warning System (EWS), Cyanobacteria Monitoring, Discrete Event Specification Systems (DEVS), Harmful Algal and Cyanobacterial Blooms (HACB), Model Based Engineering (MBSE), Co-simulation, Internet of Things (IoT).

Glosario

AWAS sistema australiano de alerta de incendios forestales (AWAS, del inglés, *Australian Wildfire Alert System*).

BMA beta-N-metilamino-L-alanina.

CoAP *Constrained Application Protocol*.

DESS Especificaciones del Sistema de Ecuaciones Diferenciales (DESS, del inglés, *Differential Equation System Specifications*).

DEVS Especificación del Sistema de Eventos Discretos (DEVS, del inglés, *Discrete Event System Specification*).

DTSS Especificaciones de Sistemas en Tiempo Discreto (DTSS, del inglés, *Discrete-Time Systems Specifications*).

E/S entrada-salida (E/S).

EEMS Sistema de Modelización EFDC Explorer (EEMS, del inglés, *EFDC Explorer Modeling System*).

EEW alerta temprana de terremotos (EEW, del inglés, *Earthquake Early Warning*).

EFAS sistemas europeo de información sobre inundaciones (EFAS, del inglés, *European Flood Awareness System*).

EWS Sistema de Alerta Temprana (EWS, del inglés, *Early Warning System*).

FWI índice meteorológico de incendios (FWI, del inglés, *Fire Weather Index*).

GCS Estación de Control en Tierra (GCS, del inglés, *Ground Control Station*).

GNC Guiado, Navegación y Control (GNC).

GOARN red mundial de alerta y respuesta ante brotes epidémicos (GOARN, del inglés, *Global Outbreak Alert and Response Network*).

HACB Afloraciones de Algas y Cianobacterias Nocivas (HACB, del inglés, *Harmful Algal and Cyanobacterial Bloom*).

IoT Internet de las Cosas (IoT, del inglés, *Internet of Things*).

JMA agencia meteorológica japonesa (JMA, del inglés, *Japan Meteorological Agency*).

M&S Modelado y Simulación (M&S).

MBSE Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE, del inglés, *Model-based systems engineering*).

MQTT *Message Queuing Telemetry Transport*.

NFCC centro nacional de alerta de inundaciones (NFCC, del inglés, *National Flood Warning Centre*).

NHC centro nacional de huracanes (NHC, del inglés, *National Hurricane Center*).

nmea Asociación Nacional de Electrónica Marina (NMEA, del inglés, *National Marine Electronics Association*).

NWS servicio meteorológico nacional (NWS, del inglés, *National Weather Service*).

ProMED Programa de Monitoreo de Desastres Naturales (ProMED, del inglés, *Program for Monitoring Emerging Diseases*).

UFC Unidades Formadoras de Colonias (UFC).

UML Lenguaje de Modelado Unificado (UML, del inglés, *Unified Modeling Language*).

unep *United Nations Environment Programme* (UNEP).

USV Vehículo de Superficie Autónomo (USV, del inglés, *Unmanned Surface Vehicle*).

WHO Organización Mundial de la Salud (WHO, del inglés, *World Health Organization*).

WQMP Programa de Monitoreo de la Calidad del Agua (WQMP, del inglés, *Water Quality Monitoring Program*).

Índice general

Glosario xi

1. Introducción **1**
1.1. Motivación 1
1.2. Propuesta y objetivos 5
1.3. Estructura del documento 9

2. Estado del Arte **11**
2.1. Algas y cianobacterias 11
2.1.1. Impacto en los ecosistemas 12
2.1.2. Detección de cianobacterias 14
2.2. Sistemas de alerta temprana 16
2.2.1. Ejemplos de EWS 17
2.3. Tecnologías de M&S 21
2.3.1. Visión general sobre DEVS 22
2.3.2. Integración en tiempo real 24

3. Descripción del sistema y propuesta **27**
3.1. Paradigma IoT 27
3.2. Proceso de modelado y simulación 30
3.2.1. Entorno simulado 32
3.2.2. Dispositivos simulados 32
3.2.3. Modelo de inferencia 35
3.3. Despliegue con hardware en el lazo 38
3.3.1. Métodos de integración de dispositivos 38
3.3.2. Validación del GPS 39
3.3.3. Validación del WebReport 42

4. Conclusiones y trabajos futuros **49**
4.1. Conclusiones 49
4.2. Objetivos alcanzados 50

4.3. Trabajos Futuros 51

Bibliografía y referencias **52**

Índice de figuras

1.1. Diagrama de flujo que ilustra los componentes y etapas clave en la implementación u optimización de un WQMP. (Fuente: Behmel et al. [2016]) 2
1.2. Afloraciones de cianobacterias en imágenes de satélite en el Golfo de Finlandia, al sur de la zona de Porvoo-Loviisa del día miércoles 13 de julio de 2022 (fuente: ympäristökeskus [SYKE]). 4
1.3. Fotografía de HACB reciente en la confluencia de los ríos Tajo y Tiétar en el Parque Natural de Monfragüe. 5
1.4. Etapas de desarrollo de un proyecto de investigación ilustrado por un diagrama en V híbrido. 8

2.1. Fotografía bajo microscopio de cianobacterias (fuente: of Environmental Quality [2024]). 12
2.2. Impactos ambientales de las floraciones de cianobacterias (fuente: Sukenik et al. [2015]). 13
2.3. Capturas de pantalla de las aplicaciones correspondientes a los ejemplos de EWSs mostrados. 20
2.4. Modelo matemático genérico. 21
2.5. Esquemático del modelo atómico DEVS. 23
2.6. Esquemático del modelo acoplado DEVS. 24
2.7. *Unified Modeling Languague* (UML) diagrama de la clase RealTimeCoordinator. 25

3.1. Pre-diseño simulado del proyecto por capas IoT que permite un posterior despliegue real. 28
3.2. Diagrama relacional del modelo DEVS-BLOOM Cloud. 29
3.3. Diseño preliminar del marco de trabajo. En esta fase, se utilizan archivos de entrada para emular los acontecimientos. 31
3.4. Máquina de estados de la operación de los sensores simulados. 33
3.5. Modelo acoplado de la arquitectura del monitoreo de HACB empleando un servicio de inferencia (sistema DEVS-BLOOM). 36

3.6. Representación detallada durante una simulación del seguimiento de las afloraciones de algas. Los gráficos muestran el mapa de la densidad de algas en la capa superficial, la posición del USV (estrella negra), y la posición y densidad de la afloración inferida (círculo rojo). Cada gráfico muestra un momento diferente: la eclosión de la afloración a las 7:30 AM (primera figura), el movimiento a las 15:30 (segunda figura), la dispersión a las 22:30 (tercera figura), y cuando el USV está regresando a la incubadora de la afloración a las 2:00 AM (cuarta figura). Datos disponibles en Esteban [2022] 37

3.7. Verificación funcional del modelo de inferencia a lo largo de varios días. En el primer gráfico, el modelo predice la existencia de una posible afloración. El segundo gráfico muestra la densidad inferida por el modelo, la densidad medida por el USV y el error cuadrático medio. Los gráficos tercero y cuarto muestran las longitudes y latitudes inferidas por el modelo de afloración y las obtenidas por el USV respectivamente. 38

3.8. Integración del `Dispositivo` GPS a través de sondeo (izquierda) e integración del `Dispositivo` GPS por inyección de eventos (derecha) en el simulador. Los dispositivos se conectan a su gemelo digital (DT) mediante diferentes tipos de integración. 40

3.9. Diagrama de la máquina de estados SysML para una operación de sensor de eventos de inyección. El diagrama forma parte de una adaptación del diagrama de máquina de estados mostrado originalmente para el caso de un sensor simulado. A diferencia de éste, los sensores implementados por inyección de eventos no tienen un estado de WORK ya que su funcionamiento depende sólo de eventos externos. 41

3.10. Estructura de conexión de la capa Cloud con el simulador a través de la base de datos. 43

3.11. Vista general de la web de la gestión de alarmas y masas de agua para el gestor del agua (mapa de la masa de agua del lago Washington que muestra la señal de densidad de algas medida por el barco situado al norte del lago (BloomMesUN) entre el 23 de agosto y el 6 de septiembre de 2008). 45

3.12. Vista web de la tabla de alertas de la gestión de alarmas y masas de agua para el gestor del agua (tabla de alertas del lago Washington que muestra los valores de algas que superan el límite establecido medidas con el barco emplazado al sur del lago (BloomMesS) y la densidad de oxígeno medida en el agua por el sensor simulado del mismo barco (SensorSimOS) entre el 23 de agosto y el 6 de septiembre de 2008). 45

3.13. Vista web del recorrido de los USV. Donde se observan las señales del planificador del USV situado al norte (UsvPlannerUN), el recorrido de dicho USV (UsvUN), los puntos de la ruta del planificador del USV situado al sur (UsvPlannerUS) y su recorrido real (UsvUS). 46
3.14. Vista web de la estimación de afloraciones de algas (mapa de la masa de agua del lago Washington que muestra la señal de densidad de algas estimada entre el 1 y el 6 de septiembre de 2008) 47
3.15. Vista web de las señales recogidas por los USVs (correspondientes a la masa de agua del lago Washington entre el 23 de agosto y el 6 de septiembre de 2008. Se muestran las señales obtenidas por los sensores de un mismo USV: la señal del viento en dirección este (SimYWS), la velocidad de la corriente de agua en dirección este (SimUWS) y la señal del viento en dirección norte (SimXWS)). 48

Índice de tablas

1.1. Valores máximos permitidos de bacterias en aguas destinadas al baño (fuente de datos: Europea [2006]). 3
1.2. Valores máximos permitidos de contaminantes en el agua de consumo humano (fuente de datos: Europea [2020]). 4

2.1. Comparación de los métodos de detección de cianobacterias. 15
2.2. Servicios proporcionados por los ejemplos anteriores de EWS. Los distintos sistemas pueden implementar los servicios mostrados de manera parcial (∼) o completa (✓). En otros casos, los servicios pueden no estar implementados en absoluto (✗). 19

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo se abordará de manera integral la problemática asociada a la escasez de agua dulce, destacando el impacto de las Afloraciones de Algas y Cianobacterias Nocivas (HACB, del inglés, *Harmful Algal and Cyanobacterial Bloom*) sobre la salud pública y el medio ambiente. Se explorará la urgente necesidad de desarrollar sistemas eficaces de monitoreo y detección temprana de cianobacterias, y de igual forma, se establecerán los mecanismos que se deben llevar a cabo hasta lograr su implementación. Finalmente se muestran los objetivos de la investigación y la estructura del documento.

1.1. Motivación

En el último informe sobre riesgos mundiales presentado por el Foro Económico Mundial [Forum, 2023], se llega a denominar a la crisis del agua como uno de los mayores riesgos globales en términos de impacto potencial. Se estima que en la próxima década, la escasez de agua dulce se convertirá en una amenaza aún más severa para el desarrollo sostenible del ser humano junto con el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y el colapso de los ecosistemas [Sharma and Soederberg, 2020]. La combinación de los efectos de la sequía y la escasez de agua de lluvia complica considerablemente el acceso al agua potable para una proporción creciente de la población [Mekonnen and Hoekstra, 2016].

Entre los principales factores que causan este fenómeno se encuentra el crecimiento demográfico, lo que implica un aumento en la actividad agrícola para satisfacer la demanda de alimento, deteriorando aún más las delicadas reservas hídricas [oec, 2023]. A todo ello, se deben incluir los efectos provocados por la contaminación, el patrón de producción/comercio y consumo, el desarrollo tecnológico y la gestión ineficiente del recurso.

Las consecuencias de la crisis del agua se reflejan en la seguridad alimentaria, la salud humana, la estabilidad política y el desarrollo sostenible. En la actualidad, cerca de 2.400 millones de personas residen en países afectados por el estrés hídrico [Nations, 2023]. La gran mayoría de ellos son agricultores que enfrentan dificultades para cubrir sus necesidades diarias

de agua dulce, vital para la alimentación, la higiene y el saneamiento. La disponibilidad y calidad de los recursos hídricos se deterioran rápidamente como consecuencia de décadas de uso inadecuado, falta de una gestión coordinada, extracción excesiva de aguas subterráneas, contaminación y el impacto del cambio climático.

Si bien la interpretación del término ”calidad del agua” varía según la perspectiva científica, gubernamental o de la sociedad en general, los programas de evaluación y gestión de la calidad del agua tienen como objetivo proteger y, en muchos casos, restaurar la integridad de los ecosistemas interiores, costeros y marinos [Brooks et al., 2016]. Los desafíos relacionados con la calidad del agua se detectan mediante programas de monitorización enfocados en la supervisión de parámetros químicos, físicos y biológicos emplazados específicamente en áreas tales como vertidos industriales, la escorrentía proveniente de actividades agrícolas y urbanas, así como en las aguas superficiales del entorno natural.

El desafío del control y monitorización de la calidad de agua se lleva abordando desde la década de 1940. No obstante, todavía no existe una estrategia conjunta, práctica y generalmente aceptada que sirva de apoyo a todas las fases de los planes de gestión de la calidad del agua. En multitud de trabajos como en Behmel et al. [2016], se muestran los casos de uso que un gestor de aguas debe considerar y cómo se debe planificar u optimizar un Programa de Monitoreo de la Calidad del Agua (WQMP, del inglés, *Water Quality Monitoring Program*). Estos incluyen los desafíos de identificar los objetivos de monitoreo, como: seleccionar los emplazamientos de los muestreos y los parámetros de calidad del agua; determinar las frecuencias de muestreo; y considerar la logística y los recursos necesarios para implementar acciones basadas en la información obtenida de un WQMP (Figura 1.1).

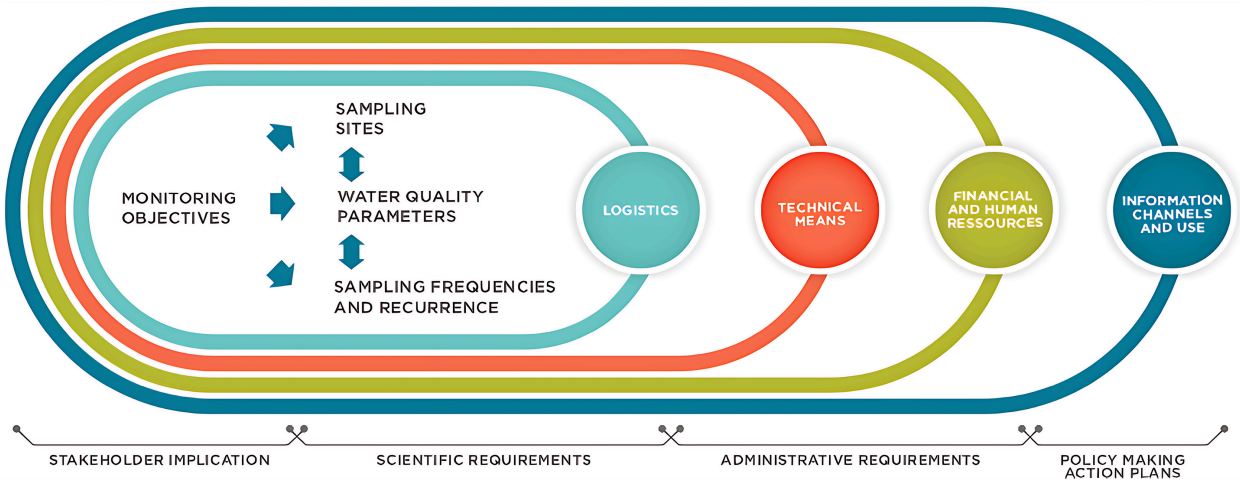


Figura 1.1: Diagrama de flujo que ilustra los componentes y etapas clave en la implementación u optimización de un WQMP. (Fuente: Behmel et al. [2016])

Se resalta el uso del aprendizaje continuo, facilitado por la retroalimentación de información, mediante sistemas inteligentes que dan soporte de decisiones con el objetivo de asistir a los gestores de cuencas hidrográficas. Al mismo tiempo, es esencial aprovechar el cono-

cimiento local e identificar las necesidades de información de todas las partes interesadas mediante enfoques participativos, basados en sistemas de información geográfica y sistemas de adaptación.

Dentro de la Unión Europea, se busca asegurar que todas las fuentes de agua superficiales alcancen un nivel óptimo tanto en su estado ecológico como químico para garantizar su protección y sostenibilidad, así como su aptitud para diversos fines, incluyendo el uso recreativo [Europea, 2006]. Para ello, se requiere que las aguas superficiales cumplan con ciertos estándares mínimos en diversos aspectos, como los biológicos, hidro-morfológicos y fisicoquímicos, incluyendo la presencia de nutrientes. Además, para garantizar un buen estado químico, se establecen normas para el monitoreo y la clasificación del estado del agua, exigiendo que se categorice en distintos niveles de calidad. En la Tabla 1.1 se pueden observar los niveles de calidad de las aguas de baño según los valores de las bacterias de Escherichia coli y Enterococos intestinales presentes en las distintas masas de agua, medidos en Unidades Formadoras de Colonias (UFC).

Tabla 1.1: Valores máximos permitidos de bacterias en aguas destinadas al baño (fuente de datos: Europea [2006]).

Parámetro	Tipo de agua	Calidad	Valores máximos
Escherichia coli	Aguas continentales	Excelente	250 UFC/100 ml
		Buena	500 UFC/100 ml
		Suficiente	900 UFC/100 ml
	Aguas costeras y de transición	Excelente	250 UFC/100 ml
		Buena	500 UFC/100 ml
		Suficiente	500 UFC/100 ml
Enterococos intestinales	Aguas continentales	Excelente	100 UFC/100 ml
		Buena	200 UFC/100 ml
		Suficiente	330 UFC/100 ml
	Aguas costeras y de transición	Excelente	100 UFC/100 ml
		Buena	200 UFC/100 ml
		Suficiente	185 UFC/100 ml

La Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo establece normas aún más restrictivas sobre la calidad del agua destinada al consumo humano [Europea, 2020]. Como se puede observar en la Tabla 1.2, se presenta un ejemplo de los niveles máximos permitidos de contaminantes, que incluyen bacterias, metales pesados y compuestos químicos. Los estándares mostrados en el listado están sujetos a modificaciones. Esto puede incluir la adición de nuevos contaminantes a medida que se identifican, basándose en las necesidades ambientales y utilizando los datos científicos más recientes y confiables disponibles.

Entre los principales microorganismos que pueden acarrear mayores problemas para la salud pública en los entornos acuosos se encuentran las HACB. Su magnitud, frecuencia y duración parecen estar en aumento a escala global en las últimas décadas, especialmente en aguas costeras e interiores [Gobler, 2020].

Tabla 1.2: Valores máximos permitidos de contaminantes en el agua de consumo humano (fuente de datos: Europea [2020]).

Parámetro	Unidad	Valor máximos
Escherichia coli (E. coli)	UFC/100 ml	0
Enterococos intestinales	UFC/100 ml	0
Microcistina-LR (toxina producida por cianobacterias)	μg/l	1.0
Plomo (Pb)	μg/l	10
Cromo (Cr)	μg/l	25
Arsénico (As)	μg/l	10
Mercurio (Hg)	μg/l	1
Nitratos (NO_3^-)	mg/l	50
Nitritos (NO_2^-)	mg/l	0.5
Cloruro (Cl^-)	mg/l	250
Trihalometanos totales	μg/l	100

Entre los principales factores climáticos que han propiciado estos efectos se encuentra el aumento en la concentración de los nitratos en los ecosistemas fluviales, lo que favorece el crecimiento y la proliferación de ciertas algas nocivas. En segundo lugar, el aumento del dióxido de carbono en el agua ha provocado una disminución del pH, lo que a su vez ha aumentado la competencia por recursos con otros microorganismos. Por último, el calentamiento progresivo de las superficies de las masas de agua, ha generado ambientes más propicios para la proliferación de las HACB.

Mientras que países como Corea y China han optado por el control directo de las afloraciones en el océano, otros como EE.UU., Canadá y algunos países europeos se han decantado por programas de vigilancia y predicción [Gallardo-Rodríguez et al., 2019] (Figura 1.2).

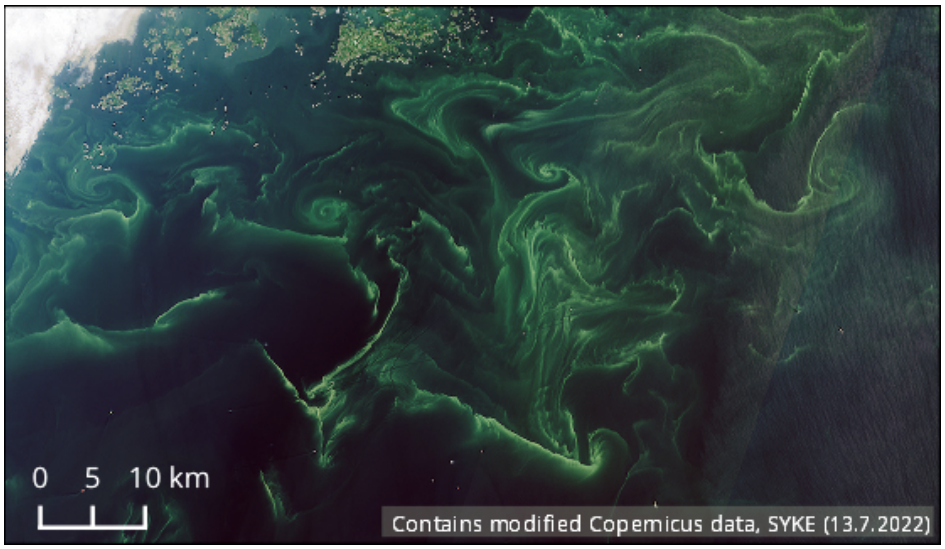


Figura 1.2: Afloraciones de cianobacterias en imágenes de satélite en el Golfo de Finlandia, al sur de la zona de Porvoo-Loviisa del día miércoles 13 de julio de 2022 (fuente: ympäristökeskus [SYKE]).

Es por ello por lo que es de vital importancia potenciar el desarrollo de novedosos mecanismos de vigilancia y predicción de HACB. Este mecanismo debe servir de apoyo a los gestores de la masa de agua para garantizar el control de calidad de agua. Además, es esencial establecer un plan estratégico centrado en la gestión sostenible, eficiente y cooperativa de los recursos hídricos.

1.2. Propuesta y objetivos

Las HACB representan un gran riesgo para la salud pública y el medio ambiente debido a su incesante producción de metabolismos secundarios tóxicos, pudiendo causar efectos negativos en la salud de humanos y animales. Las HACB densas reducen la cantidad de luz y oxígeno disponible en el agua (Figura 1.3), afectando a la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos [Paerl and Otten, 2013]. Su impacto también se ve reflejado negativamente en la pesca, en la acuicultura y demás actividades recreativas. Enfrentar estas situaciones puede implicar un gasto económico significativo para las regiones locales, especialmente cuando el daño ambiental es extenso y la capacidad de respuesta es limitada.



Figura 1.3: Fotografía de HACB reciente en la confluencia de los ríos Tajo y Tiétar en el Parque Natural de Monfragüe.

La eutrofización es una de las principales causas de contaminación en aguas de lagos y embalses. Este fenómeno consiste en el crecimiento de factores necesarios para el proceso de fotosíntesis, como la luz solar, el dióxido de carbono y especialmente el nitrógeno y el fósforo [Chislock et al., 2013]. La agricultura intensiva, el uso de fertilizantes y las descargas de aguas residuales han contribuido en el enriquecimiento excesivo de nutrientes en los ecosistemas

fluviales. A medida que los ecosistemas acuáticos envejecen, se produce la eutrofización de forma natural debido al asentamiento de sedimentos. Sin embargo, la acción humana acelera este proceso y aumenta su alcance. El peligro no se limita únicamente a las masas de agua, ya que se ha observado material extracelular de HACB en el agua, en la atmósfera y en regiones alejadas de la orilla [Schmale III et al., 2019].

Desde principios del siglo XXI, la única forma de obtener datos sobre la salud de las masas de agua y estimar la aparición de HACB era mediante muestras tomadas por personal especializado con análisis posterior en laboratorio o mediante instrumentos automáticos desplegados en un lugar fijo [Miller et al., 2022]. Este método requiere un gran esfuerzo por parte del personal, así como un alto costo económico y una considerable inversión de tiempo. La poca eficiencia del proceso no permite realizar un estudio exhaustivo sobre la calidad del agua en masas extensas. El retraso en los resultados analíticos y la capacidad limitada para interpretar el escenario actual reducen la eficacia de la respuesta de las autoridades responsables del suministro de agua potable y de sus usos recreativos.

Con el propósito de aportar una solución eficaz para el monitoreo y gestión de las cianobacterias en entornos acuáticos, se ha propuesto en este trabajo el desarrollo un sistema capaz de predecir la evolución temporal y espacial de los HACB. Esta investigación ha sido impulsada por el Proyecto IA-GES-BLOOM-CM (Y2020/TCS-6420) del programa Sinérgico de la Comunidad Autónoma de Madrid, llamado *"Hacia un sistema Integral para la Alerta y Gestión de BLOOMs de cianobacterias en aguas continentales"*.

Dicho sistema, denominado DEVS-BLOOM, deberá ser capaz de realizar por lo tanto, un análisis autónomo y preciso de las muestras de agua, con su respectivo procesado de datos para la predicción del comportamiento de las afloraciones. Las tecnologías de Modelado y Simulación (M&S) son de gran utilidad a la hora de reproducir la dinámica de las cianobacterias a partir de los datos obtenidos. Es por ello por lo que se requiere de una herramienta de desarrollo que permita la modelización y simulación de sistemas complejos, proporcionando una metodología robusta, eficiente y flexible. El formalismo Especificación del Sistema de Eventos Discretos (DEVS, del inglés, *Discrete Event System Specification*) cumple con todos estos requisitos ya que permite la construcción de sistemas complejos mediante modelos modulares y jerárquicos, facilitando de este modo su desarrollo y mantenimiento.

Se ha podido observar en trabajos previos como Baek et al. [2021], la gran eficacia de los modelos basados en aprendizaje automático para la simulación de HACB en sistemas acuáticos. Estos modelos se nutren originalmente a partir de un Sistema de Modelización EFDC Explorer (EEMS, del inglés, *EFDC Explorer Modeling System*) o MIKE [DSI, 2022], diseñados para consultar el estado físico y biológico de la masa de agua en un momento y lugar determinados. Como se explicó anteriormente, las variables esenciales para desarrollar el modelo de predicción de afloraciones son: la temperatura del agua, los niveles de nutrientes y la luz solar. Tal y como se podrá ver a lo largo del documento, disponer de modelos EEMS con suficiente detalle permite validar el modelo de algas finalmente desarrollado.

Esto es crucial para poder desplegar un Sistema de Alerta Temprana (EWS, del inglés, *Early Warning System*), cuya función principal será detectar, predecir y proporcionar avisos anticipados sobre la ocurrencia de HACB a partir de la recolección de muestras de agua, ya sea de forma simulada o real. Dicho sistema tiene como objetivo ayudar a los gestores del agua a orientar sus políticas y proteger la salud pública mediante el despliegue eficaz de sistemas tempranos [Rousso et al., 2020]. La falta de datos de alta resolución junto a la gran variabilidad espacial y temporal de las HACB, presentan un gran desafío a la hora de desarrollar modelos precisos y de uso generalizado.

Al mismo tiempo, y debido a la gran complejidad del sistema a desarrollar, es necesario realizar una gestión multidisciplinar, la cual requiere de la colaboración entre equipos especializados centrados en la creación paralela de los distintos subunidades del sistema:

- **Modelado de HACB**: Este grupo lleva a cabo el modelado y la inferencia de las biodinámicas de las masas de agua y las HACB, donde parte del equipo de trabajo son biólogos [Risco-Martín et al., 2023].
- **USV**: Este equipo de trabajo se enfoca en la programación del Guiado, Navegación y Control (GNC) de los Vehículos de Superficie Autónomos (USVs, del inglés, *Unmanned Surface Vehicles*) y en el despliegue de la instrumentación de los sensores [Nađ et al., 2015].
- **Software e integración**: Enfocado en el despliegue de tecnologías relacionadas con el Internet de las Cosas (IoT, del inglés, *Internet of Things*) para la simulación del sistema, junto a la integración del *software* y de los sistemas [Mittal et al., 2019].

A diferencia de los proyectos industriales, los proyectos de investigación a menudo no disponen de soluciones comerciales para ciertos subsistemas, que solo estarán disponibles en las etapas finales. Por esta razón, es necesario avanzar en las fases de desarrollo utilizando modelos simulados de estos subsistemas.

Será necesario por lo tanto, diseñar, verificar y validar los subsistemas comparándolos con otros subsistemas simulados basados en modelos, tal y como se hace habitualmente en proyectos de ingeniería siguiendo los principios de la Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE, del inglés, *Model-based systems engineering*) [Menshenin et al., 2021]. Dicho método proporciona una representación visual y formal de los sistemas, facilitando la comprensión y la comunicación entre las distintas unidades de trabajo que participan en el desarrollo y mantenimiento de un sistema. Si bien el software puede ser verificado funcionalmente a través de subsistemas simulados, la validación final se llevará a cabo a través del trabajo en conjunto (co-simulación) entre subsistemas simulados y subsistemas reales, cuya integración se denomina como ”hardware en el lazo” [Mihalič et al., 2022]. Por ende, se consigue realizar una transición gradual desde un modelo *software* hasta un modelo *hardware* a través de varios pasos hasta el despliegue completo del sistema.

La Figura 1.4 muestra un modelo V híbrido [Naeem et al., 2014] con las etapas de desarrollo del *software* de un proyecto de investigación. El modelo en V se denomina híbrido debido a que no es puramente incremental, permitiendo la integración ágil de diseños e implementaciones en función de los resultados obtenidos en las etapas de verificación y validación.

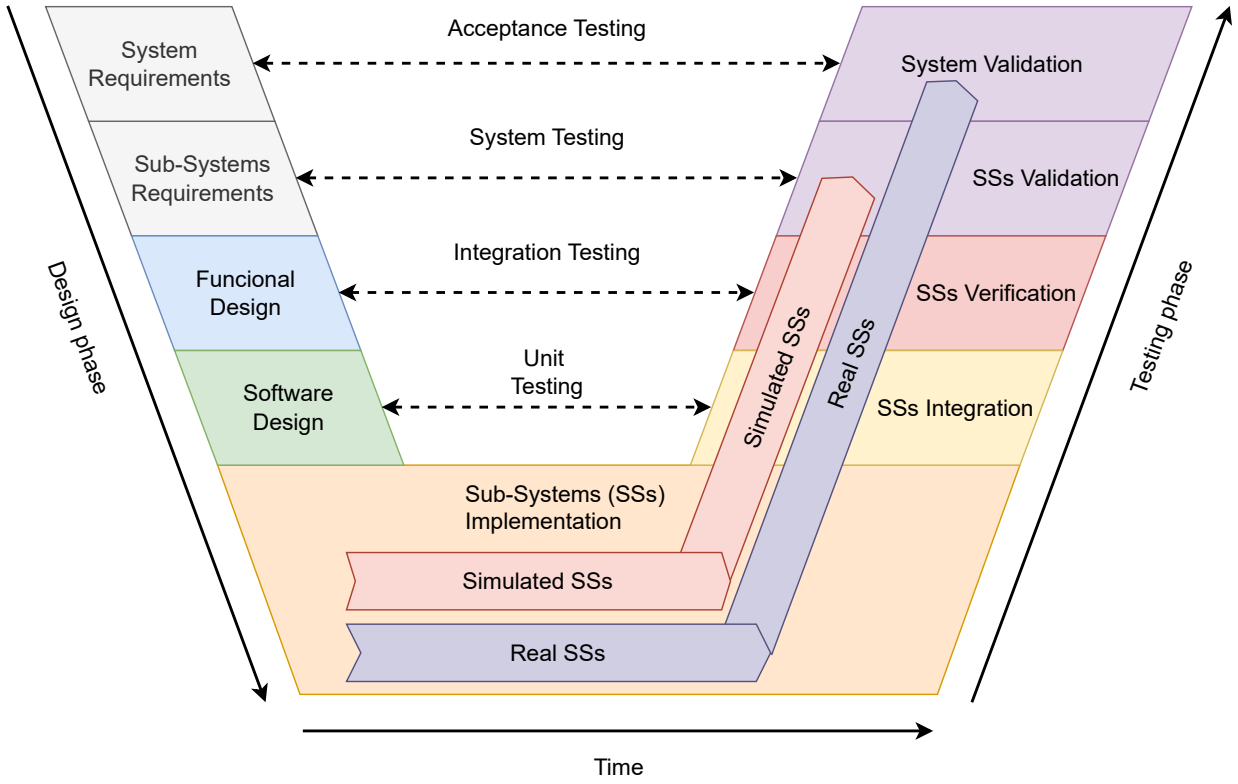


Figura 1.4: Etapas de desarrollo de un proyecto de investigación ilustrado por un diagrama en V híbrido.

Una vez se hayan definido los requisitos del sistema y de cada uno de los subsistemas, se diseñarán los modelos funcionales de los subsistemas y a continuación, el *software* para integrarlos. De esta manera, se consigue completar el desarrollo basado en modelos. Es fundamental que en la etapa de integración, el *software* conecte correctamente los diferentes subsistemas utilizando sus modelos simulados. La verificación funcional de los subsistemas se lleva a cabo también en los modelos simulados, no obstante, se pueden incorporar subsistemas reales en caso de estar disponibles. Por otro lado, se alcanza la etapa de validación siempre y cuando se lleguen a incorporar subsistemas reales, incluso si el resto de los subsistemas son simulados. En la fase final de validación a nivel de sistema deben utilizarse todos los subsistemas reales.

El sistema se ha distribuido en capas acorde al paradigma IoT, involucrando diversos elementos, como modelos, sensores reales, USVs, servidores de datos, gestores, etc. En consecuencia, la implementación de esta arquitectura a través de las reconocidas capas Cloud,

Fog y Edge garantiza un despliegue organizado de los subsistemas, con lo que se facilita la adquisición y el procesamiento de los datos en tiempo real.

A continuación se enumeran los objetivos establecidos para el desarrollo del presente trabajo de investigación. En consecuencia, se puede tener una visión general de los aspectos que se abordarán y las metas que se persiguen:

- Desarrollar un sistema capaz de realizar un monitoreo para la proliferación de HACB a partir de las tomas de aguas de los embalses, con el fin de alertar a los gestores de aguas. Dicho sistema deberá emplear la simulación de barcos autónomos para supervisar los parámetros biológicos, físicos y químicos que conducen al inicio, expansión y desaparición de las HACB, lo que permitirá realizar inferencias y predicciones sobre su comportamiento.
- Emplear el formalismo DEVS para desarrollar el software, el cual gestiona la información de los múltiples subsistemas que lo constituyen.
- Distribuir el sistema bajo el paradigma IoT: 'Cloud', 'Fog' y 'Edge'.
- Enfoque hacia una co-simulación, donde existan tanto elementos reales como simulados trabajando de forma conjunta. El objetivo final será por lo tanto validar los subsistemas desarrollados.

1.3. Estructura del documento

El presente documento se estructura de la siguiente forma: en primer lugar se proporciona el estado del arte de los principales conceptos abordados a lo largo de la investigación, desde las cianobacterias, los EWS y el formalismo denominado DEVS; seguidamente se realiza una descripción completa del sistema desarrollado, detallando la función de cada uno de los subsistemas que lo componen y el marco de trabajo empleado en su implementación; más adelante se describirá el proceso de M&S llevado a cabo para cumplir con la verificación y validación del diseño inicialmente desarrollado; finalmente se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo del trabajo, los objetivos alcanzados y las líneas de investigación futuras.

Capítulo 2

Estado del Arte

A continuación, se realizará una revisión de los conceptos más destacados de la investigación, así como de las soluciones propuestas para el problema central del proyecto. Se hará una contextualización sobre el estudio de las HACB, su impacto medioambiental, así como los métodos de detección. Luego, se revisarán las características propias de los EWS existentes y la tecnología de M&S que se empleará para desarrollar el sistema propuesto.

2.1. Algas y cianobacterias

El estudio de las microbiología moderna se remonta al año 1870 y se basó principalmente en nuevos conceptos desarrollados en siglos pasados sobre el papel de los microorganismos, junto con avances en los métodos experimentales y descubrimientos en áreas como la química, la física y la biología celular [Drews, 2000]. Un avance significativo fue el desarrollo de técnicas para aislar y sembrar cultivos de microorganismos a partir de células individuales. Abandonando definitivamente la idea de la generación espontánea de microorganismos, se descubrió que eran agentes causantes de enfermedades infecciosas y de procesos metabólicos específicos.

El análisis exhaustivo de las cianobacterias comenzó a principios del siglo XX, con el estudio de su fisionomía, su metabolismo y su papel en la producción de oxígeno atmosférico [Whitton and Potts, 2007]. Ferdinand Cohn, a través de sus estudios taxonómicos, incluyó a las cianobacterias (anteriormente conocidas como Schizophyceae o Cyanophyceae) dentro del reino de las bacterias debido a sus características morfológicas (Figura 2.1) y funcionales. Cohn especuló que las cianobacterias llegaron a ser habitantes tempranos de la Tierra debido a su capacidad para adaptarse a hábitats extremos, su simple modo de reproducción y su registro fósil. Aunque inicialmente se descubrió el proceso de la fotosíntesis y la fijación de $C0_2$ en plantas y algas, posteriormente se reconoció que las cianobacterias también poseían estas capacidades. Se encontró que las cianobacterias podían convertir la energía que recibían de la luz en energía química a través de la fotosíntesis anoxigénica.



Figura 2.1: Fotografía bajo microscopio de cianobacterias (fuente: of Environmental Quality [2024]).

Las cianobacterias, como su propio nombre indica, son un tipo de bacterias productoras de oxígeno que utilizan la luz solar como fuente de energía para convertir el dióxido de carbono en biomasa [Huisman et al., 2018]. Se estima que estos organismos unicelulares se originaron hace más de 3.000 millones años y su actividad fotosintética desencadenó en uno de los eventos más catastróficos de nuestro planeta: la oxidación de la atmósfera terrestre. Si bien las cianobacterias reciben en muchos casos la connotación de algas verdeazuladas, estrictamente hablando no son algas, que es un nombre reservado estrictamente para los fotótrofos eucariotas.

2.1.1. Impacto en los ecosistemas

La eutrofización y el cambio climático son factores clave que promueven la expansión geográfica y la intensidad de las HACB [Sukenik et al., 2015] (Figura 2.2), especialmente en regiones densamente pobladas y en países con regulaciones laxas sobre el vertido de nutrientes. El crecimiento de las HACB disminuye la transparencia del agua, lo que tiene efectos significativos en las comunidades acuáticas. El desarrollo sin control de cianobacterias y algas eucariotas tiene repercusiones importantes en las propiedades físicas y químicas de los cuerpos de agua. Entre los efectos más comunes se encuentran la disminución del dióxido de carbono disuelto, el aumento del pH y la alteración de los procesos biogeoquímicos. Las cianobacterias, además, tienen otros impactos adicionales sobre los ecosistemas, como la modificación del tamaño de la biomasa y la producción de metabolitos tóxicos, entre otros.

Algunos tipos de cianobacterias producen toxinas (cianotoxinas concretamente) dañinas para la vida acuática, causando efectos agudos o crónicos en la salud de los mamíferos, incluidos los humanos y otros organismos [Carmichael and Boyer, 2016]. Lo que supone un impacto negativo que afecta al agua potable, la pesca, la agricultura, el turismo, la calidad del agua, la resiliencia de la red alimentaria de los hábitats, y contribuye a la anoxia y a la muerte de los peces.

La incorporación de grupos microbianos asociados a las cianobacterias desempeña un papel fundamental en la sucesión de las comunidades microbianas. A medida que las cianobacterias proliferan, crean un ambiente idóneo para la evolución de otras especies microbianas, lo que conlleva cambios significativos en las actividades heterótrofas y en el reciclado de nutrientes. Este proceso favorece la aparición de bacterias degradadoras de toxinas, que encuentran un entorno favorable y se expanden rápidamente en respuesta a la gran abundancia de nutrientes disponibles. Entre los roles ecológicos más importantes que desempeñan las HACB en los ecosistemas se encuentran la fijación de nitrógeno, la producción de oxígeno y su contribución a la formación de biofilms y comunidades microbianas. El impacto medioambiental de estos microorganismos es considerable, con una biomasa estimada en $3 * 10^{14}$ gC, equivalente a mil millones de toneladas de biomasa húmeda [Garcia-Pichel et al., 2003].

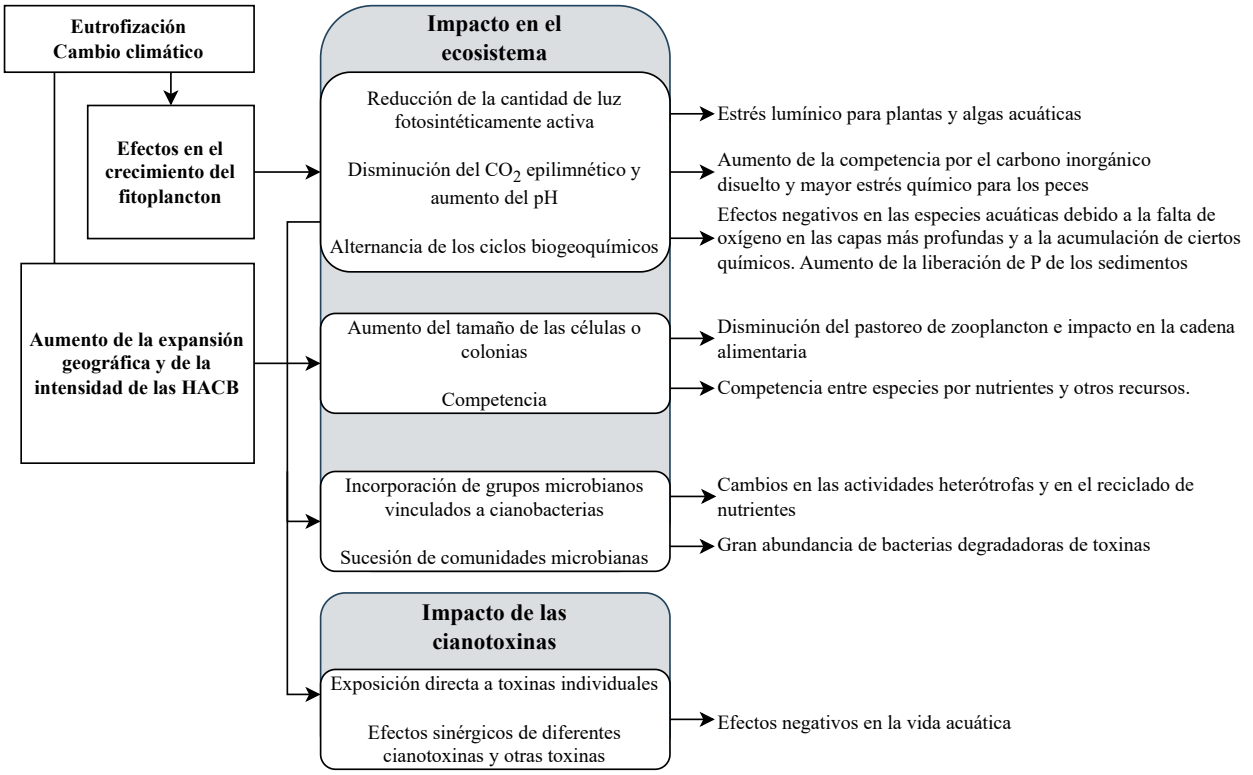


Figura 2.2: Impactos ambientales de las floraciones de cianobacterias (fuente: Sukenik et al. [2015]).

Debido a su gran resistencia y a su diversidad ecológica, las cianobacterias se pueden encontrar en una amplia variedad de hábitats terrestres y acuáticos, como océanos, suelos húmedos, agua dulce, rocas húmedas, rocas antárticas e incluso en el interior de piedras y conchas [Schirrmeister et al., 2015]. Es particularmente destacable, la interacción entre las cianobacterias y otros microorganismos presentes en los biofilms, como hongos y bacterias heterótrofas. Estas interacciones son fundamentales para la estabilidad y funcionalidad del biofilm, ya que facilitan el intercambio de nutrientes y proporcionan protección mutua.

2.1.2. Detección de cianobacterias

La eficaz detección de cianobacterias en masas de agua es un aspecto crucial para la correcta gestión de la calidad de agua y la prevención de las HACB. Actualmente, existen varios métodos de detección de cianobacterias, que van desde técnicas tradicionales hasta métodos basados en técnicas más avanzadas (Tabla 2.1). La identificación mediante microscopía sigue siendo a día de hoy uno de los métodos más importantes en la monitorización de cianobacterias. Permite observar las características morfológicas distintivas de cada tipo de cianobacteria [Rice et al., 2012]. Otro de los métodos tradicionales es el cultivo de muestras en medios selectivos para cianobacterias, el cual ayuda a aislar y cuantificar las especies presentes de forma controlada.

Entre los métodos moleculares se encuentran la reacción en cadena polimerasa (o PCR), la cual permite la amplificación de ADN específico de cianobacterias, facilitando su detección y cuantificación incluso en bajas concentraciones [Neilan et al., 1995]. La qPCR (PCR en tiempo real) no solo consigue detectar la presencia de cianobacterias, sino que también cuantifica la cantidad de ADN presente en la muestra, proporcionando información sobre la abundancia relativa [Vaitomaa et al., 2003].

Los métodos basados en sensores suponen un avance significativo en la detección eficaz de las cianobacterias. La detección de la fluorescencia se basa en la propiedad que tienen ciertos pigmentos presentes en las cianobacterias, como la clorofila-a, de emitir luz fluorescente cuando son excitados por una luz con una determinada longitud de onda. Dichos sensores pueden detectar esta luz emitida y, basándose en su intensidad, inferir la concentración de cianobacterias en el agua [Zamyadi et al., 2016]. La espectroscopia, por su parte, es capaz de diferenciar entre distintos tipos de fitoplancton incluyendo las cianobacterias, en base a la medición de la absorción y dispersión de luz en diferentes longitudes de onda [Wang et al., 2017]. Por último, los métodos basados en imágenes satelitales hacen uso de sensores ópticos acoplados a satélites que son capaces de detectar y especialmente monitorear HACB en grandes masas de agua, proporcionando datos de gran valor para la gestión ambiental [Coffer et al., 2021].

Una detección temprana de las HACB permite a las autoridades tomar medidas preventivas y correctivas antes de que las afloraciones alcancen niveles de alto riesgo, poniendo así en peligro la salud pública y el medio ambiente. A diferencia de los métodos tradicionales que dependen de la recolección manual de muestras y del posterior análisis en el laboratorio, los sistemas inteligentes pueden monitorear la calidad de agua de manera continua. Esto permite responder a eventos de afloración en cualquier momento. La automatización y el análisis inteligente reducen los costos económicos y la necesidad de recursos humanos, optimizando así el uso de los recursos disponibles.

A su vez, los modelos predictivos pueden anticipar la ocurrencia de HACB basándose en las variables ambientales medidas. Las HACB suelen estar asociadas con cambios en las condiciones ambientales de los ecosistemas acuáticos.

Con el objetivo de estimar la concentración y ubicación de las HACB dentro de los modelos de masas de agua utilizados, se emplean valores como la velocidad de las corrientes, temperatura del agua, radiación solar, densidad de oxígeno y densidad de nitratos. El modelo de masa de agua del Lago Washington (Estado de Washington, EE.UU.) obtenido a partir de un EEMS disponible, permite detectar los cambios ambientales y, por ende, las condiciones propicias para la aparición de afloraciones. De este modo, se utilizará la señal de concentración de algas como método de validación del modelo de inferencia de las HACB.

Tabla 2.1: Comparación de los métodos de detección de cianobacterias.

Método	Ventajas	Desventajas
Microscopía	Permite observar características morfológicas distintivas.	Requiere de personal especializado y supone un proceso laborioso.
Cultivo en medios selectivos	Ayuda a aislar y cuantificar especies de forma controlada.	Requiere de varios días y puede no detectar la totalidad de las especies presentes.
PCR	Detecta y cuantifica ADN específico de cianobacterias incluso en bajas concentraciones.	Requiere equipamiento especializado y costosos.
qPCR	Detecta y cuantifica la cantidad de ADN, proporcionando información sobre la abundancia relativa.	Similar a PCR, requiere equipamiento especializado y costosos.
Detección de fluorescencia	Puede inferir la concentración de cianobacterias mediante la fluorescencia de pigmentos específicos.	Puede ser afectada por la presencia de otras sustancias fluorescentes en el agua.
Espectroscopia	Diferencia entre distintos tipos de fitoplancton mediante la medición de absorción y dispersión de luz.	Requiere equipamiento especializado y puede ser afectada por partículas en suspensión.
Imágenes satelitales	Permite monitorear grandes masas de agua y detectar HACB.	Baja resolución espacial y temporal, y puede verse afectada por la cobertura de nubes.

2.2. Sistemas de alerta temprana

La existencia de una vigilancia/alerta temprana permite a las personas expuestas a cualquier peligro tomar medidas para evitar o reducir, en la medida de lo posible, su riesgo y prepararse para una respuesta eficaz. Según el informe del *United Nations Environment Programme* (UNEP) [Grasso and Singh, 2011], los principales elementos dentro de un EWS son los siguientes:

- **Conocimiento del riesgo**: Se basa en la recopilación sistemática de datos y en la evaluación de las vulnerabilidades y las capacidades de las comunidades y los sistemas para hacer frente a los riesgos. Este conocimiento permite a las autoridades responsables: realizar una toma de decisiones, obtener una mejor comprensión del riesgo y/o sustanciar un cambio de actitud hacia el mismo, orientar las inversiones hacia una mayor resiliencia, proveer de una mejor cobertura y reducir del número de catástrofes.

- **Vigilancia y predicción**: El principio fundamental de los EWSs se basa en la premisa de que una predicción precisa y temprana de los riesgos potenciales a corto y largo plazo asociados tanto a los peligros naturales como a los inducidos por el hombre, aumenta la probabilidad de mitigar el impacto de las catástrofes en la sociedad, la economía y el medio ambiente. Un sistema con capacidad de vigilancia y previsión permite estimar el riesgo potencial para las comunidades.

- **Difusión de la información**: Los sistemas de comunicación deben enviar mensajes de alerta a los lugares potencialmente afectados para alertar a los organismos gubernamentales locales y regionales. Un sistema de alerta eficaz requiere de un sistema de comunicación eficaz. Hay dos componentes críticos para la comunicación: una infraestructura *hardware*, que debe ser fiable y robusta, y una interacción adecuada entre los actores clave en el proceso. Los mensajes deben ser fiables, sintéticos y sencillos de entender tanto para las autoridades como para el público.

- **Respuesta**: La coordinación, la buena gobernanza y los planes de acción apropiados son fundamentales para una alerta temprana adecuada. Del mismo modo, la concienciación y la educación de la población general son aspectos esenciales de la mitigación de catástrofes. En concreto, los sistemas de alerta proporcionan avisos en cuestión de segundos en caso de terremotos, en días u horas para erupciones volcánicas, y en horas para tsunamis, mientras que los avisos de tornados ofrecen minutos de tiempo de respuesta.

Para determinar las características comunes de los EWSs, en el siguiente apartado se presentarán ejemplos concretos de EWSs actualmente desplegados. Dichos ejemplos proporcionarán una visión general de las características comunes de los sistemas, así como de las tecnologías y enfoques empleados en sus diseños.

2.2.1. Ejemplos de EWS

Se han escogido algunos ejemplos representativos de otros ámbitos de aplicación de interés público, tales como los sistemas de alerta para terremotos, alertas meteorológicas, medioambientales o de enfermedades infecciosas:

- **EWS para terremotos**: La agencia meteorológica japonesa (JMA, del inglés, *Japan Meteorological Agency*) opera uno de los sistemas de alerta temprana de terremotos (EEW, del inglés, *Earthquake Early Warning*) más avanzados y conocidos del mundo disponible desde el año 2007 [Doi, 2011]. El sistema está basado en un a red densa de sismómetros y otros tipos de sensores emplazados por todo Japón con el fin de detectar las ondas iniciales menos dañinas, denominadas ondas P, generadas por un terremoto. Se emplean sofisticados algoritmos para analizar los datos sísmicos para la estimación de la localización, magnitud e intensidad esperada del terremoto. Una vez se detectan las ondas P, el sistema calcula inmediatamente y evalúa los parámetros del terremoto. Si el terremoto se ha estimado como potencialmente peligroso, se genera una alerta a través de los distintos canales de comunicación del sistema EEW. Dichos canales incluyen transmisiones por televisión y radio, alertas en dispositivos móviles y otros sistemas públicos de notificación. La población en general es avisada para tomar medidas de protección inmediatas, como tirarse al suelo, ponerse a cubierto y esperar a las unidades de rescate si es necesario. Los sistemas automáticos en infraestructuras críticas, como el transporte y los servicios públicos, pueden también tomar medidas preventivas. El sistema EEW desarrollado por la JMA llega a cubrir todo el territorio de Japón por completo, lo cual refleja el riesgo al que se enfrenta esta región sísmicamente activa. La agencia también fomenta la educación de la población sobre las limitaciones técnicas y la precisión de los avisos, así como sobre las medidas que deben adoptarse en respuesta a ellos.

- **EWS para ciclones tropicales**: El centro nacional de huracanes (NHC, del inglés, *National Hurricane Center*) forma parte de los sistema desarrollados por el servicio meteorológico nacional (NWS, del inglés, *National Weather Service*) y es una parte crucial de los esfuerzos de Estados Unidos para monitorear, predecir y comunicar información sobre sistemas meteorológicos tropicales, especialmente huracanes [Sheets, 1990]. Tiene responsabilidades tanto nacionales como internacionales en los cinturones tropicales y subtropicales del Atlántico Norte y del Pacífico Norte oriental (incluidos el Golfo de México y el Mar Caribe). En estas áreas, realiza análisis tropicales, pronósticos marinos y de aviación, así como programas de pronóstico y alerta temprana de ciclones tropicales para la región. Aprovechando tecnologías avanzadas como imágenes de satélite, vuelos de reconocimiento de huracanes y modelos computacionales sofisticados, el NHC monitorea continuamente los patrones meteorológicos para predecir el desarrollo, la trayectoria y la intensidad de los huracanes.

- **EWS de inundaciones**: El sistemas europeo de información sobre inundaciones (EFAS, del inglés, *European Flood Awareness System*) es una iniciativa sofisticada desarrollada por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea para mejorar la preparación y respuesta ante inundaciones en toda Europa [Thielen et al., 2009]. EFAS utiliza modelos hidrológicos avanzados, datos meteorológicos en tiempo real y observaciones satelitales para proporcionar pronósticos precisos y oportunos de inundaciones para diferentes regiones. Este sistema de alerta temprana permite alertas de inundaciones, brindando a autoridades y comunidades un tiempo valioso para implementar medidas preventivas y coordinar respuestas de emergencia. EFAS es esencial para mejorar la resiliencia de las naciones europeas contra los impactos de las inundaciones, facilitando la colaboración y el intercambio de información para mejorar la conciencia y preparación para inundaciones en una escala continental. El modelo hidrológico LISFLOOD, utilizado por EFAS, se ha mejorado a tal punto que se incluido parametrizaciones cada vez más detalladas y una cobertura geográfica mayor. Este modelo incorpora diversos parámetros, como la topografía, el tipo de suelo y el uso del mismo, para simular los procesos hidrológicos que incluyen en el caudal de los ríos. Al mismo tiempo, EFAS hace uso de datos históricos y en tiempo real de estaciones de medición para calibrar y validar sus pronósticos.

- **EWS de incendios forestales**: El sistema australiano de alerta de incendios forestales (AWAS, del inglés, *Australian Wildfire Alert System*) está diseñado para proporcionar información precisa y oportuna al público y a los equipos de emergencia durante eventos de incendios forestales [Cao et al., 2017]. Este sistema de alerta temprana abarca diversas herramientas y canales de comunicación, incluidas alertas de emergencia entregadas a teléfonos móviles, advertencias transmitidas por televisión y radio, y actualizaciones en sitios web oficiales y plataformas de redes sociales. El sistema tiene como objetivo informar a los residentes sobre la ubicación, intensidad y trayectoria potencial de los incendios forestales, permitiéndoles tomar decisiones informadas sobre evacuaciones y otras medidas de protección. El AWAS es crucial para mejorar la seguridad y preparación comunitaria frente a las condiciones recurrentes y desafiantes de incendios forestales del país. Para obtener la información más reciente y precisa, la población debe consultar las actualizaciones de las autoridades australianas pertinentes.

- **EWS de enfermedades infecciosas**: El red mundial de alerta y Respuesta ante brotes epidémicos (GOARN, del inglés, *Global Outbreak Alert and Response Network*), establecido por la Organización Mundial de la Salud (WHO, del inglés, *World Health Organization*), proporciona recursos internacionales de salud pública para controlar brotes y emergencias de salud pública en todo el mundo [Mackenzie et al., 2014]. GOARN es una red de socios técnicos y otras redes de vigilancia coordinadas por la OMS. Dicha red está diseñada para proporcionar una respuesta rápida y adecuada a

brotes epidémicos y emergencias de salud pública a nivel mundial. Tiene un comité directivo que refleja la composición de instituciones técnicas y disciplinas necesarias para responder de manera integral a brotes. No obstante, también incluye una red de socios donde universidades, institutos de investigación, ministerios de salud y agencias internacionales se ven involucrados. Cada uno de los socios aporta su experiencia y recursos con el fin de apoyar las actividades de respuesta.

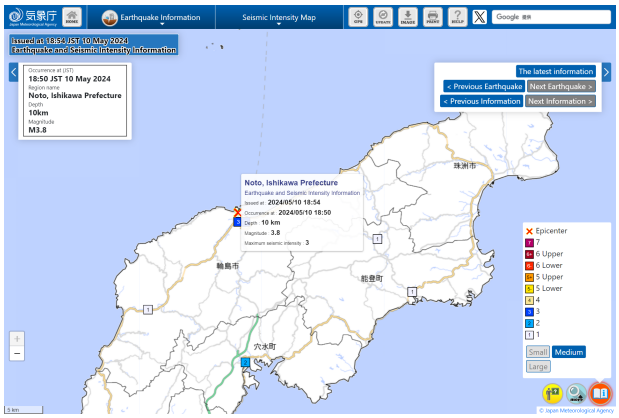
A continuación se presenta una comparativa de los sistemas mencionados anteriormente (Tabla 2.2), resaltando los prestaciones que ofrecen cada uno. Como se puede observar, los servicios que ofrecen los ejemplos de EWS incluyen alarmas, gestión de usuarios, monitoreo de datos históricos, análisis de datos y previsión. Se detallan las similitudes y diferencias entre los servicios proporcionados por los distintos EWS.

Tabla 2.2: Servicios proporcionados por los ejemplos anteriores de EWS. Los distintos sistemas pueden implementar los servicios mostrados de manera parcial (∼) o completa (✓). En otros casos, los servicios pueden no estar implementados en absoluto (✗).

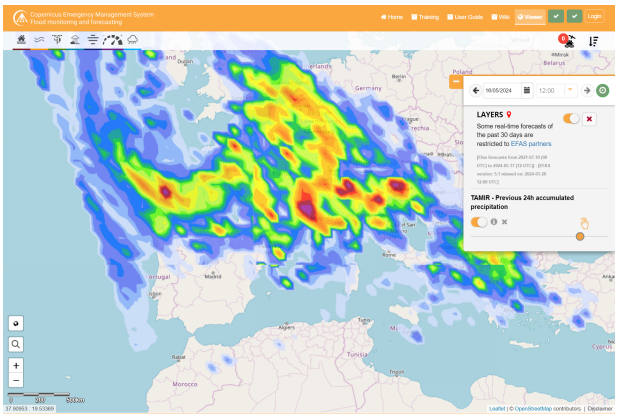
	Alarma	Usuarios	Monitoreo	Análisis de datos	Previsión
JMA	✓	✓	✓	✓	✗
NHC	✓	✓	✓	✓	✓
EFAS	✓	∼	✓	✓	✓
AWAS	✓	✓	✓	∼	✗
GOARN	✓	∼	✓	✓	✗
DEVS-BLOOM	✓	✓	✓	✓	✓

Aunque los ejemplos mostrados anteriormente no cumplen completamente con los requisitos del proyecto, han servido como referencia para orientar el desarrollo de los subsistemas (Figura 2.3). Es fundamental diseñar un EWS que proporcione los servicios específicos requeridos por los distintos equipos de trabajo. De este modo, se destaca la necesidad de elaborar un EWS específicamente diseñado para satisfacer las necesidades de todos los actores involucrados, como son los gestores de agua, los operadores de agua, los biólogos y los administradores del sistema. Esto incluye la integración de funcionalidades de alarma, gestión de usuarios, monitoreo de datos, análisis de datos y previsión en conjunto.

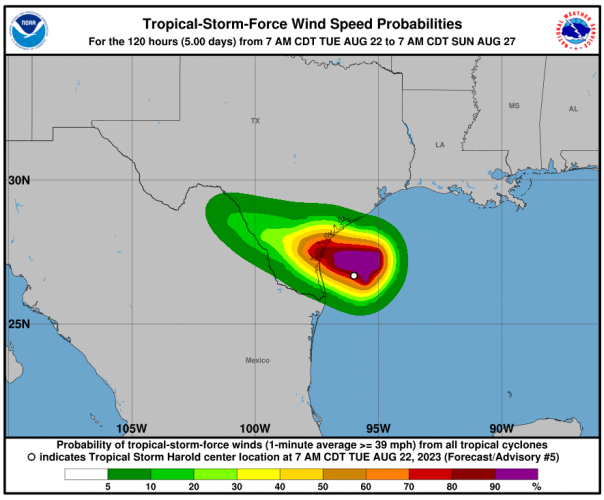
La capacidad de personalizar, adaptar y atender las recomendaciones sobre estos servicios según las necesidades específicas de cada grupo de usuarios es crucial para el éxito del sistema. Además, el EWS debe ser flexible y escalable para adaptarse a diferentes escenarios y condiciones cambiantes, permitiendo una respuesta rápida y efectiva ante situaciones de alerta.



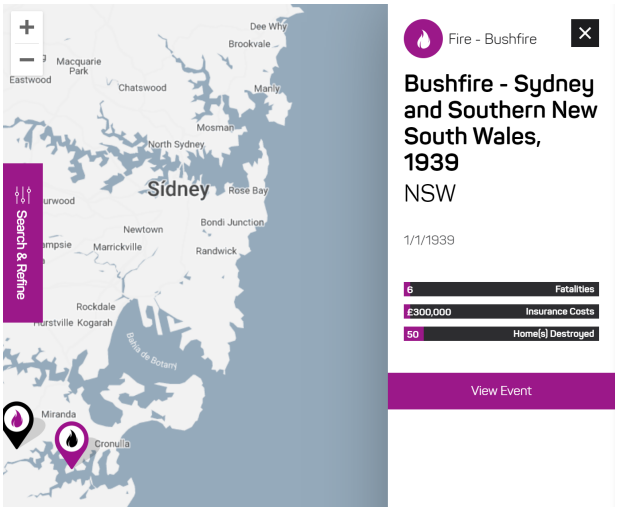
(a) Captura de pantalla del sistema JMA (fuente: Agency [2024a]).



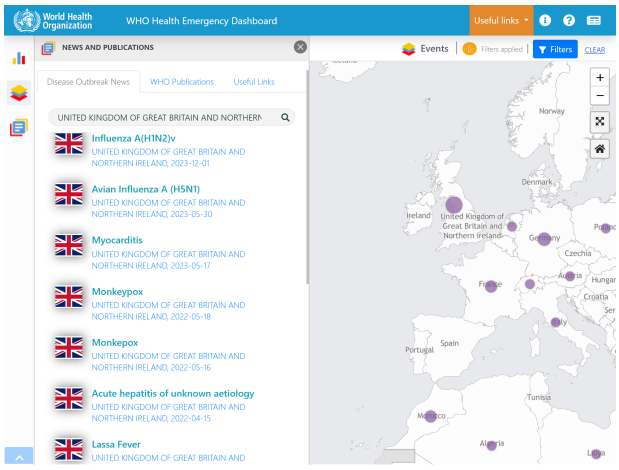
(b) Captura de pantalla del sistema EFAS (fuente: Agency [2024b]).



(c) Captura de pantalla del sistema NHC (fuente: Hazel [2024]).



(d) Captura de pantalla del sistema AWAS (fuente: Agency [2024b]).



(e) Captura de pantalla del sistema GOARN (fuente: Organization [2024]).

Figura 2.3: Capturas de pantalla de las aplicaciones correspondientes a los ejemplos de EWSs mostrados.

2.3. Tecnologías de M&S

Los modelos de aprendizaje automático se han utilizado para simular las afloraciones de algas nocivas HACB en sistemas acuáticos, comenzando con lo que se conoce como modelos base [Cruz et al., 2021]. Estos modelos base sirven como punto de partida y de referencia inicial, permitiendo desarrollar y entrenar modelos más complejos y precisos para lograr predicciones más exactas. Dichos modelos han demostrado ser herramientas efectivas para mejorar las estrategias de mitigación de las HACB, reducir las pérdidas en los sectores afectados y proporcionar a las agencias gubernamentales herramientas de decisión basadas en datos precisos y actualizados.

En el caso de las predicciones de las cianobacterias, los modelos base pueden incluir técnicas como la regresión lineal, la regresión logística, o métodos de vecinos más cercanos (k-NN), los cuales son relativamente fáciles de implementar y proporcionan un rendimiento bastante adecuado [Cosenza et al., 2021]. Sin embargo, se requiere de un formalismo común entre los modelos base y los modelos más avanzados, que permita la integración efectiva y escalable de los distintos subsistemas.

Representar la evolución de una idea puede ayudar a comprender sus complejidades a medida que se desarrollan. Los sistemas tradicionales de ecuaciones diferenciales, con estados continuos y tiempo continuo, se formularon bajo la clase Especificaciones del Sistema de Ecuaciones Diferenciales (DESS, del inglés, *Differential Equation System Specifications*). Los sistemas que operaban en tiempo discreto, como los autómatas, se formularon por medio de la clase Especificaciones de Sistemas en Tiempo Discreto (DTSS, del inglés, *Discrete-Time Systems Specifications*) [Zeigler et al., 2000]. En ambos casos, la representación matemática precedió a sus implementaciones informáticas; sin embargo, en el caso de la tercera clase, DEVS, ocurrió lo contrario.

El formalismo DEVS fue diseñado por Bernar P. Zeigler en el año 1975 [Hill, 2002]. Dentro del formalismo DEVS, se pueden diferenciar dos apartados: el modelo, compuesto por la estructura y comportamiento, y el simulador. DEVS es capaz de definir un modelo, especificar que contiene y que no. El modelo es totalmente ajeno a los parámetros de control de la simulación, y de este modo, se puede representar cualquier sistema que acepte eventos en el tiempo como entrada y genere eventos en el tiempo a la salida (Figura 2.4).

Los simuladores compatibles con los modelos de DEVS pueden realizar simulaciones de forma repetitiva y eficiente. La terminación de las simulaciones en base a acoplamiento garantiza la composición jerárquica de los componentes.



Figura 2.4: Modelo matemático genérico.

2.3.1. Visión general sobre DEVS

Los modelos de eventos discretos estaban atados en gran medida a sus implementaciones en lenguajes de simulación o expresiones de código algorítmico. De hecho, prevalecía la creencia de que las "visiones del mundo" de eventos discretos constituían nuevas formas mutantes de simulación, ajenas a los paradigmas tradicionales dominantes. Afortunadamente, esta situación ha empezado a cambiar a medida que se han hecho evidentes las ventajas de las abstracciones en el control y el diseño.

Los procesos atómicos de entrada en DEVS basados en modelos, generan eventos a la salida y transiciones al siguiente estado conforma a la siguiente tupla:

$$A = \langle X, Y, S, \delta_{ext}, \delta_{int}, \delta_{con}, \lambda, ta(s) \rangle \tag{2.1}$$

Donde:

- X es el conjunto de las entradas descritos en pares de puerto-valor $\{p \in In_Ports, v \in X_p\}$.
- Y es el conjunto de salidas, también descrita en pares de puerto-valor $\{p \in O_Ports, v \in Y_p\}$.
- El conjunto de estados secuenciales es definido con el parámetro S, donde

  $$Q = (s, e), \quad s \in S, \quad 0 \leq e \leq ta(s) \tag{2.2}$$

  representa el conjunto de estados, siendo e el tiempo transcurrido desde la última transición de estados.
- δ_{ext} es la función de transición externa, y es ejecutada de forma automática cuando aparece un evento externo en uno de los puertos de entrada del modelo atómico. Esto puede producir un cambio en el estado actual en caso de ser necesario.
- δ_{int} es la función de transición interna, la cual es ejecutada justo después de que la función de salida (λ) sea lanzada, y es empleado para cambiar el estado S.
- δ_{con} es la función de confluencia, y está sujeta a

  $$\delta_{con}(s, ta(s), \emptyset) = \delta_{int}(s) \tag{2.3}$$

  Esta transición es la encargada de determinar el estado actual en caso de existir un conflicto entre los eventos externos e internos.
- $ta(s)$ es conocido como la función de avance temporal.

- λ representa la función de salida. Cuando el tiempo transcurrido desde la última función de salida es igual a $ta(s)$, entones se ejecuta automáticamente λ.

La figura Figura 2.5 muestra un esquema del modelo atómico de DEVS, en el que se muestran las transiciones que presenta el modelo para un conjunto de estados S.

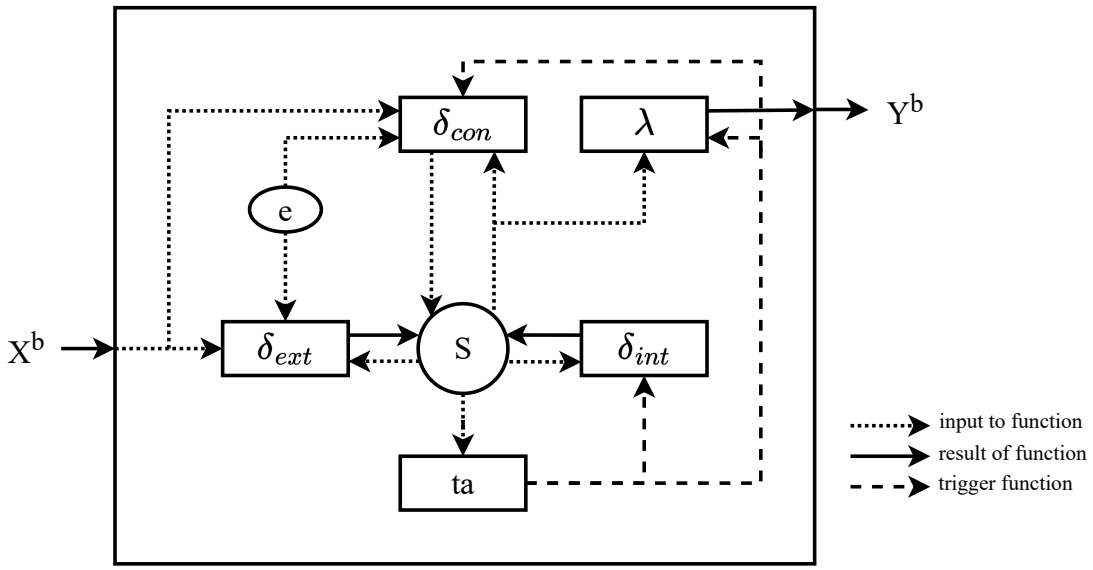


Figura 2.5: Esquemático del modelo atómico DEVS.

Se denominan modelos acoplados a aquellos que se componen de dos o más modelos atómicos y los cuales están conectados por acoplamientos explícitos. La definición formal de un modelo acoplado es descrito de la siguiente forma:

$$M = \langle X, Y, C, EIC, EOC, IC \rangle \tag{2.4}$$

Donde:

- X es el conjunto de las entradas descritos en pares de puerto-valor $\{p \in In_Ports, v \in X_p\}$.
- Y es el conjunto de salidas, también descrita en pares de puerto-valor $\{p \in O_Ports, v \in Y_p\}$.
- El conjunto de modelos de componentes DEVS, tanto atómicos como acoplados c_i, es representado por el parámetro C.
- EIC es la relación de acoplamiento de la entrada externa, de de las entradas externas M a las entradas de los componentes de C.
- EOC es la relación de acoplamiento de la salida externa, de los componentes de salida de C a las salidas externas de M.

- IC es la relación de acoplamiento interna, de los componentes de salida $c_i \in C$ a las salidas externas de M.

La siguiente Figura 2.6 muestra el esquema correspondiente al modelo DEVS acoplado correspondiente a la agrupación de submodelos c_i.

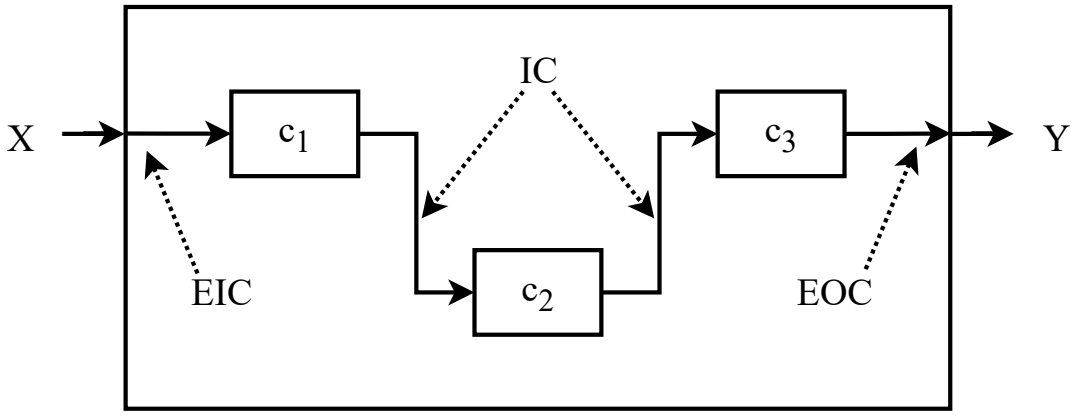


Figura 2.6: Esquemático del modelo acoplado DEVS.

Dada la anterior definición de modelo acoplado M, se puede definir un modelo acoplado aún más grande que agrupe dos o más modelos acoplados en su interior, dando lugar a la construcción de de un modelo DEVS jerárquico.

Una vez que el sistema se haya descrito siguiendo los principios de la teoría DEVS, se puede implementar fácilmente utilizando uno de los muchos motores de simulación DEVS desarrollados en las últimas décadas. Entre estos motores se encuentra xDEVS Risco-Martín et al. [2022], un simulador DEVS multiplataforma. Esta librería incluye un conjunto de repositorios C,C++,C#, Go, Java, Python y Rust que proveen interfaces equivalentes en DEVS.

En concreto, el modelo acoplado DEVS-BLOOM emplea el módulo porporcionado por el proyecto denominado xDEVS/Python. Al igual que ocurría en xDEVS, el marco de trabajo del proyecto es capaz de utilizar tiempo virtual o real, además, puede ejecutar simulaciones secuenciales o paralelas sin modificar una sola línea de código del modelo de simulación subyacente. Proporcionando con ello una solución excepcional para simulaciones secuenciales, en tiempo real, paralelas o distribuidas.

2.3.2. Integración en tiempo real

En el contexto de M&S, la integración en tiempo real se refiere a la capacidad de ejecutar un modelo de simulación en sincronización con el tiempo del mundo real. Esto permite que la simulación responda a eventos externos e interactúe con dispositivos reales de manera oportuna y coordinada. El marco que proporciona DEVS garantiza el desarrollo de aplicaciones embebidas de forma incremental cuya integración del *hardware* en los modelos se simulación se realiza de forma transparente [Moallemi and Wainer, 2010, Saadawi and Wainer, 2009].

En el caso del motor de simulación xDEVS, la integración en tiempo real se logra mediante el uso de la clase `RealTimeCoordinator`. Dicha clase no es más que una extensión de la clase `Coordinator` de xDEVS, diseñada específicamente para permitir la simulación en tiempo real. Introduce el concepto de *sigma waiting*, donde el coordinador se mantiene en espera durante un tiempo sigma de los modelos hasta que las funciones de salida y transición sean ejecutadas. Esto garantiza que la simulación progrese de acuerdo con el tiempo del mundo real, permitiendo respuestas sincronizadas.

Además de la clase `RealTimeCoordinator`, este trabajo introduce una nueva clase gestora llamada `RealTimeManager`. Es responsable de la administración de los eventos externos procedentes de dispositivos reales, tales como sensores reales o actuadores. Esto permite la gestión simultánea de componentes virtuales y reales dentro del modelo de simulación. Desde la perspectiva de la simulación, el dispositivo de *hardware* se trata como un modelo atómico, a modo de sombra digital, lo que permite una integración e interacción sin fisuras. Permite por lo tanto desplegar incrementalmente el complejo EWS, sustituyendo los elementos virtuales por sus homólogos reales.

La Figura 2.7 ilustra cómo la clase de coordinador xDEVS `RealTimeCoordinator` [Fernández Sebastián, 2023] ha sido ligeramente modificada para incorporar la figura del controlador `RealTimeManager`.

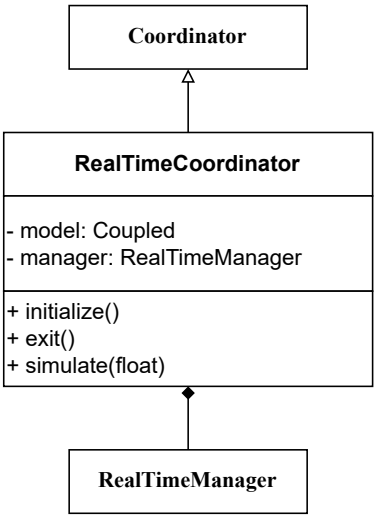


Figura 2.7: *Unified Modeling Languague* (UML) diagrama de la clase RealTimeCoordinator.

El papel principal del `RealTimeManager` es recoger los mensajes entrantes y dirigirlos hacia el `RealTimeCoordinator`, así como reprogramar las correspondientes funciones de transición externas. El `RealTimeCoordinator` también es responsable de coordinar tanto los eventos externos como los eventos internos del modelo DEVS. Los detalles de implementación del mecanismo de entrada/salida para el manejo de dispositivos reales se proporcionarán en la Subsección 3.3.2 de este documento.

Capítulo 3

Descripción del sistema y propuesta

En este capítulo se define la estructura y el marco de trabajo desarrollado a lo largo del proyecto de investigación para el modelo DEVS-BLOOM. Se mostrará en primer lugar el formalismo IoT empleado en el diseño del sistema, así como los principales componentes que lo conforman. A continuación se presentará el proceso de creación de sistemas basados en modelos y su posterior transición a co-simulación de hardware orientada a eventos.

3.1. Paradigma IoT

La concepción, el diseño y el despliegue de un EWS pueden plantear complejos retos de ingeniería y sistemas. Para llevar a cabo de manera adecuada la monitorización y previsión de las HACB, el sistema debe cubrir grandes áreas geográficas, permanecer operativo durante largos periodos de tiempo e incluir una gran variedades de sensores, USVs y datos en general. Es primordial garantizar una correcta gestión de los recursos, el equilibrio de la carga de datos y la ágil provisión de recursos cara al gestor, para lograr un rendimiento óptimo dada la magnitud del sistema [Mijuskovic et al., 2021].

El EWS pretende integrar la adquisición automatizada de datos con la simulación parametrizada de modelos. Se pueden encontrar en la literatura múltiples ejemplos de distintos campos de la ciencia que hacen uso de tecnologías IoT para el monitoreo de eventos sin intervención humana, como apoyo a la industria de la salud en Kondaka et al. [2022], para el monitoreo ambiental en Wang et al. [2019] o para el Big Data en Fioccola et al. [2016]. En estos trabajos se destaca la importancia de la tecnología IoT en la recopilación de datos a través de sensores conectados, facilitando la gestión de datos a gran escala y promoviendo la estructuración bajo un mismo modelo que mejora la organización de los proyectos.

En consonancia con el paradigma IoT, el enfoque del proyecto se ha dividido en tres capas distintas, como se muestra en el pre-diseño de alto nivel ilustrado en la Figura 3.1. Cada una de estas capas comprende los diversos subsistemas necesarios para abordar el desafío al que se enfrenta el EWS:

- **Capa Edge**: La capa Edge se encarga de agregar los componentes físicos del sistema, como sensores, estaciones meteorológicas, los USVs y dispositivos conectados a internet. Estos elementos miden las condiciones del medio acuático y son coordinados por la Estación de Control en Tierra (GCS, del inglés, *Ground Control Station*) situado en la capa intermedia, denominada como capa Fog.

- **Capa Fog**: Dentro de esta capa, se encuentra la GCS, la cual emplea un servicio de inferencia para predecir la aparición de HACBs y dirigir cada uno de los USV, asegurándose de que los sensores de a bordo se dirijan a las regiones adecuadas de medición. De este modo, se aborda la necesidad crítica de capacidades avanzadas de un EWS.

- **Capa Cloud**: Los datos se almacenan en servidores dentro del último nivel, denominado capa Cloud, donde también se elaboran informes y notificaciones para los gestores del agua. Además, los modelos de inferencia, análisis de datos y alerta se entrenan en la nube a partir de los datos históricos archivados. Es importante que el intercambio de información, la ejecución de la lógica de control y los bucles de entrenamiento entre las capas, se realicen en una configuración de bucle cerrado.

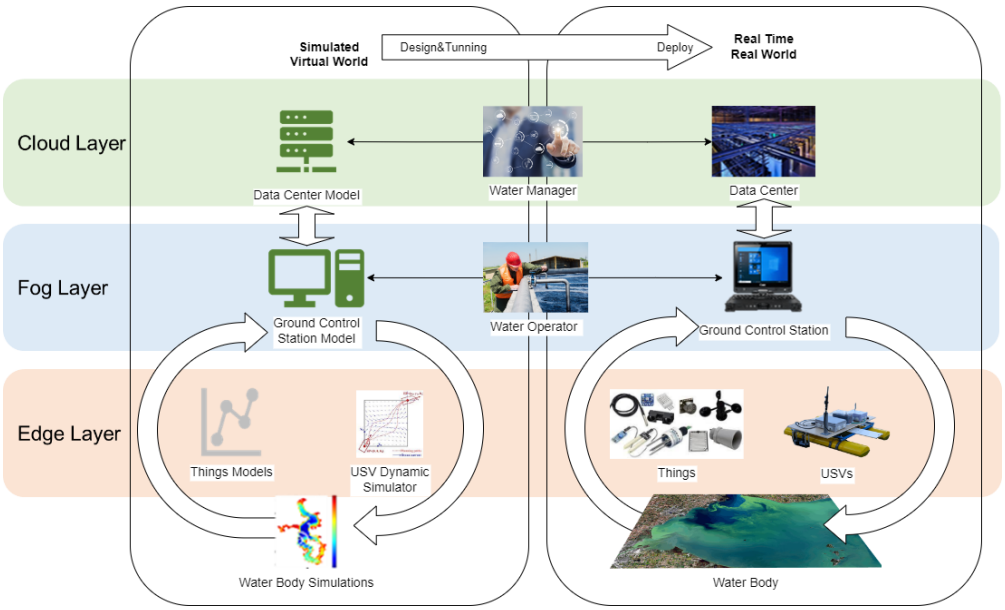


Figura 3.1: Pre-diseño simulado del proyecto por capas IoT que permite un posterior despliegue real.

Debido a la propia naturaleza de la organización mostrada, se dota al sistema de una excelente escalabilidad. Las comunicaciones entre capas se gestionarán en un futuro a través del uso de protocolos y tecnologías de red adecuadas a cada contexto. En la capa Edge, se pueden emplear protocolos de comunicación eficientes como *Message Queuing Telemetry Transport* para la transmisión de datos entre dispositivos IoT [Hwang et al., 2016]. En la

capa Fog, donde se realizan procesos intermedios de datos, se pueden utilizar protocolos como *Constrained Application Protocol* para garantizar la confidencialidad y la integridad de los datos transmitidos [Alhaidari and Alqahtani, 2020]. La capa Cloud, por su parte, ya hace uso del protocolo HTTP [Al-Masri et al., 2020] para la comunicación con los servidores alojados en la nube. De este modo, la estructura empleada es capaz de gestionar eficazmente toda la información y los datos involucrados en la predicción y prevención de riesgos ambientales en aguas intercontinentales.

El marco de M&S utilizado se alimenta a partir de datos procedentes de la masa de agua, sea esta real o de una base de datos que, a su vez, puede almacenar datos auténticos o sintéticos. La dualidad entre lo virtual y lo real desarrollada en algunos componentes permite al sistema DEVS-BLOOM trabajar en modo virtual, real o híbrido.

Toda la información generada por los modelos de simulación o tomada por sensores reales se registra en una base de datos global que reside en la capa Cloud, tal y como se muestra en la Figura 3.2. Existe una base de datos por cada uno de los directorios correspondientes a cada modelo de masa de agua. Los datos se organizan en subcarpetas en función de la fecha de recogida de la información. De esta forma, es posible tener registrados múltiples modelos simulados y reales para una misma masa de agua. Los datos almacenados se clasifican en datos de sensores del sistema (Sensor*), datos de afloración (Bloom*) y datos de USV (USV*) entre otros.

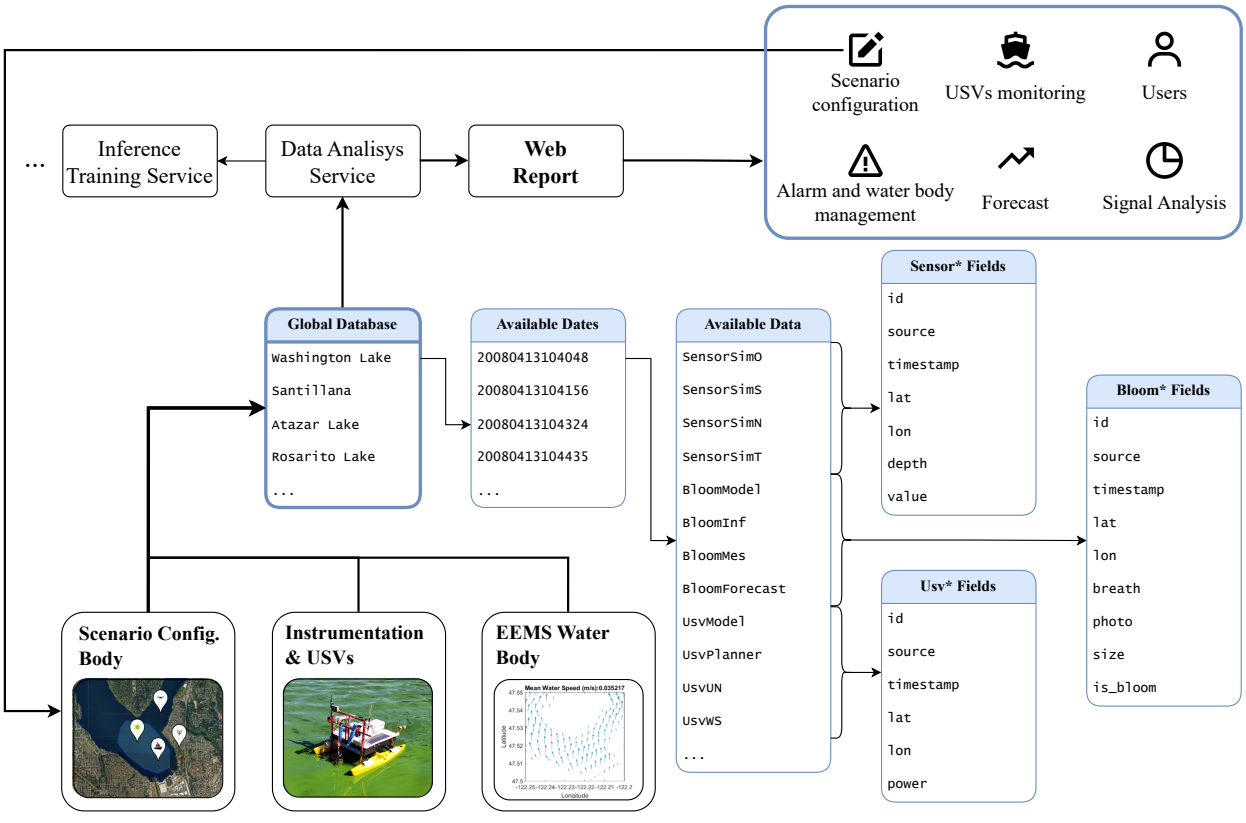


Figura 3.2: Diagrama relacional del modelo DEVS-BLOOM Cloud.

Si bien los datos comparten campos comunes como el identificador, la fuente, la marca de tiempo, la latitud y la longitud, como puede verse, existen diferencias entre los distintos tipos de datos. Esto, unido a la gran cantidad de información que se debe manejar, hace imposible que el gestor pueda hacer una evaluación eficaz de las HACB a partir del uso de datos en bruto. Por este motivo, el EWS debe incorporar una interfaz agradable para el usuario alojada en la capa Cloud, lo que representa una ventaja considerable para la visualización eficaz del comportamiento de los HACB y los dispositivos de vigilancia frente a otros ejemplos.

Antes de considerar el despliegue del sistema, se debe asegurar que los mencionados bucles de control cerrados devuelvan salidas estables para evitar posibles daños materiales o biológicos. Por lo tanto, los modelos de inferencia deben entrenarse meticulosamente antes del despliegue. Además, tras este entrenamiento, es necesario verificar el comportamiento del sistema de forma simulada.

3.2. Proceso de modelado y simulación

El inicio de la etapa de diseño implica la creación de un modelo preliminar que capture los subsistemas y las interacciones entre ellos. Es esencial discutir los aspectos clave del diseño, como la definición de la lógica, la temporización y el formato de los mensajes entre los diferentes componentes del sistema.

Se parte del diseño de un modelo acoplado que captura la descripción del sistema. En dicho diseño preliminar, se irán definiendo los modelos atómicos y las conexiones hasta obtener un modelo que capture el comportamiento fundamental del sistema mediante un proceso iterativo. La Figura 3.3 muestra un diseño de modelo acoplado de un posible caso de uso del EWS, donde ya se pueden apreciar los subsistemas que lo forman y el flujo de información entre ellos. Los componentes incluidos son: los `Dispositivos` y el USV simulados en la capa Edge, el planificador del barco; el planificador del barco, el modelo de inferencia de HACB y la base de datos locales en el modelo acoplado GCS simulado dentro de la capa Fog; el entrenamiento del modelo de inferencia y la base de datos globales alojados en un servidor simulado dentro la capa Cloud.

Las unidades *hardware* que constituyen el sistema aún no están disponibles, por lo que se utilizan archivos de entrada para emular los eventos. Como se pudo observar, el modelo de inferencia de HACB alojado dentro del GCS, se sintoniza a partir del entrenamiento realizado con datos en la nube. El objetivo principal de esta etapa, al fin y al cabo, es definir la lógica, la temporización y el formato de los mensajes entre los modelos atómicos/acoplados.

A partir de este diseño de alto nivel, las decisiones de diseño se toman de forma iterativa, desde: la estructura de carpetas y archivos; la temporización de los mensajes; el tipo de mensajes; la separación entre entre servicios y modelos, etc.

Por ejemplo, a través de este proceso, se ha llegado a la conclusión de que lo más acon-

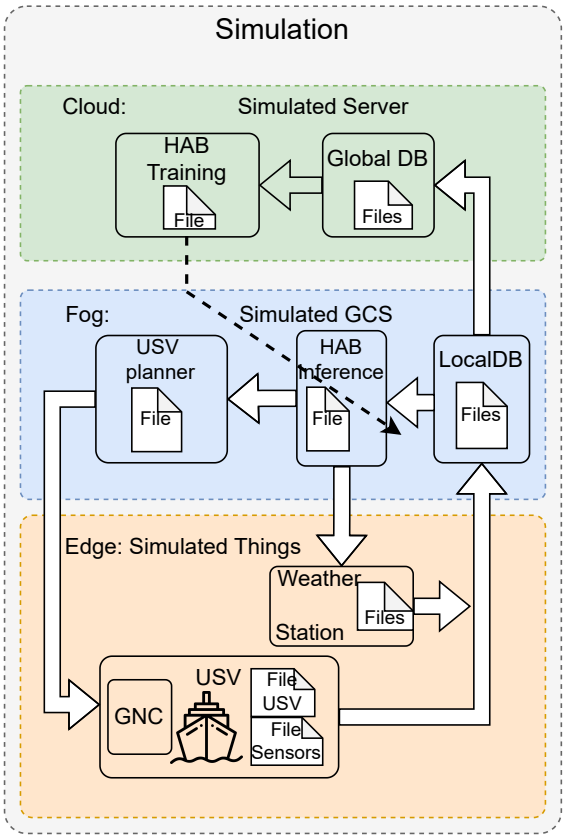


Figura 3.3: Diseño preliminar del marco de trabajo. En esta fase, se utilizan archivos de entrada para emular los acontecimientos.

sejable es generalizar las comunicaciones entre subsistemas y utilizar una única clase de mensajes genérica para todo el entorno, como se muestra a continuación:

```
1 class Event:
2     # A message to model events.
3     id: str
4     source: str
5     timestamp: datetime = field(default_factory=datetime.now)
6     payload: dict = field(default_factory=dict)
```

La principal diferencia entre la clase `Event` y las otras clases orientadas a eventos (como `DataEventId`, `EnergyEventId`, `ensorEventId`, `CommandEventId`) es que `Event` es una clase con atributos que representan un evento genérico de datos, mientras que las otras clases enumeradas definen tipos específicos de eventos (como eventos de datos, eventos de energía, eventos de sensores y eventos de comandos).

El potencial de los diccionarios en Python, utilizados en el campo `payload`, permite que todos los puertos del entorno compartan la misma clase de evento. Esto simplifica sustancialmente el desarrollo de informes web y la creación de escenarios gráficos.

3.2.1. Entorno simulado

Se ha creado un servicio denominado `SimBody` para consultar el estado físico y biológico de la masa de agua en un momento dado. Este servicio utiliza internamente un fichero .nc generado previamente con EEMS. Su uso en Python es bastante sencillo, como se ve a continuación en el siguiente código.

```
bodyfile: str = "./data/Washington-1m-2008-09_UGRID.nc"
simbody: SimBody = SimBody("SimWater", bodyfile)
```

Este servicio se utilizará en el servidor para preentrenar el modelo de inferencia con el objetivo de generar predicciones aceptables desde el inicio de la simulación. Entrenar estos modelos antes de su despliegue es esencial para evitar daños en el sistema, ya que se establece una referencia para el bucle de control. Posteriormente, durante la simulación o en el funcionamiento real del sistema, el entrenamiento del modelo de inferencia se realiza exclusivamente con información procedente de las capas inferiores.

Desde un punto de vista computacional, las simulaciones con EEMS y el tamaño del fichero resultante, resultan bastante costosos. Además, los ficheros generados por el EEMS son pesados y costosos. Por ello, este simulador se ejecuta en la capa Cloud en servidores que pueden contener múltiples simulaciones de varias masas de agua. Para proporcionar acceso al `SimBody` desde las otras capas, se ha construido un servicio web llamado `RestBody`. Este servicio se ha creado utilizando la librería FLASK, y las comunicaciones con el servicio se han realizado en formato JSON. El código siguiente muestra la facilidad de uso de este servicio, y es completamente transparente para el usuario en la capa donde reside:

```
simbody: SimBody =  RestBody("SimWater",
                    host="http://pc-xxx.xxx.es:xxxx",
                    bodyfile= "Washington-1m-2008-09_UGRID.nc")
```

3.2.2. Dispositivos simulados

Algunos estudios anteriores muestran cómo desarrollar un modelo de entorno para predecir la fiabilidad y la disponibilidad cuando el *hardware* real es inaccesible Sinha et al. [2021]. En la presente investigación, el servicio `SimBody` también es empleado por los sensores simulados para mejorar su funcionalidad y proporcionar datos valiosos para la simulación, como se muestra a continuación. El emparejamiento y calibración de los sensores virtuales con los sensores reales es llevado a cabo gracias a la clase `sensor_info`.

```
sensor_info_n = SensorInfo(id=SensorEventId.NOX,
                description="Nitrogen Sensor (mg/L)",
                tinit=10, tmeasuring=6, max=0.5, min=0.0,
                precision=0.1, noisebias=0.01, noisesigma=0.001)
sensor_n = SimSensor("SimSenN", simbody, sensor_info_n)
```

Este fragmento de código define un modelo de sensor de nitrógeno (NOX) en Python. La clase `SensorInfo` se utiliza para especificar parámetros como el identificador del sensor, la descripción, el tiempo de medición, los valores máximos y mínimos, la precisión, el sesgo del ruido y el sigma de ruido.

La clase `SimSensor` crea entonces una instancia de un modelo atómico DEVS llamado "SimSenN" utilizando la información especificada del sensor y del cuerpo simulado (`Simbody`). Como resultado, se establecen las características propias de un sensor de nitrógeno y crea un objeto de simulación para él.

El comportamiento lógico de cada uno de los sensores se emula mediante un modelo atómico que incluye la lógica de estado que se muestra en la Figura 3.4. El comportamiento funcional del sensor es proporcionado por el servicio `SimBody`.

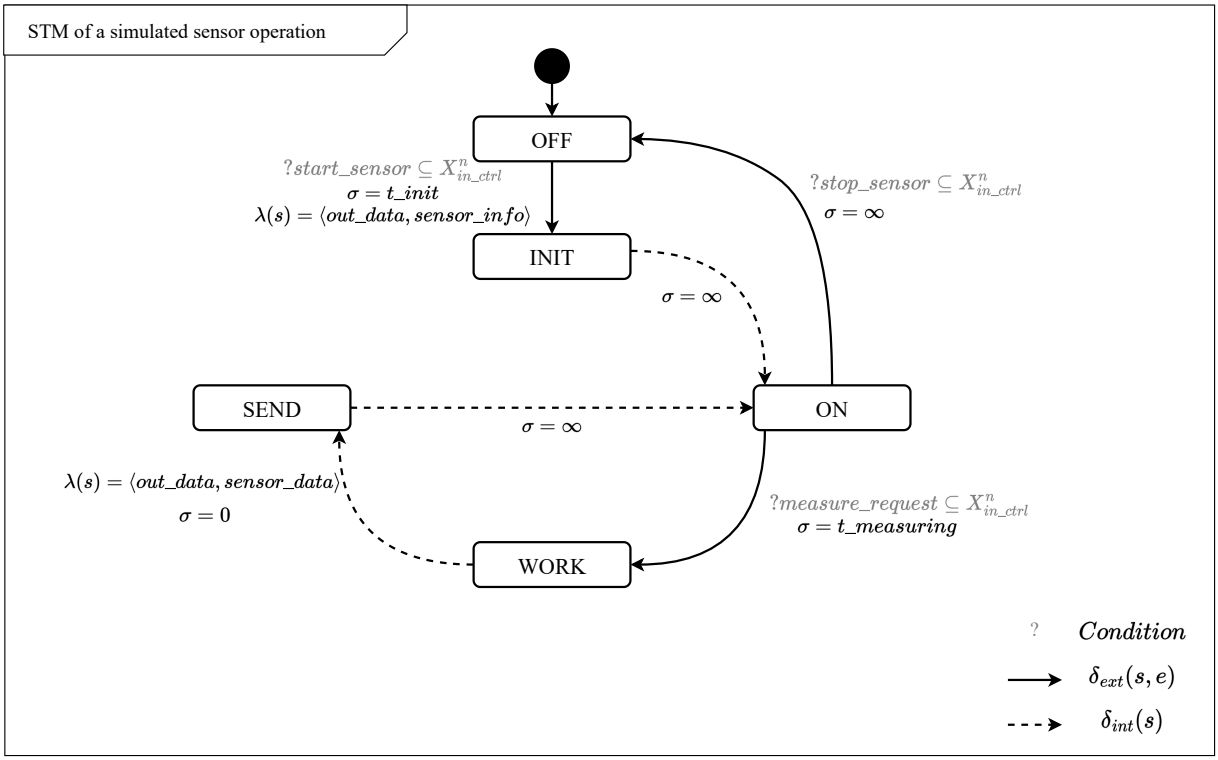


Figura 3.4: Máquina de estados de la operación de los sensores simulados.

La lógica del sensor incluye los siguientes estados y transiciones:

- **OFF**: El sensor se encuentra en espera de una orden de control de activación por parte del simulador que llegará por el puerto de control in_{ctrl}.
- **INIT**: Cuando el sensor se activa, tarda un tiempo $\sigma = t_{init}$ en sincronizar la hora y en devolver sus especificaciones a través del mensaje de tipo $sensor_{info}$.
- **ON**: El sensor está esperando una petición de medida o una orden de control de parada ($\sigma = \infty$). En este estado el sensor se encuentra totalmente operativo.

- **WORK**: Cuando se solicita una medición, el sensor tarda un intervalo de tiempo $t_{measuring}$ en obtener la medición. Inmediatamente, el valor de σ para a ser 0, provocando una transición de estado interna.

- **SEND**: El sensor envía al simulador la medida registrada y se realiza una transición al estado ON para reiniciar el ciclo de operación.

Uno de los `Dispositivos` más complejos de modelar son los USVs, ya que tienen un comportamiento dinámico que está sujeto a las acciones de control y a las perturbaciones del entorno. Por este motivo, se requiere de un modelo acoplado que, además de incluir sensores simulados, debe incluir un modelo atómico que describa la dinámica del USV. Este comportamiento dinámico puede modelarse como una ecuación diferencial bidimensional de segundo orden, como se muestra en la Ecuación 3.1.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 usv_{pos}}{dt^2} &= usv_{con}(t) + usv_{drg}(t) \\ usv_{con}(t) &= K_p \cdot (usv_{ref}(t) - usv_{pos}(t)) \\ usv_{drg}(t) &= K_{usv} \cdot \left(water_{vel}(t, usv_{pos}) - \frac{dusv_{pos}}{dt} \right) \\ &\textit{Subject to Control Saturation} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Donde la dinámica del barco incluye un control proporcional al error de la posición se denomina $usv_{con}(t)$, y la perturbación de arrastre por corrientes de agua, $usv_{drg}(t)$. Gracias a esta perturbación, el barco seguirá la afloración con un mínimo gasto de energía, ya que será arrastrado por las corrientes en la misma dirección. La señal de velocidad del agua es obtenida mediante el servicio `SimBody`. Además, se debe aplica una saturación tanto en las señales de control como en la dinámica de los barcos para aumentar su similitud con el modelo real. Esta técnica además garantiza que las señales no excedan los límites físicos del sistema y asegura un rendimiento más seguro y predecible del sistema.

En el sistema diseñado, el modelo del control del USV resuelve la Ecuación 3.1 para obtener la acción de control correspondiente en función del punto objetivo entregado por el planificador y la posición actual del barco. Para mejorar el desempeño del controlador del USV, se requiere de un conjunto de parámetros como la velocidad máxima, el error mínimo de distancia al punto objetivo y las ganancias del controlador. Se emplean técnicas geométricas simples para calcular la trayectoria deseada.

El modelo del barco por su parte, tiene en cuenta varios aspectos como la dinámica del barco, la influencia del viento y la corriente, y la respuesta a los comandos de control. En versiones posteriores, se han incluido modelos destinados al comportamiento computacional del barco, al control de las comunicaciones, al consumo de potencia, entre otros.

3.2.3. Modelo de inferencia

Inicialmente, se ha implementado un modelo de inferencia sencillo, mostrado en la Ecuación 3.2, que será sustituido por modelos más completos en el futuro. Una ecuación diferencial bidimensional de segundo orden modela la posición de la afloración, mientras que una ecuación diferencial de primer orden modela la densidad de la afloración.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 blm_{pos}}{dt^2} &= K_{drg} \cdot \left(water_{vel}(t, blm_{pos}) - \frac{dblm_{pos}}{dt} \right) \\ \frac{dblm_{den}}{dt} &= K_{pho} \cdot sun(t) \cdot nox(t, blm_{pos}) + K_{oxi} \cdot dox(t, blm_{pos}) \cdot nox(t, blm_{pos}) \\ & \textit{Subject to Bloom Saturation} \end{aligned} \tag{3.2}$$

Mientras que la primera ecuación modela la posición bidimensional de la afloración, blm_{pos}, que es arrastrada por las corrientes de agua, la segunda ecuación calcula la densidad de la afloración, blm_{den}. Cuando existe radiación solar, el crecimiento de la densidad es proporcional a la fotosíntesis de nitratos $K_{pho}(sun(k) \cdot nox(k))$. Durante las noches, si hay oxígeno, el crecimiento se debe únicamente a la oxidación de nitratos $K_{oxi} \cdot dox(k) \cdot nox(k)$. De forma análoga a lo que sucedía en la ecuación Ecuación 3.1, las señales propias de la afloración deben mantenerse entre valores razonables para garantizar la estabilidad del sistema. Los sensores reales o simulados deben suministrar la velocidad del agua, la radiación solar, el oxígeno y los nitratos. En la simulación, pueden obtenerse utilizando el servicio `Simbody`.

Una vez se dispone de nuevos datos, se entrena el modelo de inferencia. Sólo si el supervisor considera que el nuevo entrenamiento proporciona resultados significativamente mejores, se actualizan los parámetros del modelo. En la versión actual, se realiza un entrenamiento por mínimos cuadrados, con lo que se busca reducir el error entre las predicciones realizadas por el modelo de inferencia y las proporcionadas por los sensores (Ecuación 3.3).

A modo de validación del modelo, se comparan los resultados obtenidos a través del servicio de inferencia y los datos reales, y se activa el servicio de entrenamiento para minimizar el error, tal y como se propone en Herguedas-Pinedo et al. [2023]. El servicio emplea el error medio aritmético para ajustar los parámetros del modelo de inferencia. Una vez finalizado el entrenamiento, se obtienen nuevos valores para los parámetros del modelo, los cuales se utilizan para relanzar una nueva simulación con un modelo predictivo aún más preciso.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{K}_{pho} \\ \hat{K}_{oxi} \end{bmatrix} &= \underset{K_{pho}, K_{oxi}}{\operatorname{argmin}} \sum_{t=t_0}^{t_{end}} \left(EEMS_{den}(t) - blm_{den}(t, K_{pho}, K_{oxi}) \right)^2 \\ \hat{K}_{drg} &= \underset{K_{drg}}{\operatorname{argmin}} \sum_{t=t_0}^{t_{end}} \left(EEMS_{pos}(t) - blm_{pos}(t, K_{drg}) \right)^2 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Donde $EEMS_{den}(t)$ es la densidad máxima encontrada en el mapa generado por EEMS para un tiempo t y $EEMS_{pos}(t)$ es la posición bidimensional donde se encuentra dicha densidad máxima. Estos valores pueden calcularse previamente en la capa Cloud basándose en el mapa de densidad del EEMS. El entrenamiento genera nuevas constantes para el modelo de inferencia, que se envían a la capa Fog para ser utilizadas en futuras inferencias. En la Figura 3.5 se presenta una arquitectura DEVS del simulador para un caso de control de afloración, en donde las fuentes de datos de la capa Edge provienen de un USV y una estación meteorológica simuladas.

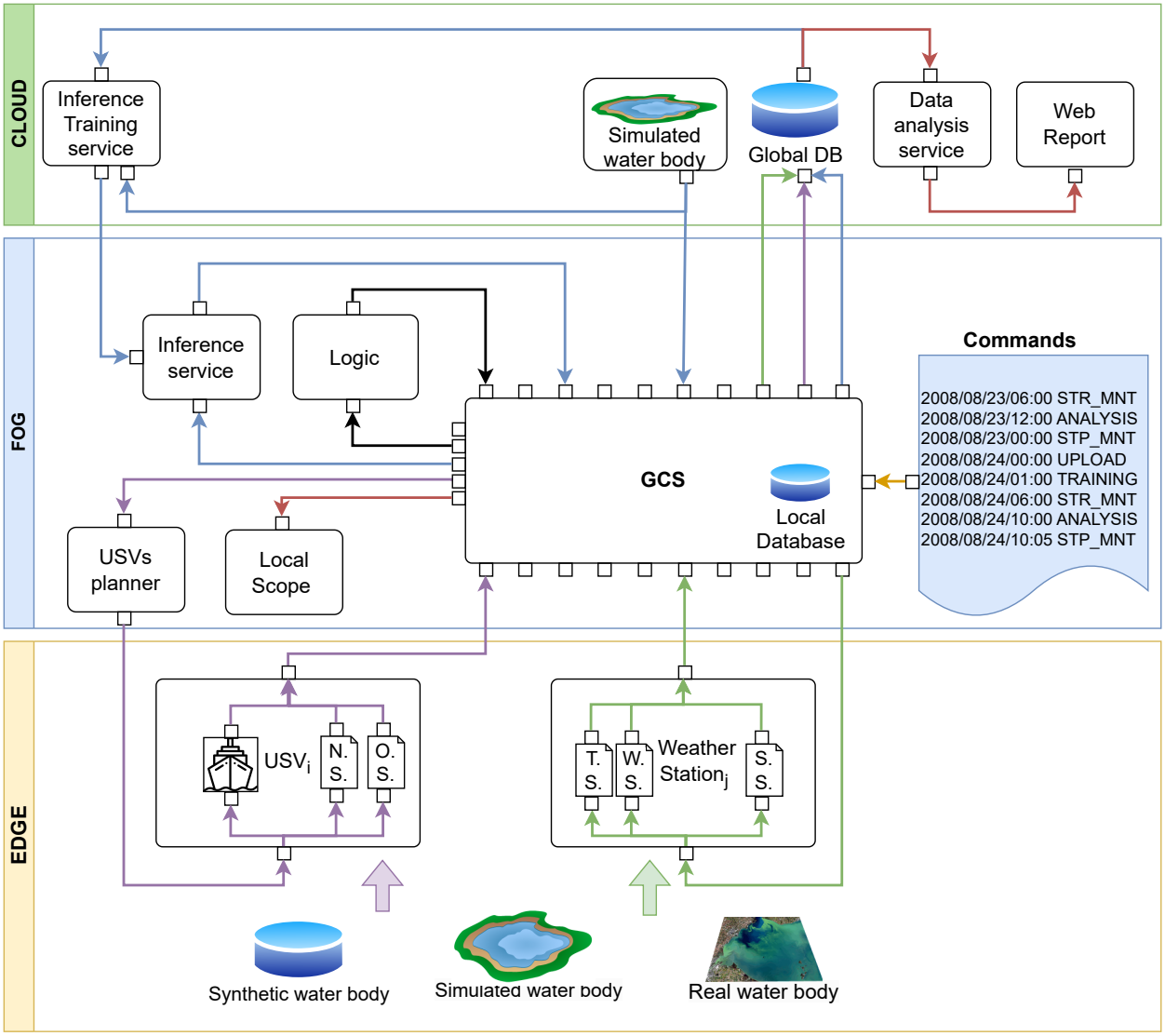


Figura 3.5: Modelo acoplado de la arquitectura del monitoreo de HACB empleando un servicio de inferencia (sistema DEVS-BLOOM).

Este modelo acoplado ya permite verificar el comportamiento funcional del modelo de inferencia y su entrenamiento de forma simulada. La Figura 3.6 muestra una representación ampliada de una evolución del seguimiento y monitorización de una afloración de algas por el USV. En esta figura se muestra la posición indicada por el modelo de inferencia y la

posición alcanzada por el USV, todo ello proporcionado por el mapa de densidad de algas del EEMS. Analizando la evolución temporal de la simulación y su representación visual, se puede comprobar que el modelo de inferencia funciona correctamente.

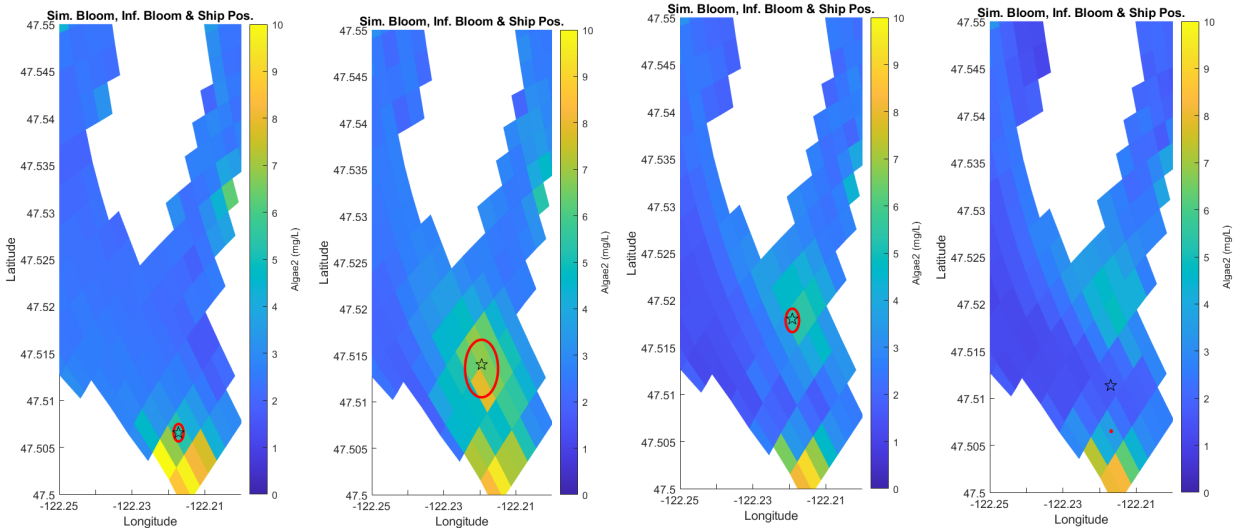


Figura 3.6: Representación detallada durante una simulación del seguimiento de las afloraciones de algas. Los gráficos muestran el mapa de la densidad de algas en la capa superficial, la posición del USV (estrella negra), y la posición y densidad de la afloración inferida (círculo rojo). Cada gráfico muestra un momento diferente: la eclosión de la afloración a las 7:30 AM (primera figura), el movimiento a las 15:30 (segunda figura), la dispersión a las 22:30 (tercera figura), y cuando el USV está regresando a la incubadora de la afloración a las 2:00 AM (cuarta figura). Datos disponibles en Esteban [2022]

En la Figura 3.7 se muestra una verificación funcional cuantitativa del modelo de inferencia de afloración y su motorización a lo largo de varios días de simulación.

Al igual que en el caso anterior, la figura muestra el comportamiento del sistema a lo largo de varios días. Puede observarse que el sistema detecta correctamente la aparición de afloraciones y predice su densidad con una precisión bastante aceptable. Además, también se genera un desplazamiento de las afloraciones, que es utilizado por el USV para realizar las mediciones de la densidad de algas. Puede observarse que al comienzo de un nuevo día, el modelo de inferencia de algas se inicializa en la posición inicial de forma instantánea (más conocido como zona de incubación de las afloraciones). Sin embargo, el modelo del USV debe regresar a ese punto durante la noche, de ahí su desplazamiento constante.

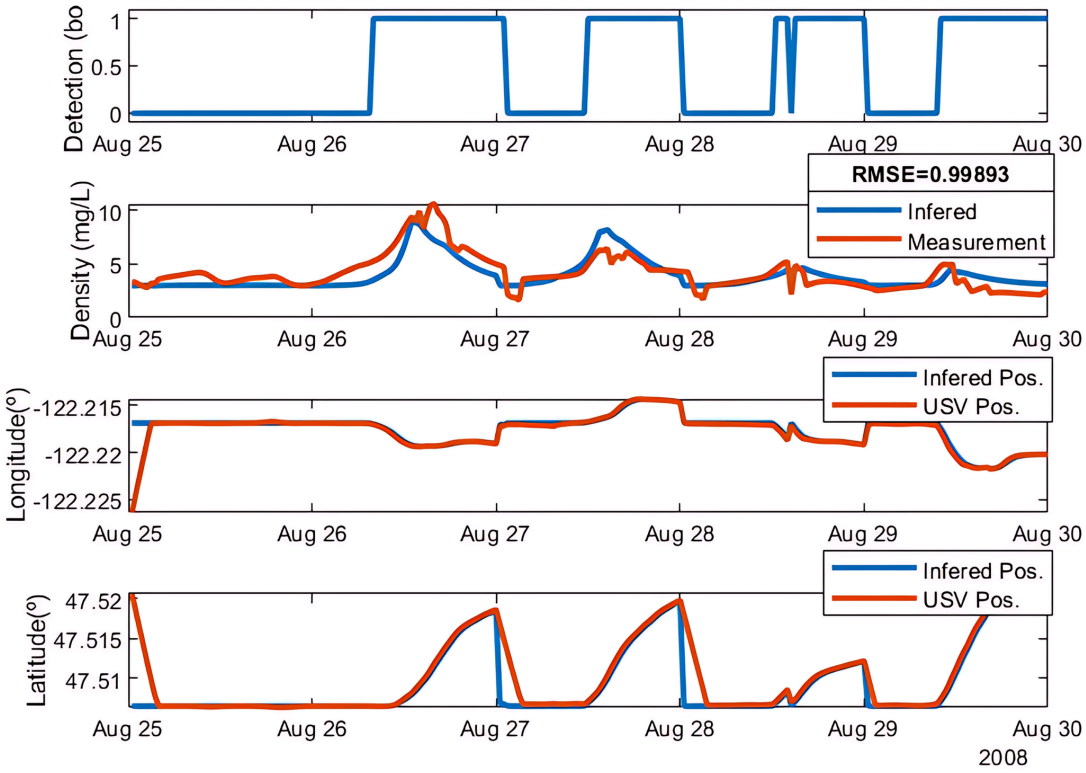


Figura 3.7: Verificación funcional del modelo de inferencia a lo largo de varios días. En el primer gráfico, el modelo predice la existencia de una posible afloración. El segundo gráfico muestra la densidad inferida por el modelo, la densidad medida por el USV y el error cuadrático medio. Los gráficos tercero y cuarto muestran las longitudes y latitudes inferidas por el modelo de afloración y las obtenidas por el USV respectivamente.

3.3. Despliegue con hardware en el lazo

En este apartado se llevará a cabo la validación de los subsistemas desarrollados anteriormente, incorporando los `Dispositivos` *hardware* en el lazo. De este modo, se consigue garantizar un correcto despliegue de los sistemas, realizando la transición coherente desde los subsistemas basados en modelos hacía una validación a nivel de sistemas.

Para llevar a cabo la fase de validación de algunos subsistemas, es necesario integrar los `Dispositivos` reales en simulaciones en tiempo real, para lo cual se debe incorporar una interfaz de comunicación común.

3.3.1. Métodos de integración de dispositivos

Como se explica en la Subsección 2.3.2, la motivación detrás de la gestión de entrada - salida (E/S) es poder adaptar eventos externos como mensajes de entrada y enviar mensajes de salida fuera del simulador. Originalmente, el simulador DEVS no fue planteado para manejar eventos externos. Existen dos formas de llevar a cabo la implementación: por sondeo de eventos o por inyección de eventos.

- **Integración de `Dispositivos` por sondeo**: El procesador solicita información a los `Dispositivos` a través de un protocolo de comunicaciones. Primero se deben abrir las conexiones necesarias y configurar los parámetros de simulación pertinentes. Una vez lanzada la simulación, el procesador se encarga de realizar una petición al dispositivo sondeado, donde se pueden consultar tanto los datos de entrada como el estado del dispositivo. La espera de una respuesta puede ser activa, si se bloquea la ejecución hasta recibir una respuesta, o pasiva, si la simulación continúa ejecutándose, independientemente de que se reciba o no una respuesta. El procesador se encarga de comprobar cada cierto tiempo la presencia de datos acumulados en un determinado `Dispositivo` virtual. Posteriormente, se realiza el procesamiento de la información, que puede implicar el análisis de los datos o la toma de decisiones en función del estado del dispositivo, etc. Tras procesar la respuesta, el procesador suele esperar un cierto periodo de tiempo antes de enviar la siguiente petición. Esto tiene la ventaja de evitar sobrecargar los dispositivos con peticiones recurrentes. Este método es muy utilizado en las peticiones HTTP cuando se trabaja con servicios web o APIs [Aziz and Ridley, 2016].

- **Integración de `Dispositivos` por inyección de eventos**: En este método, se ha incorporado la figura del `Inyector` al simulador, que permite incorporar eventos externos en un simulador de tiempo real blando [Van Mierlo et al., 2017]. Los eventos externos se producen fuera del flujo normal de simulación, como cuando un dispositivo hardware envía una señal para indicar que necesita atención. Por ende, la información del sensor es recibida por el `Inyector`, el cual introduce un evento en el simulador. El simulador tiende a procesar el evento lo antes posible. Entre las ventajas de emplear este tipo de integración se encuentra la rapidez de respuesta, ya que beneficia la sincronización entre la hora del sensor y el reloj del simulador. De esta forma, los datos obtenidos por el sensor se reflejan directamente en los datos con los que trabaja el simulador.

3.3.2. Validación del GPS

La Figura 3.8 muestra los dos esquemas correspondientes a los dos tipos de integración mostrados para un sensor GPS de la marca Sparkfun [SparkFun, 2024] que otorgará los datos de posición del USV. En estos ejemplos se puede apreciar la conexión del `Dispositivo` externo con el sensor virtual del simulador y la forma de comunicarse con el GCS.

Para el caso del sensor integrado por sondeo, el acceso a los datos proporcionados por el sensor real mantiene el mismo diseño que el diagrama de espacio de estados utilizado para los sensores simulados mostrado anteriormente, Figura 3.4. El sensor virtual parte del estado OFF y completa su inicialización notificando al simulador que se trata de un sensor real, especificando sus tipos de datos y protocolo de comunicación, y termina transitando al estado ON. Si el simulador envía una solicitud de datos en el puerto *in_ctrl*, el sensor pasa

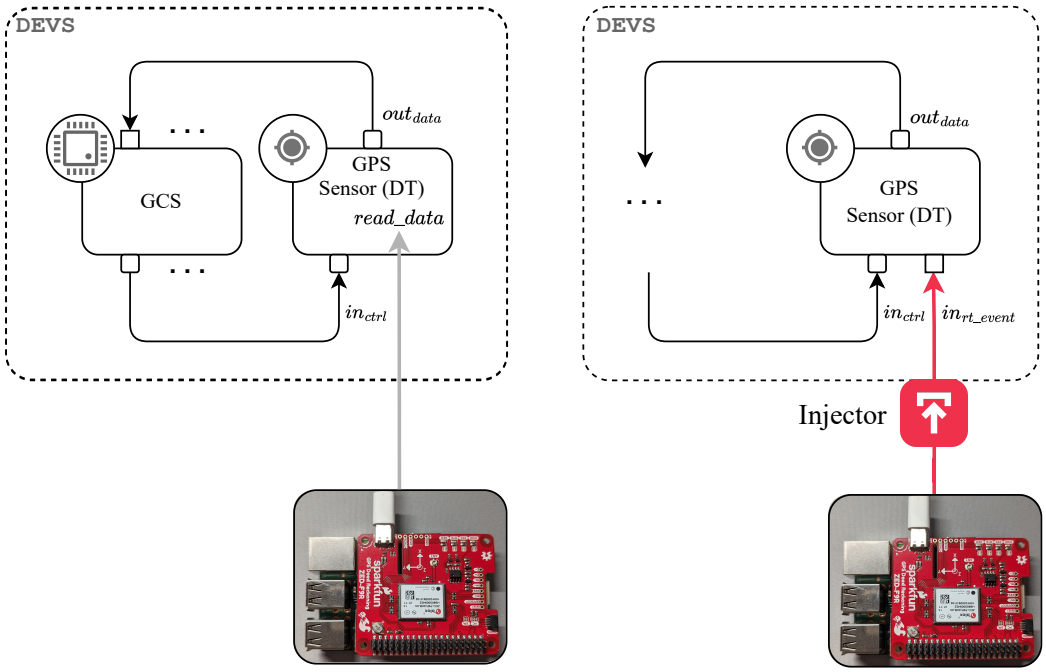


Figura 3.8: Integración del `Dispositivo` GPS a través de sondeo (izquierda) e integración del `Dispositivo` GPS por inyección de eventos (derecha) en el simulador. Los dispositivos se conectan a su gemelo digital (DT) mediante diferentes tipos de integración.

a un estado WORK, donde el sensor real lee los datos del mundo real, en lugar de leer del `Simbody`. Después del intervalo de tiempo de lectura, los datos se encuentran disponibles y el sensor virtual transita al estado SEND para proporcionar al simulador un evento con la información. Finalmente, el sensor vuelve al estado ON para esperar una nueva petición del simulador

El caso del sensor integrado con inyección de eventos mostrado en Figura 3.9, es muy similar al diagrama del sensor simulado en sus estados iniciales. Sin embargo, el modelo del sensor permanece en el estado ON hasta que recibe la inyección de datos del sensor externo a través del puerto in_{rt_event}, lo que provoca una transición de estado externa al estado SEND y con ello, el envío de los datos del sensor al simulador.

De esta forma, el envío de datos del sensor al simulador depende únicamente de la llegada de una interrupción externa con datos del sensor al simulador, lo cual es independiente de DEVS. Por este motivo, se prescinde del estado WORK y de las transiciones de estado internas ejecutadas en ella. Una vez finalizada la inyección de datos, el sensor vuelve al estado ON para continuar su funcionamiento normal. En este caso, el simulador también puede poner el sensor en estado OFF si así lo ve neceasario.

Aunque ambos métodos funcionan correctamente con el sistema diseñado, se ha decidido trabajar con la integración del sensor GPS por inyección de eventos, ya que permite una actualización más rápida y precisa de los datos de ubicación. Lo que asegura una óptima coordinación entre los ficheros de la base de datos.

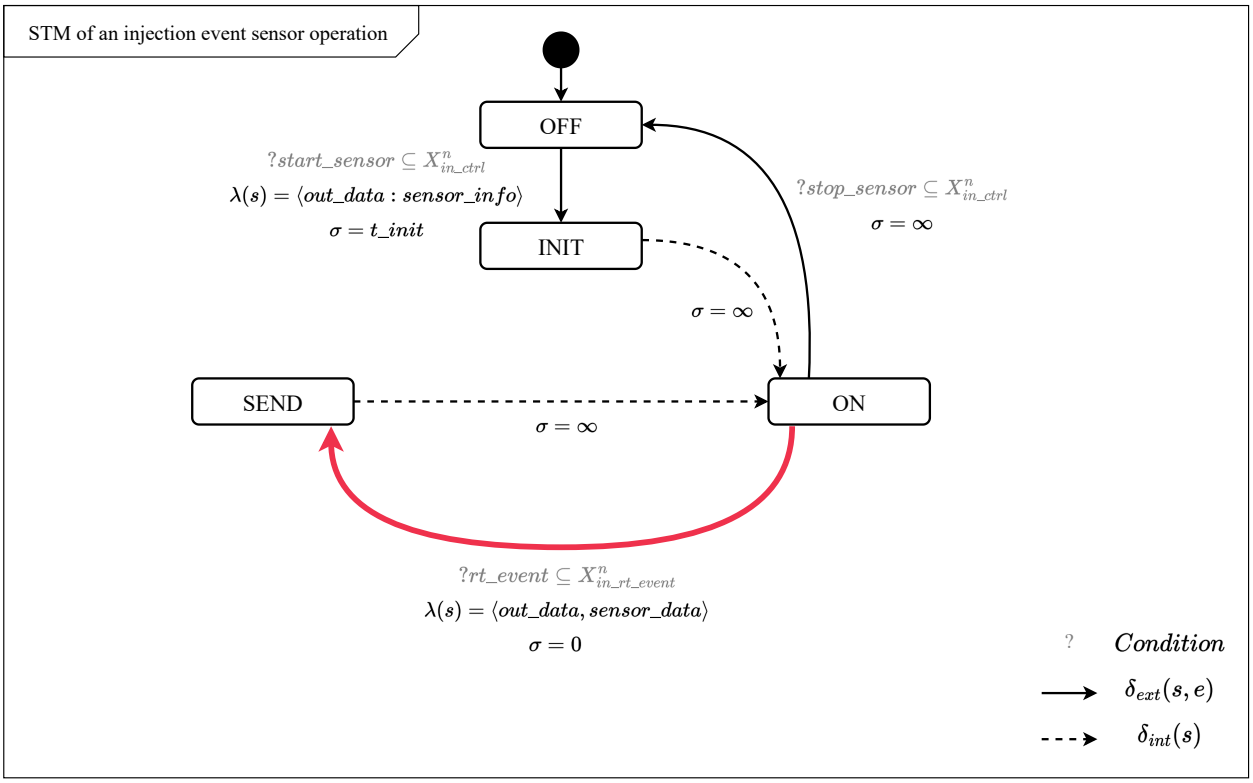


Figura 3.9: Diagrama de la máquina de estados SysML para una operación de sensor de eventos de inyección. El diagrama forma parte de una adaptación del diagrama de máquina de estados mostrado originalmente para el caso de un sensor simulado. A diferencia de éste, los sensores implementados por inyección de eventos no tienen un estado de WORK ya que su funcionamiento depende sólo de eventos externos.

A continuación se presenta un registro del controlador del software como ejemplo de la medición de la ubicación del USV.

```
...
Starting event 8 @ t = 12:12:17
Starting event 9 @ t = 12:12:17
event 8 finished @ t = 12:12:17
INFO:__main__:event 8
{
 'timestamp': datetime.time(10, 12, 18),
 'latitude': 40.45073216666667, 'longitude': -3.726055166666667,
 'horizontal_dil': '1.42',  'num_sats': '07', 'gps_qual': 1
}
...
Starting event 14 @ t = 12:12:18
Starting event 15 @ t = 12:12:18
event 14 finished @ t = 12:12:18
INFO:__main__:event 14
```

```
16    {
17     'timestamp': datetime.time(10, 12, 19),
18     'latitude': 40.450736166666665, 'longitude': -3.7260635,
19     'horizontal_dil': '1.42', 'num_sats': '07', 'gps_qual': 1
20    }
21    ...
22    Starting event 19 @ t = 12:12:19
23    Starting event 20 @ t = 12:12:19
24    event 19 finished @ t = 12:12:19
25    ...
```

La validación del sensor GPS se realiza de manera exitosa, no obstante, se muestra una anomalía en los tiempos. Existe un desfase de 2 horas y 1 segundo entre la marca de tiempo del simulador y la del GPS (obtenida a través de los satélites disponibles). El desfase de 2 horas se debe a que el reloj del ordenador está ajustado a la hora local, y el de 1 segundo, a que el sistema UTC corrige 1 segundo cada cinco años para compensar la ralentización de la rotación terrestre.

3.3.3. Validación del WebReport

Este servicio reside en la capa de la Cloud, y es responsable de recibir datos de las otras capas, procesarlos y mostrarlos a petición del usuario. Esta capa también incluye servidores y centros de datos, los cuales tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de datos, además de realizar su procesamiento y análisis.

Se considera que la validación del servicio WebReport está en curso, dado que actualmente se está ejecutando una versión finalizada fuera del simulador, operando en hardware real y alojada sobre un servidor dedicado. El análisis de datos y el aprendizaje automático, que requieren una gran potencia de cálculo, pueden realizarse en dichos servidores. Al igual que en el modelo Fog acoplado, el modelo Cloud puede ejecutar diferentes servicios, y está altamente escalado para gestionar una o varias masas de agua.

Estos servicios incluyen la ejecución de amplios análisis de datos, con todos los datos almacenados en la base de datos central, o la ejecución de servicios de entrenamiento para actualizar los modelos de inferencia en los modelos acoplados a la capa Fog. En cualquier caso, estas acciones se activan siempre con la llegada de nuevos archivos de datos procedentes de las capas inferiores.

Por ejemplo, se han implementado servicios en la capa Cloud para informar al gestor del agua de alertas o informes generados a lo largo del día de simulación. No se han incluido modelos atómicos específicos para la ejecución de servicios en la capa Cloud, ya que estos siempre se ejecutan como procesos instalados en contenedores Docker. Es decir, tienen una arquitectura distribuida. Tampoco es necesario encapsular dichos modelos atómicos en modelos DEVS, ya que la capa Cloud se considera una entidad centralizada.

La adaptabilidad del sistema está garantizada, ya que el marco de trabajo se ha diseñado teniendo en cuenta su escalabilidad, lo que permite a los usuarios externalizar y ampliar los servicios críticos en caso de cuellos de botella. Por ejemplo, los modelos atómicos que consumen muchos recursos, como los diseñados para servicios de formación o análisis de datos, pueden simularse fácilmente en arquitecturas informáticas paralelas o distribuidas.

La Figura 3.10 muestra la estructura de conexión de la capa Cloud, incluyendo sus componentes. Se puede observar que la base de datos global aglutina la información entregada por la capa Fog y los `Dispositivos`.

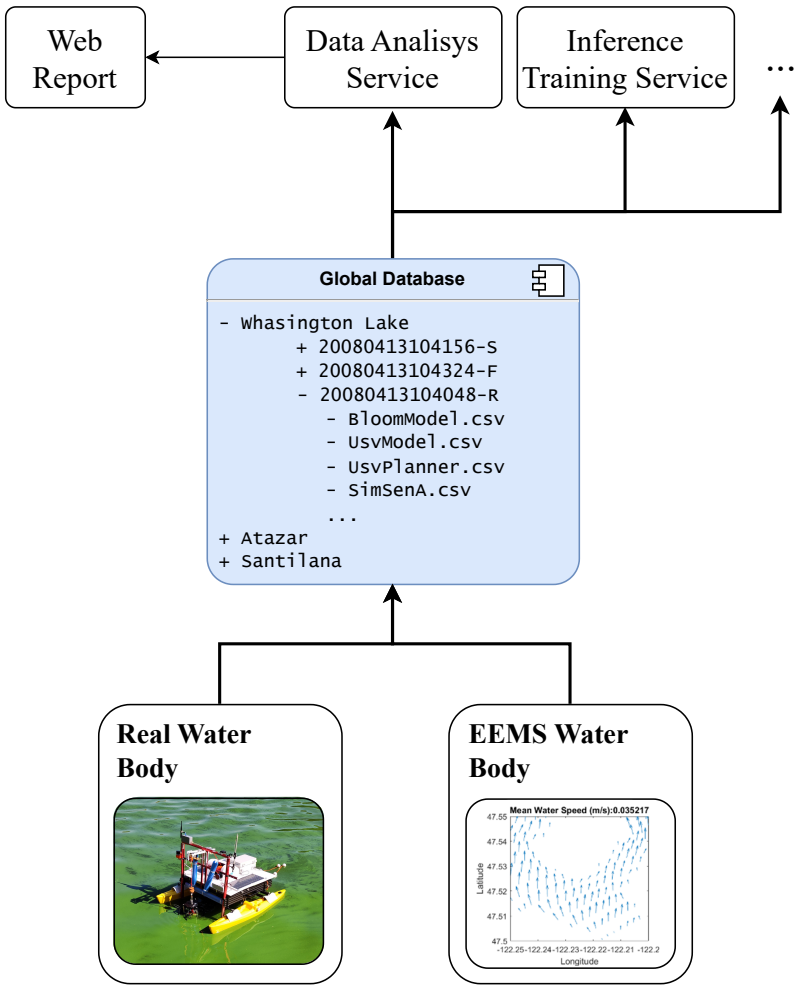


Figura 3.10: Estructura de conexión de la capa Cloud con el simulador a través de la base de datos.

En este caso, los datos se almacenan en directorios con ficheros organizados jerárquicamente por la masa de agua en la que se realiza la monitorización, la fecha y el tipo de señal registrada. A partir de dichos datos, de naturaleza real o simulados a través de un EEMS, se realizan el servicio de análisis de datos, el entrenamiento del servicio de inferencia, entre otros. El administrador del sistema es capaz de decidir cuales son los datos que se muestran al usuario a través del WebReport, así como las alertas y previsiones.

De este modo los investigadores involucrados en el proyecto, pertenecientes a distintos grupos de trabajo, pueden acceder a datos y servicios necesarios para apoyar y validar sus avances.

La gran ventaja de utilizar este tipo de sistema reside en la posibilidad de almacenar datos de diferentes `Dispositivos` independientemente de si son subsistemas reales o simulados. Los subsistemas superiores, como el informe web o los demás servicios, utilizan la información proporcionada por la base de datos y pueden identificar la naturaleza de cada señal por el tipo de archivo. Sin embargo, los servicios funcionan de la misma manera en cada caso, independientemente del tipo de `Dispositivos` empleados. En este caso, los ficheros han sido generados a través de elementos simulados, pero la validación del servicio es igualmente aplicable a los ficheros de datos reales.

Los EWS suelen ir acompañados de una interfaz o aplicación web, que ofrece diferentes servicios y tiene el potencial suficiente para crear un canal de comunicación directo entre ciudadanos, investigadores y responsables de la toma de decisiones [Wu et al., 2023]. Entre sus funciones más comunes se encuentran la generación de alertas, la monitorización de señales, el análisis de señales y la previsión de eventos. Este tipo de interfaz web demuestra las capacidades de los sistemas para poder integrar la recogida, la visualización y el análisis de datos de sensores en una única plataforma [Panduman et al., 2024].

Se ha diseñado una aplicación web avanzada para la monitorización de las HACB en diferentes masas de agua, disponible en Andrade. Para ello, se utilizan la herramienta gratuita y de código abierto Django junto a la librería de visualización Plotly para desarrollar una aplicación de forma eficiente y con una interfaz intuitiva que proporcione información de gran relevancia para los diferentes usuarios [Chacón et al., 2024].

La interfaz dispone de varias vistas orientadas a ofrecer diferentes servicios. La primera de estas vistas es la denominada "Gestión de alarmas y masas de agua", y proporciona al gestor de aguas información visual sobre el registro de medidas de afloración algal y alarmas generadas en una masa de agua (Figura 3.11). Es posible delimitar las regiones del mapa donde se realiza el servicio de alerta del nivel de algas y nutrientes, y marcar los valores límite. Esta información debe declararse al inicializar el simulador. El usuario puede seleccionar la masa de agua que desea monitorear y establecer el rango de fechas para filtrar los datos.

Una vez se accede a la primera vista de la interfaz web, aparece en la parte superior la tabla de alertas que muestra cuando los valores medidos por los sensores a lo largo de un día superan los valores máximos definidos (Figura 3.12). En la misma página, se muestra un mapa donde poder visualizar de manera geoespacial el comportamiento de las afloraciones de algas a lo largo de los días. El usuario puede seleccionar qué señales de densidad de algas desea visualizar. La interfaz muestra automáticamente los valores máximo, mínimo y el promedio de la densidad de algas, permitiendo al gestor de aguas filtrar los datos por medio de los botones interactivos. La gran versatilidad que caracteriza a Plotly ofrece visualizaciones interactivas que permiten a los usuarios obtener información de manera directa.

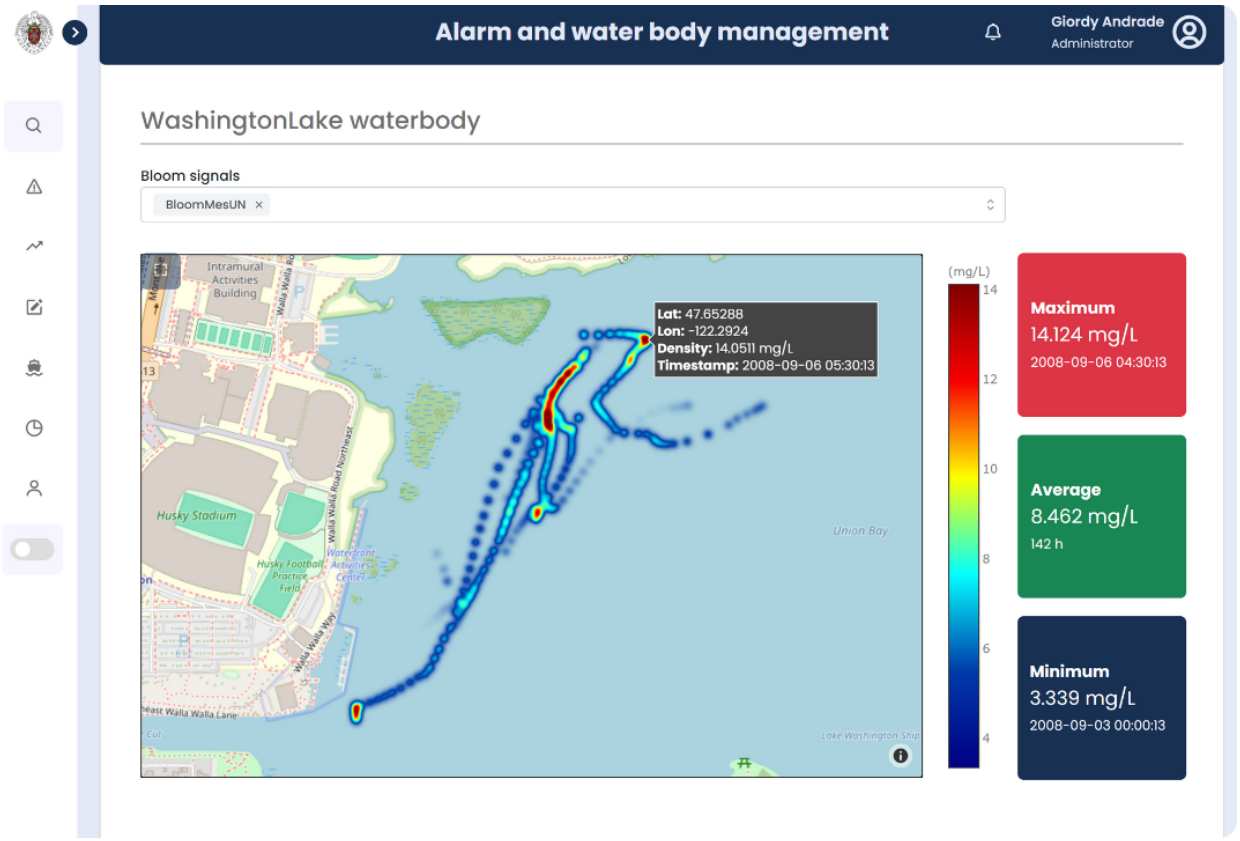


Figura 3.11: Vista general de la web de la gestión de alarmas y masas de agua para el gestor del agua (mapa de la masa de agua del lago Washington que muestra la señal de densidad de algas medida por el barco situado al norte del lago (BloomMesUN) entre el 23 de agosto y el 6 de septiembre de 2008).

Alert table

Source	Date	Latitude	Longitude	Value
BloomMesUN	2008-08-23 23:30:13	47.65110395912319	-122.29593119279428	11.928384791389512
BloomMesUN	2008-08-24 00:00:13	47.65106096900668	-122.29597801363128	11.89918632542693
BloomMesUN	2008-08-25 01:00:13	47.65213259621104	-122.29469745039904	11.072496159148171
BloomMesUN	2008-08-26 10:00:13	47.64984593474151	-122.29580720852574	10.441587231749898
BloomMesUN	2008-09-01 02:00:13	47.65227929586612	-122.2943017834752	11.374167489504137
BloomMesUN	2008-09-03 12:30:13	47.65097248674745	-122.2946106963464	12.23269951838756
BloomMesUN	2008-09-04 13:00:13	47.65125766231712	-122.29404671504872	10.252798518919692
BloomMesUN	2008-09-05 01:00:13	47.65246744825028	-122.29401132675834	13.3167008213615
BloomMesUN	2008-09-06 04:30:13	47.65292239320614	-122.29255085872228	14.124004931061007
SensorSimOUS	2008-08-25 12:00:11	47.64477773615506	-122.28540763566298	28.77937330373832
SensorSimOUS	2008-08-26 00:00:11	47.64441977143528	-122.28447425849728	26.61416588129949
SensorSimOUS	2008-09-02 10:00:11	47.6460912582825	-122.2851318617292	28.207599791588983

Figura 3.12: Vista web de la tabla de alertas de la gestión de alarmas y masas de agua para el gestor del agua (tabla de alertas del lago Washington que muestra los valores de algas que superan el límite establecido medidas con el barco emplazado al sur del lago (BloomMesS) y la densidad de oxígeno medida en el agua por el sensor simulado del mismo barco (SensorSimOS) entre el 23 de agosto y el 6 de septiembre de 2008).

Además, sus capacidades dinámicas facilitan la actualización en tiempo real de los gráficos, mejorando significativamente la experiencia del usuario y permitiendo un análisis más detallado y preciso de los datos presentados.

La vista "Monitorización del USV" permite al usuario realizar un seguimiento de la planificación y las trayectorias de los USVs utilizados en el seguimiento de las afloraciones de algas. El comportamiento del barco o barcos puede observarse dinámicamente a lo largo de los días registrados, tal y como se muestra en la Figura 3.13. Se puede observar como el modelo del USV intenta seguir las trayectorias descritas por el planificador, y al mismo tiempo, se ve desplazado por las corrientes de la masa de agua. De este modo se logra validar el control de los USVs, frente al nivel de realismo con el que se implemente la dinámica. Asimismo, como se ha podido demostrar en estas imágenes, el servicio de inferencia evalúa correctamente la dinámica de las algas con ayuda de la Ecuación 3.2 y la Ecuación 3.3, controlando el planificador del barco para seguir las afloraciones.

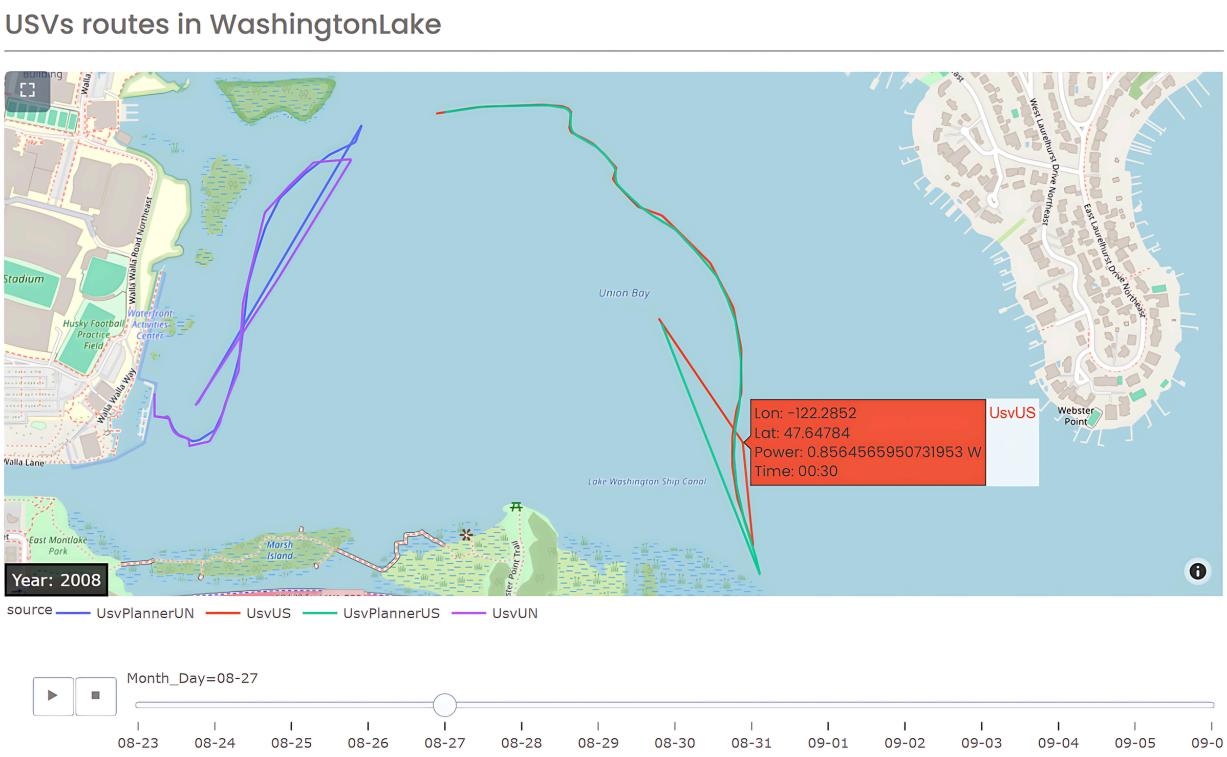


Figura 3.13: Vista web del recorrido de los USV. Donde se observan las señales del planificador del USV situado al norte (UsvPlannerUN), el recorrido de dicho USV (UsvUN), los puntos de la ruta del planificador del USV situado al sur (UsvPlannerUS) y su recorrido real (UsvUS).

Otra de las vistas incorporadas en la interfaz web es la vista de "Previsión", que se utiliza para obtener estimaciones sobre el comportamiento de las afloraciones algales en fechas futuras, basándose de datos históricos. Como se puede observar en la Figura 3.14, el servicio de previsión estima la aparición de afloraciones de algas próxima al lugar de incubación.

Esto se evidencia en los datos proporcionados por el EEMS correspondiente al lago, los cuales muestran que al sur del lago se producen vertidos de fertilizantes que contribuyen a estas afloraciones. Se puede comparar lo que el modelo de previsión ha generado con lo obtenido durante la simulación, lo que permite validar el comportamiento de este servicio.

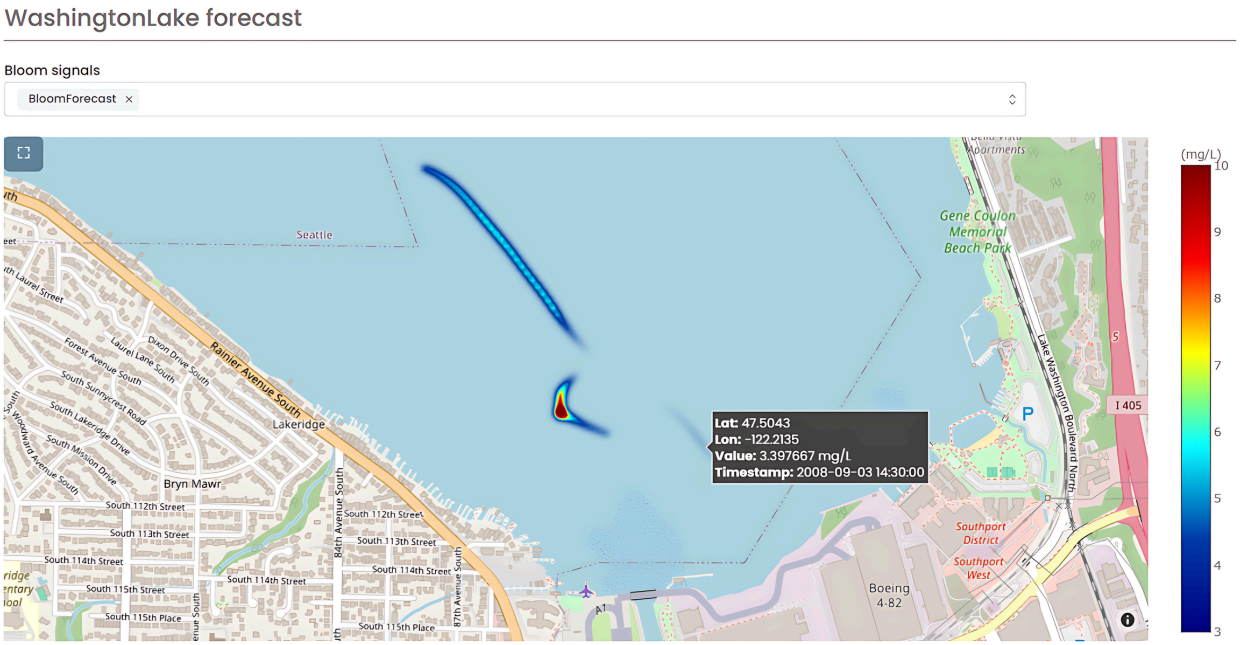


Figura 3.14: Vista web de la estimación de afloraciones de algas (mapa de la masa de agua del lago Washington que muestra la señal de densidad de algas estimada entre el 1 y el 6 de septiembre de 2008)

Una de las vistas más relevantes implementadas es la de ”Análisis de Señales”, diseñada para proporcionar a los gestores un examen detallado de las señales captadas por los sensores de los USVs. Esta funcionalidad permite analizar patrones, identificar posibles eventos y evaluar la calidad de las acciones emprendidas por las autoridades. Como se puede observar en la Figura 3.15 los datos obtenidos se presentan de forma gráfica e interactiva por medio de gráficos apilados en una única columna, para una interpretación eficaz de la evolución temporal de las señales. De esta manera, la capa en la nube puede asistir a las autoridades en la toma de decisiones estratégicas, utilizando la información proporcionada sobre las diferentes masas de agua. Por esta razón, la interfaz web ofrece una ventaja significativa para la visualización eficaz del comportamiento de los HACB y los dispositivos de monitoreo.

El sistema implementado, que se encuentra en constante evolución, permitirá también la incorporación de servicios de administración de usuarios, así como el desarrollo de modelos de edición de escenarios que permiten inicializar y realizar ajustes dinámicos durante el proceso de seguimiento de las afloraciones. Como resultado, se continua trabajando en una mayor adaptabilidad y capacidad de respuesta del EWS, proporcionando una plataforma robusta para la gestión proactiva de las afloraciones de algas.

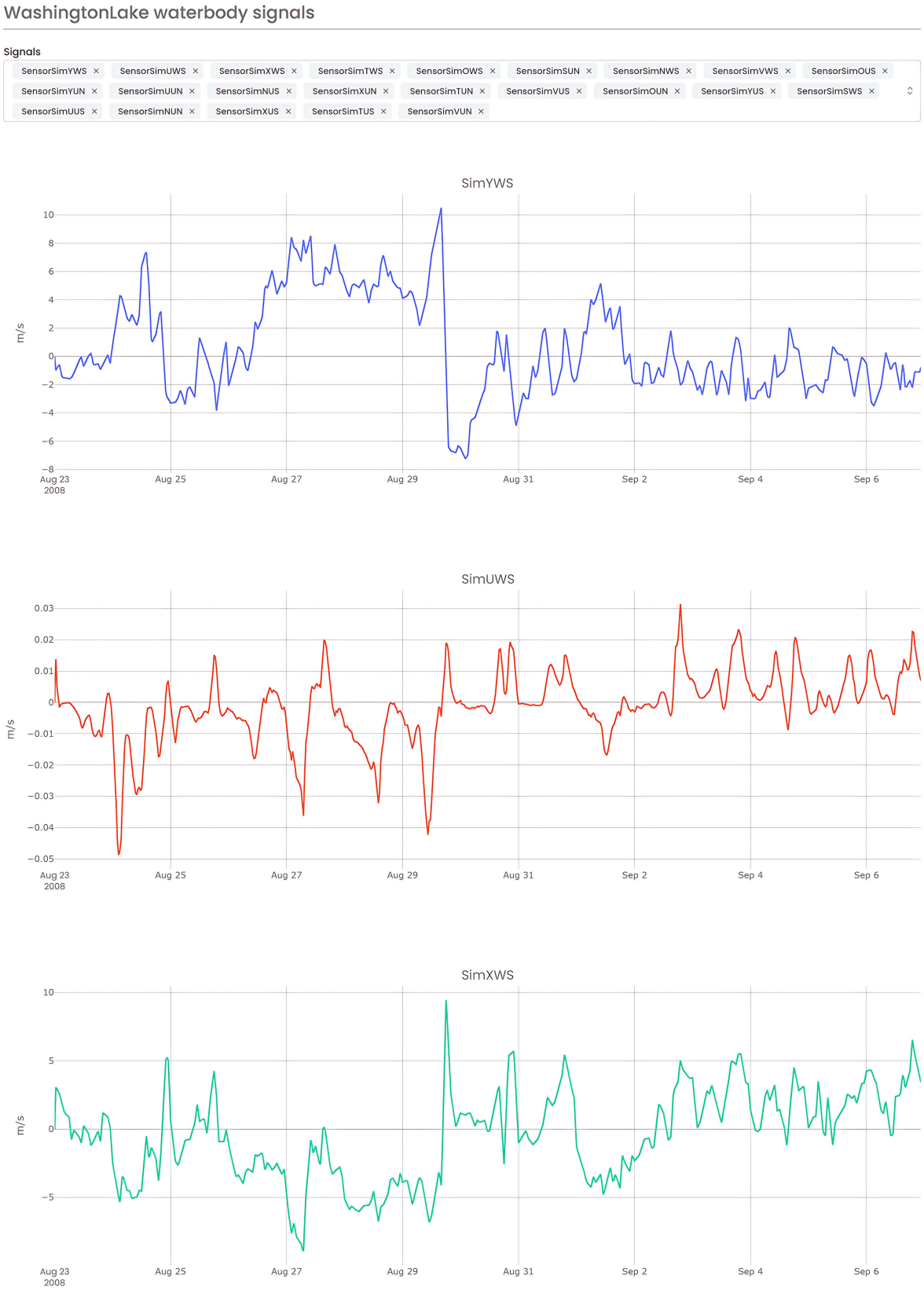


Figura 3.15: Vista web de las señales recogidas por los USVs (correspondientes a la masa de agua del lago Washington entre el 23 de agosto y el 6 de septiembre de 2008. Se muestran las señales obtenidas por los sensores de un mismo USV: la señal del viento en dirección este (SimYWS), la velocidad de la corriente de agua en dirección este (SimUWS) y la señal del viento en dirección norte (SimXWS)).

Capítulo 4

Conclusiones y trabajos futuros

A continuación, se realizará una revisión sobre las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del sistema DEVS-BLOOM. Se comenzará con un análisis exhaustivo del propósito del sistema, para luego examinar los logros alcanzados mediante el proceso de modelado y simulación, así como el despliegue de los dispositivos *hardware*. Con ello se resalta la fiabilidad del sistema y de sus modelos, lo que lo convierte en una plataforma robusta para la vigilancia de las HACB. Finalmente se presentan las línea de trabajo futuras relacionadas con el proyecto.

4.1. Conclusiones

La presencia de HACBs en ecosistemas acuáticos como pantanos, lagos y ríos plantea riesgos para el uso recreativo y el consumo humano, afectando negativamente tanto a los ecosistemas como a la salud pública. Tradicionalmente, la detección de estas afloraciones se ha basado en medidas reactivas y acciones aisladas, como la recolección manual de muestras, el muestreo automático en ubicaciones fijas y el uso de modelos predictivos convencionales. No obstante, se están desarrollando nuevos EWSs para ofrecer sistemas de monitoreo anticipativos, modernos y automatizados.

En este trabajo, se ha presentado el sistema DEVS-BLOOM, en el que se propone el diseño y el desarrollo de un avanzado EWS para el monitoreo y previsión de las afloraciones de algas, y en extrapolación, a las HACB. Debido a la complejidad del sistema, se ha emprendido una implementación robusta basada en principios de MBSE, impulsada por el formalismo DEVS. Esta metodología permite el diseño progresivo, el desarrollo, la verificación, la implementación y finalmente la validación de un sistema complejo, como el abordado en este trabajo. A su vez, toda la infraestructura ha sido modelada según los paradigmas de la tecnología IoT permitiendo con ello un diseño incremental, asegurando la fiabilidad y escalabilidad para múltiples masas de agua. Durante el desarrollo de los diversos subsistemas, es fundamental simularlos para garantizar su validación y despliegue distribuido.

Los modelos predictivos y de inferencia que han sido desarrollados en el proceso de modelado, pueden ser utilizados posteriormente en entornos reales. Esto se ha logrado gracias a la validación y al despliegue distribuido de cada uno de los subsistemas que conforman DEVS-BLOOM. La incorporación de las clases que gestionan la administración de eventos externos en DEVS ha permitido la integración de componentes virtuales y reales dentro de un modelo de simulación en tiempo real. Haciendo uso de las distintos métodos de integración de los componentes *harware* se ha obtenido una implementación sin fisuras entre los sensores y el simulador. Es esencial estabilizar completamente los bucles de control antes del despliegue utilizando un simulador del sistema para entrenar los modelos de inferencia.

El sistema DEVS-BLOOM no solo consigue mejorar la capacidad de respuesta de las autoridades antes la aparición de HACB, sino que también proporciona una plataforma confiable para la gestión de datos y administración de alertas facilitando la investigación en diversas líneas de estudio. Los resultados obtenidos a lo largo del despliegue del sistema han sido presentados en distintos congresos de simulación internacionales como el *Winter Simulation Conference* Esteban et al. [2023], y en revistas de interés científico como en Andrade et al. [2024] y Chacón et al. [2024].

4.2. Objetivos alcanzados

A continuación, se lleva a cabo una revisión exhaustiva de los objetivos establecidos al comienzo de este proyecto, explorando cómo se han abordado y alcanzado a lo largo del desarrollo del proyecto:

- **Desarrollar un sistema capaz de realizar un monitoreo para la proliferación de HACB a partir de las tomas de aguas de los embalses, con el fin de alertar a los gestores de aguas. Dicho sistema deberá emplear la simulación de barcos autónomos para supervisar los parámetros biológicos, físicos y químicos que conducen al inicio, expansión y desaparición de las HACB, lo que permitirá realizar inferencias y predicciones sobre su comportamiento.**

  Se ha conseguido desarrollar un EWS sofisticado capaz de realizar el monitoreo y la estimación de las HACB a partir de los datos capturados por los USVs. Mediante un despliegue controlado del sistema, se ha garantizado la validación exhaustiva de todos los componentes, presentando los resultados obtenidos tanto a través de la simulación como del despliegue efectivo de los sistemas. La versatilidad del sistema, permite además incorporar dispositivos de manera ordenada, independientemente de si se tratan de componentes reales o simulados. Esto demuestra que el sistema está listo para ser utilizado en entornos reales, ofreciendo una herramienta confiable para los gestores de agua en posibles pruebas de campo.

- **Emplear el formalismo DEVS para desarrollar el software, el cual gestiona la información de los múltiples subsistemas que lo constituyen.**

  Gracias al formalismo DEVS se ha podido implementar de forma jerárquica cada uno de los subsistemas, y al mismo tiempo, garantizar el procesamiento de los eventos externos en tiempo real.

- **Distribuir el sistema bajo el paradigma IoT: 'Cloud', 'Fog' y 'Edge'.**

  El paradigma IoT empleado garantiza una marco de trabajo sólido y escalable, donde cada uno de los sistemas están correctamente ubicados dentro de capas en el entrono de simulación y en el entorno de despliegue real.

- **Enfoque hacia una co-simulación, donde existan tanto elementos reales como simulados trabajando de forma conjunta. El objetivo final será por lo tanto validar los subsistemas desarrollados.**

  El proceso de validación del sistema ha permitido desarrollar de forma segura la co-simulación *hardware* entre los sistemas. Esto se ha llevado a cabo mediante una estrategia orientada a eventos para validar el funcionamiento de los sistemas que intercambian su información con sus sombras digitales. Se ha podido verificar su funcionamiento a través de la incorporación de un sensor GPS, y del lanzamiento del servicio WebReport.

4.3. Trabajos Futuros

Actualmente se continua realizando el proceso de validación del sistema en tiempo real a través de la incorporación de nuevos sensores reales. Se desea ampliar la gama de sensores para incluir aquellos que puedan proporcionar mediciones más precisas y detalladas de los parámetros físicos y químicos del entorno, así como del propio USV. El sistema está diseñado para integrar sensores ubicados tanto en el propio barco como disponibles de forma remota, como estaciones meteorológicas y otros dispositivos de monitoreo ambiental.

Del mismo modo, actualmente se está trabajando en mejorar los modelos simulados de los USV para aumentar el realismo de las simulaciones mediante la incorporación de diversos componentes simulados. Estos incluyen desde una unidad de control de potencia, un modelo realista de un sensor, un procesador, un módulo de comunicación y una representación más sofisticada de las dinámicas del USV.

Es fundamental destacar que este trabajo ha sido respaldado por los siguientes proyectos de investigación: IA-GES-BLOOM-CM (Y2020/TCS-6420) del programa Sinérgico de la Comunidad Autónoma de Madrid; SMART-BLOOMS (TED2021-130123B-I00) financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR; e INSERTION (PID2021-127648OB-C33) del programa de Proyectos de Generación de Conocimiento del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

Bibliografía

Sonja Behmel, Mathieu Damour, Ralf Ludwig, and MJ Rodriguez. Water quality monitoring strategies—a review and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 571:1312–1329, 2016.

Suomen ympäristökeskus (SYKE). La situación de las algas verdiazules se ha debilitado considerablemente en las zonas marinas, la situación es tranquila en las aguas interiores, 2022. URL `https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Sinilevatilanne_heikentynyt_merialueilla(63503)`. Último acceso: 04 de mayo de 2024.

Oklahoma Department of Environmental Quality. What are cyanobacteria?, 2024. URL `https://www.deq.ok.gov/state-environmental-laboratory-services/environmental-public-health-information/harmful-algal-blooms/what-are-cyanobacteria/`. Último acceso: 09 de mayo de 2024.

Assaf Sukenik, A Quesada, and N Salmaso. Global expansion of toxic and non-toxic cyanobacteria: effect on ecosystem functioning. *Biodiversity and Conservation*, 24:889–908, 2015.

Segundo Esteban. Habsim: Harmful algal bloom simulator, 2022. URL `https://archive.org/details/habsim-20220920`. Accedido el día 26 de mayo del 2024.

Comisión Europea. Directiva 2006/7/ce del parlamento europeo y del consejo de 15 de febrero de 2006 relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño y por la que se deroga la directiva 76/160/cee, 2006. URL `https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32006L0007`. Accedido el 24 de mayo de 2024.

Comisión Europea. Directiva 2020/2184 del parlamento europeo y del consejo sobre la calidad del agua destinada al consumo humano, 2020. URL `https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32020L2184`. Accedido el 24 de mayo de 2024.

World Economic Forum. Global risks report 2023, 2023. URL `https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf`.

Sarah Sharma and Susanne Soederberg. Redesigning the business of development: the case of the world economic forum and global risk management. *Review of International Political Economy*, 27(4):828–854, 2020.

Mesfin M Mekonnen and Arjen Y Hoekstra. Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, 2(2):e1500323, 2016.

OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032. OECD, 2023. ISBN 9789264667181. doi: 10.1787/08801ab7-en. URL http://dx.doi.org/10.1787/08801ab7-en.

United Nations. Escasez de agua, crisis climática y seguridad alimentaria mundial: un llamamiento a la acción colaborativa, 2023. URL https://www.un.org/es/cr%C3%B3nica-onu/escasez-de-agua-crisis-clim%C3%A1tica-y-seguridad-alimentaria-mundial-un-llamamiento-la. Accedido el 2 de abril de 2024.

Bryan W Brooks, James M Lazorchak, Meredith DA Howard, Mari-Vaughn V Johnson, Steve L Morton, Dawn AK Perkins, Euan D Reavie, Geoffrey I Scott, Stephanie A Smith, and Jeffery A Steevens. Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems? *Environmental toxicology and chemistry*, 35(1):6–13, 2016.

Christopher J Gobler. Climate change and harmful algal blooms: insights and perspective. *Harmful algae*, 91:101731, 2020.

Juan J Gallardo-Rodríguez, Allisson Astuya-Villalón, Alejandra Llanos-Rivera, Veronica Avello-Fontalba, and Viviana Ulloa-Jofré. A critical review on control methods for harmful algal blooms. *Reviews in Aquaculture*, 11(3):661–684, 2019.

Hans W Paerl and Timothy G Otten. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microbial ecology*, 65:995–1010, 2013.

Michael F Chislock, Enrique Doster, Rachel A Zitomer, and Alan E Wilson. Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nature Education Knowledge*, 4(4):10, 2013.

David G Schmale III, Andrew P Ault, Walid Saad, Durelle T Scott, and Judy A Westrick. Perspectives on harmful algal blooms (habs) and the cyberbiosecurity of freshwater systems. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7:128, 2019.

Todd R Miller, Wilson Tarpey, Jeffrey Nuese, and Matthew Smith. Real-time monitoring of cyanobacterial harmful algal blooms with the panther buoy. *ACS ES&T Water*, 2(6): 1099–1110, 2022.

Sang-Soo Baek, JongCheol Pyo, Yong Sung Kwon, Seong-Jun Chun, Seung Ho Baek, Chi-Yong Ahn, Hee-Mock Oh, Young Ok Kim, and Kyung Hwa Cho. Deep learning for simulating harmful algal blooms using ocean numerical model. *Frontiers in Marine Science*, 8: 729954, 2021.

DSI. Ee modeling system, 2022. URL `https://www.eemodelingsystem.com/user-center/downloads`.

Benny Zuse Rousso, Edoardo Bertone, Rodney Stewart, and David P Hamilton. A systematic literature review of forecasting and predictive models for cyanobacteria blooms in freshwater lakes. *Water Research*, 182:115959, 2020.

José L Risco-Martín, Segundo Esteban, Jesús Chacón, Gonzalo Carazo-Barbero, Eva Besada-Portas, and José A López-Orozco. Simulation-driven engineering for the management of harmful algal and cyanobacterial blooms. *SIMULATION*, 99(10):1041–1055, 2023. doi: 10.1177/00375497231184246. URL `https://doi.org/10.1177/00375497231184246`.

Đula Nađ, Nikola Mišković, and Filip Mandić. Navigation, guidance and control of an overactuated marine surface vehicle. *Annual Reviews in Control*, 40:172–181, 2015.

Saurabh Mittal, Andreas Tolk, Andrew Pyles, Nicolas Van Balen, and Kevin Bergollo. Digital twin modeling, co-simulation and cyber use-case inclusion methodology for iot systems. In *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, pages 2653–2664, 2019. doi: 10.1109/WSC40007.2019.9004656.

Yaroslav Menshenin, Yaniv Mordecai, Edward F. Crawley, and Bruce G. Cameron. *Handbook of Model-Based Systems Engineering*. Springer, Cham, Switzerland, 2021. ISBN 978-3-030-27486-3. URL `https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-3-030-27486-3`.

Franc Mihalič, Mitja Truntič, and Alenka Hren. Hardware-in-the-loop simulations: A historical overview of engineering challenges. *Electronics*, 11(15):2462, 2022.

Muhammad Rashid Naeem, Weihua Zhu, Adeel Akbar Memon, and Adeel Khalid. Using v-model methodology, uml process-based risk assessment of software and visualization. In *Proceedings of 2014 International Conference on Cloud Computing and Internet of Things*, pages 197–202. IEEE, 2014.

Gerhart Drews. The roots of microbiology and the influence of ferdinand cohn on microbiology of the 19th century. *FEMS Microbiology Reviews*, 24(3):225–249, 2000.

Brian A Whitton and Malcolm Potts. *The ecology of cyanobacteria: their diversity in time and space*. Springer Science & Business Media, 2007.

Jef Huisman, Geoffrey A Codd, Hans W Paerl, Bas W Ibelings, Jolanda MH Verspagen, and Petra M Visser. Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, 16(8):471–483, 2018.

Wayne W Carmichael and Gregory L Boyer. Health impacts from cyanobacteria harmful algae blooms: Implications for the north american great lakes. *Harmful algae*, 54:194–212, 2016.

Ferran Garcia-Pichel, Jayne Belnap, Susanne Neuer, and Ferdinand Schanz. Estimates of global cyanobacterial biomass and its distribution. *Algological Studies*, 109(1):213–227, 2003.

Bettina E Schirrmeister, Muriel Gugger, and Philip CJ Donoghue. Cyanobacteria and the great oxidation event: evidence from genes and fossils. *Palaeontology*, 58(5):769–785, 2015.

Eugene W Rice, Laura Bridgewater, American Public Health Association, et al. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, volume 10. American public health association Washington, DC, 2012.

Brett A Neilan, Daniel Jacobs, and Amanda E Goodman. Genetic diversity and phylogeny of toxic cyanobacteria determined by dna polymorphisms within the phycocyanin locus. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(11):3875–3883, 1995.

Jaana Vaitomaa, Anne Rantala, Katrianna Halinen, Leo Rouhiainen, Petra Tallberg, Lena Mokelke, and Kaarina Sivonen. Quantitative real-time pcr for determination of microcystin synthetase e copy numbers for microcystis and anabaena in lakes. *Applied and environmental microbiology*, 69(12):7289–7297, 2003.

Arash Zamyadi, Florence Choo, Gayle Newcombe, Richard Stuetz, and Rita K Henderson. A review of monitoring technologies for real-time management of cyanobacteria: Recent advances and future direction. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 85:83–96, 2016.

Guoqing Wang, Zhongping Lee, and Colleen Mouw. Multi-spectral remote sensing of phytoplankton pigment absorption properties in cyanobacteria bloom waters: A regional example in the western basin of lake erie. *Remote Sensing*, 9(12):1309, 2017.

Megan M Coffer, Blake A Schaeffer, Wilson B Salls, Erin Urquhart, Keith A Loftin, Richard P Stumpf, P Jeremy Werdell, and John A Darling. Satellite remote sensing to assess cyanobacterial bloom frequency across the united states at multiple spatial scales. *Ecological Indicators*, 128:107822, 2021.

Veronica F Grasso and Ashbindu Singh. Early warning systems: State-of-art analysis and future directions. *Draft report, UNEP*, 1, 2011.

Keiji Doi. The operation and performance of earthquake early warnings by the japan meteorological agency. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(2):119–126, 2011.

Robert C Sheets. The national hurricane center—past, present, and future. *Weather and Forecasting*, 5(2):185–232, 1990.

Jutta Thielen, Jens Bartholmes, M-H Ramos, and A De Roo. The european flood alert system–part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2): 125–140, 2009.

Yinghui Cao, Bryan J Boruff, and Ilona M McNeill. The smoke is rising but where is the fire? exploring effective online map design for wildfire warnings. *Natural hazards*, 88:1473–1501, 2017.

John S Mackenzie, Patrick Drury, Ray R Arthur, Michael J Ryan, Thomas Grein, Raphael Slattery, Sameera Suri, Christine Tiffany Domingo, and Armand Bejtullahu. The global outbreak alert and response network. *Global public health*, 9(9):1023–1039, 2014.

Japan Meteorological Agency. Jma integrated map page, 2024a. URL `https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#9/37.378/137.593/&elem=int&contents=earthquake_map&lang=en`. Accedido el 17 de mayo de 2024.

Australia Government National Emergency Management Agency. Australian disaster resiilience., 2024b. URL `https://knowledge.aidr.org.au/disasters/`. Accedido el 17 de mayo de 2024.

Riley Hazel. National hurricane center releases new forecast cone for 2024 season. *WUFT Weather*, Feb 2024. URL `https://www.wuft.org/weather/2024-02-08/national-hurricane-center-releases-new-forecast-cone-for-2024-season`. Accedido el 17 de mayo de 2024.

World Health Organization. Who health emergency dashboard., 2024. URL `https://extranet.who.int/publicemergency`. Accedido el 17 de mayo de 2024.

Rafaela C Cruz, Pedro Reis Costa, Susana Vinga, Ludwig Krippahl, and Marta B Lopes. A review of recent machine learning advances for forecasting harmful algal blooms and shellfish contamination. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3):283, 2021.

Diogo N Cosenza, Lauri Korhonen, Matti Maltamo, Petteri Packalen, Jacob L Strunk, Erik Næsset, Terje Gobakken, Paula Soares, and Margarida Tomé. Comparison of linear regression, k-nearest neighbour and random forest methods in airborne laser-scanning-based prediction of growing stock. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(2): 311–323, 2021.

Bernard P Zeigler, Herbert Praehofer, and Tag Gon Kim. *Theory of modeling and simulation*. Academic press, 2000.

David RC Hill. Theory of modelling and simulation: Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems: by bp zeigler, h. praehofer, tg kim, academic press, san diego, ca, 2000., 2002.

José L. Risco-Martín, Saurabh Mittal, Kevin Henares, Román Cardenas, and Patricia Arroba. xDEVS: a toolkit for interoperable modeling and simulation of formal discrete event systems. *Software: Practice and Experience*, pages 1–42, 2022.

Mohammad Moallemi and Gabriel Wainer. Designing an interface for real-time and embedded devs. In *Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference*, pages 1–8, 2010.

Hesham Saadawi and Gabriel Wainer. Verification of real-time devs models. In *Proceedings of the 2009 Spring Simulation Multiconference*, pages 1–8. Citeseer, 2009.

Óscar Fernández Sebastián. Diseño e implementación de un motor de simulación en tiempo real basado en el formalismo DEVS, 2023. BSc Thesis.

Adriana Mijuskovic, Alessandro Chiumento, Rob Bemthuis, Adina Aldea, and Paul Havinga. Resource management techniques for cloud/fog and edge computing: An evaluation framework and classification. *Sensors*, 21(5):1832, 2021.

Lakshmi Sudha Kondaka, M Thenmozhi, K Vijayakumar, and Rashi Kohli. An intensive healthcare monitoring paradigm by using iot based machine learning strategies. *Multimedia Tools and Applications*, 81(26):36891–36905, 2022.

Wendong Wang, Cheng Feng, Bo Zhang, and Hui Gao. Environmental monitoring based on fog computing paradigm and internet of things. *IEEE Access*, 7:127154–127165, 2019.

Giovanni B Fioccola, Raffaele Sommese, Imma Tufano, Roberto Canonico, and Giorgio Ventre. Polluino: An efficient cloud-based management of iot devices for air quality monitoring. In *2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, pages 1–6. IEEE, 2016.

Hyun Cheon Hwang, JiSu Park, and Jin Gon Shon. Design and implementation of a reliable message transmission system based on mqtt protocol in iot. *Wireless Personal Communications*, 91:1765–1777, 2016.

Fahd A Alhaidari and Ebtesam J Alqahtani. Securing communication between fog computing and iot using constrained application protocol (coap): A survey. *J. Commun.*, 15(1):14–30, 2020.

Eyhab Al-Masri, Karan Raj Kalyanam, John Batts, Jonathan Kim, Sharanjit Singh, Tammy Vo, and Charlotte Yan. Investigating messaging protocols for the internet of things (iot). *IEEE Access*, 8:94880–94911, 2020.

Sourav Sinha, Neeraj Kumar Goyal, and Rajib Mall. Reliability and availability prediction of embedded systems based on environment modeling and simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 108:102246, 2021. ISSN 1569-190X. doi: https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102246. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X20301763`.

Beatriz Herguedas-Pinedo, José L Risco-Martín, Segundo Esteban, José A López-Orozco, and Eva Besada-Portas. Predictive modeling and simulation system for the management of harmful cyanobacteria blooms. In *2023 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM)*, pages 122–133. IEEE, 2023.

Hatem Aziz and Mick Ridley. Adaptive polling for responsive web applications. In *Information science and applications (ICISA) 2016*, pages 1157–1167. Springer, 2016.

Simon Van Mierlo, Yentl Van Tendeloo, and Hans Vangheluwe. Debugging parallel devs. *Simulation*, 93(4):285–306, 2017.

SparkFun. Sparkfun gps-rtk dead reckoning phat for raspberry pi, 2024. Available: [1](https://www.sparkfun.com/products/21305).

Di Wu, Jincheng Liu, Manuel Cordova, Christina Carrozzo Hellevik, Jakob Bonnevie Cyvin, Allan Pinto, Ibrahim A Hameed, Helio Pedrini, Ricardo da Silva Torres, and Annik Magerholm Fet. The plastopol system for marine litter monitoring by citizen scientists. *Environmental Modelling & Software*, 169:105784, 2023.

Yohanes Yohanie Fridelin Panduman, Nobuo Funabiki, Evianita Dewi Fajrianti, Shihao Fang, and Sritrusta Sukaridhoto. A survey of ai techniques in iot applications with use case investigations in the smart environmental monitoring and analytics in real-time iot platform. *Information*, 15(3):153, 2024.

Giordy A. Andrade. Ucm devs-bloom alarm and water body management. `http://pc-iscar.dacya.ucm.es:8080/water_management/`. Last access: 2024-03-12.

Jesús Chacón, Giordy A Andrade, Jose L Risco-Martín, and Segundo Esteban. A bleeding edge web application for early detection of cyanobacterial blooms. *Electronics*, 13(5):942, 2024.

Segundo Esteban, José L Risco-Martín, Jesus Chacon, Eva Besada-Portas, and Giordy A Andrade. Project simulation, validation and deployment with devs. iot framework for

blooms monitoring and alert. In *2023 Winter Simulation Conference (WSC)*, pages 2603–2614. IEEE, 2023.

Giordy A Andrade, Segundo Esteban, José L Risco-Martín, Jesús Chacón, and Eva Besada-Portas. Modeling-and simulation-driven methodology for the deployment of an inland water monitoring system. *Information*, 15(5):267, 2024.