



TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y
GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LOS
SISTEMAS HÍDRICOS; DE LAS
OBSERVACIONES Y MEDIDAS A LOS
SISTEMAS AMBIENTALES DE AYUDA A LA
TOMA DE DECISIONES

Tesis doctoral presentada por Felipe Fernández Pérez

Doctorado en Ciencias y Tecnologías para la Gestión Ambiental de los Sistemas Hídricos

Dirigida por Dr. Raúl Medina Santamaría



TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y
GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LOS
SISTEMAS HÍDRICOS; DE LAS
OBSERVACIONES Y MEDIDAS A LOS
SISTEMAS AMBIENTALES DE AYUDA A LA
TOMA DE DECISIONES

Tesis doctoral presentada por Felipe Fernández Pérez

Doctorado en Ciencias y Tecnologías para la Gestión Ambiental de los Sistemas Hídricos

Dirigida por Dr. Raúl Medina Santamaría

El doctorando

El director

Santander, abril 2017

Tecnologías de la Información y Gestión Medioambiental de los Sistemas Hídricos; de las Observaciones y Medidas a los Sistemas Ambientales de Ayuda a la Toma de Decisiones

Autor: Felipe Fernández Pérez

Director: Raúl Medina Santamaría

En los siguiente enlaces se puede encontrar más información sobre el autor y temas relacionados con esta tesis doctoral

<https://twitter.com/ffpipe>

<https://www.linkedin.com/in/ffpipe/>

Texto impreso en Santander

abril 2017

A mis padres, Ernes y Felipe

Abstract

The natural dynamics of the planet Earth can lead to risk situations related with Water Systems, such as the tsunami that caused 226.000 victims in 2004 at the Indian Ocean. On the other hand, the human being can influence the natural dynamics of the planet, affecting to fluvial courses, coasts and oceans. Industrial pollution events, such as the oil spill caused by the sinking of the Prestige oil tanker off the Galician coastline (northwestern Spain) in 2002, is a clear example. Climate change, induced by human activity, is one of the biggest threats facing humanity. Under this environmental context, it is crucial to carry out a technological transfer of multidisciplinary scientific-technical solutions to society, which will reduce the decision-making time in environmental matters and improve the quality and consistency of these decisions.

The monitoring and numerical modeling of the aquatic environment are activities commonly carried out by research centers, administrations and companies related to the aquatic environment. The main objective of the monitoring of the aquatic environment is to answer the question: What is happening?. In parallel, the numerical modeling in the water environment answers the question: What could happen in the future or what could have happened in the past?. Both issues are carried out under a common framework, a decision-making process, in which decision makers must make the most reasonable choice among the alternatives provided by our context.

Current Information Technologies have been identified as true facilitators of the decision-making process. Their application to environmental issues through Environmental Decision Support Systems (EDSS) have been possible thank to technologies based on Digital Geographic Information, which are also known as Geotechnologies, technologies that allow the design and development of IT solutions to computationally represent environmental phenomena. This work analyzes the use and implementation of current Geotechnologies for the design and development of EDSS applied to the water cycle in three areas of action: (1) analyzing the particularities of the digital management process of quantitative observations aimed at aiding decision-making in water systems, (2) identifying the EDSS capabilities

in integrated coastal modeling applied to flood risk management and (3) defining the main aspects that must be met by the meteo-oceanographic Operational Systems to facilitate the decision-making process.

To this end, an infrastructure has been designed to host a single Observational Data Model that is used by *Data-driven* EDSS applied to the water quality management of rivers, estuaries (ports) and coastal waters. Two EDSS for coastal flood risk management have been designed, one static and one dynamic. Finally, an Operational Infrastructure for meteo-oceanographic information has been designed, which has allowed the implementation of several operational EDSS of various kinds (hydrocarbon discharges, tsunamis, tropical cyclones). In total, 9 EDSS have been used as case studies.

This doctoral thesis shows how the multidisciplinary scientific-technical knowledge of researchers and technologists have been integrated into EDSS applied to the management of Water Systems, the current Information Technologies have been the facilitator to successfully undertake a scientific and technological transfer to society.

Resumen

La dinámica natural del planeta puede provocar situaciones de riesgo asociados a los sistemas hídricos, como por ejemplo el tsunami que provocó 226.000 víctimas en el año 2004 en el Océano Índico. Por otra parte, el ser humano puede influenciar en la dinámica del planeta, afectando a cursos fluviales, costas y océanos. Los eventos de contaminación industrial, como el vertido de hidrocarburos sufrido en 2002 con el hundimiento del Prestige frente a las costas gallegas, son un claro ejemplo. El cambio climático, inducido por la actividad del ser humano, es una de las grandes amenazas a las que se enfrenta la sociedad actual. Bajo este contexto medioambiental, es crucial llevar a cabo una transferencia tecnológica de soluciones científico-técnicas multidisciplinares a la sociedad, las cuales permitan reducir el tiempo de toma de decisión en materias ambientales y mejorar la calidad y consistencia de dichas decisiones.

La monitorización y modelización numérica del medio acuático son actividades realizadas habitualmente por centros de investigación, administraciones y empresas relacionadas con el medio. La monitorización del medio acuático tiene como principal objetivo dar respuesta a la pregunta ¿Qué está ocurriendo?. Paralelamente, la modelización del medio tiene como principal objetivo dar respuesta a la pregunta ¿Qué podría ocurrir en el futuro o qué pasó en el pasado?. Ambas cuestiones son realizadas bajo un denominador común, un proceso de toma de decisión, en el cual debemos realizar la elección más razonable entre las alternativas que presenta nuestro contexto.

Las actuales tecnologías de la información han sido identificadas como verdaderos facilitadores del proceso de ayuda a la toma de decisión. En el caso de su aplicación al medioambiente, los *Environmental Decision Support Systems* (EDSS) han adoptado las Tecnologías orientadas a la gestión de la Información Geográfica Digital, o también denominadas Geotecnologías, como medio para el diseño y construcción de soluciones capaces de representar los fenómenos ambientales.

Este trabajo de investigación hace un análisis del uso e implementación de las actuales Geotecnologías para el diseño y desarrollo de EDSS aplicados a los sistemas hídricos en tres ámbitos de actuación: (1) analizando las particularidades del proceso de gestión digital de observaciones cuantitativas orientadas a la ayuda

en la toma de decisión en los sistemas hídricos, (2) identificando las capacidades de los EDSS en la modelización integral del medio costero aplicadas a la gestión del riesgo de inundaciones y (3) definiendo los aspectos principales que deben cumplir los Sistemas Operacionales meteo-oceanográficos para facilitar el proceso de ayuda a la toma de decisión.

Para ello, ha sido diseñada una infraestructura capaz de alojar un único Modelo de Datos de Observaciones que es utilizado por *Data-driven* EDSS aplicados a la gestión de calidad de las aguas fluviales, transición (puertos) y costeras. Han sido diseñados dos EDSS de gestión del riesgo de inundación costera, uno estático y otro dinámico. Por último, ha sido diseñada una Infraestructura Operacional de información meteo-oceanográfica que ha permitido implementar varios EDSS operacionales de diversa índole (vertidos de hidrocarburos, tsunamis y ciclones tropicales). En total han sido utilizados 9 EDSS como casos de estudio.

Esta tesis doctoral muestra cómo el conocimiento científico-técnico multidisciplinar de investigadores y tecnólogos ha sido integrado en EDSS aplicados a la gestión de los sistemas hídricos, siendo las actuales Tecnologías de la Información las facilitadoras de llevar a cabo con éxito una transferencia científico técnica a la sociedad.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Universidad de Cantabria y en especial a IHCantabria por permitirme desarrollar esta tesis doctoral.

Agradecer también a todas las instituciones implicadas en mayor o menor medida en esta tesis doctoral: Gobierno de Cantabria, Gobierno de Omán, Autoridades Portuarias, Confederaciones Hidrográficas y CEPSA.

También agradecer a la Fundación Alfonso Martín Escudero la beca que me permitió realizar el *MSc. in Geographic Information Science* en la Universidad de Edimburgo. Los conocimientos adquiridos han dado pie a esta tesis doctoral.

Quiero dar las gracias a los compañeros de IHCantabria que han contribuido en los casos de estudio planteados en esta tesis doctoral, y en especial a los integrantes del Grupo de Tecnologías de la Información (Sheila Abad, Patricia Fernández, Víctor Velarde, Luis Pedraz, Marco Vega, Felipe Maza, Iñaki Silanes y David del Prado), sin ellos este trabajo no hubiera sido posible.

Por último, pero no menos importante, agradecer la dedicación y consejos de mi tutor, Raúl Medina, y José Juanes, por su asesoramiento y estímulo para llevar a buen puerto esta tesis doctoral.

Muchas gracias!,

pipe

abril 2017

Índice general

Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xv
1 Introducción	1
1.1 Objetivo	9
2 Implicaciones de la gestión digital de observaciones en el proceso de ayuda en la toma de decisión	11
2.1 Introducción	11
2.2 Metodología	13
2.2.1 Arquitectura del Sistema	14
2.2.2 Procesos de ayuda a la toma de decisión	17
2.3 Casos de Estudio	18
2.3.1 Gestión Integrada de Cuencas	20
2.3.2 Red de Calidad del Litoral	22
2.3.3 Gestión acuática portuaria	25
2.4 Resultados y discusión	28
2.5 Conclusiones	31
2.6 Comunicaciones	33
3 Modelización aplicada en los EDSS de Gestión del Riesgo de inundación costera	37
3.1 Introducción	37
3.2 Metodología	39
3.2.1 Arquitectura del Sistema	40
3.2.2 Proceso de ayuda a la toma de decisión	41
3.3 Casos de Estudio - Sistemas de análisis del riesgo	42
3.3.1 Modelo estático - MHRAS	42
3.3.2 Modo dinámico - IH DSS Flooding	48

ÍNDICE GENERAL

3.4	Resultados y discusión	61
3.5	Conclusiones	66
3.6	Comunicaciones	68
4	Sistemas operacionales en el proceso de ayuda en la toma de decisión	73
4.1	Introducción	73
4.2	Metodología	74
4.2.1	Arquitectura del Sistema	76
4.2.2	Procesos de ayuda a la toma de decisión	77
4.3	Casos de Estudio	78
4.3.1	<i>App Web Operational Forecast System</i>	78
4.3.2	<i>App Web ATHENEA</i>	80
4.3.3	<i>App Móvil IH-Tsusy</i>	82
4.3.4	<i>Plugin de escritorio THREDDDS Explorer</i>	85
4.4	Resultados y discusión	86
4.5	Conclusiones	92
4.6	Comunicaciones	94
5	Discusión	97
6	Conclusiones y futuras líneas de investigación	105
6.1	Conclusiones	105
6.2	Contribución de esta tesis al estado del arte	107
6.3	Futuras líneas de investigación	108
	Bibliografía	109

Índice de figuras

1.1	Evolución del porcentaje de internautas en España entre 2005 y 2015	5
1.2	Media anual de la temperatura de la tierra entre 1881 y 2016	6
1.3	Contexto de desarrollo de la tesis doctoral	8
2.1	Arquitectura del Sistema WAMIS	15
2.2	Esquema de elementos clave del WAMIS ODM	16
2.3	Modelo Conceptual del WAMIS ODM	18
2.4	WAMIS - EDSS MARCE gestión de muestras (<i>biota</i>)	21
2.5	WAMIS - EDSS MARCE consulta espacial de observaciones	21
2.6	WAMIS - EDSS Sistema Gestor DMA, consulta de observaciones	23
2.7	WAMIS - EDSS Sistema Gestor DMA, visualización espacial de estaciones de muestreo y masas de agua	23
2.8	WAMIS - EDSS Sistema Gestor DMA, comparación de observaciones de diferentes estaciones mediante gráficas dinámicas	24
2.9	WAMIS - Vídeo del EDSS ROM5.1	26
2.10	WAMIS - EDSS ROM5.1, aplicación en el Puerto de Manila como uso práctico de formación	27
3.1	Arquitectura del EDSS estático implementado para el riesgo de inundación costera por tsunamis y ciclones tropicales (MHRAS)	40
3.2	Arquitectura del EDSS dinámico implementado para el análisis del riesgo de inundaciones costeras (IH-DSS Flooding)	41
3.3	Áreas de estudio del EDSS MHRAS	42
3.4	Trayectoria de ciclones tropicales simulados	44
3.5	Localización de fuentes tsunamigénicas	44
3.6	MHRAS - Visualización de un caso de tsunami (<i>elevation</i>) proporcionado por la <i>Early Warning Data Base</i>	46
3.7	MHRAS - Visualización de la trayectoria de un ciclón tropical proporcionado por la <i>Early Warning Data Base</i>	46

ÍNDICE DE FIGURAS

3.8	MHRAS - Visualización de un caso de tsunami (<i>Inundation Lenght</i>) proporcionado por las <i>Planning Tools</i>	47
3.9	MHRAS - Visualización de un caso la inundación (<i>Depth</i>) proporcionada por las <i>Planning Tools</i>	47
3.10	IH-DSS Flooding - Secciones de Procesamiento dinámico SPRC	49
3.11	IH-DSS Flooding - Modelo exterior para Delta De L Orb	50
3.12	Serie temporal <i>Storm Surge</i> (SS)	52
3.13	Serie temporal Oleaje (Hs)	52
3.14	Serie temporal Viento (W0)	53
3.15	IH-DSS Flooding - selección de tormentas históricas	54
3.16	IH-DSS Flooding - selección de escenario de cambio climático	54
3.17	IH-DSS Flooding - medidas de adaptación mediante Wave Energy Converters (WEC)	55
3.18	IH-DSS Flooding - evolución del TWL en elemento boundary	55
3.19	Esquema Modelo Interior IHDSS-Flooding	56
3.20	Representación conceptual del TWL inundando el mallado del modelo RFSM-EDA	57
3.21	Casos reales (izquierda) y simulaciones con el RFSM-EDA (derecha)	57
3.22	IH-DSS Flooding - resultados del modelo de inundación (profundidades)	58
3.23	IH-DSS Flooding - resultados del modelo de inundación (velocidades)	58
3.24	IH-DSS Flooding - medidas de adaptación ambiental (recrecimiento del sistema dunar)	59
3.25	IH-DSS Flooding - edición de Receptores	60
3.26	Esquema análisis de Consecuencias IHDSS-Flooding	60
3.27	Vídeo del Sistema IH-DSS Flooding	62
3.28	Vídeo del Sistema <i>Multi Hazard Risk Assessment System</i> (MHRAS)	63
4.1	Contexto de uso de IH-MERCURIO	76
4.2	Secciones principales de IH-MERCURIO	78
4.3	Áreas del estudio del <i>Operational Forecast System</i> , proveedores y modelos implementados	79
4.4	Áreas del estudio del EDSS ATHENEA, proveedores y modelos implementados	81
4.5	Vídeo del Sistema ATHENEA	82
4.6	Interfaces de usuario, proveedores y modelos implementados en el Sistema Operacional de Simulación de Tsunamis	83
4.7	Vídeo del Sistema <i>IH Tsunamis System</i> (interfaz Web)	84
4.8	Vídeo del <i>plugin</i> THREDDS Explorer utilizando IH-MERCURIO	85

4.9	Vídeo de la previsión del ciclón <i>Chapala</i> proporcionada por el <i>Operational Forecast System</i>	87
4.10	Trayectoria de simulación del vertido proporcionada por el EDSS ATHENEA para el Vertido Monoboya CEPSA 28/09/2016 en la bahía de Algeciras	88
4.11	Vertido Monoboya CEPSA 28/09/2016 en playa del Rinconcillo	89
4.12	<i>App</i> Móvil del Sistema Operacional de Tsunamis - IHTsusy	90
5.1	Proceso de integración: de las observaciones a las decisiones	100

Índice de tablas

2.1	Características de las áreas de estudio (número de SP - <i>SamPles</i> , V - Variables, ST - <i>eStations</i> , WT - Observaciones de Agua, SD - Observaciones de Sedimento, BT - Observaciones de <i>Biota</i>)	28
2.2	Comunicaciones realizadas en el ámbito del capítulo 2	33
3.1	Principales EDSS de análisis del riesgo de inundación costera	38
3.2	Secciones del Sistema MHRAS. <i>Early Warning Database (EWDB) & Planning Tools: Hazard, Vulnerability & Risk Assessment (HVRA)</i>	45
3.3	Protocolos de interoperabilidad del Sistema MHRAS	48
3.4	Comunicaciones realizadas en el ámbito del capítulo 3	68
4.1	Proveedores metocean del <i>Operational Forecast System</i> para el Sultanato de Omán	80
4.2	Proveedores metocean del Sistema ATHENEA para las tres refinerías: Algeciras, Huelva y Tenerife	81
4.3	Tipos de usuario de los EDSS analizados	92
4.4	Comunicaciones realizadas en el ámbito del capítulo 4	94
5.1	Temporalidad de la información analizada en los Capítulos 2, 3 y 4	98
5.2	EDSS utilizados como casos de estudio	99
5.3	Principales Tecnologías utilizadas en los EDSS de estudio y su licenciamiento	103

ACRÓNIMOS

Listado de acrónimos utilizados en el documento:

ACA - Agencia Catalana del Agua
AEMET - Agencia Estatal de Meteorología
ASTARTE - Assessment STRategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe
ASTER GDEM - ASTER Global Digital Elevation Map
AT - Astronomical Tide
BCA Tool - Benefit Cost Analysis Tool
BID - Banco Interamericano de Desarrollo
CAPRA - Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment
CEPSA - Compañía Española de Petróleos S.A.U.
CF - Climate and Forecast
CHC - Confederación Hidrográfica del Cantábrico
CHEBRO - Confederación Hidrográfica del Ebro
COASTGAP - Coastal Governance and Adaptation Policies in the Mediterranean
CUAHSI - Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science
DaaS - Data as a Service
DMA - Directiva Marco del Agua
DSS - Decision Support Systems
EDSS - Environmental Decision Support System
EIS - Environmental Information System
EM-DAT - Emergency Events Database
ERMS - European Register of Marine Species
ESRI - Environmental Systems Research Institute
ETRS89 - European Terrestrial Reference System 1989
EVI - Environmental Vulnerability Index
EWDB - Early Warning DataBase Module
FEMA - Federal Emergency Management Agency
GBIF - Global Biodiversity Information Facility
GEO BON - Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network
GESHA - Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental
GIOC - Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas
GIS - Geographic Information System
GIZC - Gestión Integrada de Zonas Costeras
GMES - Global Monitoring for Environment and Security
GPL - General Public License
GRIB - Gridded Binary
HAZUS - Hazard United States

HDF - Hierarchical Data Format
HIRMAL - HIgh Resolution Limited Area Model
HIS - CUAHSI's Hydrologic Information System
Hs - altura de ola
html - HyperText Markup Language
HVRA - Hazard Vulnerability Risk Assessment
IDE - Infraestructura de Datos Espaciales
IGN - Instituto Geográfico Nacional
IIS - Internet Information Server
INSPIRE - INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe
IOC - Intergovernmental Oceanographic Commission
IOOS - Integrated Ocean Observing System
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
IT - Information Technology
ITIS - Integrated Taxonomic Information System
IZ - Impact Zones
KML - Keyhole Markup Language
LIDAR - Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging
MDT - Modelos Digitales del Terreno
Metocean - Meteo Oceanográfico
MHRAS - Multi Hazard Risk Assessment System
MIP - Mapping Information Platform
MOOC - Massive Online Open Course
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NEAM - North East Atlantic & Mediterranean
NetCDF - Network Common Data Format
NMHEWS - National Multi Hazard Early Warning System
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration
NOMADS - NOAA Operational Model Archive and Distribution System
ODM - Observation Data Model
OECD - Organization for Economic Cooperation and Development
OGC - Open Geospatial Consortium
OSM - OpenStreetMap
POT - Peak Over Threshold
QoE - Quality of Experience
RDBM - Relational DataBase Management System
RegIS - Regional Impact Simulator

ACRÓNIMOS

RFSM-EDA - Rapid Flood Spreading Method - Explicit Diffusion wave with Acceleration term

ROM - Recomendaciones de Obras Marítimas

RPO - Recovery Point Objective

RTO - Recovery Time Objective

SaaS - Software as a Service

SDSS - Spatial Decision Support Systems

SLA - Service Level Agreement

SMS - Short Message Service

SOCIB - Sistema de Observación Costero de las Islas Baleares

SPRC - Source Pathway Receptor Consequences

SQL - Structured Query Language

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SS - Storm Surge

TAMAR - Tartarugas Marinhas

THESEUS - Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate

THREDDs - Thematic Real-time Environmental Distributed Data Services

TSN - Taxonomic Serial Number

TWL - Total Water Level

TWLI - Total Water Level Index

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

URA - Agencia Vasca del Agua, UR Agentzia en euskera

USGS - United States Geological Survey

VGI - Volunteered Geographic Information

W0 - viento

WAMIS - Water quality Management Information System

WCS - Web Coverage Service

WEC - Wave Energy Converters

WGS84 - World Geodetic System 84

WMS - Web Map Service

WPS - Web Processing Service

1

Introducción

Las estudios universitarios en ciencias de la tierra instruyen a los alumnos en la aplicación del método científico como camino hacia el conocimiento. Dicho método, tal y como definió Francis Bacon, es iniciado en un proceso de Observación: aplicar atentamente los sentidos a un objeto o a un fenómeno, para estudiarlos tal como se presentan en realidad. Actualmente la cantidad de recursos tecnológicos de los que disponen los científicos permite generar ingentes cantidades de datos en el proceso de Observación, los cuales en muchas ocasiones son difícilmente gestionados por los propios científicos.

La gestión medioambiental de los sistemas hídricos debe por tanto hacer uso de las tecnologías de la información disponibles para mejorar el proceso de ayuda a la toma de decisiones y facilitar una correcta gestión de la información. “..cómo sea gestionada la información ambiental habilitará o imposibilitará su posterior análisis” (Pokorný 2006). La gestión de la información tiene un claro objetivo final que debe ser remarcado: una correcta gestión de la información permitirá ser utilizada en los procesos de toma de decisiones. Es importante tener en cuenta la siguiente sentencia:

... “An information product is data transformed into information particularly useful for you.”... (Tomlinson 2007)

La sentencia es aplicable a cualquier ámbito de aplicación y es ampliamente aceptada por la comunidad científica. El valor de los datos es indudable, y tomar decisiones basadas en datos permite documentar dichas decisiones. El estudio del medio, y más concretamente, el de los sistemas hídricos es una de las muchas disciplinas en las que el dato es fundamental en el proceso de toma de decisiones.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de información ambiental y por lo tanto la ayuda a la toma de decisiones es susceptible a los contextos normativos y tecnológicos. En este sentido, ambos aspectos han evolucionado significativamente en la última década. La Unión Europea ha establecido un contexto normativo con un objetivo claro, conservar y mejorar el buen estado ambiental de los sistemas acuáticos, habilitando a su vez el acceso a la información ambiental disponible por las administraciones. Los marcos normativos, transpuestos al ordenamiento jurídico español, más significativos para la gestión ambiental son listados:

1. La Directiva de Hábitats (92/43/CEE), relativa a la conservación de hábitats naturales y de la fauna y la flora silvestres, establece una red de zonas especiales de conservación (CEE 1992). La red incluye asimismo zonas de protección especial para las aves, designadas con arreglo a las disposiciones de la Directiva 79/409/CEE (CE 2009).
2. La Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), conocida por sus siglas DMA, establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de gestión de los recursos hídricos y sus ecosistemas (CE 2000).
3. La Directiva de la Estrategia Marina (2008/56/CE), establece un marco de acción comunitario para la política del medio marino para adoptar las medidas necesarias para lograr o mantener un buen estado medioambiental del medio marino para 2020 (CE 2008).
4. La Directiva de Inundaciones (2007/60/CE), tiene como objetivo generar nuevos instrumentos a nivel comunitario para reducir las posibles consecuencias de las inundaciones mediante la gestión del riesgo (CE 2007b).
5. La Directiva INSPIRE (2007/2/CE) establece un marco para el establecimiento de una Infraestructura de Información Espacial en la Comunidad Europea para el año 2021 (CE 2007a).

Además, en los últimos años ha sido establecida una clara tendencia *Open Data*, a partir de la cual se pretende democratizar el acceso a la información y el establecimiento de un ecosistema económico en torno a la liberación de la información. Las agencias americanas NOAA¹ o USGS² tienen una política *Open Data* muy arraigada, proporcionando en abierto un gran número de servicios. Europa por otro lado, a través del *European Data Portal*³ ha comenzado a centralizar y habilitar toda una serie de servicios *Open Data*, entre los cuales destaca el proyecto Copernicus⁴, previamente conocido como GMES, que proporciona servicios de acceso abierto a datos de sus seis áreas temáticas: tierra, mar, atmósfera, cambio climático, gestión

¹<http://www.noaa.gov/>

²<https://www.usgs.gov/>

³<https://www.europeandataportal.eu/>

⁴<http://www.copernicus.eu>

de emergencias y seguridad. A nivel nacional el organismo que más ha apostado por facilitar el acceso a la información mediante servicios interoperables ha sido el IGN, y están siguiendo sus pasos agencias como AEMET y Puertos del Estado.

Por otra parte, el contexto Tecnológico ha evolucionado considerablemente en sus cuatro facetas: la medición, las comunicaciones, el almacenamiento/procesamiento y la comunicación directa con los usuarios.

En el proceso de medición, la sensórica ha sido mejorada notablemente (Hart & Martinez 2006), tanto en la calidad de la medida como en el abaratamiento de los propios sensores. Este hecho, junto con las mejoras en redes de comunicación, ha permitido establecer el concepto IoT o internet de las cosas, basado en cantidades ingentes de sensores que proporcionan información en tiempo real a través de internet. Globalmente, tanto empresas privadas como entidades públicas recopilan información puntual de forma constante (Burton 2016). En el caso de sensores satelitales, el Landsat 7 y 8 recopilan 1200 imágenes al día, aproximadamente 1Gb por imagen, mientras el Programa Copernicus, con su flota de satélites, pronto generará más de 10TB por día de información libre y abierta.

El almacenamiento y procesamiento de la información ha evolucionado notablemente gracias a las nuevas tecnologías *Big Data* y a la mejora de *hardware* y *software* para el procesamiento. Vitolo *et al.* (2015) proporcionan una completa revisión de los tecnologías Web relacionadas con el “*Big Environmental Data*”. Sin embargo, es la experiencia y el conocimiento del medio los que nos permiten analizar la información disponible frente a un cambio o problema detectado. En este sentido, los denominados *Decision Support Systems* (DSS) o Sistemas de ayuda a la toma de decisión emergieron como una solución tecnológica para la resolución de problemas y soporte en decisiones complejas. Los primeros estudios teóricos sobre el proceso de ayuda a la toma de decisión tuvieron lugar entre los años 1950 y comienzos de 1960. Fue en 1970 cuando los primeros DSS fueron diseñados para proporcionar ayuda en la toma de decisión, concretamente en el ámbito empresarial.

Actualmente, el gran número de disciplinas y complejidad de procesos de ayuda a la toma de decisión ha provocado un amplio abanico de investigaciones y aproximaciones técnicas. A pesar de que el rango de tipos de DSS puede ser muy amplio (*Knowledge-driven DSS*, *document-driven DSS*, *communication-driven DSS*, etc.), los DSS más implementados son identificados como los *Data-driven DSS* y *Model-driven DSS* (Bhargava *et al.* 2007). Tal y como señala la literatura, desde el inicio de los DSS en los años 60 y comienzos de 70, los principales hitos en el diseño y desarrollo de los DSS se han centrado en el *data warehousing* y el *data mining* como mayores facilitadores de la ayuda a la toma de decisión, influenciados también por los avances en los *Web-based DSS* (Carlsson & Turban 2002). En las últimas décadas, el crecimiento exponencial de investigación del medio natural y su intrínseca relación con la información espacial han supuesto la implicación de las Geotecnologías en el diseño y

1. INTRODUCCIÓN

construcción de DSS aplicados al medioambiente, los cuales son denominados *Environmental Decision Support Systems (EDSS)*(Matthies *et al.* 2007). Tanto Gobiernos como el sector privado reconocen que la geoinformación es un componente fundamental en el proceso de la toma de decisiones (Carpenter & Snell 2013). El informe del *Organization for Economic Cooperation and Development (OECD 2017)*, titulado “*Earth observation for decision making*”, identifica dos oportunidades clave en la mejora del proceso de toma de decisión: (1) la monitorización de recursos naturales y (2) la combinación de datos geoespaciales con otros datos, con el fin de ampliar la información disponible y mejorar el proceso de toma de decisión.

Entre las Geotecnologías más significativas, destacar los avances en los Sistemas de Información Geográfica (GIS), Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), geoprotocolos de interoperabilidad y *geo-standards*, siendo la comunidad *Open Source* uno de los grandes artífices de los avances en estas tecnologías. Es destacable el establecimiento del modelo de licenciamiento *Open Source* en el panorama actual de las Tecnologías de la Información, donde las grandes compañías tecnológicas han apostado claramente por establecer estrategias *Open Source* en sus proyectos: Amazon con 15 proyectos en el repositorio de GitHub¹, Google con sus más de 900 proyectos *Open Source*², Facebook con su “*Open Source program*”³ en el que lanzaron más de 77 proyectos en el 2016 (Abernathy 2016) y Microsoft con 196 proyectos en su programa *Open Source*⁴. Esta apuesta por el *Open Source* no pasa desapercibida en disciplinas de ciencias de la tierra, Swain *et al.* (2015) y colaboradores hacen una revisión de la gran cantidad de proyectos software *Open Source* en el desarrollo de *apps* Web aplicadas a los recursos hídricos y ciencias de la tierra publicados en revistas *peer-review* entre 2004 y 2014. La evolución del *cloud computing* o computación en la nube también ha supuesto una apertura de servicios escalables tanto para el almacenamiento como para el procesamiento de la información antes inimaginables. La arquitectura de sistemas de información geográfica tradicional ha pasado de estar orientada a aplicaciones de escritorio a arquitecturas orientadas a servicio, la combinación de “*GIS server technology*” e intuitivos clientes Web ha permitido habilitar el uso de los Sistemas de Información Geográfica a todo tipo de usuarios (Tomlinson 2007).

Uno de los aspectos de mayor impacto social en la evolución tecnológica de la última década han sido los *smartphones*, un nuevo paradigma tecnológico que ha permitido establecer nuevos modelos de comunicación, negocio y acceso a la información. El incremento en la penetración de *smartphones* es un hecho imparable, en donde Asia Pacífico y Europa Occidental están a la cabeza, siendo España el líder europeo con un 81 % de los teléfonos móviles según la 15^a edición del informe “*La Sociedad de la Información en España*”. España ha experimentado

¹<http://amzn.github.io/>

²<https://developers.google.com/open-source/projects>

³<https://code.facebook.com/projects/>

⁴<https://opensource.microsoft.com/>

un incremento de uso de internet de casi el 40 % en los últimos 10 años. Tal y como puede apreciarse en la figura 1.1, el porcentaje de personas que acceden a internet semanalmente ha pasado de ser de un 35.1 % en el año 2005 a un 74.7 % en el año 2015 (ONTSI 2016).

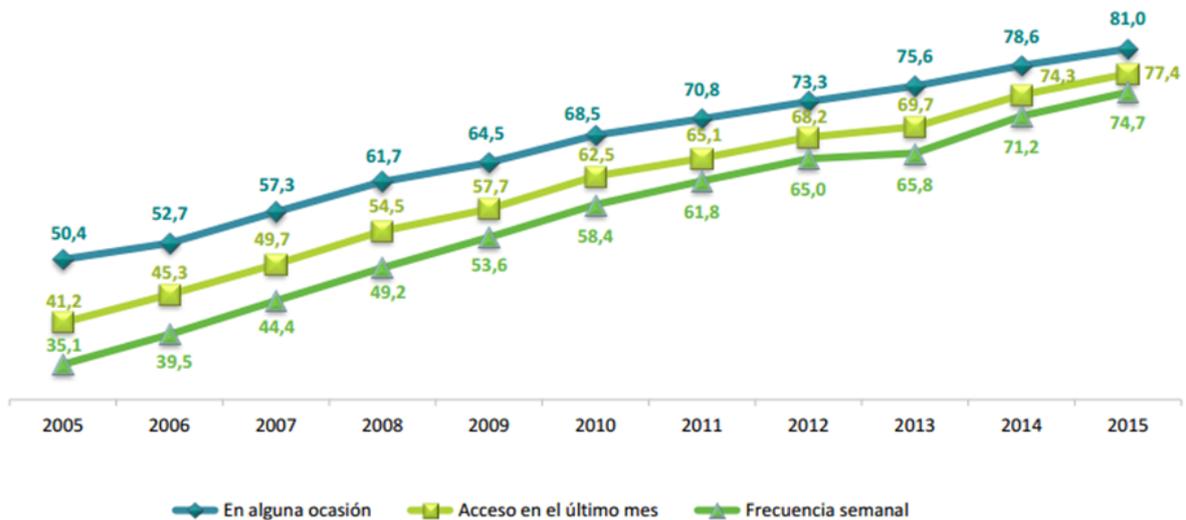


Figura 1.1: Evolución del porcentaje de internautas en España entre 2005 y 2015 - fuente: ONTSI.

Una de las características más singulares de este nuevo paradigma tecnológico es el diseño y desarrollo de nuevas *apps* específicas para dispositivos móviles. Dos de los aspectos más interesantes son la comunicación directa de las *apps* con el usuario y el uso de la sensórica del dispositivo por parte de las *apps*, por ejemplo, el uso del GPS del móvil permite la generación de infinidad de servicios basados en la geolocalización del usuario.

Las líneas anteriores resumen brevemente el contexto normativo y tecnológico en el que se enmarca esta tesis doctoral. Sin embargo, una de las principales causas de este trabajo es el contexto ambiental en el que nos encontramos actualmente, tanto por la propia dinámica del planeta como por la influencia del ser humano sobre dicha dinámica.

El efecto de la contaminación antropogénica es evidente en cursos fluviales, costas y océanos. Las eventos de contaminación más relevantes suelen ser aquellos relacionados con actividades industriales. En España, uno de los eventos de contaminación más alarmantes fue el del *Prestige*, petrolero que se hundió en 2002 frente a las costas gallegas ocasionando un vertido de crudo que provocó uno de los mayores desastres ecológicos de la historia de España.

El cambio climático, inducido por la actividad del ser humano, es uno de los grandes retos a los que se enfrente la sociedad actual. Recientemente, la NASA ha manifestado que el año 2016 ha sido el más caluroso de los registrados desde 1881 (NASA 2017a), sin embargo es la tendencia de toda la serie lo que alerta a los expertos, tal y como puede apreciarse en la figura 1.2. El IPCC (2007) establece en su informe que el coste neto del daño provocado por

1. INTRODUCCIÓN

el cambio climático probablemente sea significativo y tienda a incrementarse con el paso del tiempo. Desde el año 2000, EM-DAT¹ (*Emergency Events Database*) registró una media de 341 desastres (principalmente inundaciones y tormentas) al año, incrementándose un 44 % respecto al periodo 1994-2000 y más de dos veces el período 1980-1989 (CRED 2015). En el período 1995 - 2015 las inundaciones han afectado a 2.3 billones de personas, mientras las tormentas, incluyendo ciclones y huracanes, han provocado 242.000 víctimas (UNISDR 2015).

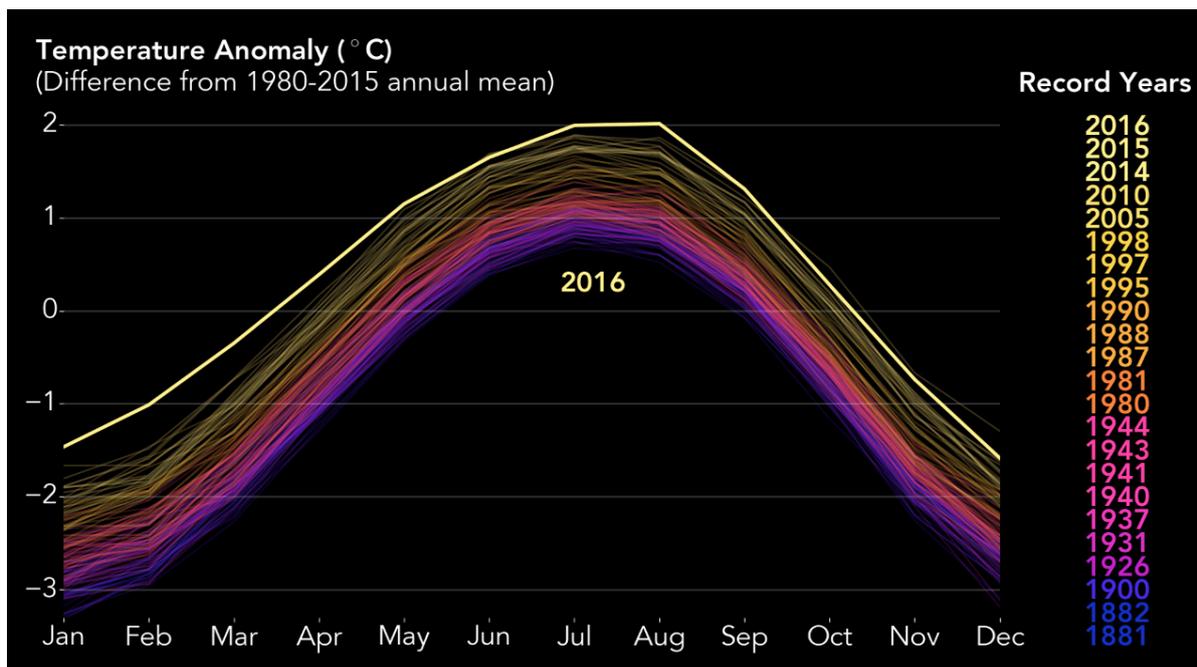


Figura 1.2: Media anual de la temperatura de la tierra entre 1881 y 2016 - fuente: NASA.

La dinámica natural de la tectónica de placas provoca zonas donde el vulcanismo y la sismicidad son activos. Dicha sismicidad causó uno de los mayores eventos de pérdidas humanas producidas por un desastre natural: en el año 2004 el Océano Índico sufrió un terremoto que causó un tsunami, quitando la vida de 226.000 personas. Japón también sufrió en el año 2011 la investida de uno de los mayores tsunamis registrados, causando la muerte de 20.000 personas y la alarmante situación de contaminación nuclear, al verse afectada la integridad estructural de las plantas nucleares afectadas por el tsunami (UNISDR 2016).

Por lo tanto, el contexto *Ambiental*, el contexto *Normativo*, las actuales capacidades *Tecnológicas* y el contexto *Profesional* en el que se ha desarrollado esta tesis doctoral (figura 1.3), permiten plantear diversas preguntas de investigación. La evolución de las tecnologías de la información es imparable, en algunos casos su ritmo acelerado supone verdaderos retos en el propio mantenimiento de DSS (Benamati & Lederer 2008), en este sentido es planteada la

¹<http://www.emdat.be/>

siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo podemos utilizar las tecnologías de la información para transferir el conocimiento científico-técnico multidisciplinar a la sociedad a través de los EDDS?

La monitorización del medio acuático es una práctica básica en el proceso de evaluación de la calidad de las aguas, proporcionando información del estado actual del medio. En la actualidad existen infraestructuras tecnológicas dedicadas a la gestión de las observaciones, denominados Sistemas de Observación. Sin embargo, dichos Sistemas no tienen carácter de ayuda a la toma de decisión. En este sentido, es planteada la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son los aspectos principales a tener en cuenta en la gestión digital de las observaciones orientada a la ayuda en la toma de decisiones en el medio acuático?

En los sistemas hídricos es habitual el uso de modelos numéricos, empleados para proporcionar una representación abstracta de una situación real, en la cual sólo la información relativa al problema estudiado es representado. La modelización del medio permite obtener datos que pueden representar una aproximación al pasado, “*hindcast*”, al momento actual, “*nowcast*”, y a eventos futuros, “*forecast*”. En este sentido, es planteada la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué singularidades presenta la modelización integral del medio costero aplicada al análisis del riesgo de inundación? ¿Qué capacidades / limitaciones presentan los EDDS para facilitar el proceso de ayuda a la toma de decisión en este ámbito?

Las capacidades de predicción proporcionadas por los modelos numéricos aplicados al medio acuático tienen una tremenda repercusión en los procesos de ayuda a la toma de decisión. Sin embargo, las infraestructuras tecnológicas al cargo de los Sistemas Operacionales meteorológico-oceanográficos no presentan una aproximación hacia el proceso de ayuda a la toma de decisiones. En este sentido es planteada la siguiente pregunta de investigación:

¿Pueden los Sistemas Operacionales meteorológico-oceanográficos proporcionar información relevante para el diseño y desarrollo de EDDS? ¿Qué características deben cumplir para ello?

Las preguntas de investigación son planteadas bajo una meta común: analizar los aspectos científico-técnicos que permitan llevar a cabo la transformación de datos en información útil para el proceso de ayuda a la toma de decisión. Con este fin, el documento ha sido dividido en los siguientes capítulos:

- el capítulo 2 analiza el diseño y desarrollo de un Modelo de Observaciones orientado a la ayuda en la toma de decisiones en la gestión de la calidad del medio acuático,
- el capítulo 3 analiza las singularidades de los Sistemas de Gestión del Riesgo de inundación costera basados en la modelización del medio,
- el capítulo 4 analiza los aspectos clave que caracterizan un Sistema Operacional orientado a proporcionar ayuda en la toma de decisión en los sistemas hídricos,

1. INTRODUCCIÓN

- el capítulo 5 lleva a cabo una discusión de los resultados obtenidos en el contexto normativo y tecnológico actual, y
- finalmente, el capítulo 6 proporciona las conclusiones obtenidas, así como futuras líneas de investigación.

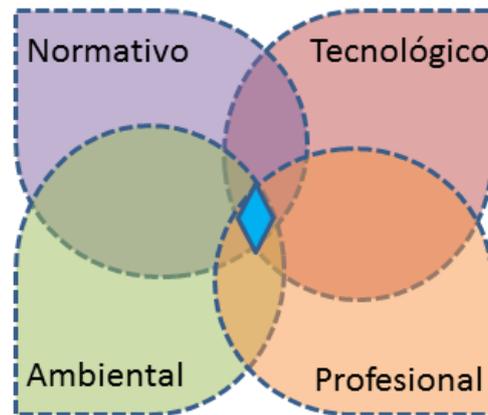


Figura 1.3: Contexto de desarrollo de la tesis doctoral

1.1 Objetivo

Nos encontramos por tanto en un contexto que requiere llevar a cabo una transferencia tecnológica de soluciones científico-técnicas multidisciplinares a la sociedad, las cuales permitan reducir el tiempo de toma de decisión en materias ambientales y mejorar la calidad y consistencia de dichas decisiones. Para ello, ha sido establecido un objetivo principal y tres objetivos específicos:

El objetivo principal de esta tesis doctoral es poner en valor la potencialidad de las actuales tecnologías de la información para la implantación de EDSS aplicados a los sistemas hídricos. El alcance de dicho objetivo es desarrollado a través los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar las particularidades del proceso de gestión digital de observaciones cuantitativas orientadas a la ayuda en la toma de decisión en los sistemas hídricos.
2. Identificar las capacidades de los EDSS en la modelización integral del medio costero aplicadas a la gestión del riesgo de inundaciones.
3. Definir los aspectos principales que deben cumplir los Sistemas Operacionales meteo-oceanográficos para facilitar el proceso de ayuda a la toma de decisión.

El agua es crítica para el desarrollo sostenible, incluyendo la integridad del medio ambiente y el alivio de la pobreza y el hambre, y es indispensable para la salud y el bienestar de los humanos

Naciones Unidas



Implicaciones de la gestión digital de observaciones en el proceso de ayuda en la toma de decisión

2.1 Introducción

La monitorización del medio está generando ingentes cantidades de observaciones digitales del medio. La gestión de dichas observaciones provoca que los investigadores dediquen una cantidad significativa de tiempo llevando a cabo tareas básicas de recopilación y transformación de datos (Goodall *et al.* 2008). El almacenamiento de datos en formato de hoja de cálculo tradicional o documentos de texto ya no son un medio práctico para administrar grandes conjuntos de datos ambientales (Carleton *et al.* 2005). Por ello, centros de investigación, Universidades y agencias de administraciones gubernamentales estadounidenses se enfrentaron a la necesidad de desarrollar ciber-infraestructuras que proporcionaran soporte en esta materia para facilitar las actividades de investigación en las ciencias ambientales (NSFCC 2007). Actuales ciber-infraestructuras como DataONE¹, LTER² o CUAHSI-HIS³, entre otras, utilizan la capacidad de Internet para consultar y compartir la información ambiental.

En Europa, la demanda de acceso electrónico a la información medioambiental no es reciente, comenzó como resultado de la evolución económica y política; en junio de 1990, la Directiva Europea 90/313/CEE inició un proceso de cambio en la forma en que las autoridades públicas

¹<https://www.dataone.org/>

²<https://portal.lternet.edu/nis/home.jsp>

³<https://www.cuahsi.org/>

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

abordan el acceso y la difusión de los datos ambientales. La presente Directiva tiene por objeto “*garantizar la libertad de acceso y difusión de la información sobre el medio ambiente en poder de las autoridades públicas...*”. En enero de 2003, la Directiva 2003/4/CE establece que “*la información medioambiental progresivamente está siendo almacenada en bases de datos digitales, las cuales son más fácilmente accesibles por el público a través de las redes públicas de comunicación*”. Además, en marzo de 2007, la Directiva INSPIRE (2007/2/CE) establece normas generales para el establecimiento de la Infraestructura de Información Espacial en la Comunidad Europea (INSPIRE).

Desde los años setenta, la Comisión Europea ha desarrollado diversas herramientas legislativas para controlar el estado de calidad, impactos y presiones de los sistemas fluviales, estuarinos y costeros. Más recientemente, el establecimiento de la normativa europea, Directiva Marco del Agua (CE 2000) ha supuesto un antes y un después en la monitorización y seguimiento del medio acuático. Obtener y gestionar información útil y trazable es un paso clave para comprobar el estado de calidad de las aguas europeas, aumentando considerablemente la información recogida mediante redes de vigilancia medioambiental con el fin de responder a los requerimientos de dichas directivas, especialmente para la Directiva Marco del Agua (Dworak *et al.* 2005). La obligatoriedad de informar desde el ámbito local (Demarcaciones Hidrográficas) al Europeo sobre la evolución de cada una de las masas de agua constituye uno de los principales retos en la gestión integrada de estas normativas. Por ello, las Tecnologías de la Información han sido el gran facilitador de la gestión digital de la información ambiental, desempeñando un papel clave en el almacenamiento, la gestión y la puesta a disposición de datos esenciales para el análisis científico y la toma de decisiones (Goodall *et al.* 2008, Szaro *et al.* 1998). Existen diversas especificaciones que describen aspectos lógicos de la gestión de observaciones (Cox 2007, EDSC 2006, NWQMC 2006), entre ellas destacar el “*Observation and Measurements best practices*” del Open Geospatial Consortium¹ (OGC), entidad internacional dedicada a la definición de estándares abiertos e interoperables de la información espacial. Las funcionalidades principales de un Sistema de Observación Ambiental pueden dividirse en: (i) recopilación de información, (ii) organización y almacenamiento y (iii) publicación. Adicionalmente, existen Sistemas de Observación que incluyen entre sus funcionalidades el análisis de la información gestionada (Horsburgh *et al.* 2011). Los usuarios principales de los Sistemas de Observación suelen ser grupos de investigación o expertos en la materia con conocimientos suficientes para interpretar la información proporcionada por el Sistema.

La revisión bibliográfica en cuanto a (i) recopilación de información (Conover *et al.* 2010, Hart & Martinez 2006), (ii) organización y almacenamiento (Boran *et al.* 2008, Carleton *et al.* 2005, Horsburgh *et al.* 2008, Pokorný 2006) y (iii) publicación (Goodall *et al.* 2008, Horsburgh *et al.* 2009, Huang *et al.* 2011) permitió identificar dos aspectos de interés:

¹<http://www.opengeospatial.org/>

- La mayoría de los Modelos de Datos de Observaciones (*Observation Data Models*, ODM) son específicos del ámbito de desarrollo: fluvial, marino, biológico, etc. Muy probablemente, la creación de ODM específicos responde a los nichos profesionales de los usuarios de la información gestionada: ecólogos fluviales, ecólogos marinos, etc. Sin embargo, el ciclo integral del agua es continuo, siendo analizadas variables ambientales, físico-químicas y biológicas, del agua y del bentos en toda su continuidad.
- Los Sistemas de Observación publican los datos brutos para ser utilizados e interpretados por usuarios expertos.

Complementariamente a los Sistemas de Observación, los Sistemas de ayuda a la toma de decisión (DSS) se basan en proporcionar las herramientas necesarias para facilitar el proceso de ayuda a la toma de decisión al usuario final. A pesar de que los Sistemas de ayuda en la toma de decisiones (DSS) fueron desarrollados inicialmente para proporcionar soporte en los complejos análisis de negocio, las ciencias ambientales han desarrollado un gran interés en esta disciplina. Los EDSS han sido aplicados mucho más en el campo del medio acuático que en cualquier otra disciplina ambiental, siendo la gestión de la calidad del medio acuático, mediante la modelización numérica (*Model-driven EDSS*), uno de los focos de mayor interés ([Argent et al. 2009](#), [Fischer et al. 2017](#), [Matthies et al. 2007](#), [Poch et al. 2004](#), [Rizzoli & Young 1997](#)).

Sin embargo, sería necesario integrar las capacidades de los Sistemas de Observación y los “*Data-driven EDSS*”, permitiendo unificar ambas aproximaciones bajo una infraestructura y modelo de gestión de información único, evitando las duplicidades detectadas en función del ámbito de estudio (fluvial, biológico, litoral, etc.) y orientando la gestión de las observaciones hacia la ayuda en la toma de decisiones.

Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es identificar las particularidades del proceso de gestión digital de observaciones cuantitativas orientadas a la ayuda en la toma de decisión en los sistemas hídricos.

2.2 Metodología

El diseño de un único Modelo de Datos de Observaciones fue realizado, siendo implementado en un modelo relacional capaz de albergar las características necesarias para una correcta gestión de la información del medio fluvial, estuarino y costero. El diseño tuvo en cuenta la importancia de la escala en la gestión medioambiental ([Goodchild 2011](#)): si el fenómeno bajo estudio está influenciado por detalles menores que la resolución espacial o temporal de los datos, entonces el resultado del análisis y, por lo tanto, la consiguiente toma de decisión será claramente incierta. Las características principales del ODM son:

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

1. Independencia de la escala.
2. Independencia de la resolución temporal.
3. Independencia del dominio espacial.

Las características listadas habilitan la implementación del Modelo de Observaciones diseñado en escalas locales, regionales y nacionales, con diversas resoluciones temporales y en cualquier área de estudio.

El Modelo de Datos de Observaciones fue implementado en tres unidades de estudio, cubriendo las tres principales categorías de aguas superficiales, según la DMA: fluviales, de transición (estuarinas) y costeras. En todas las unidades de estudio se incorporan datos físico-químicos y biológicos de la columna de agua y del bentos. Con el objetivo de evaluar la capacidad del ODM para trabajar en diferentes escalas, los ámbitos de estudio cubren también diversas escalas de trabajo: escala nacional, regional y local.

Finalmente, con el fin de testear y validar el correcto diseño del ODM, se diseñaron y desarrollaron EDSS específicos para la gestión de información en las diferentes unidades de estudio (fluvial, estuarina y costera).

2.2.1 Arquitectura del Sistema

La explotación del ODM en sus respectivos EDSS fue llevada a cabo mediante el desarrollo de una infraestructura de gestión de información cuantitativa denominada “*Water quality Management Information System (WAMIS)*”.

WAMIS fue diseñado basado en tecnología cliente/servidor, la cual es reconocida como una tecnología de referencia en la integración, análisis y difusión de datos espaciales heterogéneos en las ciencias ambientales (Charvat *et al.* 2013, Huang *et al.* 2011, Vescoukis *et al.* 2012). En esta arquitectura, el servidor está al cargo de la consulta, análisis y procesado de los datos, mientras que el cliente permite la interacción del usuario, la generación de informes y la visualización de gráficos y mapas (Ghaemi *et al.* 2009).

El Sistema diseñado fue hospedado en el Centro de Proceso de Datos del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, IHCantabria. Dicho Sistema cuenta con una configuración de tres secciones (figura 2.1): (1) clientes Web, (2) Servidor Web, y (3) Servidor de Base de Datos Relacionales (RDBM).

El diseño y desarrollo específico de *Web-based* EDSS permite a los usuarios finales la interacción con la información. El cliente Web o interfaz de usuario realiza peticiones que son construidas dinámicamente; el usuario interactúa con el sistema a través del navegador Web

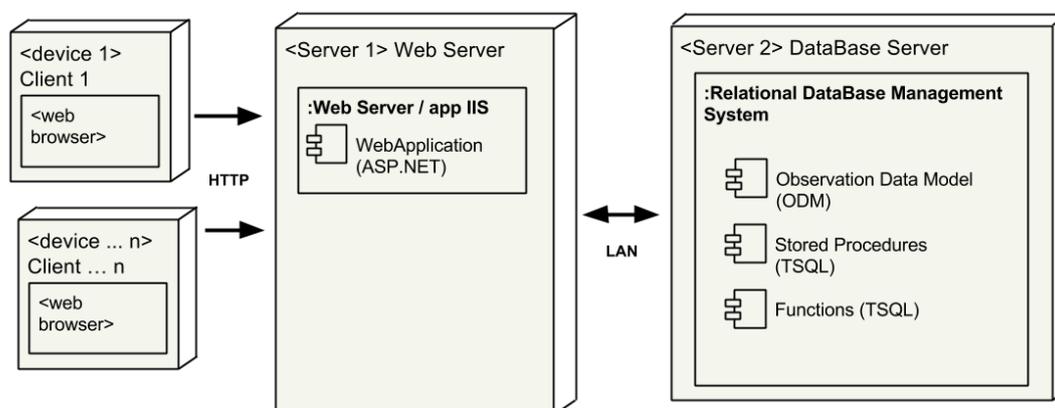


Figura 2.1: Arquitectura del Sistema WAMIS

llevando a cabo consultas, visualización de mapas y edición de datos, principalmente. El comportamiento dinámico con mapas y tablas (formato html) es debido a la comunicación establecida entre el Servidor Web y el servidor de Bases de Datos Relacional.

El diseño del WAMIS-ODM fue desarrollado mediante el análisis de ODM relevantes, tales como el desarrollado por el *CUAHSI's Hydrologic Information System*¹ (HIS) y el indicado por el *Open Geospatial Consortium* (OGC) en el “*Observation and Measurements OGC best practice document*”(Cox 2007). El conocimiento experto de científicos y técnicos involucrados en los casos de estudio también fue uno de los factores principales durante el diseño del Modelo de Observaciones que se describe a continuación.

Cada medida u observación obtenida en las inspecciones del medio supone la entidad principal. La información asociada a cada medida debe poseer obligatoriamente datos que respondan al “cuándo” (fecha de muestreo), al “dónde” (lugar de la toma de la muestra) y, finalmente, al “qué” (tipo de variable que ha sido medida). Además de esta información, el Sistema debe contemplar la posibilidad de almacenar metadatos relativos a la toma de muestras en el campo y al análisis llevado a cabo en los laboratorios (figura 2.2).

El modelo se basa en un esquema en estrella, donde las medidas u observaciones son la entidad principal. Como entidades secundarias referidas a la entidad principal hay que destacar los muestreos (entidad temporal), las estaciones (entidad geográfica), los fenómenos (variables analizadas) y los taxones, para aquellas medidas que hacen referencia a datos biológicos. Como información adicional también puede almacenarse información relevante de cada dato registrado, como el protocolo de campo, el protocolo de laboratorio, el sensor de campo, el muestreador/es y el analista/as de laboratorio.

A continuación se describen las entidades más significativas del WAMIS-ODM (figura 2.3): Medida, Estación, Muestreo, Fenómeno y Taxones.

¹<https://www.cuahsi.org/his>

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

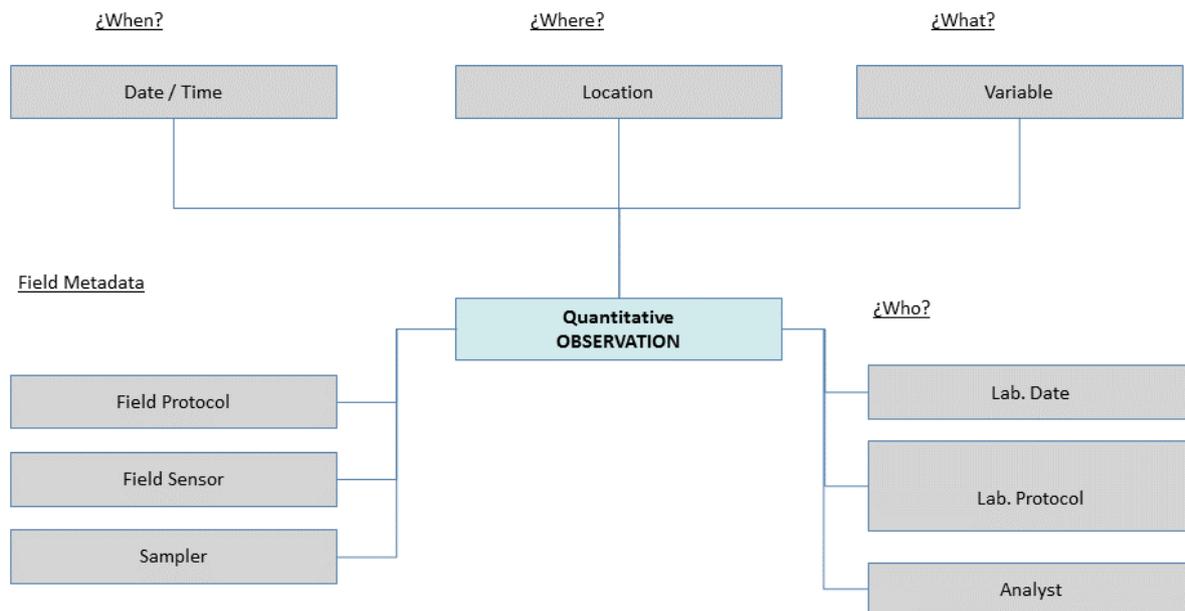


Figura 2.2: Esquema de elementos clave del WAMIS ODM

MEDIDA- *Observation and Measurement*

La medida es la entidad fundamental del modelo de datos, esta entidad almacena toda la información relativa a mediciones y observaciones tomadas en el medio, tanto el valor tomado como la información asociada.

ESTACIÓN- *Location*

El concepto de estación se refiere a la localización de la estación de muestreo, pero obviando la profundidad, ya que ésta se asocia a cada registro medido para poder contemplar mediciones del perfil de la columna de agua.

La entidad estación almacena las coordenadas en el sistema de referencia WGS84, el cual es equivalente a efectos prácticos al ETRS89. El sistema además cuenta con una librería de transformación de coordenadas con el fin de facilitar la incorporación de estaciones provenientes de otro sistema de referencia.

MUESTREO- *Sample*

La temporalidad de los muestreos se gestiona a través de las entidades “*Campaña*” y “*Muestreo*”. Un proyecto dado puede tener varias campañas, y a su vez una campaña puede tener varios muestreos. El muestreo es el espacio temporal en el que se lleva a cabo el proceso de toma de muestras, mientras que la campaña es el espacio temporal en el que se lleva a cabo una serie de muestreos.

FENÓMENO- *Variable*

La entidad “Fenómeno” contiene todas las variables muestreadas en todos los proyectos. Las variables están agrupadas según la sustancia analizada, asociando cada variable a un tipo de fenómeno, es decir agua, sedimento, *bentos / biota*. El Sistema además cuenta con una librería de transformación de unidades.

TAXA

Las mediciones biológicas poseen una característica intrínseca: “toda medición biológica está asociada a un taxón”. Esta clara dependencia incide directamente en la estructura de la base de datos, ya que debe albergar una ingente cantidad de taxones existentes de los diferentes Reinos: flora, fauna, etc.

Algunas organizaciones internacionales han desarrollado Sistemas de categorización taxonómica, como el “*Integrated Taxonomic Information System*¹ (ITIS)”, el cual se utilizó para obtener una base de datos inicial, que fué completada con más taxones procedentes de otras bases de datos internacionales, como el “*European Register of Marine Species*² (ERMS)”. De este modo, en la entidad “Taxón” de la base de datos podemos encontrar el código TSN de todos los taxones obtenidos a través del ITIS y un AphiaID con aquellos taxones no encontrados en la base de datos del ITIS, pero sí en la base de datos del ERMS. La base de datos también incorpora el almacenamiento del árbol filogenético de cada taxón, de modo que pueda ser consultado cualquier dato asociado a una categoría taxonómica superior, como por ejemplo, obtener el número de familias, órdenes o géneros obtenidos en una campaña.

2.2.2 Procesos de ayuda a la toma de decisión

El Modelo de Observaciones permite almacenar las medidas y observaciones llevadas a cabo, así como realizar consultas específicas. El objetivo de dichas consultas es mejorar el proceso de toma de decisiones proporcionando información relevante para el usuario. El diseño de consultas específicas permitió evaluar el Modelo de Observaciones diseñado.

Con el fin de automatizar cualquier consulta requerida por los usuarios, se desarrollaron *procedimientos almacenados*, funciones y desencadenadores en la base de datos relacional. Un *procedimiento almacenado* es un elemento de base de datos reutilizable que realiza operaciones en la base de datos. Los procedimientos almacenados contienen código *SQL* que puede, entre otras cosas, consultar, insertar, actualizar o eliminar registros. La ventaja que nos ofrece un procedimiento almacenado es que, al ser ejecutado en respuesta a una petición de usuario, se actúa directamente sobre el motor de bases de datos. Como tal, posee acceso directo a los

¹<https://www.itis.gov/>

²<http://www.marbef.org/data/erms.php>

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

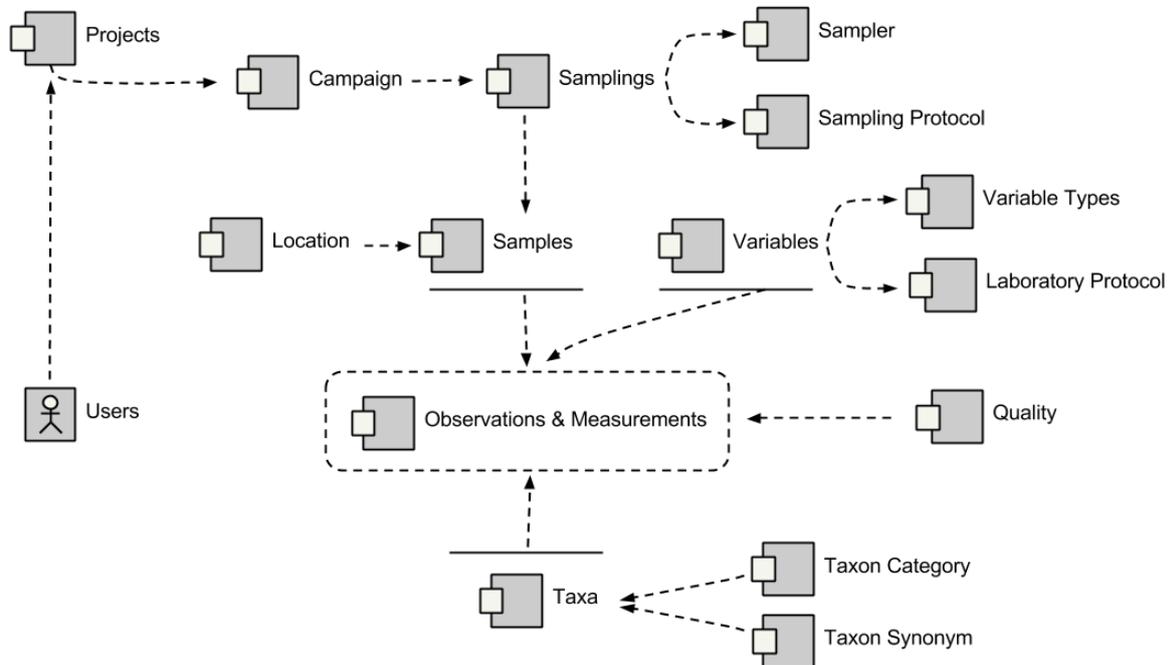


Figura 2.3: Modelo Conceptual del WAMIS ODM

datos que necesita manipular y sólo necesita enviar sus resultados de regreso al usuario, deshaciéndose de la sobrecarga resultante de comunicar grandes cantidades de datos salientes y entrantes.

Un *desencadenador* es un tipo especial de *procedimiento almacenado* que se ejecuta en la base de datos al modificar datos de una tabla especificada mediante el uso de una o más de las operaciones de modificación de datos: *UPDATE*, *INSERT* o *DELETE*. Los *desencadenadores* o también llamados “*Triggers*”, permiten que el Sistema Gestor de Base de Datos desencadene una serie de acciones tras la inserción o actualización de datos.

Al igual que las *funciones* en los lenguajes de programación, las *funciones* definidas por el usuario en la base de datos son rutinas que aceptan parámetros, realizan una acción, como un cálculo complejo, y devuelven el resultado de esa acción como un valor. El valor devuelto por las *funciones* desarrolladas puede ser un valor escalar único o un conjunto de resultados en forma de tabla.

2.3 Casos de Estudio

Tal y como se ha explicado, los casos de estudio comparten el marco de la infraestructura WAMIS, en la cual toda la información es centralizada en el WAMIS-ODM y utilizada por *apps* Web diseñadas específicamente, pero que comparten funcionalidades de (i) *data curation*, (ii) inserción/actualización y (iii) consulta de la información.

(i) La infraestructura desarrollada facilita a los usuarios finales las siguientes tareas comunes de *data curation*:

- Identificación de *outlayers* mediante el graficado de la información.
- Identificación de errores relacionados con las unidades establecidas para cada variable.
- Identificación de errores taxonómicos.
- Identificación de errores en la localización espacial de estaciones de muestreo.

(ii) La inserción /actualización de la información centralizada en la infraestructura se facilita a los usuarios finales a través de los siguientes formularios:

1. Edición de proyectos.
2. Edición de campañas.
3. Edición de muestras.
4. Edición de muestreos.
5. Edición de protocolos de campo.
6. Edición de muestreadores.
7. Edición de variables.
8. Edición de estaciones.
9. Edición de procedimientos *in situ*.
10. Edición de procedimientos de laboratorio.
11. Edición de taxones y categorías taxonómicas.

(iii) La integración y centralización de la información permite a los usuarios finales acceder al repositorio de datos a través de un navegador Web, pudiendo realizar las siguientes tareas:

- Consulta de las observaciones y medidas aplicando filtros por proyecto, tipo de dato, campañas, estaciones, unidades de gestión y variables.
- Consulta de las observaciones y medidas aplicando filtros espaciales por localización de interés.
- Consulta de los muestreos realizados en función del proyecto y variable.

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

- Consulta de las observaciones y medidas de la *biota* proporcionando el árbol filogenético del taxón observado.
- Consulta de las observaciones y medidas de la *biota* proporcionando el sumatorio de observaciones asociados a una categoría taxonómica.
- Consulta de estadísticas básicas (media, desviación, máximos, mínimos) de las observaciones y medidas.
- Visualización de gráficos dinámicos de las observaciones y medidas: comparación de observaciones entre diferentes estaciones, evolución temporal de las observaciones, gráfica de estadísticas básicas y perfil de la variables en la columna de agua.

2.3.1 Gestión Integrada de Cuencas

En el año 2009 IHCantabria inicia el Proyecto MARCE¹, titulado “*Development of a Spatial Framework for Integrated Catchment Management*”, el cual fue desarrollado entre 2009 y 2011 bajo la financiación del Plan Nacional de I+D+I del Ministerio de Ciencia e Innovación. El objetivo del proyecto fue integrar la información ambiental de las cuencas bajo un único marco de trabajo a escala nacional, con el fin de identificar las relaciones biofísicas clave necesarias para asegurar la máxima variabilidad en ecosistemas fluviales y determinar las consecuencias ecológicas de los posibles impactos antrópicos. La información biológica y fisicoquímica de los cauces fluviales gestionados por la Agencia Catalana del Agua² (ACA), la Confederación Hidrográfica del Ebro³ (CHEBRO), la Agencia Vasca del Agua⁴ (URA), la Confederación Hidrográfica del Cantábrico⁵ (CHC) y el Gobierno de Cantabria⁶, principalmente, fue recopilada para su análisis.

Uno de los objetivos del proyecto MARCE fue el desarrollo de un EDSS a escala nacional orientado a integrar la información muestreada por diversas instituciones (ACA, URA, CHC, CHEBRO, Gobierno de Cantabria, etc.). La figura 2.4 muestra el panel de gestión de muestras, y la figura 2.5 los resultados de una consulta espacial.

Los usuarios finales del EDSS MARCE son investigadores y analistas, los cuales tras recopilar la gran cantidad de información de las Agencias al cargo de la monitorización de las cuencas de estudio pudieron integrarla en el Sistema para su posterior análisis y divulgación pública a través del portal IH Rivers⁷.

¹<http://marce.ihcantabria.com/>

²<http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca/>

³<http://www.chebro.es/>

⁴<http://www.uragentzia.euskadi.eus/>

⁵<http://www.chcantabrico.es/>

⁶<https://www.cantabria.es/>

⁷<http://ihrivers.ihcantabria.com/>

2.3 Casos de Estudio

Gestión de Muestras

Proyecto: **MARCE Cantabria** Múltiples Campañas Biota

Campaña: **Hijar Oct-06** Campañas Físico-Químico

Muestreo: **25/10/2006 - IH Cantabria - Muestreo 0**

[Nuevo Muestreo](#) [Ver/Editar Muestreo](#)

Codigo	Tipo Fenómeno	Número Muestras	Número Medidas
2	Sediment	0	0
4	Biota (Taxa)	6	166
5	Biota (CFR Indicators)	0	0
6	Biota (Fish)	0	0
1	Water	6	78
3	Bioacumulacion	0	0
7	Biomarkers	0	0

Nueva Muestra

Estación: **Seleccione un registro** Protocolo Campo: **"In situ"** +

Lista de Muestras BIOTA (TAXA)

[ProyH1 20 kicks](#) [ProyH2 20 kicks](#) [ProyH3 20 kicks](#) [ProyH4 20 kicks](#) [ProyH5 20 kicks](#) [ProyH6 20 kicks](#)

ProyH6

Número de Medidas: 28
Protocolo de Campo: 20 kicks

Editar	Eliminar	Variable	Valor Medido	Protocolo	Profundidad	Réplica	Fecha Análisis	Calidad Medida	Taxón	TSN
	X	Abundance (n Specimen)	32	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Hydracarina	
	X	Abundance (n Specimen)	120	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Erpobdella	69444
	X	Abundance (n Specimen)	4	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Helobdella stagnalis	69398
	X	Abundance (n Specimen)	392	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Oligochaeta	68422
	X	Abundance (n Specimen)	20	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Ancyclus fluviatilis	76581
	X	Abundance (n Specimen)	8	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Radix	76525
	X	Abundance (n Specimen)	4	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Physa	76677
	X	Abundance (n Specimen)	1	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Gyraulus	76592
	X	Abundance (n Specimen)	248	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Atyaephyra desmarestii	
	X	Abundance (n Specimen)	156	IHCantabria - Abundancia (n individuos)	0	1		Very High	Echinogammarus	656501

Figura 2.4: WAMIS - EDSS MARCE gestión de muestras (biota)

Consulta de Medidas con Mapa

Tipo de Dato: **Water**

Proyectos:

- A.P. Tarragona ROM
- Bahía de Santander (2001 / 2002 / 2003)
- Caracterización Bahía de Santander (1988)
- DMA
- DMA - Ríos
- MARCE Andalucía
- MARCE Cantabria
- MARCE Cataluña
- MARCE CHN

Periodo de búsqueda:

Entre 2 fechas Meses y años

Inicio: Fin:

Estación

Estación	Fecha	Protocolo	Medidas
LI001	25/08/2008 0:00:00	Unknown	10
LI002	24/08/2007 0:00:00	Unknown	10
LI003	24/08/2007 0:00:00	Unknown	10
LI003	25/08/2008 0:00:00	Unknown	10
LI005	23/08/2007 0:00:00	Unknown	10
LI006	25/08/2007 0:00:00	Unknown	10
LI008	14/06/2006 0:00:00	Unknown	10

[Generar fichero con medidas](#)

Figura 2.5: WAMIS - EDSS MARCE consulta espacial de observaciones

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

El EDSS MARCE fue desarrollado bajo el marco de la infraestructura WAMIS, en la cual toda la información fue centralizada en el WAMIS-ODM. En este sentido, las capacidades de la infraestructura WAMIS: *data curation*, inserción/actualización y consulta de la información, están siendo explotadas.

2.3.2 Red de Calidad del Litoral

A partir del año 2005, comenzó el proceso de implementación de la Directiva DMA en Cantabria¹ a través de la puesta en funcionamiento de la Red de Control de Calidad del Litoral del Gobierno de Cantabria en colaboración con el IHCantabria. Con más de 10 años de observaciones y mediciones, la Red de Calidad ha generado una ingente cantidad de información ambiental.

Esta red tiene como objetivo cumplir con los requerimientos de monitorización exigidos por la Directiva DMA en su artículo 8 (CE 2000), atendiendo tanto a las aguas de transición como las costeras, incluyendo el análisis biológico y físico-químico de las masas de agua para la evaluación del estado ecológico (columna de agua, sedimentos, fitoplancton, angiospermas, macroalgas, peces y macroinvertebrados bentónicos). Uno de los objetivos del proyecto fue el desarrollo de un EDSS a escala regional, Sistema Gestor DMA, orientado a integrar la información muestreada por la red de monitorización.

Los usuarios finales del EDSS Sistema Gestor DMA son técnicos especialistas del Gobierno de Cantabria e investigadores, los cuales periódicamente actualizan la información físico-química y biológica del estado de las aguas del litoral de Cantabria. Las figuras 2.6 y 2.7 muestran consultas de datos y generación de mapas dinámicos (formateado en *html*). El Sistema también permite visualizar gráficos de los datos observados dinámicamente (figura 2.8).

El EDSS Sistema Gestor DMA ha sido utilizado para integrar más de 10 años de monitoreo del litoral bajo el marco de la infraestructura WAMIS, integrando toda la información en un único repositorio (WAMIS-ODM) y permitiendo su acceso a través de su interfaz Web. En este sentido, las capacidades de la infraestructura WAMIS: *data curation*, inserción/actualización y consulta de la información, están siendo explotadas.

¹<http://dmacantabria.cantabria.es>

CONSULTA DE MEDIDAS (FILTRO AVANZADO)

Proyectos:
 Programa de vigilancia emisarios AEQT
 Pruebas
 Recursos
 Red de Calidad

Tipo de Dato:
 Bioacumulacion
 Biota (Taxa)
 Sediment
 Water

Campañas:
 Red de Calidad Agua Otoño 2016
 Red de Calidad Agua Verano 2016
 Red de Calidad Agua Primavera 2016
 Red de Calidad Agua Invierno 2016

Estaciones con Datos:
 Red de Calidad A-AC01
 Red de Calidad A-AC03
 Red de Calidad A-AC04
 Red de Calidad A-AC06

Variables:
 Ammonium Water
 Chlorophyll a Water
 Dissolved oxygen Water
 Nitrates Water

Realizar Consulta

Figura 2.6: WAMIS - EDSS Sistema Gestor DMA, consulta de observaciones

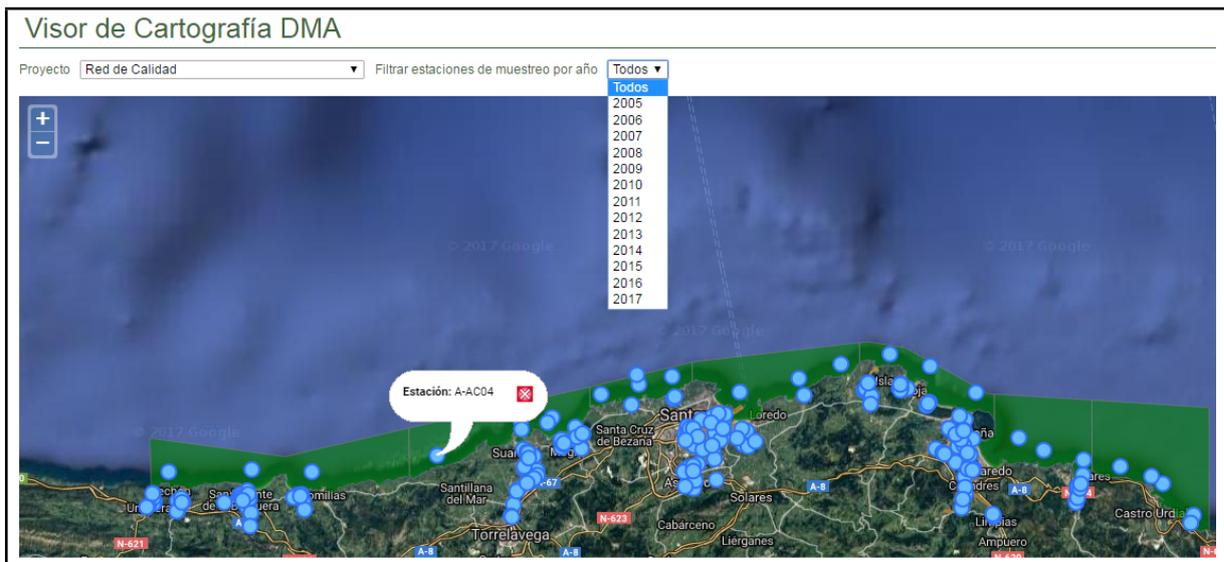


Figura 2.7: WAMIS - EDSS Sistema Gestor DMA, visualización espacial de estaciones de muestreo y masas de agua

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

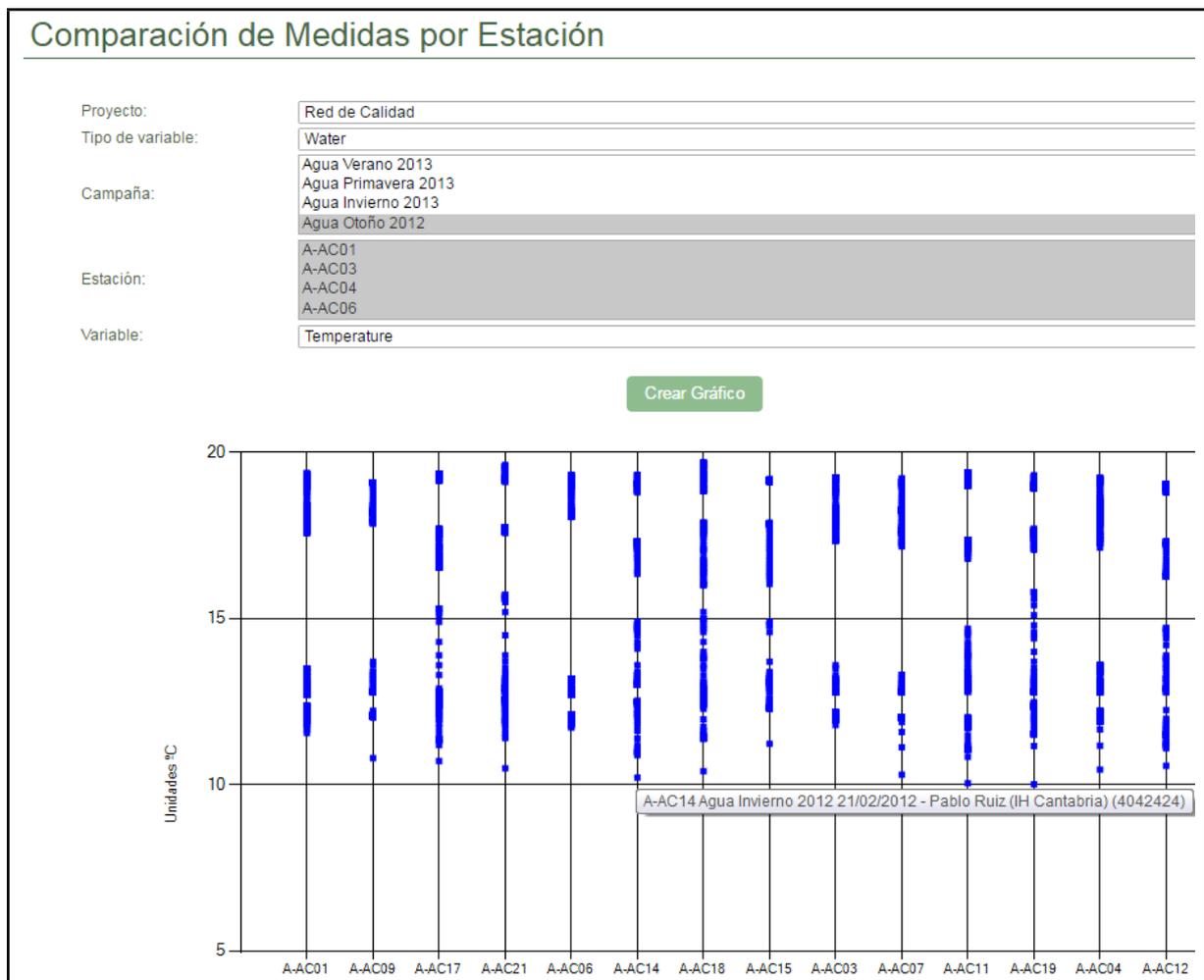


Figura 2.8: WAMIS - EDSS Sistema Gestor DMA, comparación de observaciones de diferentes estaciones mediante gráficas dinámicas

2.3.3 Gestión acuática portuaria

En el año 2005 fue validado el procedimiento metodológico ROM5.1¹, formando parte del programa de Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM) para abordar la problemática de la calidad de las aguas portuarias, recogiendo el espíritu y los principios establecidos por la DMA (Juanes *et al.* 2013).

La ROM5.1 es un procedimiento metodológico orientado a complementar las herramientas adoptadas por numerosos Puertos españoles y europeos en el ámbito de la gestión de la calidad de las aguas, incluyendo los principios y conceptos de la DMA (Ondiviela *et al.* 2013).

La aplicación del procedimiento metodológico ROM5.1 requiere, entre otros, la evaluación de la calidad del medio acuático portuario (agua, sedimento y *bentos*). La vigilancia periódica mediante la toma de muestras *in situ*, posterior análisis en laboratorio y gestión de información son por lo tanto necesarios para la correcta implementación del procedimiento metodológico ROM5.1. Cabe destacar que esta recomendación ha sido desarrollada y adoptada por Puertos del Estado como modelo de gestión interno (Juanes *et al.* 2013).

Los requerimientos metodológicos de la ROM5.1 precisan de una correcta y eficiente gestión de la información ambiental de las masas de agua Portuarias. En este sentido, la infraestructura WAMIS ha sido implementada para el desarrollo de un EDSS a escala local, EDSS ROM5.1, orientado a la gestión de las observaciones ambientales de las aguas portuarias en cada puerto. Los usuarios finales del EDSS ROM5.1 son los gestores portuarios, los cuales periódicamente actualizan la información físico-química y biológica de las aguas portuarias para conocer su estado. Para ello, el Sistema hace uso de las capacidades de la infraestructura WAMIS: *data curation*, inserción/actualización y consulta de la información. La evaluación de la calidad de las aguas portuarias se divide en cuatro evaluaciones principales:

1. Evaluación de la calidad físico-química del sedimento
2. Evaluación de la calidad biológica del agua y del bentos
3. Evaluación de la calidad físico-química del agua
4. Evaluación de la calidad química del agua y del Sedimento

Dependiendo de las características portuarias (renovación de las aguas en las unidades de gestión, etc.) y la demarcación hidrográfica a la que pertenece el Puerto, las evaluaciones y umbrales establecidos pueden variar. Por lo tanto, el EDSS ROM5.1 incluye de forma programática, a través de *procedimientos almacenados*, los cálculos necesarios para facilitar el proceso de evaluación de la calidad de las aguas portuarias, entre otros. La figura 2.9 muestra

¹<http://rom51.ihcantabria.com/>

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

la interfaz de evaluación de calidad de las aguas portuarias, en el pie de la figura se proporciona el enlace al vídeo donde es mostrado el funcionamiento del EDSS ROM5.1.

El EDSS ROM5.1 ha sido implementado en varias autoridades portuarias: Autoridad Portuaria de Gijón¹, Autoridad Portuaria de Tarragona², Autoridad Portuaria de Cádiz³ y Autoridad Portuaria de Tenerife⁴. Además, el Proyecto Interreg Portonovo⁵: “*Water quality in harbours*” permitió implentar al Sistema nuevas metodologías generadas en el ámbito de este proyecto europeo (Gómez *et al.* 2015).

Adicionalmente, el Sistema ha sido utilizado como herramienta de formación práctica en el curso titulado “ROM5.1:Calidad de Aguas Portuarias”, curso *MOOC* proporcionado a través de la plataforma MiriadaX, permitiendo el acceso al Sistema a través de la Web ROM5.1⁶ (figura 2.10). Actualmente han sido realizadas 6 ediciones del curso, con un total de 8652 alumnos inscritos, de los cuales finalizaron con éxito 1889 alumnos.

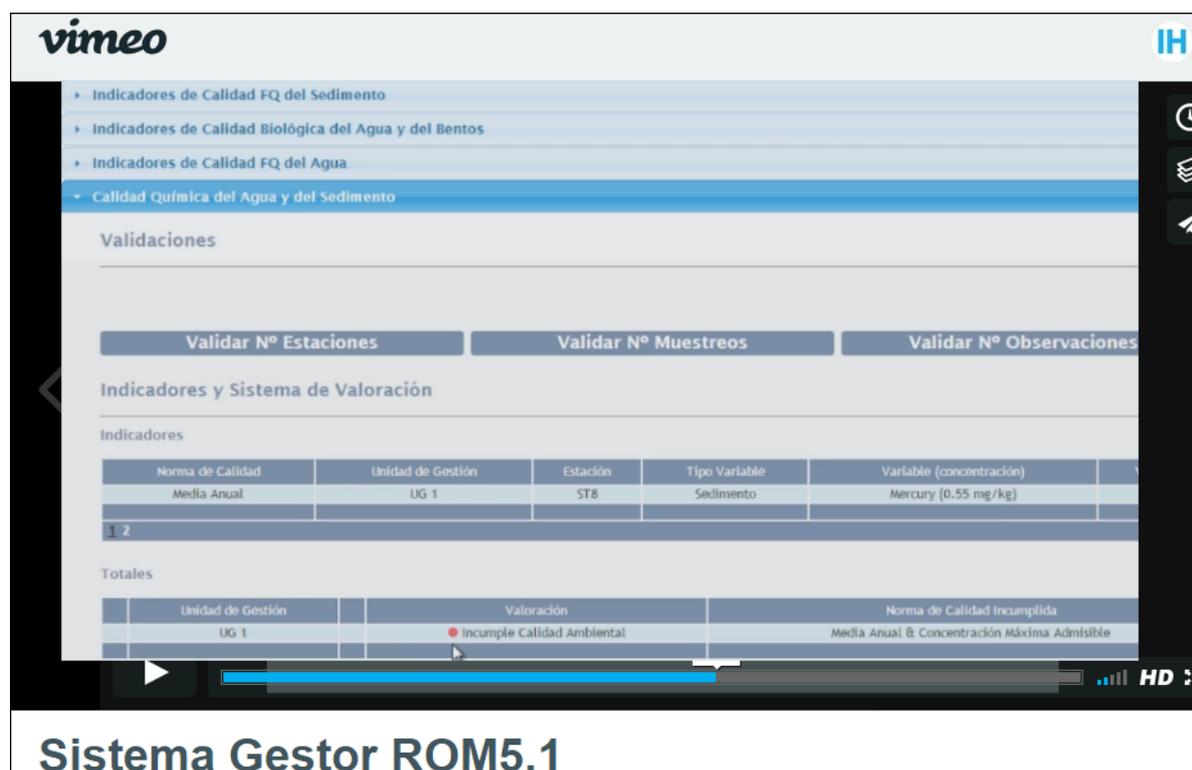


Figura 2.9: WAMIS - Vídeo del EDSS ROM5.1 - <https://vimeo.com/ihcantabria/rom51>

¹<https://www.puertogijon.es>

²<https://www.porttarragona.cat>

³<http://www.puertocadiz.com>

⁴<http://www.puertostenerife.org>

⁵<http://portonovo.ihcantabria.com/>

⁶<http://rom51.ihcantabria.com/aplicacion/>

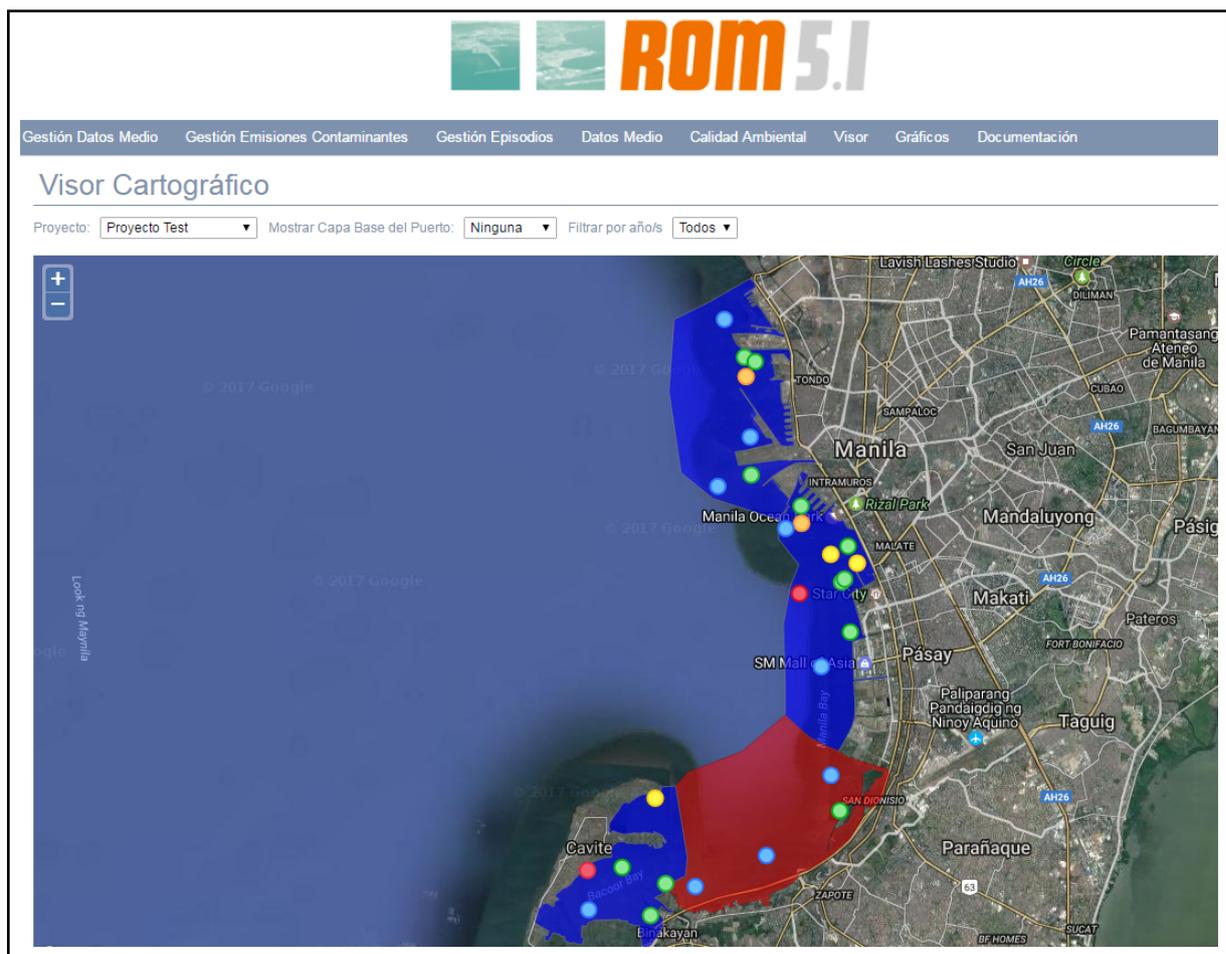


Figura 2.10: WAMIS - EDSS ROM5.1, aplicación en el Puerto de Manila como uso práctico de formación

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

2.4 Resultados y discusión

El ODM presentado ha sido implementado bajo la infraestructura WAMIS en diferentes contextos y bajo diferentes escalas espaciales, permitiendo evaluar y validar la funcionalidad del WAMIS-ODM en el medio fluvial, estuarino y costero.

A pesar de que todos los casos de estudio son aplicados a la disciplina de la gestión de la calidad de las masas de agua, éstos presentan diferencias significativas: el primer caso de estudio es aplicado a las aguas fluviales, el segundo a aguas de transición y costeras, mientras que el tercero está dedicado a la calidad de “aguas muy modificadas” (*sensu* DMA), las aguas portuarias. La siguiente tabla muestra diferencias significativas en cuanto a escala de trabajo y mediciones realizadas.

EDSS	Scale - Area	Sistema Acuático	Muestras	Observ.
MARCE	Nacional 125.000 km ²	Aguas Fluviales	ST - 2838 V - 72 SP - 36229	WT - 229.361 SD - 0 BT - 351067
Sistema Gestor DMA	Regional 50 km ²	Aguas de Transición & Costeras	ST - 193 V - 115 SP - 8923	WT - 278509 SD - 18841 BT - 38716
ROM5.1	Local 50 km ²	Aguas de Transición & Costeras	ST - 113 V - 476 SP - 6160	WT - 451398 SD - 22154 BT - 2340

Tabla 2.1: Características de las áreas de estudio (número de SP - *SamPles*, V - *Variables*, ST - *eSTations*, WT - *Observaciones de Agua*, SD - *Observaciones de Sedimento*, BT - *Observaciones de Biota*)

Es destacable que el EDSS MARCE, con una escala de trabajo nacional, presenta un gran número de estaciones (ST) y un bajo número de variables (V) analizadas, focalizándose en observaciones del agua (WT) y bentos (BT). El Sistema Gestor DMA, con una escala de trabajo regional presenta un número de estaciones reducido pero un gran número de observaciones debido a sus 10 años de actividad. Finalmente, en una escala local y en un área altamente modificada por el hombre, las zonas portuarias, el dato más significativo es el gran número de variables analizadas en el Sistema ROM5.1.

El desarrollo de un único ODM para la gestión de la calidad acuática ha presentado diversas dificultades, tales como: (1) el uso de clasificaciones taxonómicas, (2) la gestión de unidades, (3) la heterogeneidad semántica, (4) la generalización de datos ambientales y (5) las diferencias entre datos brutos y datos derivados:

1. La Taxonomía es una disciplina dinámica y en continua actualización, por lo tanto la gestión y actualización de las categorías taxonómicas es un aspecto importante. Además, pueden aparecer posibles inconsistencias en el criterio de categorización taxonómica de determinados taxones entre científicos involucrados en diferentes dominios de

investigación, como por ejemplo: ecólogos costeros y ecólogos fluviales. Aspecto también identificado por Scholes *et al.* (2012) en su trabajo de integración y armonización de un Sistema Global de Observaciones de biodiversidad (Scholes *et al.* 2008). Sorprendentemente, también ha sido significativo identificar taxones con una misma definición provenientes de reinos distintos, por ejemplo: *Osmia sinuata* y *Pharus legumen*. Iniciativas como la del *Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network*¹ (GEO BON) o el *Global Biodiversity Information Facility*² (GBIF) podrían centralizar la gestión taxonómica, evitando inconsistencias entre dominios de investigación (terrestres, marinos y fluviales).

2. Una eficiente gestión de las unidades de medida de cada variable es fundamental. Los diversos laboratorios proporcionan analíticas en diferentes unidades que deben ser integradas. Por lo tanto, el Sistema debe proporcionar una conversión de unidades para facilitar una completa integración de las analíticas.
3. La heterogeneidad semántica de las fuentes de datos impide el descubrimiento, acceso, interpretación, integración e intercambio de datos (Horsburgh *et al.* 2014). Los principales problemas detectados fueron el uso de homónimos y sinónimos referidos a los nombres de las variables y a los taxones. Las tecnologías aplicadas al campo de la semántica jugarán un papel significativo en el campo de la gestión de datos durante los próximos 5-10 años (Carpenter & Snell 2013). El uso de estándares en el caso de las variables y la gestión de sinónimos y homónimos en la base de datos de taxones fue requerido.
4. La generalización de datos ambientales, es decir, hacer más grosera la resolución espacial o temporal de los datos muestreados es una práctica común en las ciencias ambientales, lo cual en algunos casos provoca la pérdida de información valiosa. Investigadores y gestores deben tener presente que los datos ambientales deben ser almacenados con la máxima resolución temporal y espacial posible, futuros estudios podrían requerir las máximas resoluciones temporales o espaciales.
5. El WAMIS-ODM ha sido diseñado para gestionar información bruta y proporcionar a su vez procedimientos que permitan realizar análisis dinámicos. En ocasiones, los laboratorios proporcionan resultados analíticos (datos derivados, no información bruta) que deben ser almacenados en el Sistema. Esta información debe ser analizada cuidadosamente para evitar inconsistencias.

¹<http://geobon.org/>

²<http://www.gbif.org/>

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

Un aspecto fundamental que presenta el modelo de datos presentado es su capacidad para gestionar información adicional relativa a la observación y al proceso de medición. Conocer las metodologías utilizadas, protocolos, sensores, muestreadores, etc. permite a un nuevo usuario interpretar y utilizar, o no, las observaciones en su análisis. La gestión de metadatos puede ser descrita como la gestión de la huella de cada observación, una correcta descripción de la huella de observación es fundamental para seguir el rastro del proceso de medición. Los metadatos asociados a cada observación proporcionan información decisiva para una correcta futura explotación de los datos.

El modelo de observaciones WAMIS-ODM fue diseñado sin contemplar mediciones asociadas a especímenes, es decir, observaciones que han sido realizadas sobre un mismo individuo o espécimen (como por ejemplo: peso y talla de una trucha o analíticas de un mejillón). Este requerimiento funcional fue solicitado en una etapa tardía del desarrollo por lo que no pudo implementarse en el Modelo de Observaciones. Futuras versiones del WAMIS-ODM deberán contemplar este requerimiento funcional.

La selección de la tecnología apropiada ha sido clave para la gestión y visualización de la información almacenada en el modelo de datos. Los Sistemas ambientales de ayuda a la toma de decisión (EDSS) centralizan la información ambiental, permitiendo un fácil y múltiple acceso a la información y al conocimiento generado, prueba de ello es el uso del EDSS ROM5.1 en cursos online masivos y abiertos (MOOC). Las tecnologías Web cumplen con estos requisitos funcionales, además de ofrecer otros aspectos significativos: centralización de la actualización del *software*, escalabilidad del *hardware* y *software*, centralización del *bug tracking* y ayuda al usuario. Además, el uso de aplicaciones Web es accesible mediante un navegador Web, *software* al que están habituados los usuarios finales.

Por otra parte, la implementación de tecnologías Web permiten migrar del modelo clásico de producto *software*, producto instalado en las máquinas del usuario, al modelo de Servicio. Los datos y el conocimiento son proporcionados como Servicio, estando disponibles las 24 horas del día los 365 días del año a través de una conexión a internet y un navegador Web.

Los aspectos técnicos que han surgido tras la implementación del Sistema en los diferentes casos de estudio han sido discutidos. Otro aspecto con la misma relevancia que los aspectos técnicos son los aspectos sociales; la actitud y voluntad de enfrentarse a un cambio tecnológico son aspectos significativos a tener en cuenta en una implementación tecnológica (Argent *et al.* 1999). La puesta en funcionamiento del Sistema en los casos de estudio ha permitido identificar tres aspectos relevantes:

- entre los usuarios continúa existiendo una mala interpretación del concepto base de datos, cualquier archivo que contenga información cuantitativa es considerado base de datos,

- algunos gestores o científicos, normalmente aquellos con menos conocimientos tecnológicos, perciben una pérdida de control, aumento de incertidumbre y pérdida de confianza,
- las reglas impuestas por el ODM para cumplir con la integridad del Sistema provocan cierto malestar o inquietud entre los usuarios, probablemente relacionado con el hecho de que la mayoría gestionaban su información en hojas de cálculo o documentos de texto, los cuales no consideran ninguna regla o proceso de validación.

2.5 Conclusiones

Ha sido realizado un acercamiento, mediante las Tecnologías de la Información, entre la gestión de datos realizada por los Sistemas de Observación y los Sistemas de ayuda a la toma de decisión (*Data-driven* EDSS), permitiendo unificar ambas aproximaciones bajo una infraestructura y modelo de gestión único, evitando las duplicidades detectadas en función del ámbito de estudio y orientando la gestión de las observaciones hacia los procesos de ayuda a la toma de decisiones.

Ha sido diseñado un Modelo de Datos de Observaciones, WAMIS - ODM, lo suficientemente flexible y genérico para ser implementado en la gestión de la calidad de las aguas fluviales, estuarinas y costeras, siendo a su vez explotable por Sistemas ambientales de ayuda a la toma de decisión, *Data-driven* EDSS, bajo una misma infraestructura tecnológica denominada WAMIS (Water quality Management Information System).

Los principales características del proceso de gestión digital de observaciones cuantitativas del medio acuático son:

- la localización de la observación,
- el momento en que se realizó la observación,
- el fenómeno observado (variable), teniendo en cuenta que ciertas observaciones podrían hacer referencia a la *biota* (ej. abundancia, peso seco, etc.).

Secundariamente, debe ser gestionada la huella de la observación, los metadatos: protocolos de campo, sensores utilizados, muestreador, protocolo de laboratorio, analista de laboratorio, etc.

La implementación del WAMIS-ODM a través de la infraestructura WAMIS proporciona el ciclo de vida de los datos: recolección, validación, organización y manipulación de datos ambientales, permitiendo análisis científicos y superando la heterogeneidad de datos de diversas fuentes.

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

El Modelo de Datos de Observaciones, WAMIS-ODM, ha sido implementado en tres casos de estudios satisfactoriamente, mostrando su versatilidad y flexibilidad respecto a: (i) resolución espacial, (ii) resolución temporal, (iii) localización y (iv) ámbito de estudio (fluvial, litoral, etc.). El Modelo por lo tanto permite gestionar eficientemente observaciones cuantitativas de la matriz de agua, sedimento y biológica, así como incorporar dichas observaciones en el proceso de ayuda a la toma de decisión.

El diseño y desarrollo de *Data-driven* EDSS aplicados a la gestión de la calidad de los sistemas hídricos debe tener en cuenta los siguiente aspectos:

- la taxonomía puede variar entre científicos de diferentes ámbitos,
- una correcta gestión de unidades es clave,
- la gestión semántica de las variables es fundamental,
- debe almacenarse información con una máxima resolución espacial y temporal,
- los datos derivados deben ser generados dinámicamente a partir de los datos brutos.

La tecnología Web y la arquitectura cliente servidor ha demostrado ser una buena opción para la implementación de EDSS, centralizando la información y proporcionando un Servicio software (SaaS) y Datos como Servicio (DaaS) para la ayuda en la toma de decisiones ambientales. Sin embargo, deben ser tenidos en cuenta la necesidad de personal especializado y los recursos económicos necesarios para el mantenimiento de la infraestructura necesaria (*hardware* y *software*).

Una implementación exitosa de un *Data-driven* EDSS aplicado a la gestión de la calidad de los sistemas hídricos requerirá de actitud y voluntad por parte de los usuarios finales, en algunos casos será necesaria su capacitación.

El conocimiento multidisciplinar de investigadores y tecnólogos ha sido integrado en tres EDSS aplicados a la gestión de la calidad de las aguas (Sistema Gestor DMA, MARCE y ROM5.1), reduciendo el tiempo en materia de toma de decisión y mejorando la calidad y consistencia de dichas decisiones. La implementación y uso de los EDSS nos permiten concluir que, mediante el uso de las actuales Tecnologías de la Información se ha realizado con éxito una transferencia científico técnica a la sociedad.

A continuación son listadas las aportaciones más significativas de este capítulo, “*Implicaciones de la gestión digital de observaciones en el proceso de ayuda en la toma de decisión*”, respecto a las preguntas de investigación planteadas y al estado del conocimiento:

- La investigación planteada ha demostrado que el acercamiento entre los Sistemas de Observaciones, creados para expertos, y los Sistemas de ayuda en la toma de decisión,

creados para un público objetivo, es viable y presenta una gran potencialidad en cuanto al diseño y creación de nuevos *Data-driven* EDSS aplicados a las ciencias ambientales.

- Ha sido diseñado un Modelo de Datos de Observaciones, WAMIS-ODM, capaz de gestionar las observaciones del medio acuático fluvial, estuarino y costero de forma integral (agua, sedimentos y *biota*), permitiendo centralizar información de cualquier área de estudio con distinta resolución temporal y espacial.
- Han sido listados los aspectos más relevantes a tener en cuenta en el diseño, desarrollo e implementación de *Data-driven* EDSS aplicados a la gestión de la calidad acuática.
- WAMIS-ODM ha permitido diseñar EDSS que proporcionan ayuda en la toma de decisión bajo el marco normativo actual, especialmente facilitando la implantación de la Directiva Marco del Agua.
- El marco tecnológico diseñado y establecido permite la generación de nuevos EDSS basados en el WAMIS-ODM, reduciendo considerablemente la dedicación en la gestión de información y permitiendo focalizar el esfuerzo en la implementación de nuevos avances científico-técnicos aplicados a la ayuda en la toma de decisiones.

2.6 Comunicaciones

A continuación son listadas las publicaciones y comunicaciones realizadas en el ámbito de las “*Implicaciones de la gestión digital de observaciones en el proceso de ayuda en la toma de decisión*” y sus casos de estudio.

Tabla 2.2: Comunicaciones realizadas en el ámbito del capítulo 2

Publicación	2015 Barquin, J., Peñas, F.J., Alvarez-Cabria, M., Rodríguez, T, González,AM., Estévez E., Lezcano M., Fernandez, F. , Rojo, J., Garcia, A., Alvarez, C. Optimización de las redes de seguimiento del estado de conservación en ríos de alta montaña in: <i>Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013</i> . Organismo Autónomo Parques Nacionales. Pep Amengual y Benigno Asensio M.2999-2015. Madrid, España
Referencia	ISBN:9788480148702

2. IMPLICACIONES DE LA GESTIÓN DIGITAL DE OBSERVACIONES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

Comunicación	2015 Juanes, J.A., Gómez, A.G., Martínez, S., Ondiviela, B., Fernandez, F. , Samano, M.L. A successful experience of a MOOC in Port Waters' Quality Management 2015 AS-LO. <i>Aquatic Sciences Meeting</i> . Granada, España
Referencia	http://www.sgmeet.com/aslo/granada2015/

Publicación	2013 Juanes, J.A., Ondiviela, B., Gómez, A.G., Revilla, J.A., Samano, M.L., Fernández, F. , Garcia, A., Puente, A., Guinda, X., Fernandez, P., Echavarrri-Erasun, B. in: <i>Recommendations for maritime works</i> . ROM 5.1-13. Quality of coastal waters in port areas. Puertos del Estado. Spain
Referencia	ISBN:978-84-88975-83-6

Comunicación	2013 Gómez, A.G., Fernandez, F. , Pedraz, L., Samano, M.L., Ondiviela, B., Juanes, J.A. Desarrollo de Sistemas para la toma de decisiones (DSS) en la Gestión Acuática Portuaria XII <i>Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos</i> . Cartagena, España
Referencia	http://rom51.ihcantabria.com/congresos/

Publicación	2011 Peñas, F.J., Fernandez, F. , Calvo Elías, Milena, Barquin, J., Pedraz, L. Influence of data sources and processing methods on theoretical river network quality. <i>Limnética</i> 30 (2) 197-216
Referencia	ISSN: 0213-8409

Comunicación	2011 Fernández, F. , Velarde, V., Pedraz, L., Puente, A., Barquin, J., Juanes, J.A., Medina, R. WAMIS: A Water Management Information System. <i>CoastGIS 2011 - 10th International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Management</i> . Oostende, Belgium
Referencia	-

Publicación	2011 Fernández, F. , Velarde, V., Puente, A., Juanes, J.A., Medina, R. Answering Environmental European Directives through Information Systems <i>OCEANS '11 IEEE</i> . Santander, Spain
Referencia	978-1-4577-0088-0

Comunicación	2011 Fernández, F. , Pedraz, L., Velarde, V., Sámano, M. L., Gómez, A. G., Juanes, J. A. Sistema gestor de información ambiental portuaria: ROM 5.1. <i>X Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos</i> . Santander, España.
Referencia	http://rom51.ihcantabria.com/congresos/

Publicación	2007 Sámano, M. L., Gómez, A. G., Ondiviela, B., Fernández, F. , Mayor, R., Revilla, J. A., Juanes, J. A., Álvarez, C. Environmental management of seaport water bodies using Geographical Information Systems. <i>CoastGIS 2007 - 8th International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Zone Management</i> . Santander, España.
Referencia	http://rom51.ihcantabria.com/congresos/

Publicación	2007 Lopez, Y., Puente, A., Fernandez, F. , Juanes, J.A., Alvarez, C., Revilla, J.A., Vizoso, G., Tintoré, J., Gil, J.L. GIS and DBMS to compare Bathing Water Quality Directives. <i>CoastGIS 2007 - 8th International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Zone Management</i> . Santander, España
Referencia	ISBN:978-84-8102-471-5

Por el bien de nuestros hijos y de nuestro futuro, tenemos que hacer más para combatir el cambio climático

Barack Obama

3

Modelización aplicada en los EDSS de Gestión del Riesgo de inundación costera

3.1 Introducción

El análisis de fenómenos ambientales, en aquellas localizaciones que no disponen de monitorización (*in situ* o remota), se realizan normalmente mediante el uso de modelos numéricos que permiten extrapolar o interpolar las variables fundamentales que caracterizan el fenómeno de estudio. El análisis del riesgo por inundación costera es un claro ejemplo: los fenómenos generados por eventos de inundación producidos por tsunamis, ciclones tropicales o los posibles efectos del cambio climático, son modelados numéricamente para posteriormente analizar sus riesgos.

Según [UNISDR \(2009\)](#) y el [IPCC \(2012\)](#) los componentes básicos que deben ser considerados en el análisis del riesgo son tres: la peligrosidad o “*hazard*”, fenómeno físico que tiene el potencial de causar daños y pérdidas a los sistemas naturales o antrópicos; la exposición, elementos en riesgo (por ejemplo edificios, infraestructuras, etc) que pueden ser afectados; y vulnerabilidad, elementos susceptibles de responder frente a diferentes *hazards* ([Gallina et al. 2016](#)). Finalmente, el concepto de riesgo es concebido como la cuantificación de las consecuencias derivadas de los diferentes *hazards*, tanto reales como potenciales ([UNISDR 2009](#)). La evaluación de Riesgos se concibe como un instrumento de gestión preventivo y, como tal, muy dirigido a la toma de decisiones. Por ello, en los últimos años han surgido diferentes iniciativas internacionales en el desarrollo de EDSS relacionados con la evaluación

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

Sistema	Hazard	Escala	Software base	Modelo de Datos	Modelado dinámico del Hazard	Referencias
Risk Map	múltiples hazards	Regional Local	HEC-RAS	vector raster	Si	FEMA (2012)
HAZUS	múltiples hazards	Regional Local	ArcGIS SQL Server	vector raster	Si	FEMA (2004)
RiskScape	múltiples hazards	Regional Local	Google Earth (visual.)	vector raster	No	https://www.riskscape.org.nz/ Schmidt et al. (2011)
CAPRA	múltiples hazards	Regional Local	HEC RAS	vector raster	Si	http://www.ecapra.org/ Bernal (2010)
THESEUS DSS	costero	Local	desconocido	vector raster	No	Zanuttigh et al. (2014)
DESYCO	costero	Regional Local	QGIS ArcGIS	vector raster	No	Torresan et al. (2016) Hinkel & Klein (2009)
DIVA	costero	Global	ArcGIS	vector	No	Vafeidis et al. (2008)
Tyndall Coastal Simulator	costero	Regional Local	ArcGIS	vector raster	Si	Mokrech et al. (2011)
SimCLIM 2013	múltiples hazards	Regional Local	propio	raster	Si	http://www.climsystems.com/
CLIMSAVE	efectos cambio climático	Europa	ArcGIS Server	raster	No	Harrison et al. (2015)
BCA Tool	múltiples hazards	Regional Local	SQL Server	vector raster	No	FEMA (2015) Islam & Ryan (2016)
NOAA's Digital Coast	costero	Regional Local	ArcGIS Server	vector raster	No	https://coast.noaa.gov/digitalcoast/
InaSAFE	múltiples hazards	Regional Local	QGIS	vector raster	No	http://inasafe.org/
Coastal Hazard Wheel	múltiples hazards	Regional Local	OpenEarth	vector raster	Si	http://www.coastalazardwheel.org/ UNEP (2017)

Tabla 3.1: Principales EDSS de análisis del riesgo de inundación costera

de riesgos naturales en zonas costeras (tabla 3.1). El objetivo principal de los EDSS listados es el análisis de la vulnerabilidad, impactos, riesgos, así como la identificación y evaluación de posibles opciones de gestión con el fin de proporcionar ayuda en la toma de decisiones de cara a una gestión sostenible ([Zanuttigh et al. 2014](#)).

Los EDSS mostrados se centran principalmente en tres grandes secciones: análisis y evaluación de la Vulnerabilidad (HAZUS, RiskScape, DIVA, RegIS, DESYCO, Costal Simulator), análisis del riesgo (HAZUS, RiskScape, RegIS, Coastal Simulator, THESEUS DSS) y evaluación de medidas de gestión o mitigación del riesgo (HAZUS, SimCLIM, BCA Tool) ([Gallina et al. 2016](#), [Islam & Ryan 2016](#), [Zanuttigh et al. 2014](#)).

Los Sistemas más mencionados en la literatura son el HAZUS y CAPRA; HAZUS es un software financiado por el FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) pudiéndose aplicar en tres niveles de detalle, siendo destacable el análisis de coste beneficio de máximo detalle gracias a la información proporcionada por el catastro del gobierno americano (US Census Bureau). Por otro lado, CAPRA ha sido implementado principalmente en Sudamérica gracias a la financiación del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). A pesar de la madurez de estos EDSS, continúan surgiendo iniciativas en el desarrollo de Sistemas de Gestión del Riesgo (DESYCO, SimCLIM 2013, InaSAFE, Coastal Hazard Wheel). [Torresan et al. \(2016\)](#) achacan este hecho a tres posibles razones: su escala de trabajo es muy grosera, son herramientas *demo* para una localización específica, o carecen de funcionalidades para la comparación de

diferentes impactos.

Los EDSS de Gestión del Riesgo que trabajan a escalas globales o continentales (DIVA, CLIMSAVE) llevan a cabo una agregación y generalización de la información a su unidad de estudio, línea de costa en el caso del DIVA (modelo de datos vectorial) y *pixel* en el caso de CLIMSAVE (modelo de datos *raster*). Paralelamente, trabajar a escalas locales requiere captar la evolución espacial y temporal de los fenómenos de estudio, estando en muchas ocasiones condicionados por factores físicos del ámbito de estudio. Este hándicap se evidencia notablemente en el reducido número de EDSS que presentan un módulo específico para el modelado dinámico del *hazard*, a pesar de ser el primer paso para la evaluación del riesgo. En su lugar, los Sistemas incorporan la peligrosidad como un input que ha sido calculado externamente de forma específica para el área de estudio.

Por ello, parece evidente la importancia de identificar las peculiaridades (fortalezas y debilidades) de este tipo de Sistemas con el fin de progresar en el desarrollo y generación de soluciones que faciliten una gestión sostenible e integral del litoral. En este sentido, sería de enorme interés analizar las capacidades que las Tecnologías de la Información y la modelización numérica pueden ofrecer en el proceso de ayuda a la toma de decisiones a través de la pre-ejecución de casos (modo estático) y la ejecución en caliente (modo dinámico).

Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es identificar las necesidades de los EDSS en la modelización integral del medio acuático costero aplicados a la prevención de inundaciones costeras.

3.2 Metodología

El análisis de los EDSS de Gestión del Riesgo costero más relevantes ha permitido identificar las principales singularidades de estos Sistemas. Con el fin de profundizar en dichos aspectos se ha llevado a cabo el diseño y desarrollo de dos EDSS de Gestión del riesgo de inundación costera deterministas, los cuales han sido diseñados, desarrollados e implementados en casos reales.

Tal y como hemos podido comprobar en la literatura, los EDSS de Gestión del Riesgo focalizan sus esfuerzos en el análisis y evaluación de la vulnerabilidad, análisis del riesgo y evaluación de medidas de gestión o mitigación del riesgo, siendo escasos los Sistemas que incorporan la modelización del *hazard* a escala local entre sus funcionalidades. Los dos Sistemas de Gestión del riesgo han sido diseñados incorporando dicha funcionalidad bajo una arquitectura cliente-servidor, presentando dos enfoques diferentes: (a) sistema dinámico, aplicación dedicada a proporcionar una “*risk screening tool*” que permite al usuario simular de forma dinámica, eventos de inundación para evaluar su riesgo; y (b) sistema estático, dedicado a proporcionar la gestión de información previamente simulada.

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

El análisis de ambos EDSS ha permitido identificar las singularidades de este tipo de Sistemas, haciendo especial hincapié en la obtención de los *hazards*, el análisis del riesgo, la gestión de información ambiental y el proceso de ayuda en la toma de decisión.

3.2.1 Arquitectura del Sistema

La arquitectura cliente servidor ha sido seleccionada para diseñar y desarrollar los EDSS de Gestión del Riesgo costeros propuestos (figuras 3.1 y 3.2). En ambos casos, tanto en modo dinámico como estático, fueron desarrolladas aplicaciones Web para permitir la interacción entre los Sistemas y el usuario final.

Mientras el EDSS de Gestión del riesgo dinámico utilizó una combinación de tecnología *Open Source*, tecnología propietaria y modelos numéricos para el análisis y generación de mapas resultado, el EDSS de Gestión del riesgo estático utilizó tecnología propietaria para el almacenamiento y generación de servicios interoperables.

Ambos EDSS están basados en tecnología GIS, la cual es reconocida internacionalmente como pieza fundamental, tanto en el análisis como en la visualización de la información espacial para el proceso de toma de decisiones durante todas las fases de análisis del riesgo (Islam & Ryan 2016).

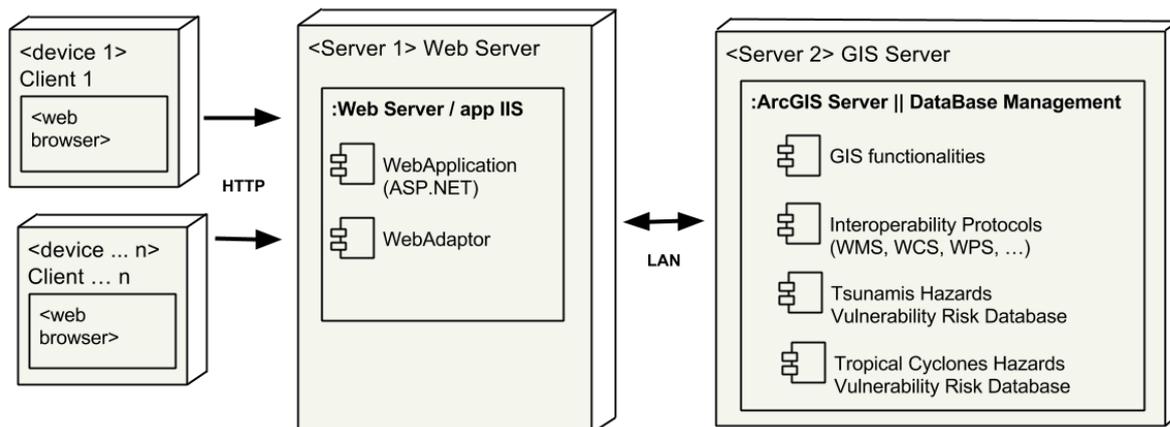


Figura 3.1: Arquitectura del EDSS estático implementado para el riesgo de inundación costera por tsunamis y ciclones tropicales (MHRAS)

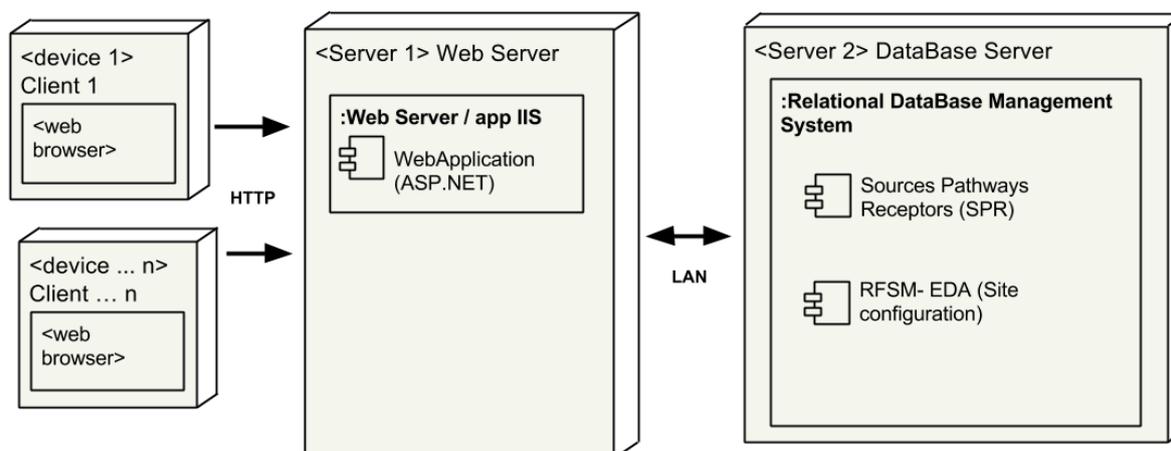


Figura 3.2: Arquitectura del EDSS dinámico implementado para el análisis del riesgo de inundaciones costeras (IH-DSS Flooding)

3.2.2 Proceso de ayuda a la toma de decisión

El proceso de cálculo de riesgo de inundación es la pieza angular en el proceso de ayuda a la toma de decisión. En este sentido, pueden encontrarse diferencias significativas entre un Sistema estático (MHRAS) o un Sistema dinámico (IH-DSS Flooding).

El análisis del riesgo mediante un EDSS estático está basado en el procesado previo de todos los cálculos para la obtención de un riesgo final. Este proceso representa un periodo o instante de tiempo concreto, para el cual han sido obtenidos los datos de vulnerabilidad y peligrosidad necesarios para el análisis del riesgo. El Sistema estático MHRAS, fue diseñado para resolver las necesidades del Gobierno Omaní, en concreto de la Agencia de Meteorología, la cual está al cargo de la gestión de riesgos derivados de eventos hidrometeorológicos.

Por otra parte, el Sistema dinámico de análisis del riesgo está basado en el procesado bajo petición del usuario. El usuario, debe proporcionar o seleccionar los *inputs* necesarios para llevar a cabo el procesamiento antes del análisis del riesgo. Por ello, la cantidad y variedad de variables editables o seleccionables por el usuario proporcionarán un mayor o menor rango de flexibilidad de análisis, entre las que destacan las variables de vulnerabilidad, el modelo digital del terreno y la propia peligrosidad. El Sistema dinámico IH-DSS Flooding, fue diseñado en un entorno de investigación sin incluir a los *stakeholders* en el proceso de participación, siendo éste una evolución del Sistema THESEUS DSS (Zanuttigh *et al.* 2014).

En ambos EDSS el proceso de ayuda a la toma de decisión se basa en proporcionar al usuario una visión holística del problema. La visualización espacial de todos los aspectos analizados permite al usuario tener una visión individualizada de cada uno de ellos. A su vez, el análisis multicriterio permite integrar todos ellos proporcionando un resultado que facilita la toma de decisiones.

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

3.3 Casos de Estudio - Sistemas de análisis del riesgo

3.3.1 Modelo estático - MHRAS

El Sultanato de Omán se encuentra localizado en el sudeste de la placa tectónica arábica, frente al golfo de Omán, en la costa de Makran, donde se encuentra presente una zona activa de subducción (figura 3.3). En el pasado han tenido lugar terremotos significativos en esta zona de subducción generando tsunamis destructivos, el evento tsunamigénico más reciente tuvo lugar en 1945, el cual causó más de 4.000 pérdidas humanas y pérdidas económicas en Irán, Pakistán, Omán y Emiratos Árabes (Heidarzadeh *et al.* 2009, Mokhtari 2011). La actividad tsunamigénica no ha sido el único evento devastador sufrido en las costas del Sultanato; el ciclón tropical *Gonu* causó más de 60 pérdidas humanas en 2007, mientras el ciclón tropical *Phet* causó 24 víctimas en 2010 además de numerosas pérdidas económicas. El mayor ciclón tropical registrado tuvo lugar en 1890, el cual es hasta la fecha el ciclón tropical que mayor número de pérdidas humanas ha provocado en Omán, 724 víctimas (Fritz *et al.* 2010).

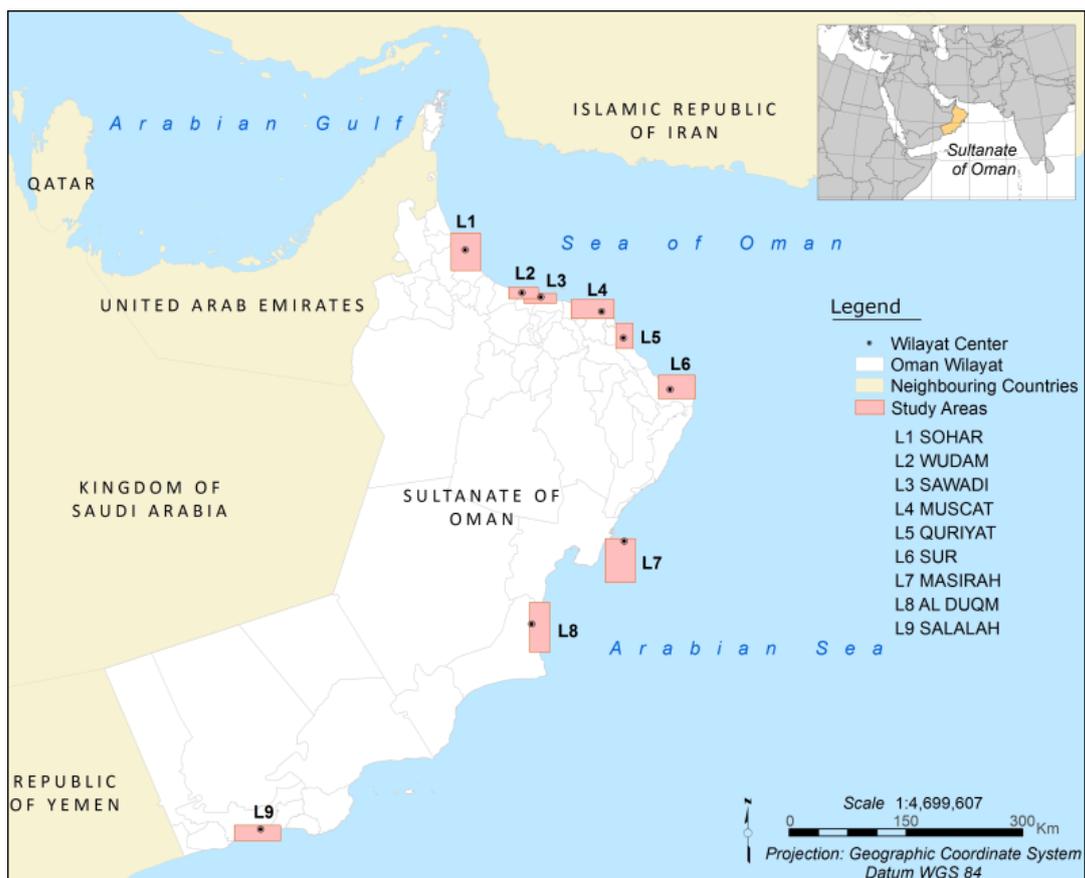


Figura 3.3: Áreas de estudio del EDSS MHRAS

Desde el año 2010 el Gobierno Omaní y el IOC de la UNESCO han colaborado en el desarrollo del *National Multi Hazard Early Warning System* (NMHEWS) de Omán. El Sistema

3.3 Casos de Estudio - Sistemas de análisis del riesgo

incluye la monitorización, el procesamiento y procedimientos operacionales con único fin: proteger a la población civil frente a cualquier peligro derivado de posibles ciclones tropicales o tsunamis. En este contexto, fue requerida la evaluación del riesgo de posibles tsunamis y ciclones tropicales en la costa de Omán para proporcionar ayuda en la toma de decisión del gestor costero. La ingente cantidad de información generada precisó el desarrollo de un software, denominado *Multi Hazard Risk Assessment System* (MHRAS), para facilitar una gestión eficiente de la información y por lo tanto facilitar el proceso de ayuda en la toma de decisiones. El concepto “*multi-hazard*” está relacionado con el análisis de diferentes *hazards* que amenazan a los mismos elementos expuestos de forma concurrente o en diferentes instantes de tiempo (Komendantova *et al.* 2014). El enfoque de análisis *multi-hazard* puede variar dependiendo del posible efecto en cascada de los diferentes *hazards* o de la variabilidad de la vulnerabilidad en función del tipo de *hazard* (Gallina *et al.* 2016). En este caso de estudio, el análisis del riesgo frente a Tsunamis y Ciclones Tropicales fue desarrollado independientemente ya que son eventos con muy baja probabilidad de concurrencia y con vulnerabilidades (ambientales, socioeconómicas, etc) distintas.

Basados en el contexto previamente descrito, el Sistema MHRAS contempla los siguientes requerimientos:

- la proximidad del litoral Omaní a la zona de generación de tsunamis requiere que las consultas al Sistema proporcionen resultados prácticamente de forma instantánea,
- el Sistema debe integrar resultados a escala nacional y local, y
- otros Sistemas, como el NMHEWS, deben poder acceder a la información gestionada por el MHRAS mediante protocolos interoperables (comunicación máquina-máquina).

La evaluación del riesgo de tsunamis y ciclones tropicales en la costa de Omán ha requerido un planteamiento multidisciplinar en el que han participado investigadores y tecnólogos en diferentes facetas: analizando más de 600 ciclones tropicales históricos y ficticios (figura 3.4) y más de 3000 potenciales tsunamis (figura 3.5), para, finalmente, evaluar la vulnerabilidad y el riesgo de las inundaciones costeras más significativas (Aguirre-Ayerbe *et al.* 2015). La gran cantidad de información generada requirió una gestión eficiente de la información, así como la automatización de procesos de evaluación del riesgo y el desarrollo del Sistema MHRAS. Teniendo en cuenta la generación de tan amplia base de datos de posibles escenarios y la necesidad de consulta inmediata por parte del gestor costero, el Sistema MHRAS fue diseñado con un enfoque determinista basado en la selección del evento más parecido. Este planteamiento permite realizar consultas instantáneas, evitando la necesidad de espera por parte del usuario, normalmente necesaria en Sistemas basados en la ejecución en caliente de modelos numéricos.

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

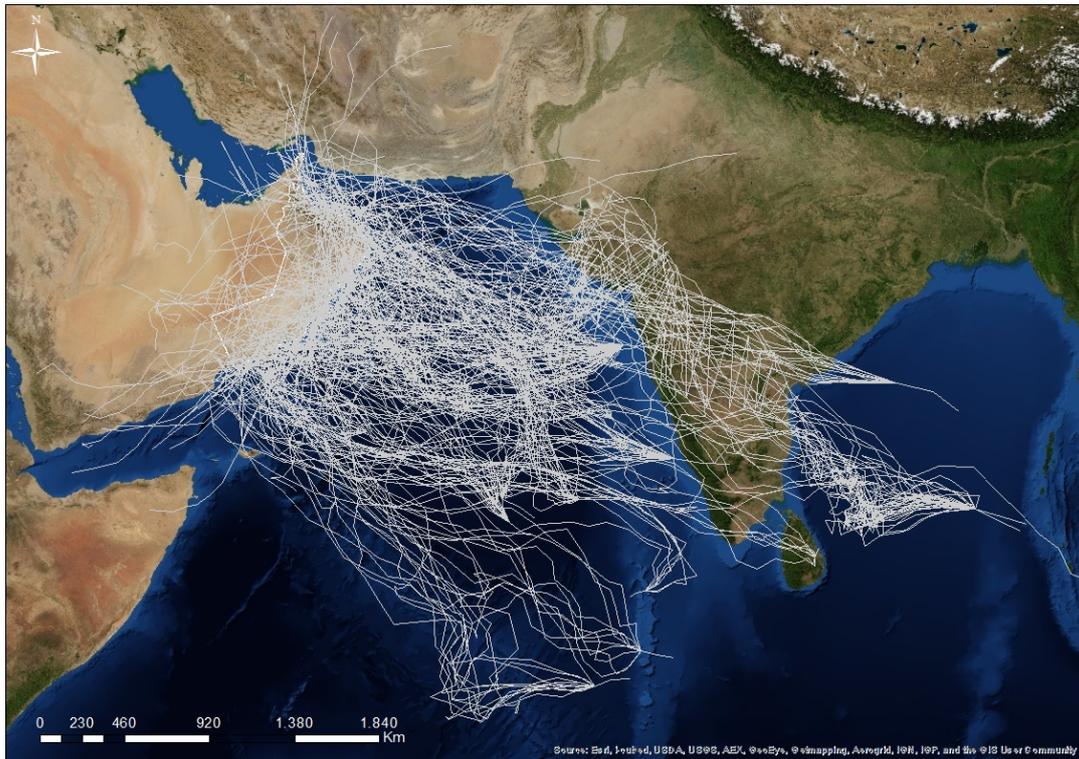


Figura 3.4: Trayectoria de ciclones tropicales simulados

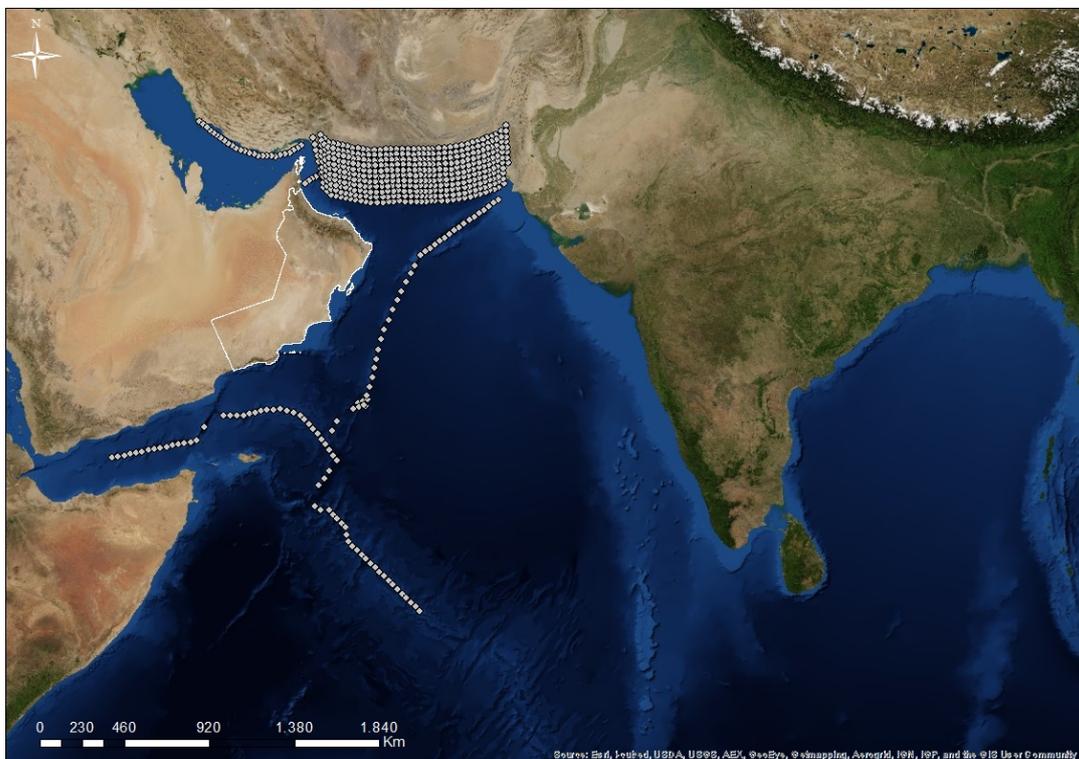


Figura 3.5: Localización de fuentes tsunamigénicas

3.3 Casos de Estudio - Sistemas de análisis del riesgo

El Sistema MHRAS ha sido diseñado para satisfacer dos escalas de trabajo, nacional y local (figura 3.3). La escala nacional cubre todo el litoral del Sultanato, siendo los 30 “*wilayat*”, unidad administrativa equivalente al municipio, las unidades de estudio. Por otra parte, la escala local incluye las 9 principales ciudades: Sohar, Wudam, Sawadi, Muscat, Quriyat, Sur, Masirah, Al Duqm, and Salalah.

Los gestores costeros acceden a la información generada a partir de una aplicación Web específicamente generada para la visualización espacial. La aplicación está dividida en dos secciones claramente diferenciables: (1) la base de datos, denominada “*Early Warning DataBase Module (EWDB)*” y (2) la información de planificación, denominada “*Planning Tools module (HVRA)*”. La tabla 3.2 muestra la información contenida en cada una de las secciones.

A partir de la localización del ciclón y del tsunami junto su magnitud, la sección EWDB de la aplicación Web del Sistema MHRAS permite al usuario identificar el caso más similar y visualizar las variables del mismo (figuras 3.6 y 3.7).

EWDB		HVRA	
3181 Tsunamis generados	636 ciclones históricos y sintéticos	Nacional & Local Tsunami peor escenario	<i>Storm Surge</i> Nacional catálogo peores casos <i>Storm Surge</i> Local peores escenarios
Gestión - Base de datos		Nacional & Local Tsunami agregado peores casos	Nacional & Local <i>Storm Surge</i> agregado peores casos
PASO 1. LON, LAT, Magnitude Selección Tsunami	PASO 1. 12h track Selección Ciclón	Resultados Nacionales	
		Tsunami: Elevación Run-up Vulnerabilidad Riesgo	<i>Storm Surge</i> : <i>Total Water Level</i> Vulnerabilidad Riesgo
Resultados Nacionales		Resultados Locales	
PASO 2. escenario más similar: mapa Elevación <i>Travel Time</i> <i>Time Series</i> Elevación Máxima	PASO 2. escenario más similar: Track del Ciclón <i>Wave footprint</i> <i>Surge footprint</i> <i>Total Water Level</i>	Tsunami: Elevación Profundidad Arrastre Vulnerabilidad Riesgo	<i>Storm Surge</i> : Track del Ciclón Profundidad de Inundación Vulnerabilidad Riesgo

Tabla 3.2: Secciones del Sistema MHRAS. *Early Warning Database (EWDB) & Planning Tools: Hazard, Vulnerability & Risk Assessment (HVRA)*

Por otra parte, la sección HVRA o “*Planning Tools*” permite visualizar la peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo, tanto a escala nacional como local, de los casos más significativos (figuras 3.8 y 3.9).

El Sistema MHRAS además de ser diseñado para ser accesible por gestores costeros vía Web *app*, también fue diseñado para permitir acceder a otros *software*, vía protocolos interoperables conformes a los estándares OGC o a la propia *ESRI interface*.

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

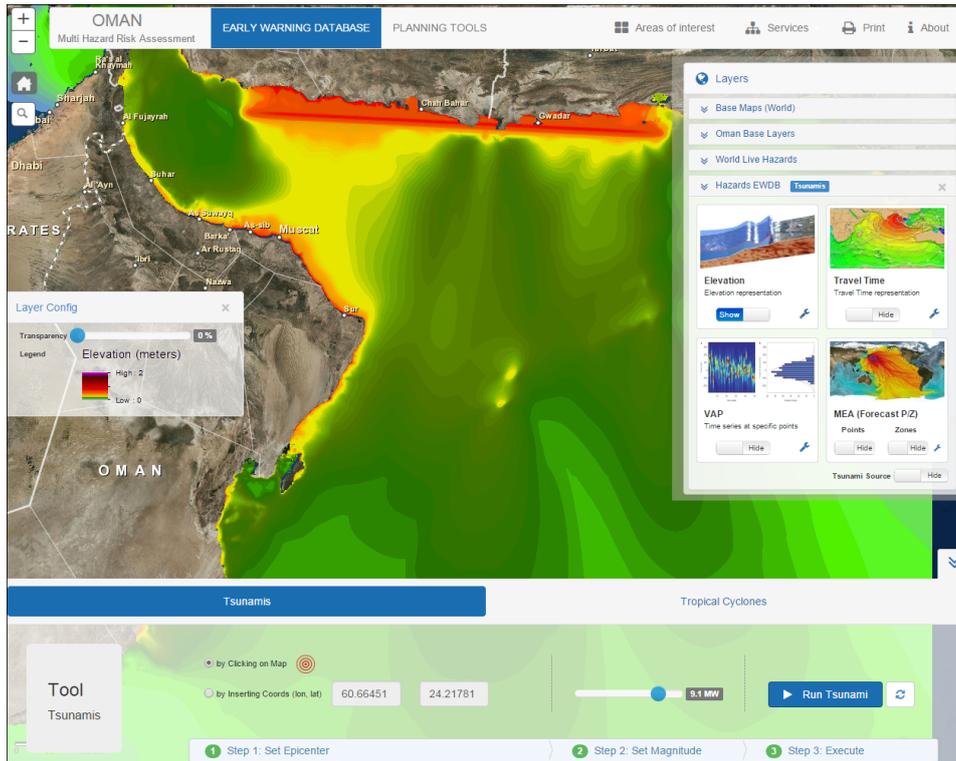


Figura 3.6: MHRAS - Visualización de un caso de tsunami (*elevation*) proporcionado por la *Early Warning Data Base*

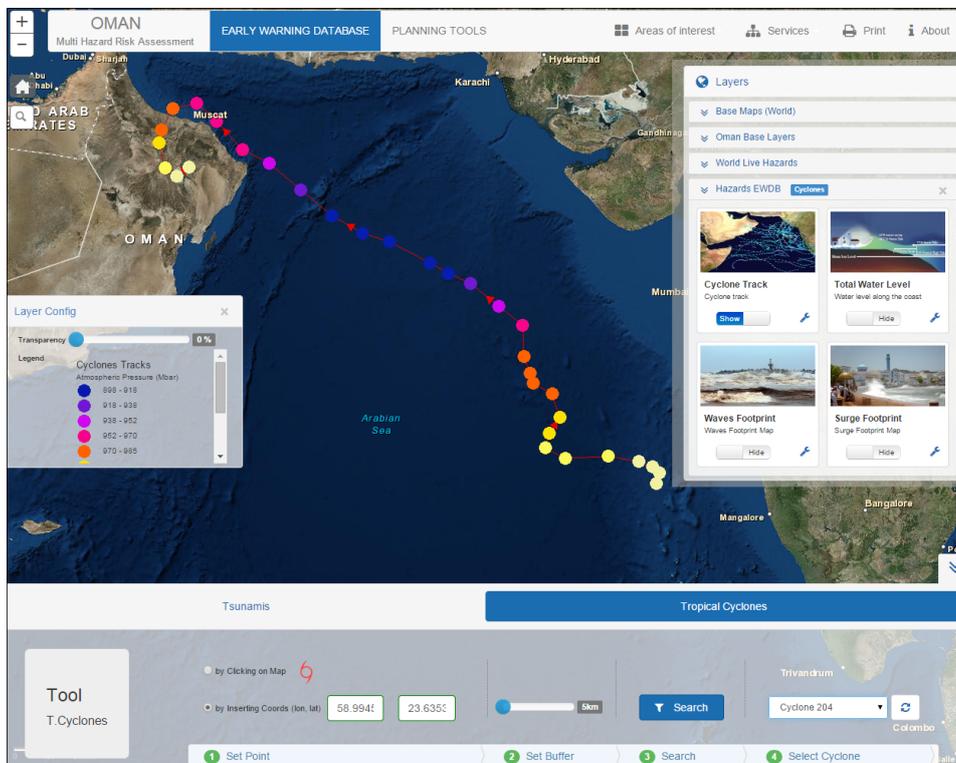


Figura 3.7: MHRAS - Visualización de la trayectoria de un ciclón tropical proporcionado por la *Early Warning Data Base*

3.3 Casos de Estudio - Sistemas de análisis del riesgo

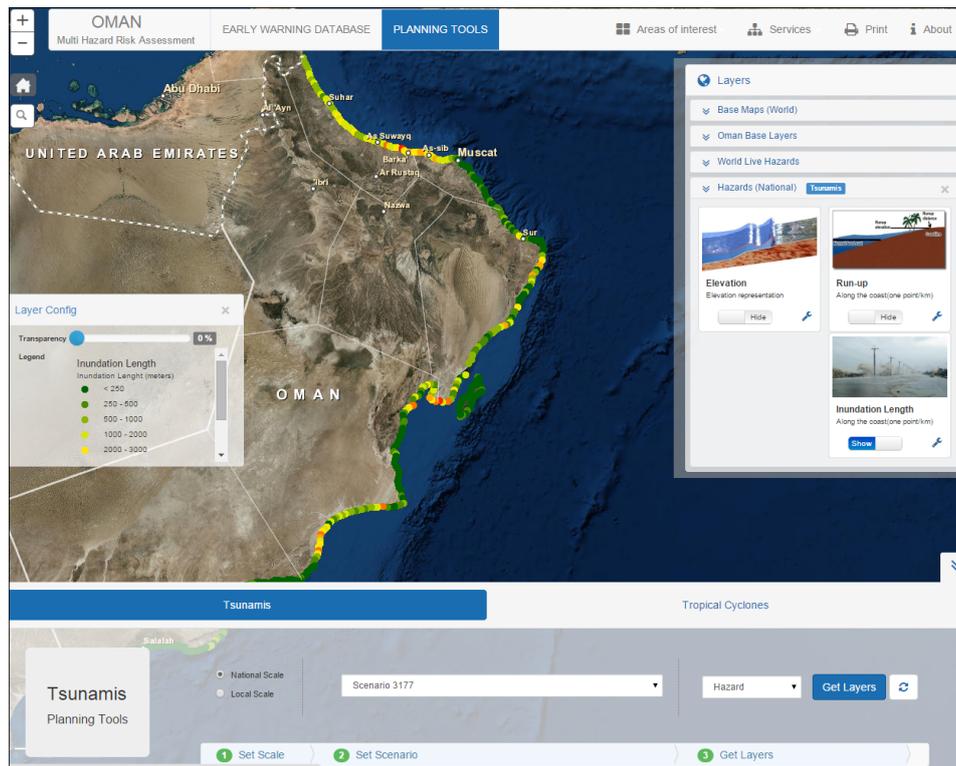


Figura 3.8: MHRAS - Visualización de un caso de tsunami (*Inundation Length*) proporcionado por las *Planning Tools*

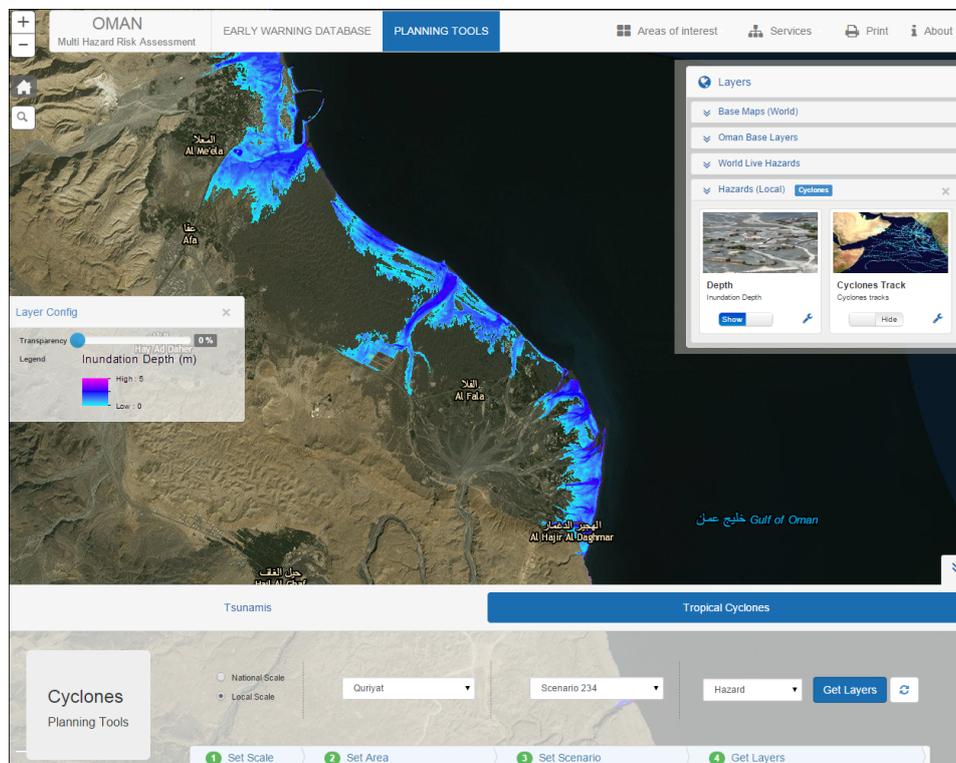


Figura 3.9: MHRAS - Visualización de un caso la inundación (*Depth*) proporcionada por las *Planning Tools*

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

Los estándares de interoperabilidad implementados en el Sistema MHRAS son mostrados en la tabla 3.3. El conjunto de *layers* es servido como imagen a través del protocolo *Web Map Service* (WMS). Sin embargo, un acceso y descarga de la información como *Coverage* permite usar la información como parte de futuros análisis. Es el caso del NMHEWS, que accede a la base de datos de tsunamis simulados a través del protocolo *Web Coverage Service* (WCS). Otro aspecto importante es facilitar la búsqueda e identificación de los casos simulados. El Sistema MHRAS ha implementado el protocolo *Web Processing Service* para facilitar búsquedas espaciales y filtrado de los casos almacenados en la base de datos.

Formato de Datos	prototcolo ESRI	Fuente de Datos	protocolo OGC	Formato de Datos
Features	Geodatabase conexion	MHRAS	WMS	Imagen (png, tiff, jpg,...)
Rasters		GeoDatabases	WCS	Covertura
Tablas			KML	Kmls
numérico	Geoproceso	Case ID	WPS	numérico
Raster	Geoproceso	Case Layer	WPS	Raster

Tabla 3.3: Protocolos de interoperabilidad del Sistema MHRAS

3.3.2 Modo dinámico - IH DSS Flooding

IH-DSS Flooding es un Sistema de ayuda a la toma de decisión Web que proporciona una serie de herramientas calibradas que pueden ser utilizadas en la costa por agentes implicados en la gestión, planeamiento, adaptación y/o mitigación de riesgos costeros.

El Sistema ha sido diseñado para poder ser implementado en cualquier área de estudio bajo el mismo marco metodológico, *SPRC Source - Pathway - Receptor - Consequences*. Cada área de estudio posee sus particularidades físicas, ambientales y económicas, las cuales son definidas bajo el marco metodológico *SPRC*: *Source* es el origen de la inundación (por ejemplo oleaje, lluvias, niveles, etc), el *Pathway* es el camino o medio que atraviesa la inundación (por ejemplo playas, diques, etc), y los *Receptors* son las entidades afectadas por la inundación (por ejemplo propiedades, ciudadanos, hábitats, etc). Finalmente, las características de los procesos físicos (por ejemplo intensidad de la inundación: profundidades, velocidad del agua, etc) tendrán *Consequences* sobre los receptores afectados dependiendo de la intensidad de la exposición y vulnerabilidad del receptor.

Esta metodología fue desarrollada bajo el proyecto Europeo THESEUS¹. Posteriormente, el proyecto Europeo COASTGAP 2013-2014 permitió implementar el IH-DSS Flooding en el

¹<http://www.theseusproject.eu/>

3.3 Casos de Estudio - Sistemas de análisis del riesgo

Delta De L Orb (Francia), con el objetivo de identificar las mejores prácticas en Gestión Integrada de Zonas Costeras (GIZC).

El marco metodológico SPRC fue implementado en el IH-DSS Flooding como un conjunto de funciones o modelos ligeros interconectados y un conjunto de datos que describen escenarios climáticos, socio-económicos y ecológicos del área de estudio francés, Delta De L Orb.

El procesamiento o análisis fue dividido en tres fases (figura 3.10):

1. Aplicación del modelo exterior para trasladar las condiciones offshore a la línea de costa.
2. Lanzamiento del modelo numérico de inundación *Inland Model* a partir del nivel del mar o *Total Water Level* (TWL) obtenido en la línea de costa.
3. Análisis de las consecuencias obteniendo los daños finales: pérdida de vidas, pérdida de euros y *Environmental Vulnerability Index* (EVI).

Adicionalmente, IH-DSS flooding incluye escenarios climáticos futuros y opciones de adaptación y/o mitigación (socio económicos, ambientales, estructurales), los cuales permiten a los usuarios configurar escenarios incluyendo opciones de adaptación/mitigación y calcular dinámicamente la reducción de los daños.

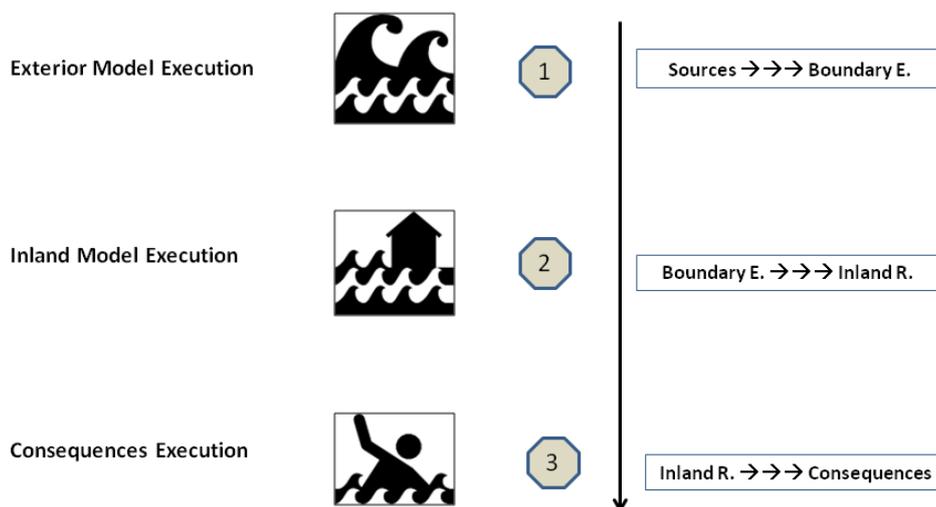


Figura 3.10: IH-DSS Flooding - Secciones de Procesamiento dinámico SPRC

Con el fin de dar a conocer el grado de libertad proporcionado por el Sistema IH-DSS Flooding al usuario final, a continuación son descritas las secciones de procesamiento implementadas en el área de estudio francés Delta De L Orb: modelo exterior, modelo interior y análisis de consecuencias.

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

Modelo Exterior

El proceso de ejecución comienza con las fuentes meteocean seleccionadas (figura 3.11). Para ello, fueron identificados los peores temporales de los últimos 60 años en la zona y seleccionados los efectos *offshore* generados por dichos temporales: altura de ola, periodo y marea meteorológica con una resolución horaria. Trasladar estas variables a la costa y transformarlas en *Total Water Level* (TWL) puede variar significativamente en función de las características del área de estudio. En este caso, el área de estudio fue configurado mediante tres elementos de transformación del oleaje:

1. Transformación de oleaje *offshore* a partir de las ecuaciones de *Snell* (Bampi & Zordan 1991) previamente generadas,
2. *Pathway* representando las playas, mediante la función “*Beach*” desarrollada bajo el proyecto THESEUS (Zanutigh *et al.* 2014).
3. Funciones “*Boundary*” de distintos tipo: “*Dune*”, “*Natural Boundary*” y “*Sea Wall*”, también desarrolladas bajo el proyecto THESEUS.

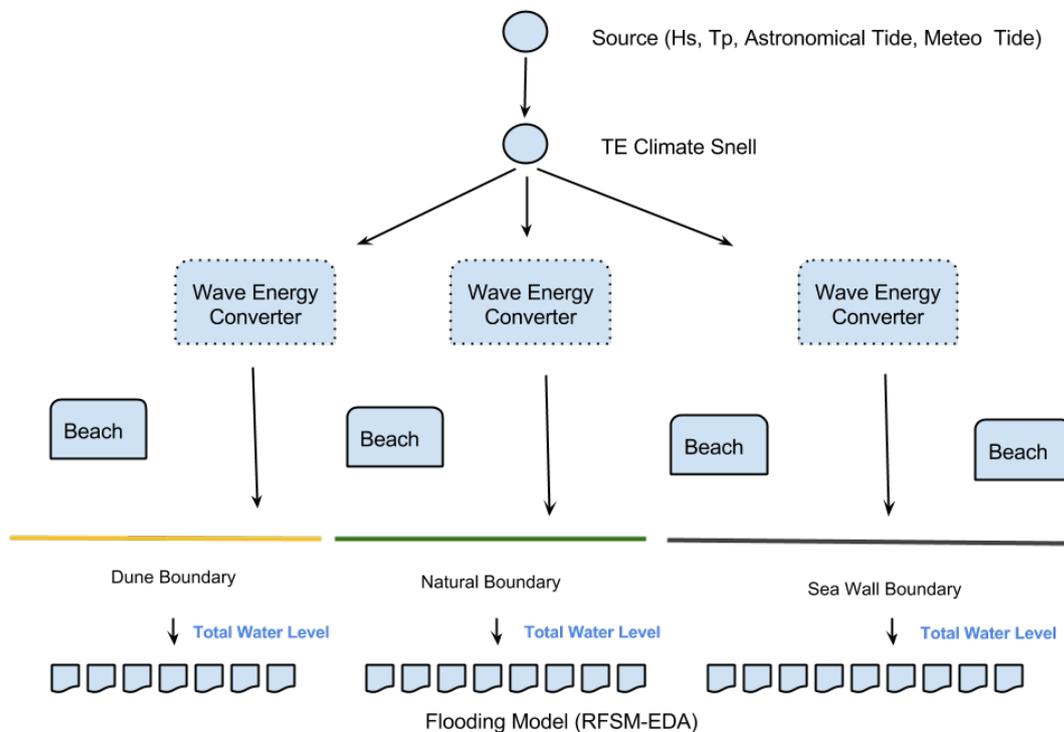


Figura 3.11: IH-DSS Flooding - Modelo exterior para Delta De L Orb

Por lo tanto, el TWL se proporciona como dato a la siguiente sección del proceso, el modelo interior, con información para cada instante de tiempo.

3.3 Casos de Estudio - Sistemas de análisis del riesgo

El escenario de nivel del mar y clima en el corto, medio y largo plazo fue definido en el Elemento *Source*. El modelo exterior inicia el análisis utilizando información temporal meteorológica proporcionada por el *Source* (base de datos de marea astronómica, nivel del mar, oleaje y viento). IH-DSS flooding hace uso de “*IH Data*¹”, la cual es una base de datos desarrollada por IHCantabria capaz de proporcionar información precisa de viento oleaje y nivel para cualquier parte del mundo. Los principales bloques de información son:

- GOT: Serie horaria de marea astronómica
- GOS: Nivel del mar costero (meteorológico)
- GOW: Oleaje a escala regional o global
- Sea Wind: Vientos regionales Offshore

La selección de eventos históricos más significativos en el Delta De L’ Orb está basada en análisis de las variables climáticas proporcionadas por *IH Data*. Para ello, se generó el “*Total Water Level Index (TWLI)*”, el cual se calculó mediante la reconstrucción horaria de “*Astronomical Tide (AT)*”, “*Storm Surge (SS)*”, altura de ola (*Hs*) y viento (*W0*) a partir de la siguiente fórmula:

$$TWLI(t) = AT(t) + 0.2Hs(t) + SS(t) + 0.02W0(t)$$

El primer componente es la marea astronómica (*AT*), el segundo componente es el 20 % de la altura de ola significativa en aguas profundas (*Hs*, figura 3.13), el tercer componente es el *Storm Surge*, (*SS*, figura 3.12) y el cuarto componente es el 2 % de la magnitud del viento (*W0*, figura 3.14).

Una vez obtenido el *TWLI* para cada instante de tiempo, la serie temporal fue analizada con el objetivo de identificar los eventos extremos. Para ello se utilizó la técnica estadística *POT (Peak Over Threshold)* (Far & Wahab 2016), identificando las tormentas más intensas y extrayendo 72 horas de cada una de ellas para ser incluidas como posibles *Source Elements* (figura 3.15).

Una vez seleccionado el *Source*, el usuario puede incluir más cambios a su escenario de ejecución: incluir escenario climático, aplicar medidas de adaptación/mitigación para el modelo exterior, etc.

Los escenarios de cambio climático proporcionados por el IPCC (2014) son mostrados al usuario como referencia a través de la Interfaz Web (figura 3.16). El usuario puede seleccionar la subida de nivel del mar que considere para su escenario de análisis. El modelo exterior también cuenta con medidas de adaptación/mitigación (figura 3.17). El usuario puede activar *Wave Energy Converters (WEC)* para simular el efecto que estas instalaciones tienen en la

¹<http://ihdata.ihcantabria.com/>

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

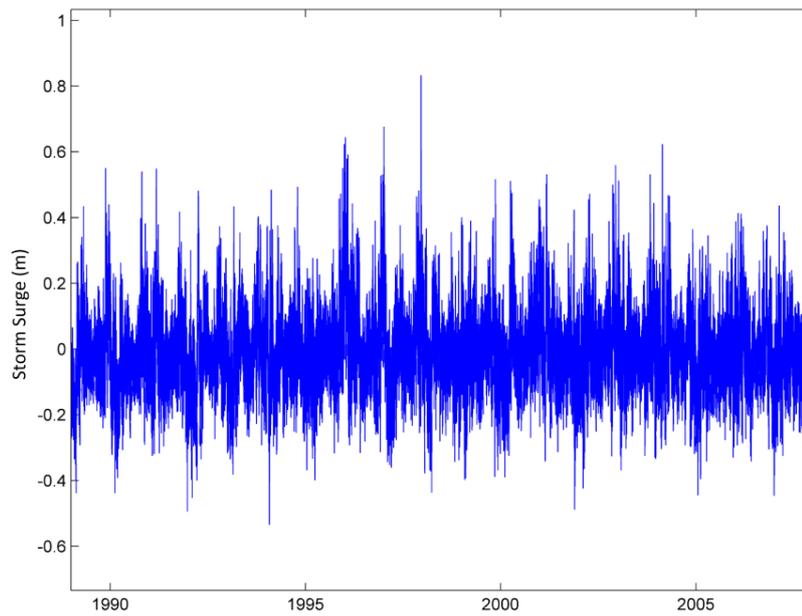


Figura 3.12: Serie temporal *Storm Surge* (SS)

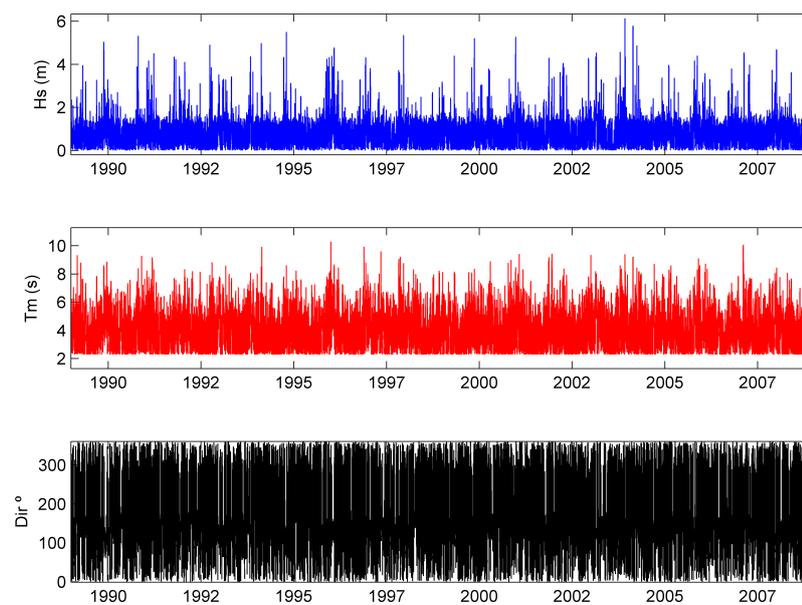


Figura 3.13: Serie temporal Oleaje (Hs)

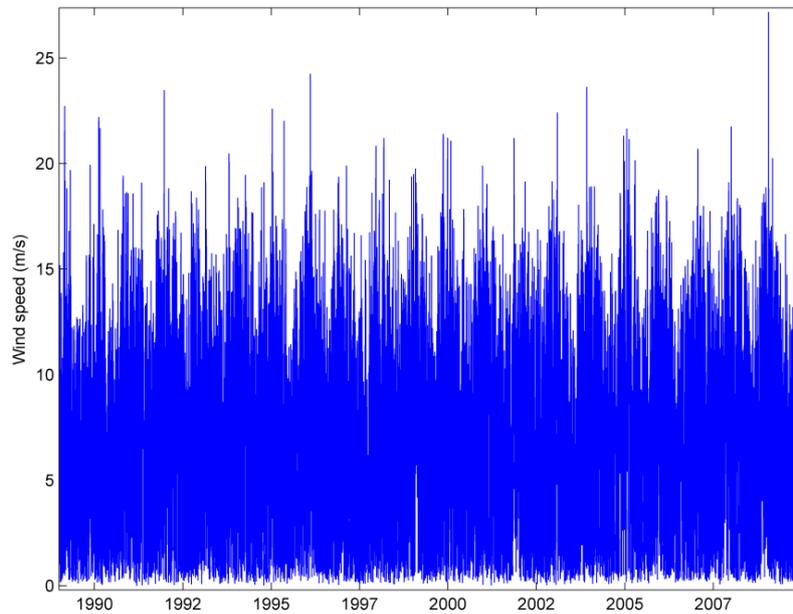


Figura 3.14: Serie temporal Viento (W0)

reducción del oleaje. Una vez configurado el escenario, el usuario puede ejecutar el modelo exterior. Como resultado, los “*Boundary Elements*” tendrán información del TWL en cada instante de tiempo, pudiendo identificar los momentos de máxima intensidad, y por lo tanto posible rebase, del temporal (figura 3.18).

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

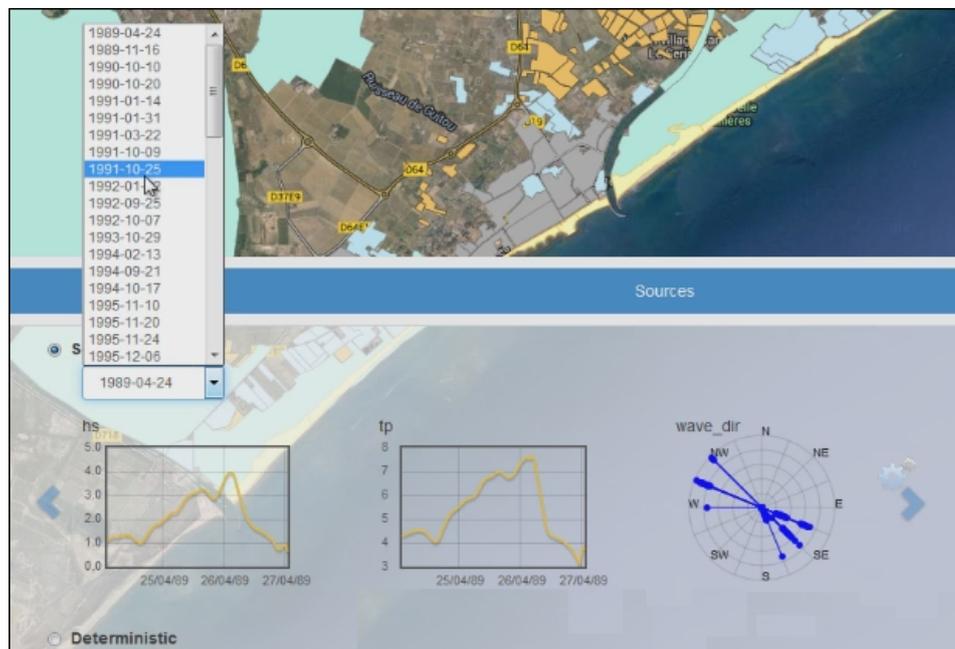


Figura 3.15: IH-DSS Flooding - selección de tormentas históricas

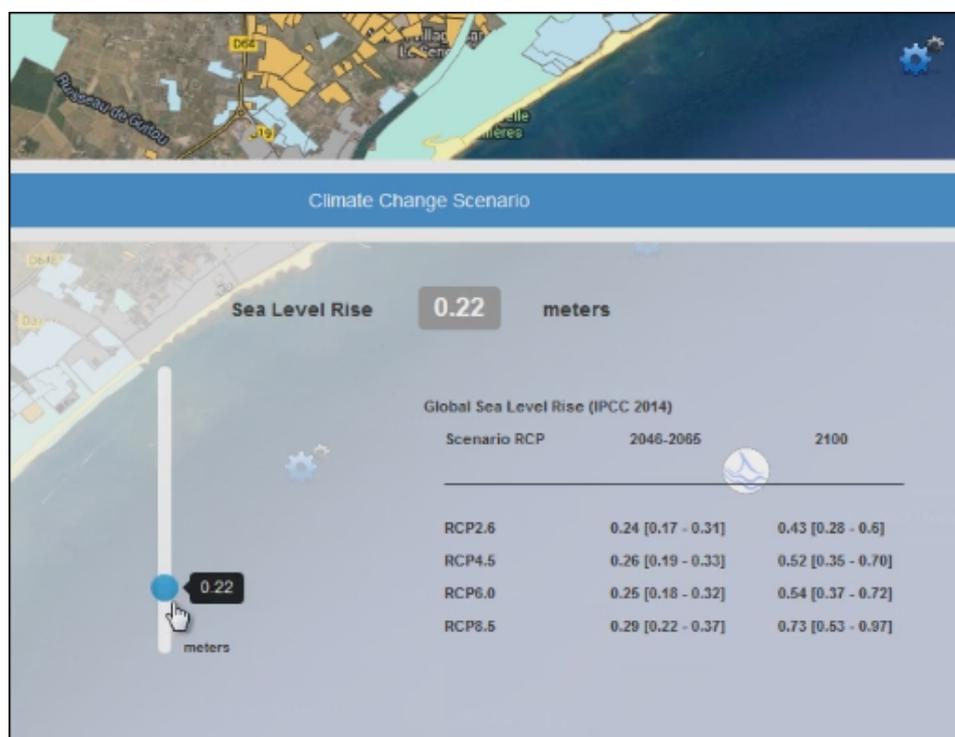


Figura 3.16: IH-DSS Flooding - selección de escenario de cambio climático

3.3 Casos de Estudio - Sistemas de análisis del riesgo

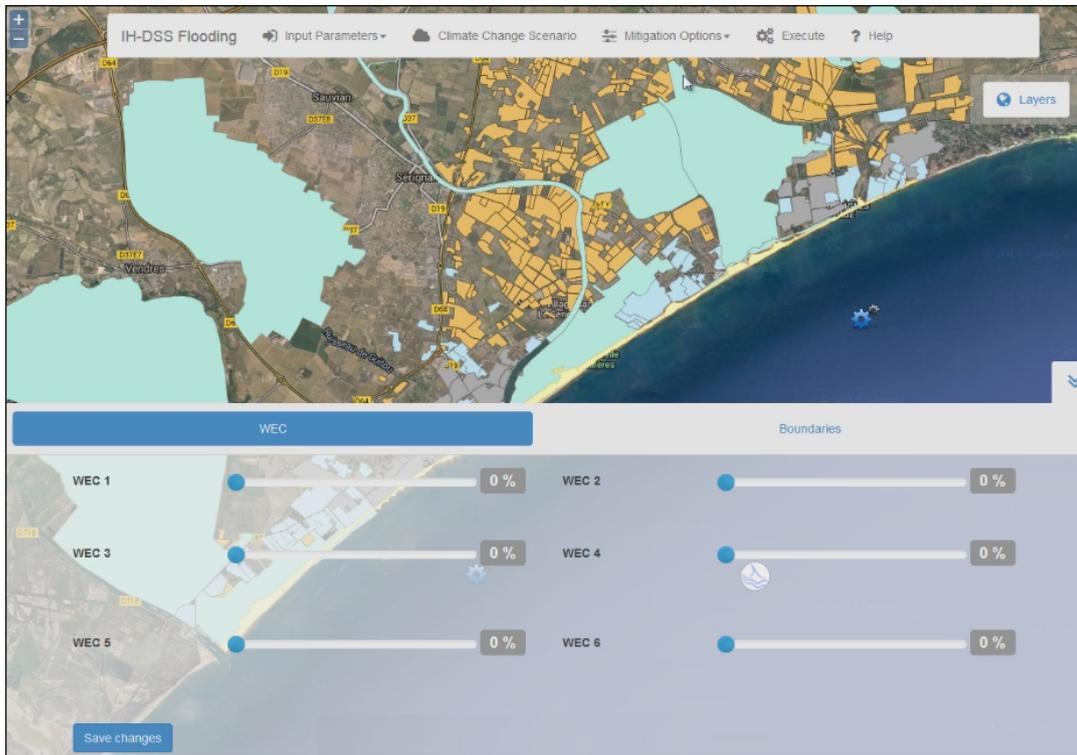


Figura 3.17: IH-DSS Flooding - medidas de adaptación mediante Wave Energy Converters (WEC)



Figura 3.18: IH-DSS Flooding - evolución del TWL en elemento boundary

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

Modelo Interior

La información proporcionada por el modelo exterior, TWL en cada instante de tiempo en los elementos *Boundary*, permite lanzar la ejecución del modelo interior (figura 3.19). En este caso se configuró el modelo de inundación RFSM-EDA (*Rapid Flood Spreading Method - Explicit Diffusion wave with Acceleration term*), modelo 2D hidrodinámico desarrollado por HR Wallingford (Bates *et al.* 2010). El modelo lleva a cabo un análisis hidrodinámico que proporciona profundidades, extensión, duración y tiempos de inundación prácticamente al vuelo. Para ello, el modelo RFSM-EDA requiere la generación de una malla vectorial (figura 3.20), polígonos denominados *Impact Zones* (IZ), generada a partir del Modelo Digital del Terreno, la cual es almacenada en una base de datos relacional (*SQL Server*) y posteriormente utilizada en cada uno de las simulaciones de inundación. La generación del mallado depende enormemente de la resolución y calidad del Modelo Digital del Terreno. La validación del modelo fue llevada a cabo con casos reales (figura 3.21).

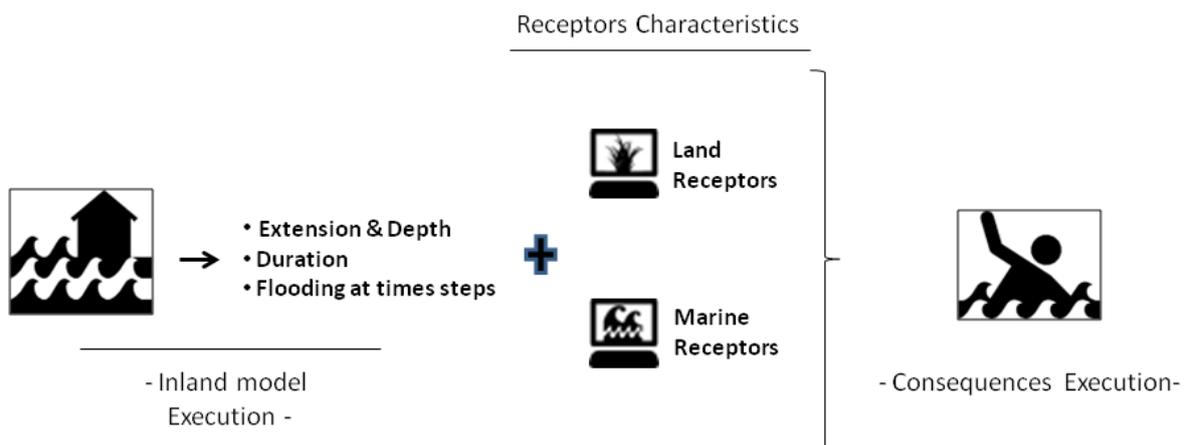


Figura 3.19: Esquema Modelo Interior IHDSS-Flooding

En el caso de Delta De L' Orb el mallado fue definido con las siguientes características: el tamaño de las IZs fue limitado a un rango entre 20.000 (140m x 140m de media) y 40.000 (200m x 200m) metros cuadrados. La ejecución del modelo interior en el Sistema proporciona profundidades y velocidades que pueden ser visualizados y consultados a través del navegador Web (figuras 3.22 y 3.23). El Sistema a su vez, proporciona capacidad de adaptación ambiental de la inundación mediante el incremento de la altura de las dunas (figura 3.24).



Figura 3.20: Representación conceptual del TWL inundando el mallado del modelo RFSM-EDA



Figura 3.21: Casos reales (izquierda) y simulaciones con el RFSM-EDA (derecha)

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

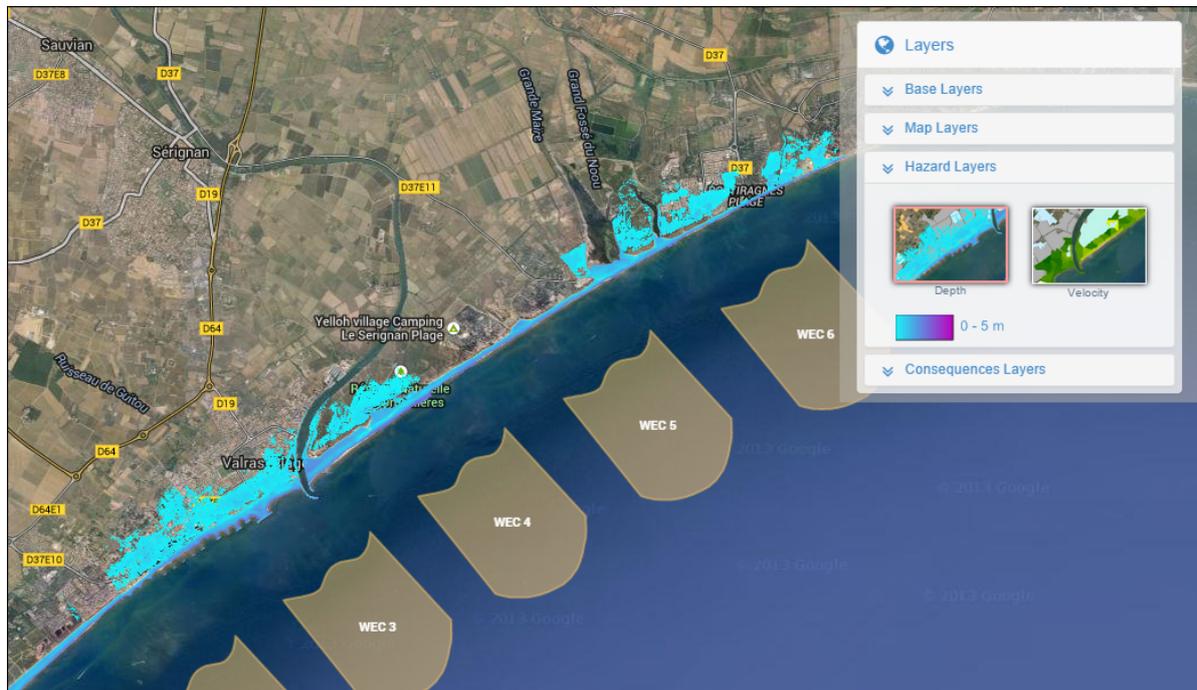


Figura 3.22: IH-DSS Flooding - resultados del modelo de inundación (profundidades)



Figura 3.23: IH-DSS Flooding - resultados del modelo de inundación (velocidades)

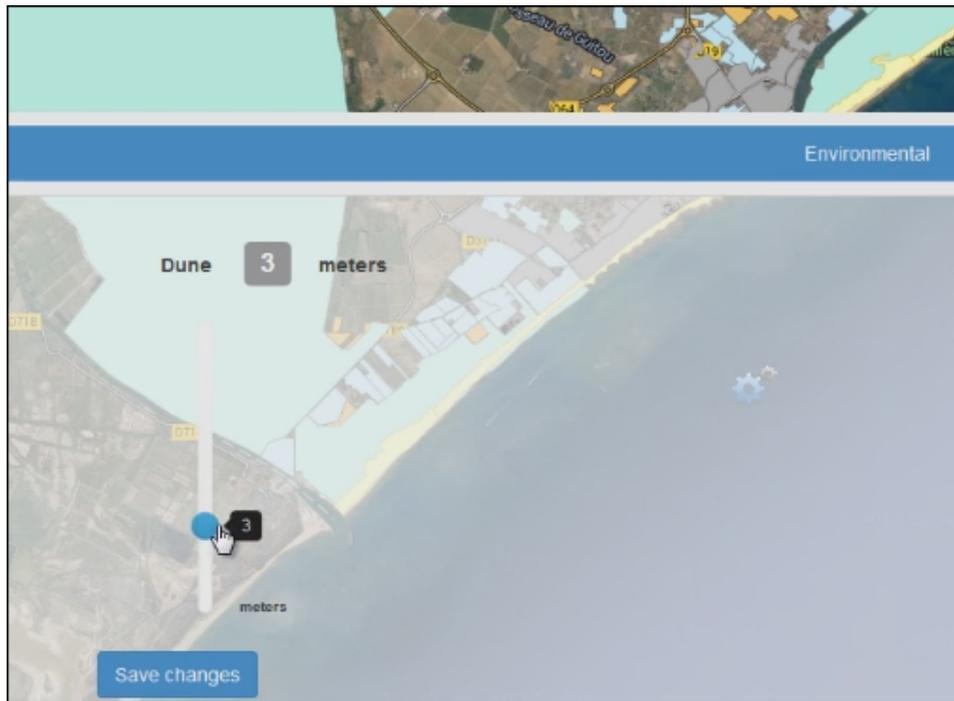


Figura 3.24: IH-DSS Flooding - medidas de adaptación ambiental (recrecimiento del sistema dunar)

Análisis de Consecuencias

La caracterización de los receptores: usos del suelo, población, características de las propiedades, hábitats, etc fueron utilizadas junto con el resultado del modelo de inundación en el cálculo final de consecuencias (figura 3.19). IH-DSS Flooding permite al usuario editar las características de los Receptores a través de su interfaz de usuario (figura 3.25).

Finalmente, el Sistema realiza un análisis multicriterio mediante la integración de indicadores socioeconómicos, pérdida de vidas (Jonkman *et al.* 2008), pérdida económica mediante curvas de daño (Buchele *et al.* 2006) y el *Environmental Vulnerability Index* (EVI) desarrollado bajo el proyecto THESEUS (Zanuttigh *et al.* 2014) (figura 3.26).

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

Code	Name	PUCODE	PUValue	Population	IniExpRt	EvacEffInd	evacuated
657	Camping - l'Emeraude	13	3000	250	0.5	0	0
658	Camping - CCAS EDF GDF	13	3000	250	0.5	0	0
659	Camping - Camping familial de la ville de Venissieux	13	3000	250	0.5	0	0
660	Camping - Les Sablons	13	3000	250	0.5	0	0
661	Camping - Les Mimosas	13	3000	250	0.5	0	0
662	Camping - Les Cotes du Soleil	13	3000	250	0.5	0	0

Showing 1 to 6 of 57 entries (filtered from 484 total entries) Previous 1 2 3 4 5 ... 10 Next

Figura 3.25: IH-DSS Flooding - edición de Receptores

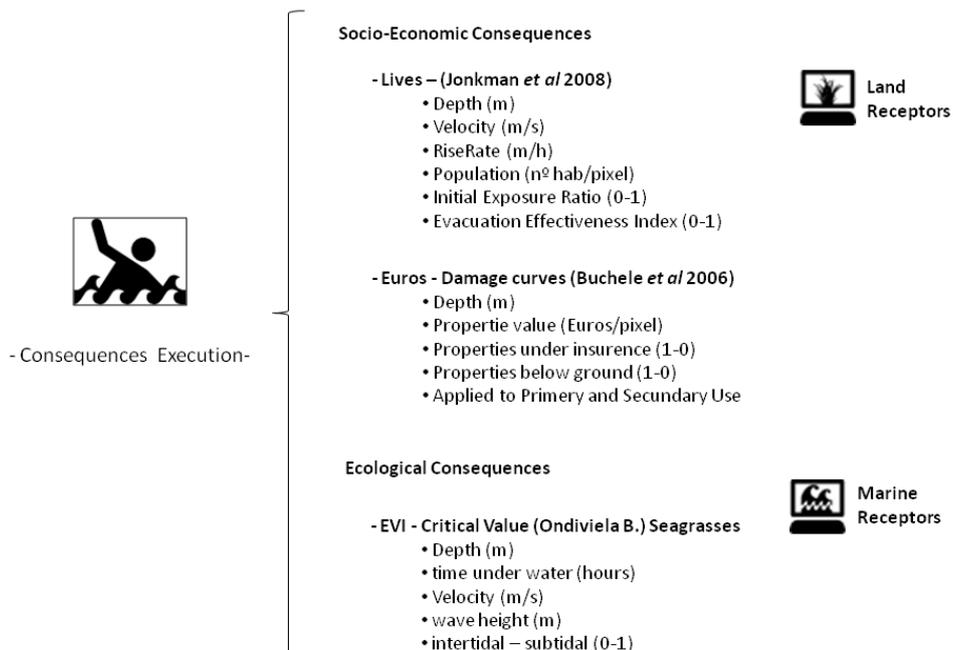


Figura 3.26: Esquema análisis de Consecuencias IHDSS-Flooding

3.4 Resultados y discusión

Tal y como hemos podido observar a través de los casos de estudio, captar las condiciones ambientales y socioeconómicas del área de estudio son fundamentales para realizar el proceso de modelización y análisis del riesgo. En un primer caso, el Sistema MHRAS basa su aproximación en un “fotograma de información”, entendiendo como tal la más fiel representación de la situación actual en función de los datos disponibles. Por otro lado, el Sistema IH-DSS Flooding pretende proporcionar al usuario el mayor grado de libertad posible para configurar el escenario deseado (pasado, presente o posible futuro). Ambas aproximaciones tienen sus debilidades: en el caso del MHRAS, su mayor debilidad se encuentra en los datos, los cuales deben representar fielmente la situación actual. Los modelos digitales del terreno, vías de comunicación, distribución de la población, etc pueden cambiar drásticamente en un país como Omán, país que ha sufrido un extraordinario crecimiento urbanístico en los últimos 40 años (Shueili 2015). Los patrones de desarrollo y asentamiento en la costa, tanto en el tiempo como en el espacio, juegan un papel fundamental en el aumento o descenso del riesgo en zonas costeras (Dilley *et al.* 2005, World-Bank 2014). Por lo tanto, la actualización periódica de las posibles inundaciones, vulnerabilidades y riesgos es un aspecto requerido para un correcto proceso de ayuda a la toma de decisión. Actualmente existen dos fuentes de información que permiten actualizar, de forma dinámica y autónoma, la vulnerabilidad socioeconómica del área de estudio: (1) los datos satelitales, en especial la iniciativa Copernicus y su constelación de satélites y sensores, son una fuente de información global que ya suponen un antes y un después en el proceso de ayuda en la toma de decisión en situaciones de emergencia (Denis *et al.* 2016), por otro lado, (2) el papel que están tomando las iniciativas VGI (*Volunteered Geographic Information*) en el cartografiado global y más concretamente en la gestión de emergencias y análisis del riesgo es destacable (Goodchild 2007, Haworth 2016, Horita *et al.* 2015), siendo *OpenStreetMap* (OSM) una referencia, la cual ha comenzado a implementarse en desarrollos dedicados a la gestión del riesgo, como es el caso de InaSAFE.

El mayor hándicap del IH-DSS Flooding es permitir al usuario un grado de libertad elevado en la configuración del área de estudio, dicha configuración presenta dos vertientes: (1) la configuración de los datos, es decir, permitir al usuario seleccionar e introducir los valores de *Sources*, *Pathways* y *Receptors*, y por otro lado (2) proporcionar al usuario una colección de tipos de elementos de transformación mediante funciones *Pathways*, funciones de análisis de consecuencias y opciones de adaptación/mitigación para permitir al usuario una completa configuración del área de estudio. La configuración del área de estudio para el Sistema IH-DSS Flooding puede apreciarse en el vídeo de la figura 3.27. Por otro lado, el Sistema MHRAS es un Sistema basado en consultas, sin necesidad de configuración previa (ver enlace del vídeo al pie de la figura 3.28).

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

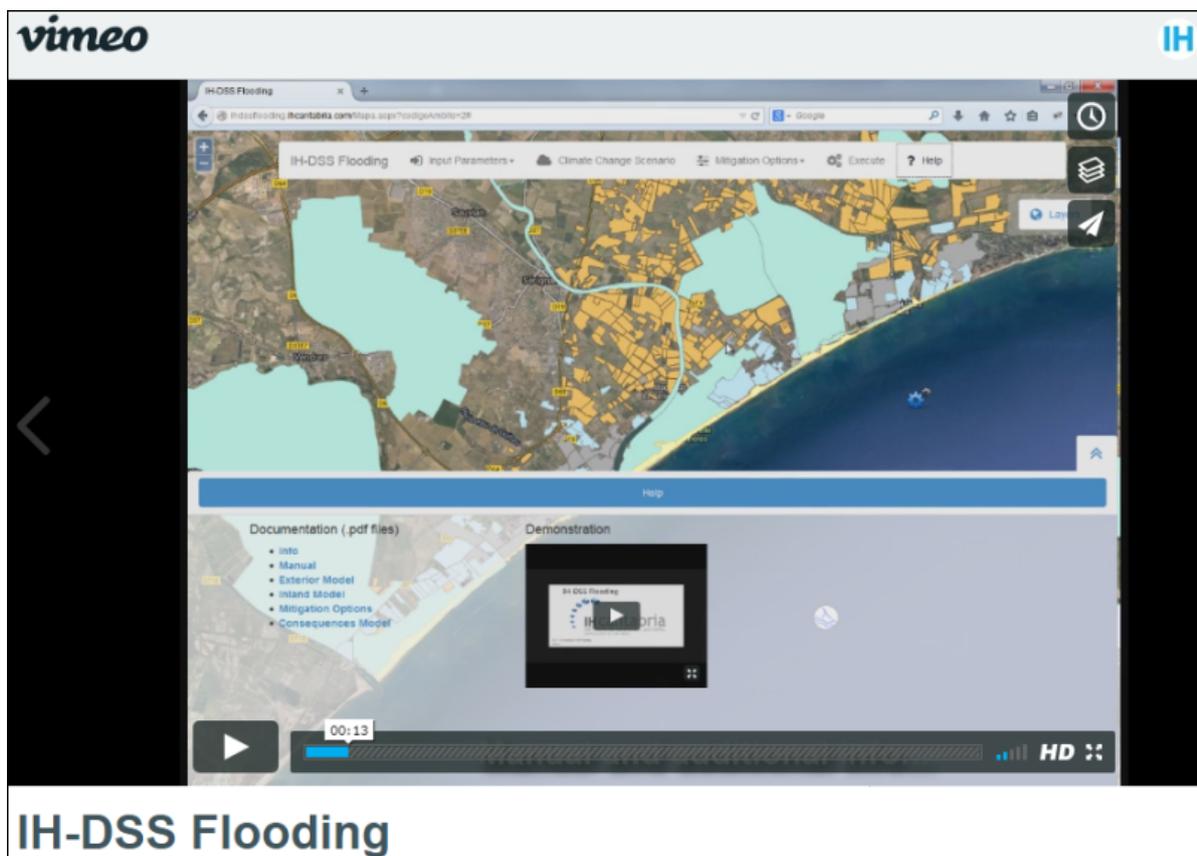


Figura 3.27: Vídeo del Sistema IH-DSS Flooding - <https://vimeo.com/ihcantabria/IHDSSFlooding>



Multi Hazard Risk Assessment System (MHRAS)

Figura 3.28: Vídeo del Sistema *Multi Hazard Risk Assessment System* (MHRAS) - <https://vimeo.com/ihcantabria/mhras>

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

Los procesos de análisis del riesgo son muy intensos en cuanto a requerimiento de datos y procesamiento (World-Bank 2014). El análisis del riesgo de inundación a escala local depende en gran medida de la resolución espacial de los datos. El modelado de la peligrosidad a escalas locales requiere de topo-batimetría de alta resolución, la cual desafortunadamente no suele estar ampliamente disponible y se debe recurrir a modelos digitales del terreno (MDT) de cobertura Global, tales como por ejemplo el STRM¹, ASTER GDEM², ETOPO³, etc. Los MDT de cobertura global cubren prácticamente todo el globo pero presentan una resolución espacial y vertical reducida. La comunidad científica internacional es consciente de este hecho (Griffin *et al.* 2015, Kulp & Strauss 2016) y están trabajando para obtener un MDT global con importantes mejoras en lo que a resolución espacial y vertical se refiere (Sampson *et al.* 2016). En el caso de la información socioeconómica de alta resolución, ésta también suele ser escasa, aspecto que fue identificado por Naciones Unidas como una carencia significativa para el proceso de análisis del riesgo (Basher *et al.* 2006). Una de las últimas aportaciones más notables en este sentido ha sido realizada por el *Connectivity Lab* de Facebook, la Universidad de Columbia y el Banco Mundial, los cuales han liberando un mapa de asentamientos de población global del año 2015 con una resolución espacial de aproximadamente 30m (Tiecke 2016).

Los avances tecnológicos nos permiten almacenar grandes volúmenes de información y llevar a cabo operaciones de cálculo antes inimaginables. Los avances en sensorica generan información de alta resolución que requiere de más almacenamiento y más capacidad de cálculo. Por lo tanto, somos capaces de caracterizar espacialmente un área de estudio con mucho mayor detalle, utilizando por ejemplo tecnología LIDAR, sin embargo debemos tener en cuenta el proceso de análisis de la información. Utilizar datos con mayor resolución espacial supone un incremento, tanto en el volumen de datos como en la capacidad de cálculo, reduciendo la incertidumbre respecto a la variabilidad espacial de los fenómenos estudiados.

Las incertidumbres asumidas por ambos sistemas difieren notablemente ya que el Sistema estático proporciona “el caso más cercano” de un amplio número de simulaciones, asumiendo el posible rango de error, mientras el dinámico lleva a cabo un modelado numérico específico para cada evento. El uso de datos de alta resolución podría facilitar la reducción de incertidumbre, sin embargo podría incrementar considerablemente el tiempo de ejecución, lo cual podría ser asumible para el caso estático pero significativamente más problemático para el dinámico. Por lo tanto, en ambos casos es necesario alcanzar un balance adecuado entre estos tres aspectos: (1) la resolución espacial de los datos, (2) la incertidumbre asumida y (3) los tiempos de ejecución de los modelos numéricos. Otro aspecto relevante, pero no contemplado

¹<http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>

²<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

³<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>

en esta tesis doctoral, es el análisis y la representación de dicha incertidumbre al usuario final, información fundamental de cara al proceso de toma de decisión (Maier *et al.* 2008, Uusitalo *et al.* 2015).

El uso de una infraestructura cliente/servidor para la implementación de ambos EDSS ha proporcionado los siguientes beneficios:

- los usuarios finales únicamente requieren de un dispositivo con conexión a internet para acceder al EDSS,
- los usuarios están familiarizados con el uso de navegadores Web facilitando una interacción amigable,
- el Sistema permite establecer protocolos interoperables (máquina-máquina) con otros Sistemas, y
- la información y los procesos numéricos están centralizados, lo que facilita cualquier proceso de actualización y mantenimiento.

Por otro lado, deben ser tenidos en cuenta los siguientes aspectos:

- los sistemas requieren una infraestructura *IT*, *Data Center* y personal especializado, y
- las capacidades de procesamiento concurrente y multiusuario son limitadas.

La arquitectura cliente/servidor encaja por lo tanto en el diseño de Sistemas de ayuda a la toma de decisión dirigidos a usuarios gestores de medio/alto nivel. Por otro lado, para aquellos usuarios con pretensiones analíticas y con grados de libertad muy elevados, debería ser desarrollado un software *desktop* basado en las metodologías del caso IH-DSS. Este razonamiento se basa en el contexto denominado “*Quality of Experience*” (QoE), Egger *et al.* (2012) ponen de manifiesto la reducción en la calidad de la experiencia de uso en relación con los altos tiempos de espera que pueden ser necesarios al utilizar tecnologías Web.

Respecto al modo de licenciamiento de las tecnologías utilizadas, la implementación de tecnologías *Open Source* en el caso dinámico demuestra su grado de madurez. El licenciamiento *Open Source* ha calado en el panorama actual de las Tecnologías de la Información siendo para muchos el camino hacia la innovación. Este es el caso de la NASA, la cual en Marzo de 2017 ha liberado, bajo distintos tipos de licenciamiento, su catálogo de software (2017-2018) a través de su Portal Web¹ con un claro objetivo “*supporting the innovation economy*” (NASA 2017b).

El World-Bank (2014) en su estudio “*Understanding Risk in an evolving World*” establece recomendaciones para futuros análisis del riesgo, los cuales deben ser tenidos en cuenta como

¹<https://software.nasa.gov/>

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

especificaciones funcionales en el desarrollo de futuros EDSS de Gestión del Riesgo. Entre ellos, destacar los siguientes:

- el usuario final y el objetivo del análisis del riesgo deben ser definidos inicialmente,
- favorecer y habilitar el sentimiento de propiedad y compromiso con el análisis del riesgo,
- cultivar y promocionar la generación y uso del *Open Data*,
- fomentar la generación de datos mediante nuevas técnicas: sensórica remota, información geográfica voluntaria o colaborativa, mejora iterativa de la información generada, etc.
- mejorar aspectos en la comunicación del riesgo,
- mantener una actualización de la evolución del riesgo,
- comunicar las incertidumbres y limitaciones del análisis del riesgo, y
- fomentar una evaluación del riesgo abierta y transparente, fomentando la disponibilidad del software bajo licenciamientos *Open Source*.

3.5 Conclusiones

Se ha realizado un análisis, haciendo uso de las actuales Tecnologías de la Información, del uso de la modelización numérica de forma estática (pre-ejecución de casos) y de forma dinámica (ejecución en caliente) aplicados en el proceso de ayuda en la toma de decisión.

La revisión de los principales EDSS de Gestión del Riesgo de los últimos diez años ha permitido identificar las siguientes aspectos:

- La tecnología utilizada en los Sistemas de Gestión del Riesgo es Web o *Desktop* y en ocasiones una combinación de ambas.
- La información espacial es clave para estos análisis por lo que todos los Sistemas se sustentan en Sistemas de Información Geográfica, principalmente ArcGIS/ArcGIS Server y QGIS. El modelo de datos utilizado suele ser una combinación vectorial y raster.
- Los Sistemas de Gestión del Riesgo Global o Continental no presentan grandes retos, la escala local y más concretamente el modelado del *hazard* presenta una gran dependencia a las características físicas del área de estudio.

- Muchas iniciativas de desarrollo surgen bajo proyectos de investigación, generando desarrollos aplicados a áreas piloto con difícil implementación en nuevas localizaciones.
- Existe una clara tendencia hacia el desarrollo de EDSS de Gestión del Riesgo bajo un licenciamiento *Open Source*.

Se han diseñado y desarrollado dos EDSS, estático y dinámico, de gestión del riesgo de inundación costera deterministas. Sistemas implementados en casos reales bajo una arquitectura cliente servidor, orientados a proporcionar ayuda en la toma de decisión en relación a posibles eventos de inundación costera.

Las singularidades de los EDSS de Gestión del Riesgo de inundación costera están basadas en el propio análisis del riesgo y en la gestión de los resultados de dicho análisis. Los componentes principales del análisis del riesgo son las características del proceso de inundación y la resolución temporal y espacial de tres tipos de datos: MDT, datos socioeconómicos y datos ambientales. Por otra parte, la capacidad de integrar los resultados del análisis en un Sistema orientado a favorecer el proceso de la ayuda de toma de decisión es clave. En este sentido, dependiendo de su esencia dinámica o estática identificamos dos aspectos sustanciales:

En los EDSS de Gestión del Riesgo estático es necesario conseguir:

- una gestión de la información que permita llevar a cabo las consultas necesarias, y
- una actualización periódica de la información gestionada por el Sistema.

En los EDSS de Gestión Dinámicos es necesario proporcionar:

- mayor grado de libertad posible al usuario mediante la concatenación de funciones y modelos, y
- funcionalidades para que a través del Sistema el usuario pueda modificar los datos principales de evaluación del riesgo.

La obtención dinámica de información mediante datos satélite o iniciativas VGI supondrá un claro impulso en la mejora de los EDSS de Gestión del Riesgo, permitiendo automatizar el proceso de análisis del riesgo con el fin de obtener el fotograma más actualizado posible para el proceso de gestión del riesgo. En este contexto, la interoperabilidad y el uso de estándares (ej. OGC) será un requisito indispensable.

El conocimiento multidisciplinar de investigadores y tecnólogos ha sido integrado en dos EDSS aplicados a la Gestión del Riesgo de inundación costera, IH-DSS Flooding y MHRAS, reduciendo el tiempo en materia de toma de decisión y mejorando la calidad y consistencia de dichas decisiones. La implementación del Sistema MHRAS en el Gobierno de Omán nos

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

permite concluir que, mediante el uso de las actuales Tecnologías de la Información ha sido realizada con éxito la transferencia de conocimientos científico-técnicos multidisciplinares a la sociedad.

A continuación son listadas las aportaciones más significativas de este capítulo, “*Modelización aplicada en los EDSS de Gestión del Riesgo de inundación costera*”, respecto a las preguntas de investigación planteadas y al estado del conocimiento:

- Se han identificado y listado los aspectos más relevantes a tener en cuenta en el diseño, desarrollo e implementación de EDSS aplicados a la Gestión del Riesgo de inundación costera.
- Se han diseñado e implementado un EDSS estático multiriesgo (tsunamis y ciclones tropicales) a escala nacional y local capaz de proporcionar acceso interoperable a otros Sistemas.
- Se ha diseñado e implementado un EDSS dinámico a escala local, con capacidad de ser aplicado en otras áreas de estudio, el cual incluye capacidades como la generación del *hazard*, evaluación del riesgo e implementación de medidas de adaptación/mitigación.

3.6 Comunicaciones

A continuación son listadas las publicaciones y comunicaciones realizadas en el ámbito de la “*Modelización aplicada en los EDSS de Gestión del Riesgo de inundación costera*” y sus casos de estudio.

Tabla 3.4: Comunicaciones realizadas en el ámbito del capítulo 3

Publicación	2014 Tomás, A., Ortiz, M.D., Medina, R., Mendez, F., Fernández, F, Castellanos, O.F., Fernández, F. , Lara, J.L. Application of the European Flooding Directive to Coastal Areas in Spain: Methodology and Tools to generate Flood hazards and Risk Maps. <i>6th International Conference on Flood Management (ICFM6)</i> . Sao Paulo, Brasil
Referencia	http://www.abrh.org.br/icfm6/proceedings/

Comunicación	2014 Fernández, F. , Pedraz, L., Martínez, J., Mendez, F., Gonzalez, M., Medina, R., Al-Yahyai, S Multi Hazard Risk Assessment System (MHRAS) Tsunamis and Tropical Cyclones. <i>Conferencia ESRI España 2014</i> . Madrid, Spain
Referencia	-

Comunicación	2014 Fernández, F. , Velarde, V., Jiménez, M., Pham Van Band, D., Laborie, V., Losada, I.J., Medina, R. IH-DSS Flooding – Decision Support System for Planning Coastal Risk and Mitigation. <i>GeoRisk 2014</i> . Madrid, Spain
Referencia	-

Comunicación	2014 Fernández, F. , Aguirre, I., González-Riancho, P., Martinez, J., Mendez, F., Gonzalez, M., Medina, R., Losada, I.J., Al-Yahyai, S. Vulnerability Analysis for the Omani Coastal Areas - Multi Hazard Risk Assessment System (MHRAS) Tsunamis and Tropical Cyclones. <i>GeoRisk 2014</i> . Madrid, Spain
Referencia	-

Comuniación	2013 Losada, I.J., Medina, R., Méndez, F., Izaguirre, C., Espejo, A., Pérez, J., Díaz, G., Menéndez, M., Reguero, G.B., Guanache, Y., Tomás, A., Fernández, F. , Mínguez, R., Castellanos, O.F., Fernández, F. Cambio climático en la costa española: Proyecto C3E. <i>XII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos</i> . Cartagena, España
Referencia	-

3. MODELIZACIÓN APLICADA EN LOS EDSS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

Comunicación	2013 Tomás, A., Medina, R., Mendez, F., Fernández, F., Castellanos, O.F., Higuera, P., Fernández, F. , Mínguez, R., Diaz, G., Lara, J.L., Ortiz, M.D. Metodología para la elaboración de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación costera en España (iOLE) <i>XII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos</i> . Cartagena España
Referencia	http://iole.ihcantabria.com/referencias/

Comunicación	2013 Tomás, A., Medina, R., Mendez, F., Lara, J.L., Mínguez, R., Castellanos, O.F., Fernández, F., Higuera, P., Fernández, F. , Abad, S. Metodología y herramientas para la elaboración de los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación costera <i>IV Seminario Técnico sobre Inundaciones Fluviales y Costeras</i> . Madrid España
Referencia	-

Publicación	2013 Fernández, F. Cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe en: <i>Las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC) y el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe: experiencias e iniciativas de política</i> . CEPAL - Serie Seminarios y Conferencias. N°74. Santiago de Chile, Chile
Referencia	http://repositorio.cepal.org/handle/11362/7062

Comunicación	2012 Losada, I.J., García, E., Mendez, F., Zanuttigh, B., Nicholls, R.J., Thompson, Richard, Venderlinden, J.P., Fernández, F. , Ondiviela, B., Díaz-Simal, P., Bagli, S. A holistic evaluation of risks in coastal regions under changing climatic, environmental and socioeconomic conditions: the Theseus Decision Support System European Geosciences Union General Assembly 2012. Vienna, Austria
Referencia	http://repositorio.cepal.org/handle/11362/7062

Comunicación	2011 Abad, S., Fernández, P., Reguero, G.B., Ondiviela, B., Fernández, F. , Castanedo, S., Losada, I.J., Mendez, F. Evaluación de vulnerabilidad con Sistemas de Información Geográfica Estudio regional de los efectos del Cambio Climático en la Costa de América Latina y el Caribe. <i>Jornadas sobre nuevas tecnologías aplicadas al estudio de riesgos naturales en la costa. Investigaciones actuales y perspectivas.</i> Santander, España
Referencia	-

La inteligencia es la habilidad de adaptarse al cambio

Stephen Hawking

4

Sistemas operacionales en el proceso de ayuda en la toma de decisión

4.1 Introducción

Los fenómenos ambientales, además de poseer una clara dimensión espacial, ya que ocurren en una determinada localización, poseen una clara dimensión temporal, ocurriendo durante un determinado periodo de tiempo. Debemos evitar una visión simplificada del medio natural, en el cual aplanamos temporalmente un fenómeno a un instante de tiempo en el espacio.

No hay duda de que la habilidad de predecir tendencias o patrones medioambientales tiene una tremenda repercusión en los procesos de ayuda en la toma de decisión. Los Sistemas Operacionales Metocean (meteo-oceanográficos) albergan el modelado numérico de diversos modelos meteorológicos y oceanográficos, proporcionando información *hindcast* (pasado), *nowcast* (presente) y *forecast* (futuro) de diversas variables (viento, oleaje, nivel, corrientes, temperatura, salinidad, etc) y con diferentes resoluciones temporales y espaciales. Los Sistemas Operacionales Metocean han pasado de compartir la información generada (datos en cuatro dimensiones) en formato gráfico (png, tiff, etc) a utilizar protocolos interoperables (*OGC compliant*) que permiten obtener los últimos datos en formatos analizables y bajo las mismas interfaces de acceso, independientemente del modelo utilizado (Signell *et al.* 2008). La comunidad geoespacial internacional ha realizado importantes avances en el desarrollo de estándares, servicios y herramientas que permiten la búsqueda, acceso, análisis y visualización de la información oceanográfica, siendo adaptadas técnicas originalmente desarrolladas para

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

la previsión meteorológica y climática (Signell & Snowden 2014). Este hecho, ha permitido a grupos de investigación transformar su heterogénea colección de datos no *standard* en un marco de servicios Web estandarizados que proporcionan datos bajo estándares interoperables, permitiendo hacer búsquedas, previsualizaciones y acceder a la información de forma ágil y homogénea (Signell & Camossi 2016). El beneficio principal que obtienen científicos y analistas de la implementación de este tipo de infraestructuras se basa en reducir los tiempos de gestión y manipulación de la información, permitiéndoles focalizar sus horas de trabajo en los procesos de análisis e investigación.

La información gestionada por los Sistemas Operacionales Metocean, tales como el *Integrated Ocean Observing System*¹ (IOOS) de la NOAA o el *Marine Environment Monitoring Service*² de Copernicus, es únicamente interpretable por especialistas en meteorología y oceanografía. Sin embargo, la información que proporcionan abre un amplio abanico de posibilidades en la generación de EDSS, Sistemas de información que reducen el tiempo de toma de decisión en materias ambientales y mejoran la calidad y consistencia de dichas decisiones (Poch *et al.* 2004).

El uso de Sistemas Operacionales Metocean y el posterior anidamiento de EDSS supone un claro avance en la explotación de la información operacional proporcionada por dichos Sistemas. Mientras los Sistemas Operacionales Metocean son diseñados para compartir información entre técnicos especializados, los EDSS se caracterizan por su vinculación con el usuario objetivo, basados en su conocimiento y experiencia para proporcionar ayuda en el proceso de toma de decisión (McIntosh *et al.* 2011).

Por ello, sería necesario motivar un acercamiento de los Sistemas Operacionales Metocean y los EDSS, permitiendo unificar ambas aproximaciones bajo una infraestructura de gestión operacional única, capaz de albergar la información meteo-oceanográfica con las resoluciones espaciales y temporales necesarias para su aplicación en los procesos de ayuda en la toma de decisiones.

Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es definir las características principales que deben cumplir los Sistemas Operacionales meteo-oceanográficos para facilitar su vinculación con los EDSS aplicados a los sistemas hídricos.

4.2 Metodología

La metodología para identificar los aspectos clave que caracterizan un Sistema Operacional orientado a proporcionar ayuda en la toma de decisión en los sistemas hídricos se basó en el diseño de una única Infraestructura Operacional, llamada IH-MERCURIO, capaz de:

¹<https://ioos.noaa.gov/>

²<http://marine.copernicus.eu/>

- estandarizar los forzamientos de fuentes externas,
- permitir el procesado de modelos numéricos,
- proporcionar servicios interoperables,
- almacenar la información de interés, y
- monitorizar el Sistema Operacional.

El diseño y desarrollo del Sistema IH-Mercurio se llevó a cabo mediante un proceso iterativo e incremental, pudiendo así incorporar las necesidades funcionales de cada EDSS y generalizarlas para futuros Sistemas de ayuda a la toma de decisión. El uso del *software* de control de versiones *Open Source*, Subversion (SVN)¹, ha sido fundamental para gestionar los desarrollos en su ciclo de vida iterativo.

El proceso de ayuda a la toma de decisión fue embebido en aplicaciones finales que hacen uso de la Infraestructura Operacional. Dependiendo de las características de la ayuda a la toma de decisión fueron utilizados tres tipos de soluciones tecnológicas: aplicación Web, aplicación de escritorio y aplicación móvil, todas ellas haciendo uso de la misma arquitectura operacional:

App Web - Permite analizar el desarrollo e implementación de dos EDSS Operacionales meteo-oceanográficos. El primer EDSS Operacional está basado en la capacidad de proporcionar información meteo-oceanográfica de alta resolución espacial y temporal mediante el *downscaling* operacional, a la que el usuario puede acceder a través de una aplicación Web. El segundo EDSS Operacional está basado en el acoplamiento de otro modelo para simular trayectorias de hidrocarburos, a partir del *downscaling* metocean, pudiendo proporcionar dicha información al usuario a través de una aplicación Web.

App Móvil - El desarrollo de un Sistema Operacional de Tsunamis permitió diseñar e implementar una aplicación Móvil que recibe las alertas establecidas por la infraestructura operacional, pudiendo así analizar las características de la Infraestructura Operacional utilizada a través de aplicaciones móviles.

App Escritorio - El desarrollo de un *plugin* específico para el acceso, visualización y descarga de la información del Sistema Operacional a través de un Sistema de Información Geográfica (GIS), permitió analizar las características del Sistema Operacional utilizado por una aplicación de escritorio.

¹<https://subversion.apache.org/>

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

4.2.1 Arquitectura del Sistema

IH-MERCURIO está basado en una Arquitectura Servidora capaz de integrar proveedores de datos externos, modelos numéricos y servicios para diversas soluciones finales.

El Sistema cuenta además con un Sistema de Monitorización de equipos (*hardware*) y servicios (*software*), *Nagios*¹, el cual genera alertas configuradas para la detección de cualquier anomalía. La comunicación de alertas es realizada vía e-mail y vía *Slack*², herramienta de comunicación de equipos.

El Sistema fue conceptualizado y diseñado en cuatro capas (figura 4.1):

1. capa de estandarización de datos
2. capa de procesamiento de datos
3. capa de servicios de datos
4. capa de almacenamiento de datos

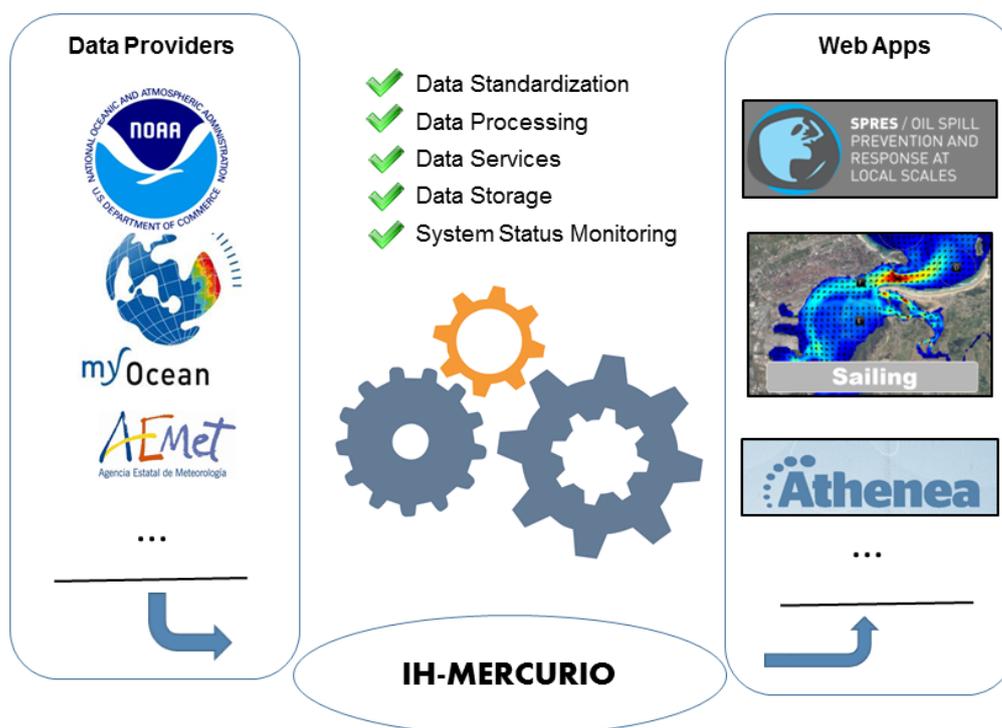


Figura 4.1: Contexto de uso de IH-MERCURIO

Los proveedores existentes proporcionan información océano meteorológica en diversos formatos y a través de diversas tecnologías (ftp, http, etc) . La sección “RAW” de IH-MERCURIO

¹<https://www.nagios.org/>

²<https://slack.com/>

es la encargada de recopilar dicha información para ser procesada y transformada en un único formato. El formato debe ser “*machine-independent*” y “*self-describing*”, los formatos más populares que cumplen esas características son NetCDF (*Network Common Data Form*), HDF (*Hierarchical Data Format*), y GRIB (*Gridded Binary*), siendo NetCDF el más utilizado en la comunidad oceanográfica (Signell *et al.* 2008). Por lo tanto, el formato seleccionado fue NetCDF, concretamente la convención CF1.0 (*Climate and Forecast conventions*).

La información almacenada en formato estándar (CF1.0) es servida a través del *middleware* THREDDS (*Thematic Realtime Environmental Distributed Data Service*), mediante protocolos interoperables: *Web Map Service* (WMS), *Web Coverage Service* (WCS), etc. THREDDS es una herramienta *Open Source* de conectividad entre proveedores de datos científicos y usuarios finales, ampliamente utilizada por organismos proveedores de información meteo oceanográfica operacional tanto a escala global, nacional y regional. Algunos ejemplos de instituciones que han implementado la tecnología THREDDS en sus infraestructuras son: a escala global, el *Earth System Grid Federation* (ESGF), que proporciona datos climáticos (Cinquini *et al.* 2014); a escala nacional, el MetOffice de Reino Unido (Robinson *et al.* 2016), el *Integrated Ocean Observing System* de la NOAA (Signell & Snowden 2014) y Puertos del Estado¹, que proporcionan información meteorológica y oceanográfica; a escala regional, agencias meteorológicas y oceanográficas, como MeteoGalicia (Otero *et al.* 2015) y el Sistema de Observación Costero de las Islas Baleares² (SOCIB), que proporcionan información meteo oceanográfica a través del *middleware* THREDDS.

IH-MERCURIO alberga, durante un periodo de tiempo considerado “de vida útil operacional”, los datos para poder ser servidos por THREDDS. Una vez transcurrido el tiempo de vida útil, los datos pueden formar parte del *Data Store* o repositorio histórico, en caso de que su almacenamiento sea considerado de interés.

La sección de modelos accede a la información operacional necesaria para su correcto funcionamiento. Los modelos numéricos llevan a cabo tareas de *downscaling* de las variables metocean, datos resultantes que pasan a formar parte del ciclo de vida útil operacional proporcionado por el Sistema (figura 4.2).

4.2.2 Procesos de ayuda a la toma de decisión

El Sistema IH-MERCURIO tiene como objetivo establecer un punto común de acceso a toda la información ambiental necesaria para desarrollar soluciones que faciliten el proceso de toma de decisiones basadas en información ambiental operacional. Centralizar los esfuerzos de estandarización de proveedores existentes, el almacenamiento, la puesta en marcha de servicios interoperables y la monitorización de todo el Sistema, permite a los desarrolladores de

¹<http://opendap.puertos.es>

²<http://www.socib.eu>

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

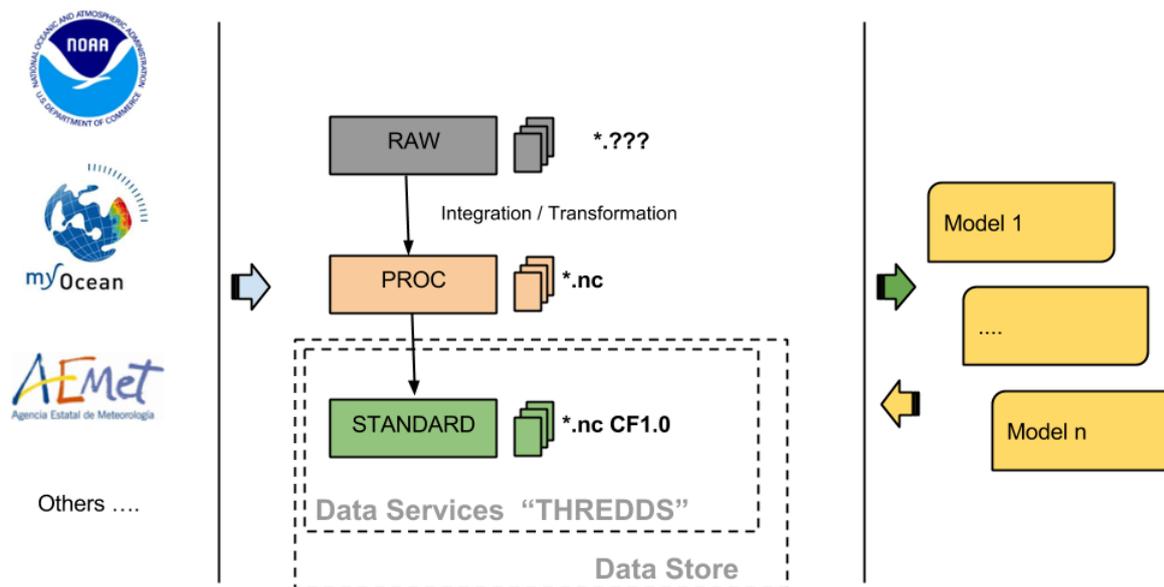


Figura 4.2: Secciones principales de IH-MERCURIO

aplicaciones de ayuda a la toma de decisiones abstraerse de las implicaciones operacionales y focalizarse en el desarrollo *software* de los procesos de ayuda a la toma de decisión.

La abstracción de la capa operacional permite plantear una gran variedad de soluciones. El usuario final y sus expectativas permiten identificar las tecnologías más adecuadas para una solución final. Las capacidades interoperables del sistema posibilitan el acceso a la información mediante tecnologías de escritorio, Web o móviles.

Los procesos de ayuda a la toma de decisión pueden incorporarse en la propia aplicación cliente o en la capa servidora mediante servicios de procesamiento.

4.3 Casos de Estudio

Esta sección describe cuatro EDSS implementados bajo la infraestructura operacional IH-MERCURIO.

4.3.1 App Web Operational Forecast System

En el marco del proyecto “*Supply, installation, train and commission assessment development of multi hazard early warning system*” para el Gobierno del Sultanato de Omán (descrito en el apartado 3), también ha sido desarrollado el *Operational Forecast System* para la costa de Omán, el cual proporciona previsión metocean (viento, oleaje y nivel) para la costa Omaní.

El objetivo del *Operational Forecast System* es proporcionar información sobre las dinámicas de los ciclones tropicales y, en especial, la predicción de posibles eventos de inundación

en la costa de Omán. El usuario final del Sistema es un técnico especializado en océano-meteorología y riesgos naturales hidrometeorológicos.

Como pieza fundamental del *Operational Forecast System*, IH-MERCURIO ha sido implementado para la gestión de la información metocean operacional. A su vez, fueron configurados los modelos numéricos SWAN (Ris *et al.* 1999) y H2D (GIOCI 1990) para 14 mallas de detalle, como se puede apreciar en la figura 4.3. Finalmente, todos los modelos fueron integrados en IH-MERCURIO, haciendo uso del proveedor de la NOAA.

Previsiones globales de viento, oleaje y presión al nivel del mar son descargadas a través del servicio proporcionado por el Sistema NOMADS (Rutledge *et al.* 2006), cuatro veces al día (00Z, 06Z, 12Z y 18Z), al tiempo de ser generados (tabla 4.1). Los datos de NOMADS proporcionan previsiones de 180 horas (7.5 días) con una resolución temporal de tres horas. La información es descargada, estandarizada e integrada por IH-MERCURIO, el cual a su vez proporciona la información estandarizada a los modelos SWAN y H2D. Finalmente estos modelos proporcionan previsión de oleaje y niveles con una resolución temporal horaria y máxima resolución espacial, siendo actualizados dos veces al día.

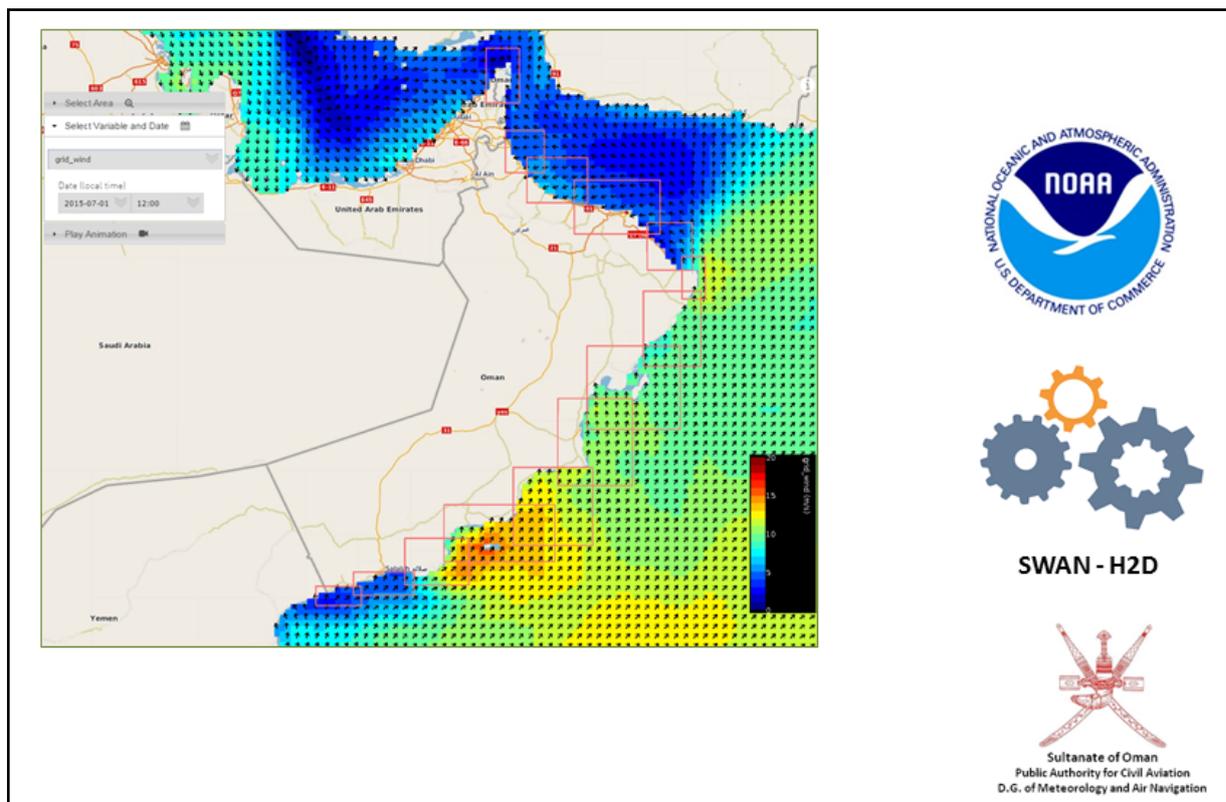


Figura 4.3: Áreas del estudio del *Operational Forecast System*, proveedores y modelos implementados

El Sistema se encuentra alojado en las instalaciones de la Agencia de meteorología del Go-

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

Variables	Localizaciones	Modelos o Productos	Proveedores de Datos
viento	Arabian Sea	NOMADS	NOAA
oleaje	Arabian Sea	NOMADS	NOAA
oleaje	Ciudades Locales (14)	SWAN	DGMET
nivel del mar	Arabian Sea	NOMADS	NOAA
<i>storm surge</i>	Omán	H2D	DGMET

Tabla 4.1: Proveedores metocean del *Operational Forecast System* para el Sultanato de Omán

bierno Omaní, *Directorate General of Meteorology*¹, operativo y en funcionamiento las 24 horas del día, los 365 días del año, desde el año 2015, proporcionando el servicio a las 14 principales ciudades de la costa de Omán: Jasab, Shinas, Al Suwayq, Muscat, Qalhat, Al Hadd, Al Ashkharah, Masirah, Duqm, Lakabi, Miji, Sadah, Salalah y Dhalqut.

4.3.2 App Web ATHENEA

El Sistema ATHENEA² fue desarrollado mediante un proyecto de la convocatoria INNPACTO 2012 del Ministerio español de Economía y Competitividad por un equipo multidisciplinar de investigadores y tecnólogos de IHCantabria, junto con la empresa energética CEPSA³ (Compañía Española de Petróleos S.A.U.).

El Objetivo del EDSS ATHENEA es proporcionar un Sistema integral para la prevención y gestión de la contaminación en las operaciones de carga / descarga y manipulación de hidrocarburos en el ámbito marítimo y portuario. El usuario final del Sistema es un técnico especialista en la prevención y gestión de las operaciones de carga y descarga de hidrocarburos en estaciones suministradoras de hidrocarburos.

El Sistema ATHENEA se encuentra operativo y en funcionamiento las 24 horas del día, los 365 días del año, desde el año 2015 para las refinerías de CEPSA localizadas en Huelva, Algeciras y Tenerife (figura 4.4). Para todas ellas, IH-MERCURIO ha sido implementado con el objetivo de integrar todos los datos proporcionados por fuentes externas (AEMET, Copernicus, etc.), junto con los resultados de los modelos operacionales de *downscaling* del EDSS ATHENEA: SWAN(Ris *et al.* 1999) y DELFT3D(DelftHydraulics 2001) (tabla 4.2). El análisis de trayectorias de vertidos se lleva a cabo mediante el modelo TESEO Abascal *et al.* (2007), el cual utiliza los datos operacionales proporcionados por IH-MERCURIO. Finalmente, se proporciona al usuario mapas de operatividad y condiciones metocean, haciendo uso de los servicios OGC facilitados por el componente THREDDS de IH-MERCURIO.

El funcionamiento y usabilidad del EDSS ATHENEA se muestra en el vídeo de la figura 4.5, el pie de figura proporciona la url de acceso al vídeo.

¹<http://www.met.gov.om>

²<http://athenea.ihcantabria.es>

³<https://www.cepsa.com/>

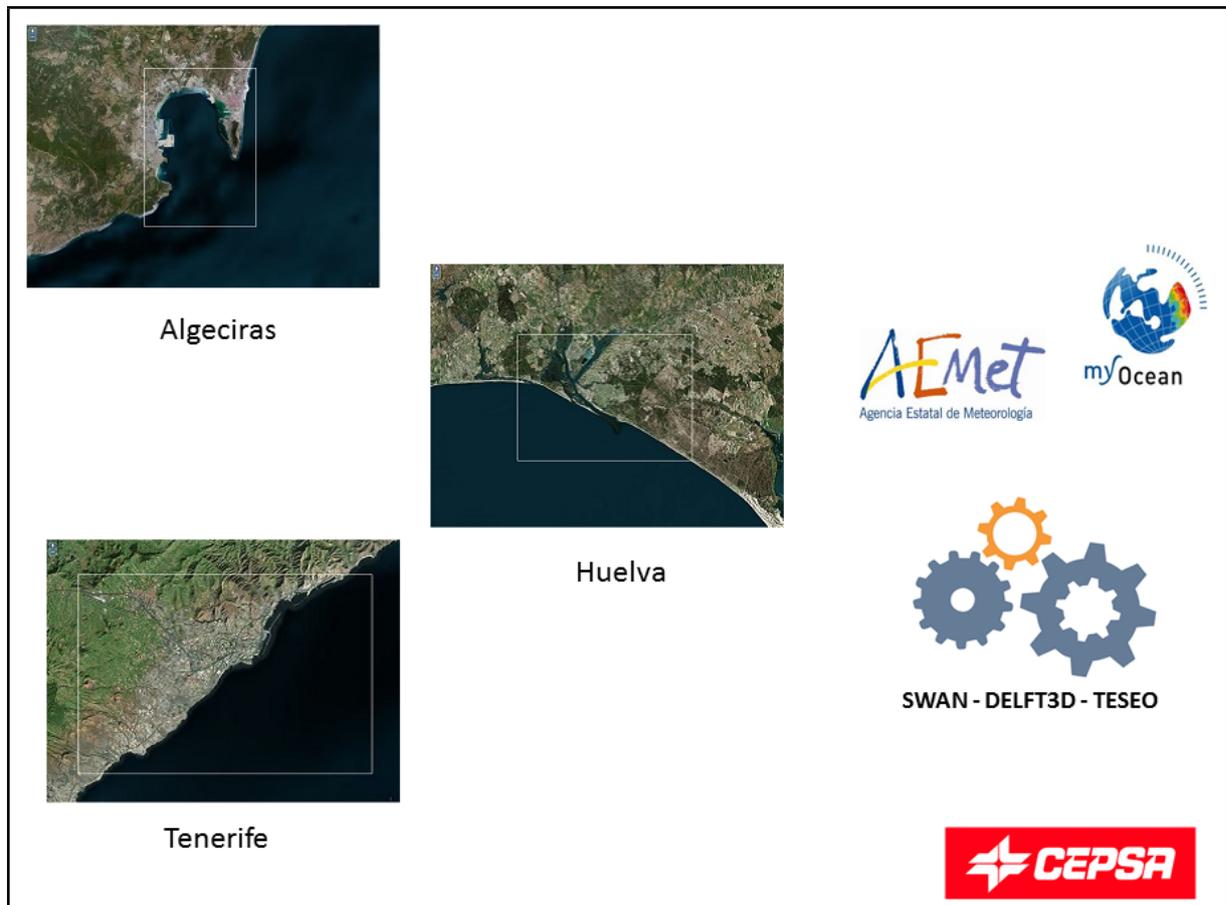


Figura 4.4: Áreas del estudio del EDSS ATHENEA, proveedores y modelos implementados

Variables	Localizaciones	Modelos o Productos	Proveedores de Datos
viento	Bahía Algeciras	Análogos	IHCantabria
oleaje	Estrecho	SWAN	IHCantabria
oleaje	Bahía Algeciras	SWAN	IHCantabria
corrientes	Bahía Algeciras	Análogos	IHCantabria
wind	Bahía Huelva	HIRLAM-HR	AEMET
waves	Andalucía	SWAN	IHCantabria
oleaje	Bahía Huelva	SWAN	IHCantabria
corrientes	Bahía Huelva	Delft3D	IHCantabria
viento	Tenerife	HIRLAM-HR	AEMET
oleaje	Sta. Cruz	SWAN	IHCantabria
oleaje	Tenerife	SWAN	IHCantabria
corrientes	Tenerife	MYOCEAN IBI2	EU-Copernicus

Tabla 4.2: Proveedores metocean del Sistema ATHENEA para las tres refinerías: Algeciras, Huelva y Tenerife

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

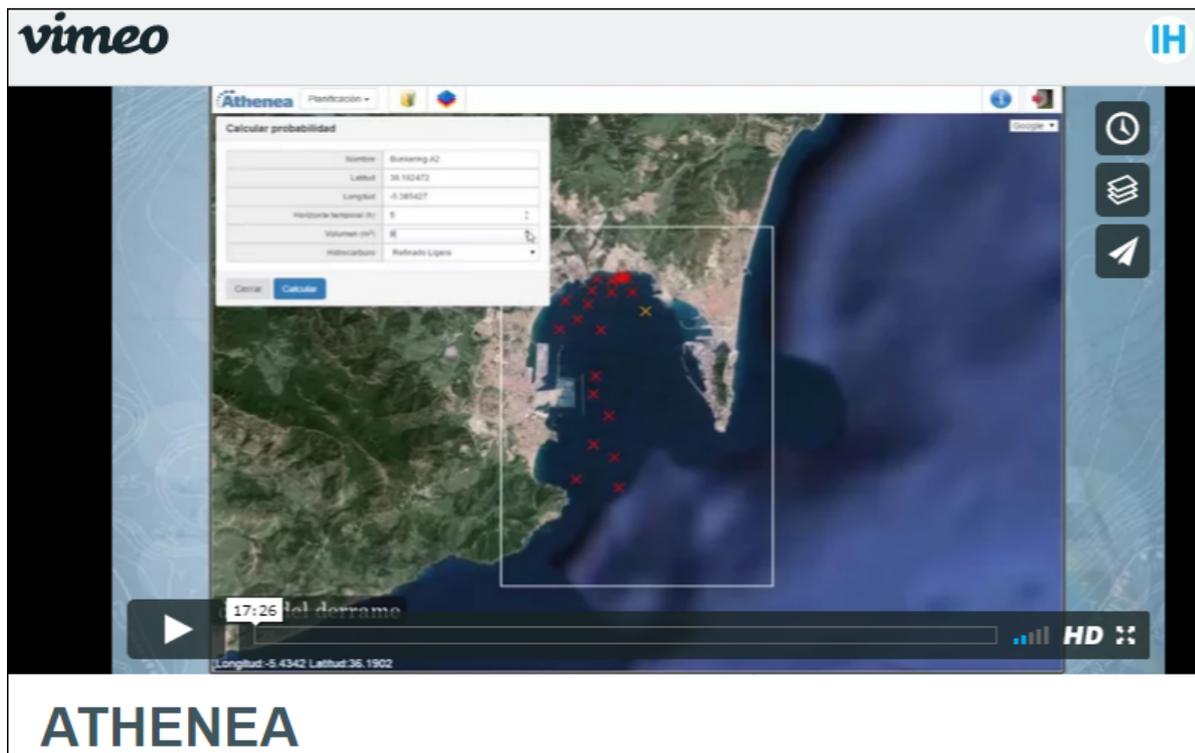


Figura 4.5: Vídeo del Sistema ATHENEA - <https://vimeo.com/ihcantabria/athenea>

4.3.3 App Móvil IH-Tsusy

Los tsunamis son peligros naturales poco frecuentes, poderosos e impredecibles, siendo el tipo de desastre natural más mortal en el planeta, en términos de proporción de víctimas. En total, 16 tsunamis han causado la pérdida de 250.900 vidas humanas en 21 países entre 1996 y 2015, según EM-DAT¹ (*Emergency Events Database*). La proyección de vidas humanas afectadas por tsunamis para el periodo 2016-2030 incrementará un 16 %, siendo fundamental la gestión de estos eventos mediante la preparación de la población a través de Sistemas de Alerta, información sobre el riesgo y educación (UNISDR 2016).

Esta aplicación surgió a partir de la participación en el proyecto Europeo ASTARTE², cuyo principal objetivo fue incrementar el nivel de resiliencia frente a tsunamis en la region NEAM (*North East Atlantic & Mediterranean*). Una de las tareas del proyecto, fue el diseño y puesta en funcionamiento de un Sistema Operacional de Simulación de Tsunamis (figura 4.6).

El Objetivo del Sistema Operacional de Tsunamis es detectar cualquier terremoto significativo que se produzca en el mundo y simular el posible tsunami derivado del mismo de forma autónoma y operacional, proporcionando finalmente información al público. Por lo tanto, el

¹<http://www.emdat.be/>

²<http://www.astarte-project.eu/>

usuario final es el público general, principalmente aquellos ciudadanos que vivan en zonas de riesgo potencial frente a eventos de tsunamis.

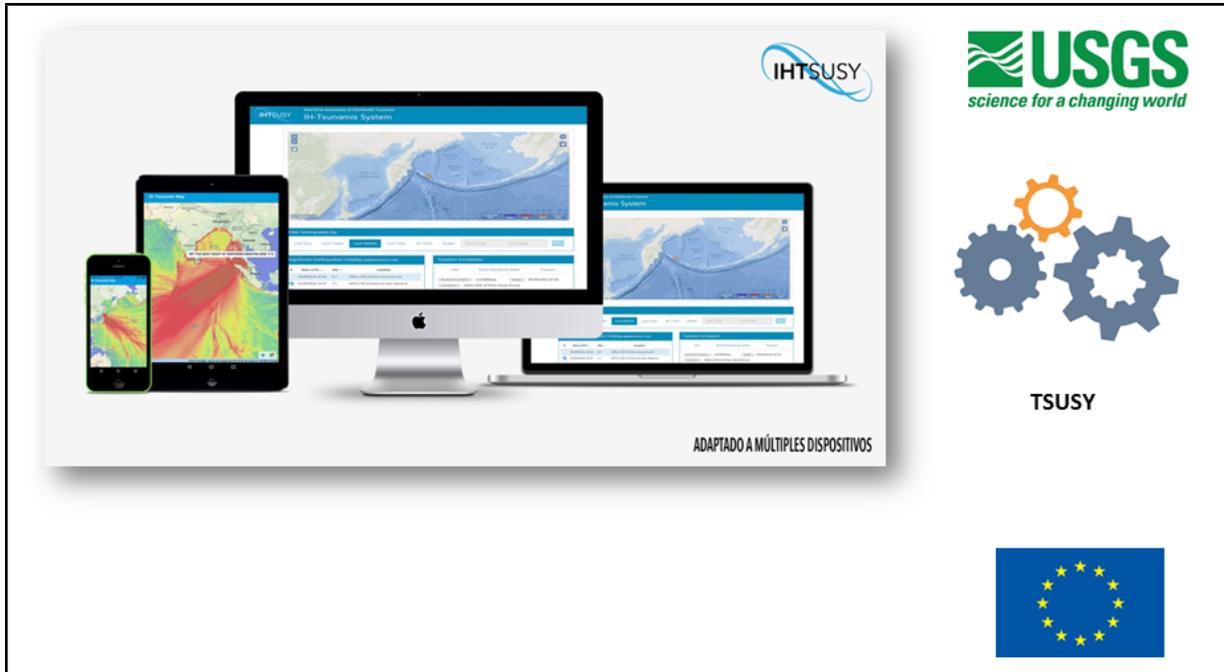


Figura 4.6: Interfaces de usuario, proveedores y modelos implementados en el Sistema Operacional de Simulación de Tsunamis

El Sistema Operacional de Simulación de Tsunamis cuenta con 5 secciones:

1. la sección “*IH-Tsunamis Operational*” se encarga de comprobar la existencia de cualquier nuevo evento de terremoto y, en caso afirmativo, de obtener los datos proporcionados por la agencia americana USGS¹ para alimentar el Modelo IH-Tsusy con sus características (origen, magnitud, y datos tectónicos del *focal mechanism*). Finalmente, gestiona la ejecución de los modelos y sus resultados,
2. la sección “*Database*” almacena y gestiona los datos asociados a los terremotos y a las simulaciones de los tsunamis,
3. la sección IH-MERCURIO, a través del *middleware* THREDDS *Data Server*, proporciona acceso interoperable a los resultados obtenidos tras la simulación del tsunami,
4. finalmente la sección de interacción con el usuario final se realiza a través de: una *app* Web² y una *app* Móvil³ específicamente diseñadas.

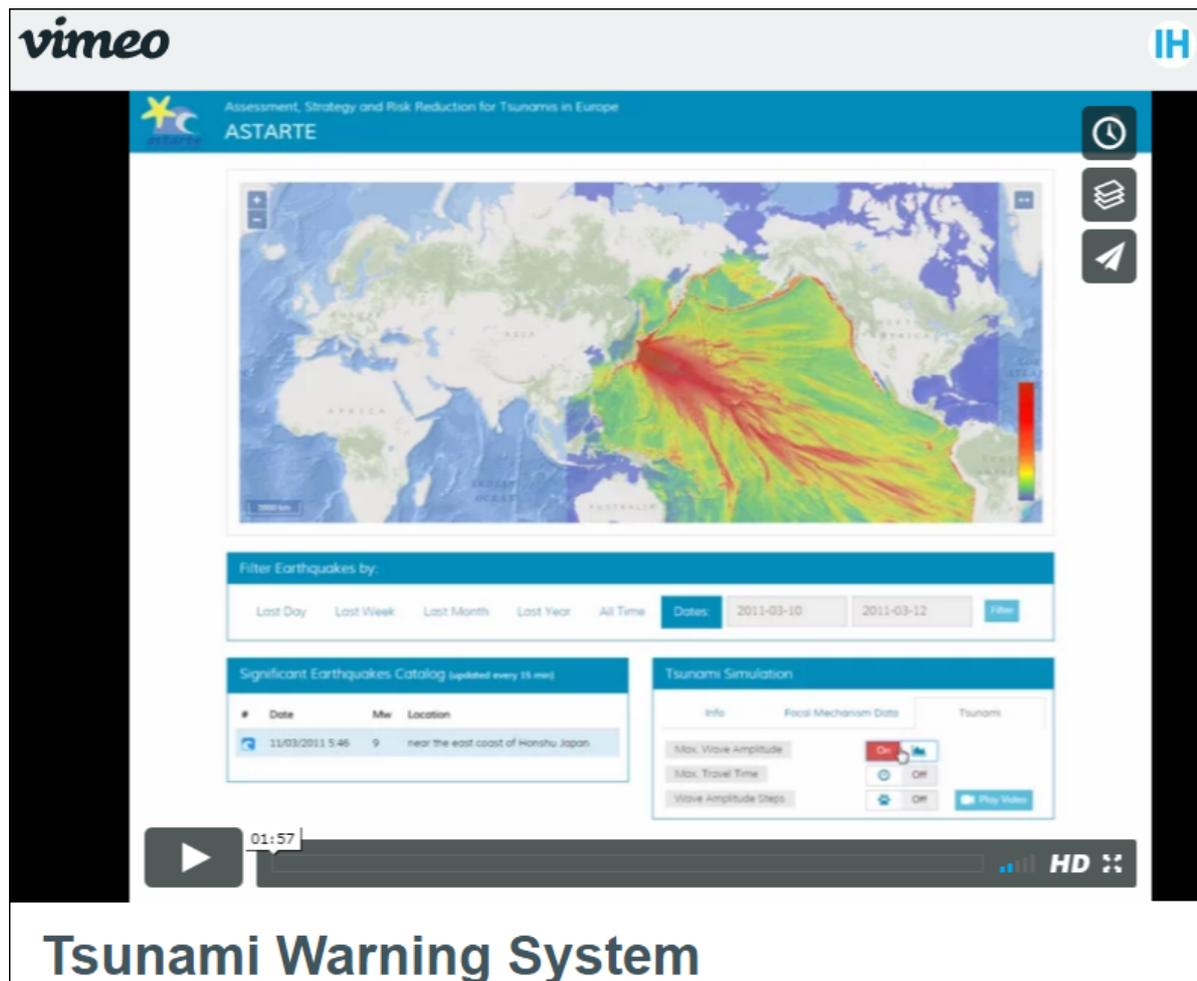
El vídeo mostrado en la figura 4.7 permite visualizar la interfaz Web del EDSS y su usabilidad.

¹<https://www.usgs.gov/>

²<http://tsunami.ihcantabria.com/>

³https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ihcantabria.ih_tsunamis

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN



Tsunami Warning System

Figura 4.7: Vídeo del Sistema *IH Tsunamis System* (interfaz Web) - <https://vimeo.com/ihcantabria/astarte>

4.3.4 *Plugin* de escritorio THREDDs Explorer

En el marco del desarrollo de la arquitectura operacional de IH-MERCURIO, fue desarrollado un *plugin* específico para el *software* GIS de código abierto QGIS. El objetivo del *plugin* es facilitar al usuario final, un analista / investigador con conocimientos GIS, la descarga y análisis de la información operacional proporcionada por distintas entidades a través de un *THREDDs Data Server*.

El código fuente del *plugin* THREDDs Explorer se encuentra accesible bajo licencia GPL en el repositorio de GitHub de IHCantabria¹.

El funcionamiento del *Plugin* puede visualizarse en el vídeo que muestra la figura 4.8, el cual ha tenido más de 2200 visualizaciones en menos de 10 meses, siendo uno de los vídeos más visualizados del canal de IHCantabria.

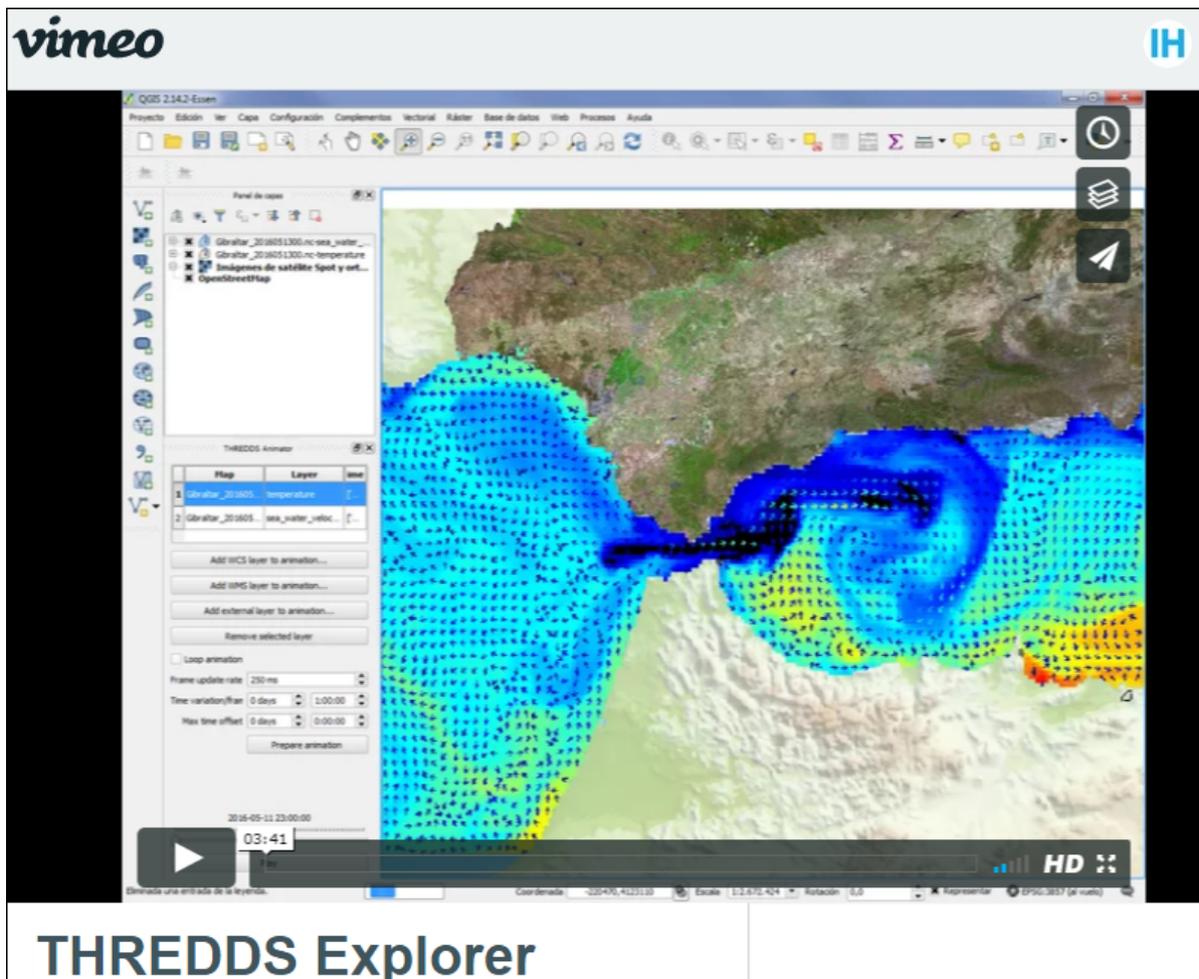


Figura 4.8: Vídeo del *plugin* THREDDs Explorer utilizando IH-MERCURIO - <https://vimeo.com/ihcantabria/threddsexplorer>

¹<https://github.com/IHCantabria/THREDDSExplorer>

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

4.4 Resultados y discusión

El diseño, desarrollo y finalmente implementación del Sistema IH-MERCURIO en distintos casos de estudio ha permitido obtener unos resultados e identificar los principales aspectos que caracterizan un Sistema Operacional orientado a proporcionar ayuda en la toma de decisión en los sistema hídricos.

El desarrollo de IH-Mercurio comenzó en el año 2013, siendo desplegada la primera versión (v0.1.) en producción este mismo año. El proceso de ciclos de desarrollo iterativos ha permitido implementar funcionalidades genéricas de los distintos EDSS implementados, estando actualmente desplegada la versión v2.1.0.

A pesar de la que la evaluación de EDSS es un problema abierto y no existen claras estrategias establecidas para ello (Sánchez-Marrè *et al.* 2008), los resultados obtenidos tras la implementación y mantenimiento de los Sistemas fueron satisfactorios, a continuación se detallan las experiencias de uso de los EDSS basados en soluciones Web y Móvil:

Operational Forecast System

El uso del *Operational Forecast System* tomó verdadera importancia el 28 de octubre de 2015, con el fin de analizar la previsión, en cuanto a trayectoria e intensidad, del ciclón tropical *Chapala*. El ciclón tropical comenzó a formarse en el océano Índico, concretamente en un área de baja presión del mar Árabe. El ciclón recibió el nombre de *Chapala*, que significa “inquieta” en idioma bengalí, un poderoso y atípico ciclón que se consolidó rápidamente alcanzando su máxima intensidad el día 31 de octubre, convirtiéndose en el segundo ciclón más poderoso desde 1979 en el mar Árabe, sólo superado por el ciclón *Gonu* en 2007. La figura 4.9 muestra la previsión establecida por el sistema días antes de que el ciclón tropical tocara tierra en Yemen (el pie de figura proporciona el enlace al vídeo).

La previsión del *Operational Forecast System* proporcionó ayuda en la toma de decisiones por parte de la Agencia Meteorológica omaní, la cual está al cargo de la seguridad civil frente a posibles desastres naturales hidrometeorológicos.

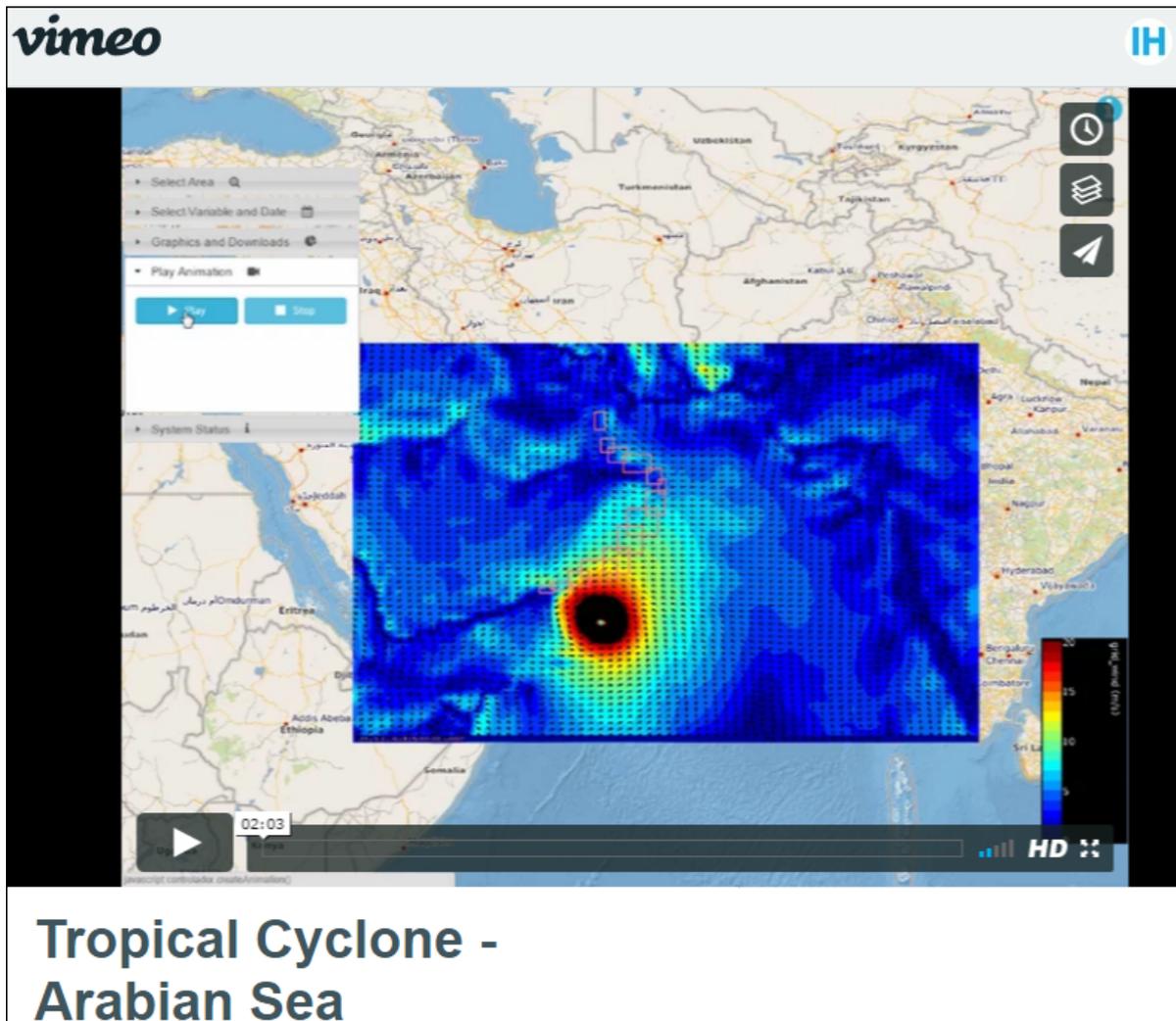


Figura 4.9: Vídeo de la previsión del ciclón *Chapala* proporcionada por el *Operational Forecast System* - <https://vimeo.com/ihcantabria/chapala>

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

ATHENEA

El pasado 28 de Septiembre de 2016, un problema en una operación rutinaria de mantenimiento de la Monoboya de CEPSA en la refinería de Algeciras causó un derrame de hidrocarburos debido a un fallo mecánico en las mangueras. El derrame se produjo entre las 20:30 - 20:45. La falta de luz en el momento del accidente provocó que las estrategias de contención del vertido se basaran principalmente en los resultados de la ejecución del EDSS ATHENEA. Los medios de contención se desplazaron hasta las coordenadas indicadas por el EDSS ATHENEA. La simulación utilizada para coordinar las operaciones durante la noche del accidente se muestra en la figura 4.10.

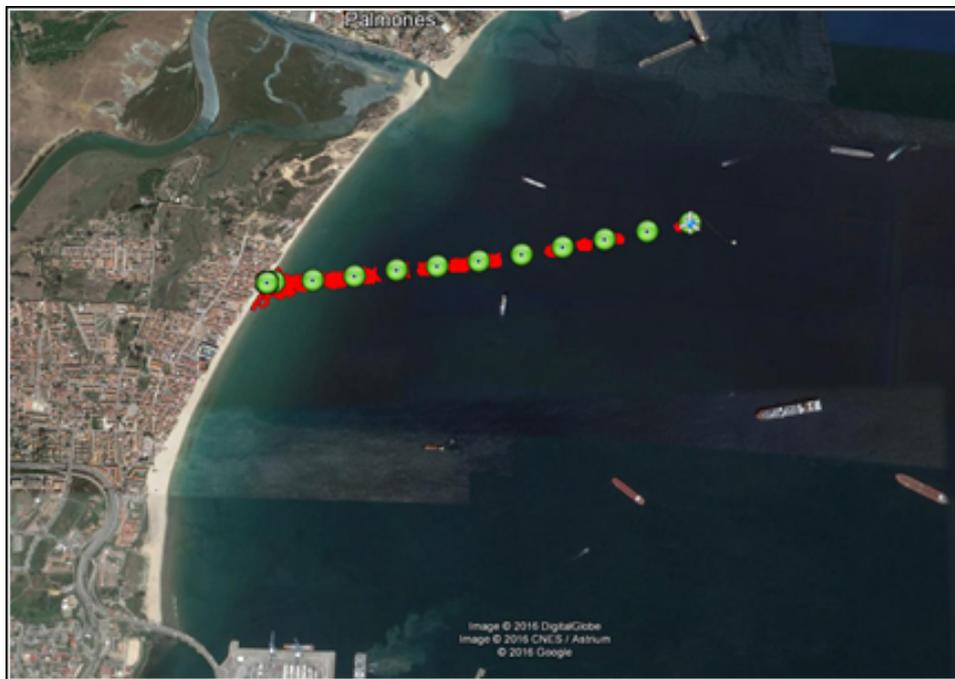


Figura 4.10: Trayectoria de simulación del vertido proporcionada por el EDSS ATHENEA para el Vertido Monoboya CEPSA 28/09/2016 en la bahía de Algeciras

Los responsables de las operaciones por parte de CEPSA indicaron que la mancha pudo haberse dividido, una parte continuó con la trayectoria simulada, la cual fue contenida finalmente por los medios, y otra se desplazó hacia el sur, llegando a la zona sur de la playa del Rinconcillo (figura 4.11).

En definitiva, CEPSA comunicó a IHCantabria su satisfacción con el rendimiento del EDSS y el valioso apoyo que ha proporcionado en la toma de decisiones durante la emergencia.



Figura 4.11: Vertido Monoboya CEPESA 28/09/2016 en playa del Rinconcillo - fuente: [Cadena SER](#).

App Móvil IH-Tsusy

El Sistema se encuentra operativo las 24 horas los 365 días del año, prueba de ello fue la activación automática del Sistema el pasado 13 de noviembre, día en el que un terremoto de entorno 7.4 grados de magnitud sacudió la costa de la isla sur de Nueva Zelanda, y sus efectos se dejaron sentir en prácticamente todo el país. El sismo ocurrió en una profundidad de apenas 10 km, en una localización y con una magnitud suficiente para la generación de un maremoto, lo que provocó la activación local de la alerta por tsunami en Nueva Zelanda, identificándose las posibles zonas de peligro, e iniciándose los protocolos de protección civil en cuanto a evacuación de la población costera hacia zonas altas o lejanas a la costa. El Sistema Operacional de Simulación de Tsunamis proporcionó la notificación de alerta de potencial tsunami a los usuarios de la *app* Móvil. Apenas unas horas después, el Sistema proporcionó los mapas de altura de ola y tiempos de viaje, alcanzando una altura máxima de 2.2 metros y una propagación al océano Pacífico inapreciable. La figura 4.12 muestra la información proporcionada por la *app* Móvil en dicho evento.

Afortunadamente, las olas de mayor tamaño coincidieron con la bajamar, reduciendo la posibilidad de inundación costera a causa del tsunami, tal y como indica la empresa [MetOcean-Solutions \(2017\)](#) a través de las mediciones de tamaño de ola realizadas en el puerto de Wellington.

El despliegue y mantenimiento en producción de IH-MERCURIO durante los últimos cuatro

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

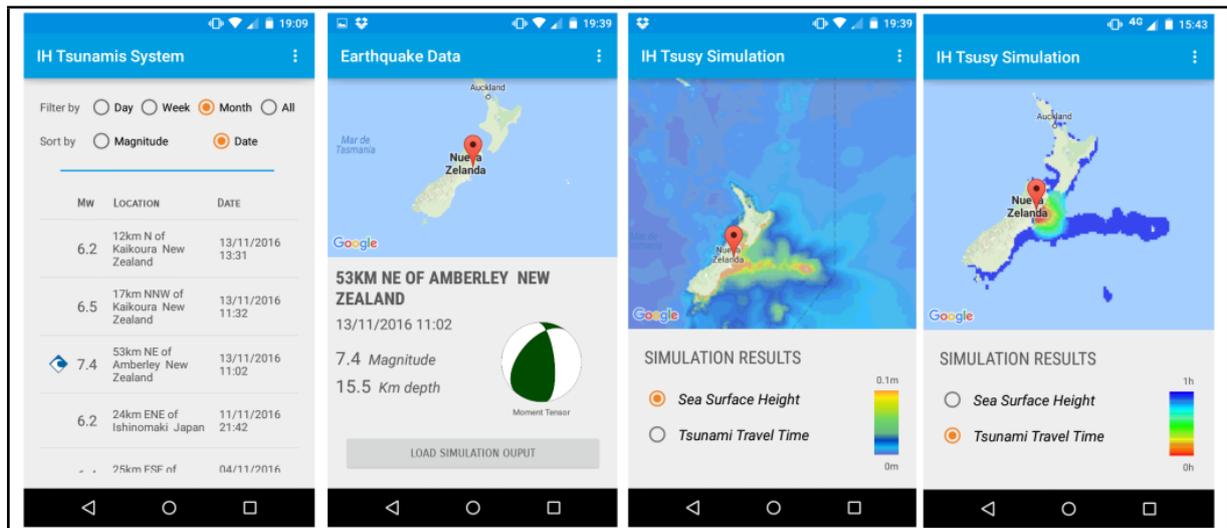


Figura 4.12: App Móvil del Sistema Operacional de Tsunamis - IHTsusy - Evento Nueva Zelanda 13/11/2016

años ha permitido identificar las siguientes características principales de este tipo de infraestructura:

1. la gestión operacional de los *inputs* o datos de entrada. Todas las soluciones implementadas en cada uno de los casos estudio dependen directamente de datos proporcionados por Sistemas Operacionales Globales: NOAA, USGS y programa *Copernicus* principalmente. La información es diversa y es proporcionada en diferentes formatos por lo que el Sistema Operacional debe integrar y estandarizar dicha información.
2. la gestión operacional del procesamiento permite albergar modelos numéricos que, utilizando los *inputs* de la gestión operacional, generen la información necesaria para el proceso de toma de decisión. La gestión operacional está focalizada en la gestión del tiempo de ejecución de los modelos numéricos, respondiendo a las siguientes cuestiones respecto al modelo numérico: ¿Cuándo dispondrá de los *inputs* necesarios para su ejecución?, ¿Cuándo proporcionará los resultados?. La primera pregunta dependerá de la gestión operacional de los *inputs*, mientras la segunda cuestión dependerá de los recursos computacionales asignados al proceso y aspectos relacionados con las características del modelo numérico: resolución espacial, resolución temporal y área de estudio principalmente.
3. el principal objetivo del anidamiento de EDSS al Sistema Operacional es proporcionar información de valor añadido para el proceso de toma de decisión. Los casos de estudio presentan dos patrones de generación de valor añadido: (1) mejoran la resolución espacial o temporal de las variables proporcionadas por los modelos globales, y (2) analizan,

mediante el uso de modelos numéricos, el comportamiento de un fenómeno puntual. El primer patrón de generación de valor añadido es abordado en los casos de estudio ATHENEA y *Operational Forecast System*, mediante un *downscaling* de las variables meteocean, mientras que el segundo patrón es afrontado por los Sistemas IH-TSUSY y ATHENEA con el fin de analizar el alcance de un posible tsunami y las posibles trayectorias de un vertido de hidrocarburos.

4. Un Sistema Operacional debe estar operativo las 24 horas del día, los 7 días de la semana, los 365 días del año, requiriendo una monitorización completa de los elementos *hardware* y *software* que conforman el Sistema Operacional. La monitorización debe contemplar como mínimo un seguimiento de los siguientes aspectos: redes de comunicación, capacidad de almacenamiento y capacidad de procesamiento. También puede ser relevante establecer un seguimiento de la calidad de los resultados generados por los modelos numéricos. Los Servicios prestados gracias al Sistema Operacional deben ser acordes al *Service Level Agreement (SLA)* acordado con el cliente, para ello el sistema debe tener una capacidad de contingencia ante desastres que cumpla con un *Recovery Time Objective (RTO)* y un *Recovery Point Objective (RPO)* coherente con un SLA acorde a los servicios prestados. Por lo tanto, la monitorización del Sistema Operacional es fundamental para cumplir el SLA.

Uno de los aspectos más relevantes que diferencia notablemente un caso de estudio de otro es el acceso a la información generada de cara a la toma de decisión. [Rizzoli & Young \(1997\)](#) establecen que el diseño de un EDSS debe ser realizado de acuerdo a los requerimientos del tipo de usuario, identificando 3 tipos de usuarios: (1) “*environmental scientists*”, (2) “*environmental managers*” y (3) “*environmental stakeholders*”. Además, podemos clasificar a los usuarios como activos o pasivos y seleccionar una tecnología u otra en función del usuario tipo (tabla 4.3). El usuario activo es definido como aquel que accede a la información de forma intencional, mientras el usuario pasivo recibe la información sin ser solicitada. Analizando los casos de estudio, todos ellos han sido diseñados para usuarios activos. Sin embargo, la información operacional varía constantemente, tanto en el espacio como en el tiempo, haciendo necesaria la implementación de tecnología orientada a usuarios pasivos. Este es el caso de ATHENEA, en el que se envían informes diarios vía e-mail, informando sobre la previsión operacional en las plantas de refinería. Otro caso más significativo es el presentado en el Sistema Operacional de Tsunamis, donde el evento no tiene una periodicidad definida, pudiendo producirse en cualquier momento. En este caso, las tecnologías implementadas para el modelo “usuario activo” fueron replanteadas hacia un modelo de “usuario pasivo”, el cual es notificado una vez se produce un evento. Las tecnologías móviles han permitido democratizar la comunicación directa con los usuarios, anteriormente establecida vía mensaje SMS a través de compañías de

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

EDSS	Tecnología Interfaz de Usuario	Tipo de Usuario	Modo
<i>Operational Forecast System</i>	<i>app</i> Web	environmental managers	activo
ATHENEA	<i>app</i> Web informes vía mail	<i>environmental managers</i>	activo pasivo
<i>IH Tsunamis System</i>	<i>app</i> Web <i>app</i> Móvil	environmental stakeholders general public	activo pasivo
THREDDSS Explorer	Plugin GIS Desktop	<i>environmental scientists</i>	activo

Tabla 4.3: Tipos de usuario de los EDSS analizados

telefonía. Las *app* Móviles permiten tener un canal de comunicación directo con el usuario y notificarle cualquier evento potencial de tsunami en el globo. Los terminales móviles de los usuarios también pueden proporcionar información de sus sensores, como por ejemplo la ubicación del usuario, la cual podría ser utilizada para proporcionarle información personalizada, como por ejemplo la peligrosidad de su ubicación (sitio seguro o no) en caso de producirse un evento de inundación.

El contexto tecnológico actual permite la combinación de tres elementos clave para la generación de futuros EDSS personificados de ayuda a la toma de decisión:

1. los Sistemas Operacionales proporcionan datos (tiempo real y previsión) globales accesibles mediante protocolos interoperables,
2. el acceso a la geolocalización personificada en tiempo real, y
3. el desarrollo de *app* móviles con comunicación directa con el usuario.

Es destacable la tendencia en el uso de dispositivos móviles. Una de las multinacionales de referencia en el campo de las Tecnologías de la Comunicación, Cisco Systems, apunta que en el 2021 habrá 1,5 dispositivos móviles por persona, frente a las 1,1 por persona de 2016 (CISCO 2017). El diseño y desarrollo de futuras soluciones orientadas a la ayuda de toma de decisiones ambientales deberá tener presente el incremento de la tecnología móvil y adaptarse en este sentido. Otro aspecto es la capacidad de plantear soluciones en ambientes *Cloud*, reduciendo el tiempo empleado en instalar y mantener la infraestructura *hardware* y *software* (Ramamurthy 2016), y por otro lado la posible mejora del servicio en cuanto a proporcionar un acceso más rápido y fiable a los datos en tiempo real (Raoult & Correa 2016).

4.5 Conclusiones

Se ha realizado un acercamiento, mediante las Tecnologías de la Información, entre los Sistemas Operacionales Meteo-oceanográficos y los Sistemas de ayuda a la toma de decisión (EDSS), permitiendo unificar ambas aproximaciones bajo una infraestructura de gestión operacional única, capaz de albergar la información meteo-oceanográfica con las resoluciones

espaciales y temporales necesarias para su aplicación en los procesos de ayuda en la toma de decisiones.

Se ha diseñado una Infraestructura Operacional, denominada IH-MERCURIO, sobre la cual han sido anidados diversos EDSS (*ATHENEA*, *IH-Tsunamis System*, *Operational Forecast System* y *THREDDS Explorer*), utilizando tres tipos de soluciones tecnológicas: Web, escritorio y móvil.

Los EDSS desarrollados, mostrados en la sección casos de estudio, están actualmente en producción, proporcionando un servicio operacional real y efectivo.

Los aspectos clave que garantizan un Sistema Operacional orientado a proporcionar ayuda a la toma de decisión en los sistemas hídricos son 4:

1. la gestión operacional de los *inputs*,
2. la gestión operacional del procesamiento o análisis numérico,
3. la generación de la información necesaria para el proceso de toma de decisión, y
4. la monitorización completa de los elementos *hardware*, *software* y sistemas de comunicación.

Centralizar los esfuerzos de estandarización de proveedores, almacenamiento, puesta en marcha de servicios interoperables y monitorización del Sistema ha permitido a los desarrolladores abstraerse de las implicaciones Operacionales, focalizando su esfuerzo en el diseño, desarrollo e implementación de la lógica de ayuda a la toma de decisión de los EDSS.

Los EDSS deberán adaptarse a la omnipresencia de dispositivos móviles, aprovechando sus beneficios y adecuándose a sus peculiaridades. Los futuros Sistemas de ayuda a la toma de decisión basados en Sistemas Operacionales deben contemplar la existencia de un canal de comunicación directa con el usuario, el cual permite desencadenar notificaciones personales.

El conocimiento multidisciplinar de investigadores y tecnólogos ha sido integrado en una Infraestructura Operacional que proporciona la información necesaria a EDSS operacionales, reduciendo el tiempo en materia de toma de decisión y mejorando la calidad y consistencia de dichas decisiones. Los ejemplos de aplicación reales mostrados en este capítulo (ciclón en el mar Arábido, tsunami en Nueva Zelanda y vertido de hidrocarburos en Algeciras) nos permiten concluir que, mediante el uso de las actuales Tecnologías de la Información se ha realizado, con éxito, una transferencia científico-técnica multidisciplinar a la sociedad.

A continuación se indican las aportaciones más significativas de este capítulo, “*Sistemas operacionales en el proceso de ayuda en la toma de decisión*”, respecto a las preguntas de investigación planteadas y al estado del conocimiento:

4. SISTEMAS OPERACIONALES EN EL PROCESO DE AYUDA EN LA TOMA DE DECISIÓN

- Se han identificado los aspectos más relevantes a tener en cuenta en el diseño, desarrollo e implementación de un Sistema Operacional orientado a proporcionar ayuda en la toma de decisión en los sistemas hídricos.
- Se ha diseñado un Sistema Operacional, IH-MERCURIO, orientado a proporcionar información operacional para el diseño, desarrollo e implementación de EDSS aplicados a los sistemas hídricos.
- El Sistema IH-Mercurio ha permitido el diseño, desarrollo e implementación de EDSS que proporcionan ayuda en la toma de decisión de situaciones reales (riesgos hidrometeorológicos, riesgos por contaminación de hidrocarburos y riesgos por tsunamis).
- El marco tecnológico diseñado y establecido permite la generación de nuevos EDSS basados en la información meteo-oceanográfica operacional, reduciendo considerablemente la dedicación en la gestión de información operacional y permitiendo focalizar el esfuerzo en la implementación de nuevos avances científico-técnicos aplicados a la ayuda en la toma de decisiones.

4.6 Comunicaciones

A continuación son listadas las publicaciones realizadas en el ámbito de los “*Sistemas operacionales en el proceso de ayuda en la toma de decisión*” y sus casos de estudio.

Tabla 4.4: Comunicaciones realizadas en el ámbito del capítulo 4

Publicación	2016 Benedito M., Hormaechea H., Velarde, V., Fernández, F. , Medina, R. THREDDS Explorer <i>plugin</i> , bringing meteoceanographic operational data into QGIS. <i>International QGIS User and Developer Conference</i> . Girona, Spain
Referencia	http://diobma.udg.edu/handle/10256.1/4309

Publicación	2011 Fernández, F. , Velarde, V., Pedraz, L., Espejo, A., Camus, P., Méndez, F., Medina, R. An Oceanographic and Meteorological Service-Oriented Infrastructure aimed at public use for nautical sports: www.surfspots.es <i>CoastGIS 2011 - 10th International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Management</i> . Oostende, Belgium
Referencia	ISBN:9788889405239

Publicación	2009 Castanedo, S., Juanes, J.A., Medina, R., Puente, A., Fernandez, F. , Olabarrieta, M., Pombo, C. Oil Spill Vulnerability Assessment Integrating Physical, Biological and Socio-Economical aspects: Application to the Cantabrian Coast (Bay of Biscay, Spain) <i>Journal of Environmental Management</i> .(91)149-159
Referencia	http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.07.013

Publicación	2009 Castanedo, S., Abascal, A.J., Medina, R., Fernandez, F. , Liste, M., Olabarrieta, M. Development of a GIS-based Oil Spill Risk Assessment System <i>OCEANS '09 IEEE</i> . Bremen, Alemania
Referencia	ISBN:978-1-4244-2523-5

Publicación	2008 Castanedo, S., Pombo, C., Fernandez, F. , Medina, R., Puente, A., Juanes, J.A. Oil Spill vulnerability Atlas for the Cantabrian Coast (Bay of Biscay, Spain). <i>2008 International Oil Spill Conference</i> . Savannah, Georgia EE.UU.
Referencia	ISBN:978-1-4244-2523-5

La ciencia está hecha de datos, como una casa de piedras. Pero un montón de datos no es ciencia más de lo que un montón de piedras es una casa.

Henri Poincaré

5

Discusión

Este trabajo de investigación ha analizado el diseño y creación de EDSS mediante el planteamiento de tres cuestiones de investigación principales:

1. ¿Cuáles son los aspectos principales a tener en cuenta en la gestión digital de las observaciones orientada a la ayuda en la toma de decisiones en el medio acuático?
2. ¿Qué singularidades presenta la modelización integral del medio costero aplicada al análisis del riesgo de inundación? ¿Qué capacidades / limitaciones presentan los EDSS para facilitar el proceso de ayuda a la toma de decisión en este ámbito?
3. ¿Pueden los Sistemas Operacionales meteo-oceanográficos proporcionar información relevante para el diseño y desarrollo de EDSS? ¿Qué características deben cumplir para ello?

La primera pregunta de investigación, argumentada en el capítulo 2, ha sido resuelta mediante el diseño de un único Modelo de Datos de Observaciones (ODM) que permite integrar las observaciones del medio realizadas *in situ* en los diferentes sistemas acuáticos: medio fluvial, medio estuarino y medio litoral, denominado WAMIS-ODM. A partir del WAMIS-ODM han sido generados diversos EDSS, aplicaciones Web que comparten la misma base de datos relacional para la gestión de observaciones y el diseño de procesos de ayuda a la toma de decisión dedicados a la gestión de la calidad de las masas de agua fluviales, estuarinas y litorales.

La segunda pregunta de investigación, argumentada en el capítulo 3, ha sido resuelta mediante la exploración de la representación abstracta proporcionada por modelos numéricos, en este

5. DISCUSIÓN

caso procesos de inundación costera, para la generación de EDSS dedicados a la gestión y análisis del riesgo costero frente a inundaciones.

La tercera pregunta de investigación, argumentada en el capítulo 4, ha sido resuelta mediante el diseño de un Sistema Operacional Metocean y el anidamiento de diversos EDSS que utilizan la información operacional generada para proporcionar ayuda en la toma de decisión en sus respectivos campos de actuación.

Las tres cuestiones de investigación principales han permitido abordar la gestión espacio-temporal de la información espacial requerida por las especificaciones funcionales de los distintos EDSS implementados (tabla 5.1):

- el capítulo 2 focaliza su análisis en la gestión de información muestreada *in situ* periódicamente y por lo tanto en *near real time*, generando una base de datos histórica de observaciones medioambientales,
- el capítulo 3 analiza la representación abstracta generada mediante técnicas de modelado numérico, las cuales permiten obtener datos que pueden representar una aproximación al pasado, al momento actual o a eventos futuros,
- el capítulo 4 centra su análisis en las capacidades tecnológicas para el establecimiento de una infraestructura que permita el uso de técnicas de modelado numérico de forma operacional, representando una aproximación al futuro de forma periódica y consistente.

	pasado <i>hincast</i>	presente <i>nowcast</i>	futuro <i>forecast</i>
Capítulo 2	X	X	
Capítulo 3	X	X	X
Capítulo 4			X

Tabla 5.1: Temporalidad de la información analizada en los Capítulos 2, 3 y 4

Bajo este contexto, los avances identificados en estos análisis han permitido diseñar y desarrollar diversos EDSS (tabla 5.2). A pesar del gran esfuerzo empleado en el desarrollo de EDSS, tanto en tiempo como en dinero, [Uran & Janssen \(2003\)](#) destacan el desuso de este tipo de Sistemas una vez finalizados. En este sentido, el estado inactivo de dos de los Sistemas utilizados, el IH-DSS Flooding y WAMIS-ROM5.1, fue analizado, identificando la baja participación de los *stakeholders* en el proceso de diseño, desarrollo y testeo de los Sistemas como principal causa de desuso. A pesar de que en ambos casos (IH-DSS Flooding y WAMIS-ROM5.1), han sido realizados acercamientos con los agentes implicados para conocer la cultura institucional, tradiciones y capacidades frente a la mitigación / adaptación frente al riesgo ([Penning-Rowse et al. 2014](#)) y la gestión acuática portuaria ([Ondiviela et al. 2013](#)),

EDSS	Tipo de Usuario	Implementaciones	Estado
MARCE (WAMIS)	Investigador	IHCantabria	activo
Sistema Gestor DMA (WAMIS)	Investigador / Gestor Costero	IHCantabria / Gob. Cantabria	activo
ROM 5.1 (WAMIS)	Gestor Costero / investigador	Puerto de la Coruña Puerto de Tarragona Puerto de Gijón Puerto de Cádiz Formación ROM5.1	inactivo inactivo inactivo inactivo activo
MHRAS	Gestor riesgos hidrometeorológicos	Gob. Omán	activo
IH-DSS Flooding	Gestor riesgos costeros	Delta De'L Orb	inactivo
<i>Operational Forecast System</i> (IH-MERCURIO)	Gestor riesgos hidrometeorológicos	Gob. Omán	activo
ATHENEA (IH-MERCURIO)	Gestor ambiental	Refinería Tenerife Refinería Huelva Refinería Algeciras	activo activo activo
<i>IH Tsunamis System</i> (IH-MERCURIO)	gestores costeros y público general	Global (<i>free service</i>)	activo
THREDDS Explorer (IH-MERCURIO)	analistas metocean	Global (<i>Open Source</i>)	activo

Tabla 5.2: EDSS utilizados como casos de estudio

habilitar un espacio de discusión entre los investigadores, tecnólogos y usuarios finales es un aspecto fundamental para el correcto desarrollo y testeo de los EDSS (McIntosh *et al.* 2011). Los usuarios finales de EDSS aplicados a los sistemas hídricos en muchas ocasiones no son capaces de especificar sus necesidades y requerimientos en las fases iniciales del desarrollo (Mysiak *et al.* 2005). Con el fin de satisfacer nuevos requisitos, o más complejos, por parte de los responsables de la toma de decisiones, un Sistema de ayuda a la toma de decisión debe mantenerse constantemente actualizado, incorporando nuevos desarrollos y funcionalidades, de lo contrario el EDSS pasará a ser un Sistema obsoleto (Newman *et al.* 2000). Por lo tanto, un desarrollo iterativo, en ciclos de desarrollo e interacción con los *stakeholders* es una práctica recomendable, la cual está siendo actualmente utilizada en el desarrollo de EDSS con una buena respuesta por parte de los *stakeholders* (Fischer *et al.* 2017).

Otro aspecto fundamental en el desarrollo de los EDSS ha sido identificar las capacidades del usuario final para establecer el grado de ayuda a implementar en el proceso de toma de decisión. Sànchez-Marrè *et al.* (2008) establecen el proceso de toma de decisión medioambiental en una serie de etapas (figura 5.1): el proceso comienza con la recolección de *Observaciones*, las cuales suministran *Datos* que proporcionan información que a su vez genera un *Conocimiento*. En el caso de enfrentarnos a problemas complejos, la experiencia de expertos proporciona una valiosa ayuda para su resolución. Por lo tanto, el proceso puede ceñirse en proporcionar la información necesaria para que el experto en la materia pueda tomar una decisión o incorporar ese conocimiento experto en el propio Sistema para facilitar la toma de decisiones a personal no experto. De este razonamiento se deduce que el grado de ayuda en la decisión de un Sistema está implícito en las capacidades del propio usuario.

La selección de las tecnologías apropiadas y datos utilizados para el desarrollo de los Sistemas ha resultado crucial. Actualmente vivimos un momento de expansión tecnológica, a partir de la cual la información geolocalizada y tecnologías asociadas están sufriendo una aceleración

5. DISCUSIÓN

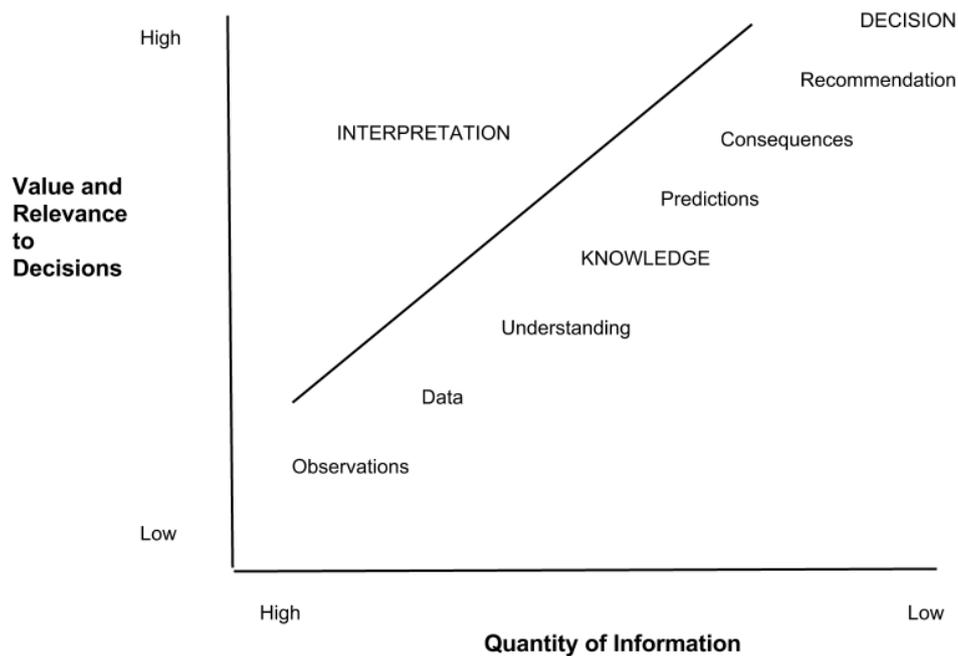


Figura 5.1: Proceso de integración: de las observaciones a las decisiones - fuente: [Sánchez-Marrè et al. \(2008\)](#)

exponencial. La cantidad de información espacial proporcionada por satélites, modelos numéricos, sensores *in situ*, dispositivos móviles, redes sociales, etc. ha supuesto en los últimos años un auge en el uso de datos masivos, un fenómeno encapsulado bajo el concepto “*Big Data*”. El término o la etiqueta “*Big Data*” hace referencia a las nuevas tecnologías utilizadas para gestionar y procesar ingentes cantidades de datos, los cuales no pueden ser gestionados o procesados con software convencional. Actualmente, existe cierta tendencia a malinterpretar el término “*Big Data*”: en ocasiones se hace referencia al término utilizando tecnologías convencionales y en otras ocasiones es interpretado como la solución tecnológica a implementar para cualquier proceso de ayuda a la toma de decisiones. Contrariamente al término “*Big Data*”, [Lindstrom et al. \(2017\)](#) realizan una clara reflexión introduciendo el término “*Small Data*”: la resolución de un problema o análisis mediante el “*Big Data*” se centra en encontrar correlaciones, mientras el “*Small Data*” busca las causas de dicho problema. El proceso de diseño y desarrollo de los Sistemas mostrados en esta tesis doctoral está alineado con el concepto “*Small Data*”, dando especial importancia a la comunicación con los usuarios finales, identificación de problemas a solventar y finalmente la selección de la tecnología apropiada. Respecto a los datos necesarios para la generación de los EDSS analizados en este estudio, los capítulos 3 y 4 muestran una clara dependencia de información actualizada. En el caso de los sistemas operacionales, éstos deben ser anidados a Sistemas Operacionales Globales los cuales se encuentran subordinados al contexto político administrativo. A pesar de que existe una clara tendencia en los últimos años hacia el *Open Data* y el *Open Source* como motores

de la innovación, cambios político-administrativos podrían parar, o al menos ralentizar, estas iniciativas; sucedió en España en el año 2009 con el cambio de política de datos de AEMET y podría ocurrir en Estados Unidos, donde actualmente se ha cerrado la sección “*Open Government and Open Data*” del portal de la Casa Blanca. El cierre de servicios tan asentados internacionalmente como los proporcionados por la NOAA o el USGS afectaría a multitud de aplicaciones y servicios actualmente operativos en todo el globo. La huelga de la administración estadounidense en el año 2013, dio cuenta de la cantidad de servicios que se vieron afectados.

En Europa, la Directiva INSPIRE (2007/2/CE) establece un marco para el establecimiento de una Infraestructura de Información Espacial en la Comunidad Europea para el año 2021. Actualmente, el programa Copernicus es una de las iniciativas con una Infraestructura Operacional que proporciona información meteo-oceanográfica de forma interoperable en Europa, presentando además una clara hoja de ruta para el desarrollo y puesta en producción de nuevos productos y servicios, continuando la iniciativa GMES (Aschbacher & Milagro-Pérez 2012). En España, AEMET y Puertos del Estado han establecido infraestructuras interoperables de acceso público recientemente: AEMET, mediante la AEMET Open API¹ proporciona acceso a las estaciones meteorológicas y otros recursos, mientras Puertos del Estado, a través de su THREDDS² proporciona acceso a los modelos operacionales meteo-oceanográficos. Sin embargo, ambas iniciativas no presentan una hoja de ruta. Conocer cuándo estarán disponibles en abierto, de forma interoperable y en *near real time*, sus productos más relevantes para la ayuda de toma de decisión en los sistemas hídricos sería de gran interés para el desarrollo de futuros EDSS. Dos de sus productos más relevantes en este sentido son: (1) las observaciones recogidas por la red de boyas meteo-oceanográficas de Puertos del Estado y (2) los resultados operacionales de los modelos meteorológicos de AEMET (HIRLAM y HARMONIE).

En lo que respecta al *software Open Source*, Brovelli *et al.* (2017) destacan la madurez del panorama *Open Source* en la implementación de soluciones geoespaciales dedicadas al *Digital Earth* (Gore 1998). Esta tesis doctoral es una muestra de la implementación de soluciones *Open Source* combinada con tecnologías propietarias para la generación de EDSS (tabla 5.3). La omnipresencia de las tecnologías móviles es otro de los factores a tener en cuenta en el diseño y desarrollo de los futuros EDSS. El desarrollo de *apps* Móviles abre un amplio abanico de posibilidades en el diseño de EDSS:

- la comunicación directa con el usuario permitirá proporcionar ayuda en la toma de decisiones personalizada a cada individuo, y

¹<https://opendata.aemet.es>

²<http://opendap.puertos.es>

5. DISCUSIÓN

- el acceso a la información proporcionada por la sensórica del dispositivo (GPS, temperatura, luminosidad, etc) permitirá incluir dichas variables en el proceso de ayuda a la toma de decisión.

La evolución y el futuro de los DSS y EDSS es un tema ampliamente abordado en la literatura (Bhargava *et al.* 2007, Matthies *et al.* 2007, McIntosh *et al.* 2011, Shim *et al.* 2002). Sin embargo, la constante evolución del contexto *Tecnológico* y *Normativo*, plantea nuevos retos y capacidades.

Finalmente, destacar la importancia del mantenimiento de la infraestructura para el correcto funcionamiento de los EDSS, teniendo en cuenta tanto el mantenimiento *software / hardware* del Sistema como de Sistemas proveedores de información. Este aspecto requiere de técnicos especializados en el uso y manejo de las tecnologías listadas en la tabla 5.3.

EDSS	Principales Tecnologías	Licenciamiento
WAMIS	Windows Server + IIS SQL Server OpenLayers .NET Framework	propietario propietario Open Source propietario
MHRAS	Windows Server + IIS ArcGIS Server .NET Framework	propietario propietario propietario propietario
IH-DSS Flooding	Windows Server + IIS RFSM-EDA SQL Server DotSpatial OpenLayers .NET Framework	propietario propietario Open Source Open Source propietario propietario
Operational Forecast System	Windows Server + IIS Ubuntu Server SWAN H2D THREDDS OpenLayers .NET Framework Nagios	propietario Open Source Open Source propietario Open Source Open Source propietario Open Source
ATHENEA	Windows Server + IIS SQL Server Ubuntu Server SWAN DELFT3D TESEO THREDDS OpenLayers .NET Framework Nagios	propietario propietario Open Source Open Source Open Source propietario Open Source Open Source propietario Open Source
IH Tsunamis System	Windows Server + IIS SQL Server Ubuntu Server Tsusy Model THREDDS OpenLayers .NET Framework Android Nagios	propietario propietario Open Source propietario Open Source Open Source propietario Open Source Open Source
THREDDS Explorer	Ubuntu Server THREDDS QGIS Nagios	Open Source Open Source Open Source Open Source

Tabla 5.3: Principales Tecnologías utilizadas en los EDSS de estudio y su licenciamiento

*La ciencia más útil es aquella cuyo
fruto es el más comunicable.*

Leonardo Da Vinci

6

Conclusiones y futuras líneas de investigación

6.1 Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en esta tesis doctoral son las siguientes:

- El conocimiento científico-técnico multidisciplinar de investigadores y tecnólogos ha sido integrado en *Data-driven* y *Model-driven* EDSS aplicados a la gestión de los sistemas hídricos, siendo las actuales Tecnologías de la Información las facilitadoras para llevar a cabo con éxito una transferencia científico técnica a la sociedad.
- La implementación de EDSS en los sistemas hídricos permite al usuario final reducir el tiempo en materia de toma de decisión y mejorar la calidad y consistencia de dichas decisiones. Los EDSS llevan a cabo una transformación de datos en información útil para el usuario final. Por lo tanto, los EDSS son Sistemas orientados a proporcionar ayuda en la toma de decisiones a un usuario tipo identificado.
- El diseño de EDSS aplicados a la gestión de los sistemas hídricos deben realizarse con la meta de solucionar una necesidad a un usuario tipo objetivo. Para ello, es fundamental la participación del usuario objetivo en el diseño y testeo del Sistema, permitiendo identificar el conocimiento científico-técnico y necesidades de dicho usuario objetivo.
- Han sido implementados 9 EDSS en casos reales orientados a 3 usuarios tipo objetivo:

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- (i) *investigador o analista*: (1) MARCE - EDSS para la gestión integrada de cuencas, (2) Sistema Gestor DMA - EDSS para la aplicación de la Directiva Marco del Agua, (3) THREDDS Explorer - EDSS para el acceso a información proporcionada por los Sistemas Operacionales Meteo-oceanográficos.
 - (ii) *gestor*: (4) ROM5.1 - EDSS para la gestión de la calidad acuática portuaria, (5) MHRAS e (6) IH-DSS Flooding - EDSS para la gestión del riesgo de inundación costera, (7) *Operational Forecast System* - EDSS para la simulación operacional de *hazards* hidrometeorológicos y (8) ATHENEA - EDSS para la prevención y gestión de la contaminación en operaciones de manipulación de hidrocarburos en el ámbito marítimo y portuario.
 - (iii) *público*: (9) IH Tsunamis System - EDSS para la alerta de tsunamis en todo el globo.
- El proceso de ayuda a la toma de decisión en los sistemas hídricos puede hacer referencia a situaciones del pasado, del presente o del futuro. Mientras las observaciones del medio acuático permiten obtener información del presente, alimentando principalmente *Data-driven EDSS*, los modelos numéricos permiten proporcionar una representación abstracta del pasado, del presente o del futuro, formando parte de *Model-driven EDSS*.
 - El acercamiento de Sistemas de Observación y Sistemas de ayuda a la toma de decisión aplicados a los sistemas hídricos ha permitido determinar las características y singularidades que los Sistemas de Observación deben tener en cuenta para proporcionar una ayuda efectiva en la toma de decisiones.
 - Han sido identificados y listados los aspectos más relevantes y las capacidades de los EDSS en la modelización del medio acuático costero aplicados al análisis del riesgo frente a inundaciones costeras.
 - El acercamiento de Sistemas Operacionales Meteo-oceanográficos y Sistemas de ayuda a la toma de decisión aplicados a los sistemas hídricos ha permitido determinar las características y singularidades que los Sistemas Operacionales deben tener en cuenta para proporcionar una ayuda efectiva en la toma de decisiones.
 - Los datos utilizados y la información generada por los EDSS presentan una clara componente espacial, la cual es fundamental durante el proceso de ayuda a la toma de decisión. Las tecnologías geoespaciales juegan un papel fundamental en el diseño y desarrollo de los EDSS implementados en los sistemas hídricos, tomando especial relevancia

los actuales protocolos interoperables y geo-standares aplicados a las ciencias ambientales, facilitando el acceso a datos generados por diferentes entidades bajo protocolos interoperables.

- La omnipresencia de dispositivos móviles presenta un nuevo panorama tecnológico en el diseño y desarrollo de EDSS, los cuales permiten una comunicación directa vía *apps* y el acceso a información del dispositivo del usuario (geolocalización, temperatura, luminosidad, etc.).
- Las iniciativas *Open Data* y *Open Source* plantean un escenario favorable para el diseño y desarrollo de nuevos EDSS aplicados a los sistemas hídricos, mejorando la fiabilidad y consistencia en el proceso de ayuda a la toma de decisiones.

6.2 Contribución de esta tesis al estado del arte

A continuación son listadas las contribuciones de esta tesis al actual estado del arte:

- Se ha diseñado un único Modelo de Datos de Observaciones, WAMIS-ODM, capaz de integrar información ambiental del medio fluvial, estuarino y costero para su posterior uso en diversos EDSS de gestión de calidad de las aguas aplicados a escala local, regional y nacional.
- Se ha diseñado una infraestructura, WAMIS, que permite albergar distintos EDSS haciendo uso del mismo modelo de datos de observaciones, reduciendo considerablemente los tiempos de mantenimiento y nuevos desarrollos de EDSS basados en observaciones cuantitativas del medio acuático.
- A través del desarrollo de dos EDSS de gestión del riesgo de inundaciones costeras (MHRAS y IH-DSS Flooding), se ha analizado el uso de la modelización numérica para el desarrollo de EDSS. Han sido identificadas los aspectos más relevantes que deben ser tenidos en cuenta en su diseño y desarrollo.
- Se ha diseñado una única infraestructura Operacional, IH-MERCURIO, capaz de proporcionar información meteo-oceanográfica operacionalmente a EDSS que utilizan dicha información en diferentes campos de actuación (comportamiento de ciclones tropicales, alerta de tsunamis, vertidos de hidrocarburos y análisis meteocean). IH MERCURIO reduce considerablemente los tiempos de mantenimiento y nuevos desarrollos de EDSS basados en información meteocean operacional.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- El análisis presentado deja patente el gran potencial de los Sistemas de Observaciones y los Sistemas Operacionales Meteo-oceanográficos en la creación de Sistemas de ayuda a la toma de decisión (*Data-driven* EDSS y *Model-driven* EDSS). Los aspectos más relevantes de estos Sistemas para proporcionar una ayuda a la toma de decisión efectiva han sido identificados.
- Este trabajo proporciona una visión de las actuales tecnologías de la información aplicadas a la gestión medioambiental y la ayuda en la toma de decisiones en los sistemas hídricos, así como un análisis del futuro prometedor que las iniciativas *Open Data* y *Open Source* van a suponer en el diseño y desarrollo de los EDSS aplicados a dicha gestión.

6.3 Futuras líneas de investigación

- Nuevas **fuentes de información operacionales**. Existen dos fuentes de información en *near real time* que permitirían mejorar las capacidades que los EDSS proporcionan en el proceso de ayuda a la toma de decisión en el ciclo integral del agua: los datos obtenidos mediante *sensores satelitales* y la información generada a través de las *Redes Sociales*. Profundizar en el acceso y uso operacional de esta información en el contexto del ciclo integral del agua es una de las futuras líneas de investigación.
- Desarrollo de **app Móviles**. El uso de dispositivos móviles presenta una tendencia creciente, siendo dispositivos que incorporan sensorica de utilidad para poder proporcionar ayuda en la toma de decisión personalizada. Incorporar estas capacidades en los EDSS es una de las futuras líneas de investigación.
- Desarrollo de una **infraestructura de servicios** para el ciclo integral del agua. Dicha infraestructura estaría compuesta por tres elementos principales: (1) interfaces de usuario (*Web*, *Desktop* y *Móvil*), (2) infraestructura de datos y (3) Servicios de procesamiento. La combinación de estos tres elementos permitiría establecer una infraestructura capaz dar servicio en la resolución de muchos de los problemas del ciclo integral del agua. Continuar con el diseño, desarrollo e implementación de este tipo de infraestructuras es una de las futuras líneas de investigación.

Bibliografía

- ABASCAL, A.J., CASTANEDO, S., GUTIERREZ, A.D., COMERMA, E., MEDINA, R. & LOSADA, I.J. (2007). Teseo, an operational system for simulating oil spills trajectories and fate processes. 1751–1758. [80](#)
- ABERNATHY, C. (2016). Facebook Open Source 2016 year in review. <https://code.facebook.com/posts/1058188987642144/facebook-open-source-2016-year-in-review/>, [Online; accedido 05-Marzo-2017]. [4](#)
- AGUIRRE-AYERBE, I., FERNÁNDEZ, F., GONZÁLEZ-RIANCHO, P., JARA, M.S., ANIELQUIROGA, I., ALAVEREZ, J.A., GONZÁLEZ, M., MEDINA, R., AL-YAHYAI, S. & ALRAWAS, G. (2015). Tsunami vulnerability and risk assessment for the development of planning tools in oman. In *Conference: Reducing Tsunami Risk in the Western Indian Ocean*. [43](#)
- ARGENT, R.M., GRAYSON, R.B. & EWING, S.A. (1999). Integrated models for environmental management: Issues of process and design. *Environment International*, **25**, 693 – 699. [30](#)
- ARGENT, R.M., PERRAUD, J.M., RAHMAN, J.M., GRAYSON, R.B. & PODGER, G.M. (2009). A new approach to water quality modelling and environmental decision support systems. *Environmental Modelling & Software*, **24**, 809 – 818. [13](#)
- ASCHBACHER, J. & MILAGRO-PÉREZ, M.P. (2012). The european earth monitoring (gmes) programme: Status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, **120**, 3 – 8. [101](#)
- BAMPI, F. & ZORDAN, C. (1991). Solving snell's law. *Mechanics Research Communications*, **18**, 87 – 93. [50](#)
- BASHER, R., BARRANTES, M., HARDING, J., LLOSA, S., MOUBARAK, K., SCHÄRPF, C. & ZARIAN, P. (2006). Global Survey of Early Warning Systems. An assessment of

BIBLIOGRAFÍA

- capacities, gaps and opportunities towards building a comprehensive global early warning system for all natural hazards. Tech. rep., United Nations, Geneva, Switzerland. [64](#)
- BATES, P.D., HORRITT, M.S. & FEWTRELL, T.J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, **387**, 33 – 45. [56](#)
- BENAMATI, J.S. & LEDERER, A.L. (2008). Decision support systems uninfrastructure: The root problems of the management of changing IT. *Decision Support Systems*, **45**, 833 – 844. [6](#)
- BERNAL, G. (2010). CAPRA: multi-hazard approach. In *Conference Presentation in the Understanding Risk Forum (2010)*. [38](#)
- BHARGAVA, H.K., POWER, D.J. & SUN, D. (2007). Progress in Web-based decision support technologies. *Decision Support Systems*, **43**, 1083 – 1095. [3](#), [102](#)
- BORAN, B., VALENTINE, D., INGEN, C., ZASLAVSKY, I. & WHITENACK, T. (2008). A Data Model for Environmental Observations. Tech. rep., Microsoft Research, mSR-TR-2008-92. [12](#)
- BROVELLI, M.A., MINGHINI, M., MORENO-SANCHEZ, R. & OLIVEIRA, R. (2017). Free and open source software for geospatial applications (FOSS4G) to support Future Earth. *International Journal of Digital Earth*, **10**, 386–404. [101](#)
- BUCHELE, B., KREIBICH, H., KRON, A., THIEKEN, A., IHRINGER, J., OBERLE, P., MERZ, B. & NESTMANN, F. (2006). Flood-risk mapping, contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **6**, 485–503. [59](#)
- BURTON, C. (2016). Earth Observation and Big Data: Creatively Collecting, Processing and Applying Global Information. *Earth Imaging Journal*. [3](#)
- CARLETON, C.J., DAHLGREN, R.A. & TATE, K.W. (2005). A relational database for the monitoring and analysis of watershed hydrologic functions: I. Database design and pertinent queries. *Computers & Geosciences*, **31**, 393 – 402. [11](#), [12](#)
- CARLSSON, C. & TURBAN, E. (2002). DSS: directions for the next decade. *Decision Support Systems*, **33**, 105 – 110. [3](#)
- CARPENTER, J. & SNELL, J. (2013). Future trends in geospatial information management: the five to ten years vision. Tech. rep., United Nations Initiative on Global Geospatial Information Management, ISBN:978-0-319-08792-3. [4](#), [29](#)

- CE (2000). DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. [2](#), [12](#), [22](#)
- CE (2007a). DIRECTIVA 2007/2/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea (Inspire). [2](#)
- CE (2007b). DIRECTIVA 2007/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. [2](#)
- CE (2008). DIRECTIVA 2008/56/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por la que se establece un marco de acción comunitaria para la política del medio marino (Directiva marco sobre la estrategia marina). [2](#)
- CE (2009). DIRECTIVA 2009/147/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativa a la conservación de las aves silvestres. [2](#)
- CEE (1992). DIRECTIVA 92/43/CEE DEL CONSEJO relativa a la conservación de lo hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. [2](#)
- CHARVAT, K., VOHNOUT, P., SREDL, M., KAFKA, S., MILDORF, T., BONO, A.D. & GIULIANI, G. (2013). Enabling Efficient Discovery of and Access to Spatial Data Services. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, **3**, 28 – 31. [14](#)
- CINQUINI, L., CRICHTON, D., MATTMANN, C., HARNEY, J., SHIPMAN, G., WANG, F., ANANTHAKRISHNAN, R., MILLER, N., DENVIL, S., MORGAN, M., POBRE, Z., BELL, G.M., DOUTRIAUX, C., DRACH, R., WILLIAMS, D., KERSHAW, P., PASCOE, S., GONZALEZ, E., FIORE, S. & SCHWEITZER, R. (2014). The Earth System Grid Federation: An open infrastructure for access to distributed geospatial data. *Future Generation Computer Systems*, **36**, 400 – 417. [77](#)
- CISCO (2017). Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021. Tech. rep., Cisco Systems, San Jose, CA USA, c11-738429-00. [92](#)
- CONOVER, H., BERTHIAU, G., BOTTS, M., GOODMAN, H.M., L, X., L, Y., MASKEY, M., REGNER, K. & ZAVODSKY, B. (2010). Using sensor web protocols for environmental data acquisition and management. *Ecological Informatics*, **5**, 32 – 41. [12](#)
- COX, S. (2007). Observation and Measurements - Part1 Observation schema. Tech. rep., Open GeoSpatial Consortium, oGC 07-022r1. [12](#), [15](#)

BIBLIOGRAFÍA

- CRED (2015). The Human Cost of Natural Disasters. A global perspective. Tech. rep., Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. 6
- DELFTHYDRAULICS (2001). Delft3D user interface, Capabilities and applications. Tech. rep., RIZA Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, Delft, The Netherlands. 80
- DENIS, G., DE BOISSEZON, H., HOSFORD, S., PASCO, X., MONTFORT, B. & RANERA, F. (2016). The evolution of Earth Observation satellites in Europe and its impact on the performance of emergency response services. *Acta Astronautica*, **127**, 619 – 633. 61
- DILLEY, M., CHEN, R.S., DEICHMANN, U., LERNER-LAM, A.L. & ARNOLD, M. (2005). Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis. Tech. rep., World Bank, Washington, DC USA. 61
- DWORAK, T., GONZALEZ, C., LAASER, C. & INTERWIES, E. (2005). The need for new monitoring tools to implement the WFD. *Environmental Science & Policy*, **8**, 301 – 306. 12
- EDSC (2006). Environmental Sampling, Analysis and Results Data Standards Overview of Component Data Standards. Tech. rep., Environmental Data Standards Council, standard No.: EX000001.1. 12
- EGGER, S., HOSSFELD, T., SCHATZ, R. & FIEDLER, M. (2012). Waiting times in quality of experience for web based services. In *2012 Fourth International Workshop on Quality of Multimedia Experience*, 86–96. 65
- FAR, S.S. & WAHAB, A.K.A. (2016). Evaluation of Peaks-Over-Threshold Method. *Ocean Science Discussions*, **47**, 1–25. 51
- FEMA (2004). Using HAZUS-MH for Risk Assessment. Tech. rep., Federal emergency Management Agency, FEMA 433. 38
- FEMA (2012). What is Risk MAP. Tech. rep., Federal emergency Management Agency, 1–877–FEMA MAP. 38
- FEMA (2015). Benefit Cost Tool Kit. <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/92923>, [Online; accedido 02-Mayo-2016]. 38
- FISCHER, A., LAAK, T., BRONDERS, J., DESMET, N., CHRISTOFFELS, E., WEZEL, A. & HOEK, J.P. (2017). Decision support for water quality management of contaminants of emerging concern. *Journal of Environmental Management*, **193**, 360 – 372. 13, 99

- FRITZ, H.M., BLOUNT, C.D., ALBUSAIIDI, F.B. & AL-HARTHY, A.H.M. (2010). Cyclone Gonu storm surge in Oman. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **86**, 102 – 106. [42](#)
- GALLINA, V., TORRESAN, S., CRITTO, A., SPEROTTO, A., GLADE, T. & MARCOMINI, A. (2016). A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management*, **168**, 123 – 132. [37](#), [38](#), [43](#)
- GHAEMI, P., SWIFT, J., SISTER, C., WILSON, J.P. & WOLCH, J. (2009). Design and implementation of a web-based platform to support interactive environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, **33**, 482 – 491. [14](#)
- GIOC (1990). The H2D long wave propagation model. Tech. rep., Universidad de Cantabria, Santander, España. [79](#)
- GÓMEZ, A.G., ONDIVIELA, B., PUENTE, A. & JUANES, J.A. (2015). Environmental risk assessment of water quality in harbor areas: A new methodology applied to European ports. *Journal of Environmental Management*, **155**, 77 – 88. [26](#)
- GOODALL, J.L., HORSBURGH, J.S., WHITEAKER, T.L., MAIDMENT, D.R. & ZASLAVSKY, I. (2008). A first approach to web services for the National Water Information System. *Environmental Modelling & Software*, **23**, 404 – 411. [11](#), [12](#)
- GOODCHILD, M.F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *Geographical Journal*, **69**, 211–221. [61](#)
- GOODCHILD, M.F. (2011). Scale in GIS: An overview. *Geomorphology*, **130**, 5 – 9. [13](#)
- GORE, A. (1998). The Digital Earth. *Australian Surveyor*, **43**, 89–91. [101](#)
- GRIFFIN, J., LATIEF, H., KONGKO, W., HARIG, S., HORSPOOL, N., HANUNG, R., ROJALI, A., MAHER, N., FUCHS, A., HOSSEN, J., UPI, S., EDI, S., RAKOWSKY, N. & CUMMINS, P. (2015). An evaluation of onshore digital elevation models for modeling tsunami inundation zones. *Frontiers in Earth Science*, **3**, 32. [64](#)
- HARRISON, P.A., HOLMAN, I.P. & BERRY, P.M. (2015). Assessing cross-sectoral climate change impacts, vulnerability and adaptation: an introduction to the CLIMSAVE project. *Climatic Change*, **128**, 153–167. [38](#)
- HART, J.K. & MARTINEZ, K. (2006). Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? *Earth-Science Reviews*, **78**, 177 – 191. [3](#), [12](#)

BIBLIOGRAFÍA

- HAWORTH, B. (2016). Emergency management perspectives on volunteered geographic information: Opportunities, challenges and change. *Computers, Environment and Urban Systems*, **57**, 189 – 198. [61](#)
- HEIDARZADEH, M., PIROOZ, M.D., ZAKER, N.H. & SYNOLAKIS, C.E. (2009). Evaluating Tsunami Hazard in the Northwestern Indian Ocean. In P. Cummins, K. Satake & L. Kong, eds., *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami*, Pageoph Topical Volumes, 2045–2058, Birkhäuser Basel. [42](#)
- HINKEL, J. & KLEIN, R.J.T. (2009). Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, **19**, 384 – 395. [38](#)
- HORITA, F.E.A., DE ALBUQUERQUE, J.P., DEGROSSI, L.C., MENDIONDO, E.M. & UEYAMA, J. (2015). Development of a spatial decision support system for flood risk management in Brazil that combines volunteered geographic information with wireless sensor networks. *Computers & Geosciences*, **80**, 84 – 94. [61](#)
- HORSBURGH, J.S., TARBOTON, D.G., MAIDMENT, D.R. & ZASLAVSKY, I. (2008). A relational model for environmental and water resources data. *Water Resources Research*, **44**. [12](#)
- HORSBURGH, J.S., TARBOTON, D.G., P, M., MAIDMENT, D.R., Z, I., VALENTINE, D. & WHITENACK, T. (2009). An integrated system for publishing environmental observations data. *Environmental Modelling & Software*, **24**, 879 – 888. [12](#)
- HORSBURGH, J.S., TARBOTON, D.G., MAIDMENT, D.R. & ZASLAVSKY, I. (2011). Components of an environmental observatory information system. *Computers & Geosciences*, **37**, 207 – 218. [12](#)
- HORSBURGH, J.S., TARBOTON, D.G., HOOPER, R.P. & ZASLAVSKY, I. (2014). Managing a community shared vocabulary for hydrologic observations. *Environmental Modelling & Software*, **52**, 62 – 73. [29](#)
- HUANG, M., MAIDMENT, D.R. & TIAN, Y. (2011). Using SOA and RIAs for water data discovery and retrieval. *Environmental Modelling & Software*, **26**, 1309 – 1324. [12](#), [14](#)
- IPCC (2007). Cambio Climático 2007, Informe de Síntesis. Tech. rep., Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza. [5](#)

- IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Tech. rep., Intergovernmental Panel on Climate Change, ISBN 978-1-107-02506-6. [37](#)
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Tech. rep., Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [51](#)
- ISLAM, T. & RYAN, J. (2016). Chapter 11 - Mitigation Tools. In T. Islam & R. Jeffrey, eds., *Hazard Mitigation in Emergency Management*, 345 – 378, Butterworth-Heinemann. [38](#), [40](#)
- JONKMAN, S.N., BOCKARJOVA, M., KOK, M. & BERNARDINI, P. (2008). Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the netherlands. *Ecological Economics*, **66**, 77 – 90. [59](#)
- JUANES, J.A., ONDIVIELA, B., GÓMEZ, A.G., REVILLA, J.A., SAMANO, M.L., FERNÁNDEZ, F., GARCIA, A., PUENTE, A., GUINDA, X., FERNANDEZ, P. & ECHAVARRI-ERASUN, B. (2013). *Recommendations for maritime works. ROM 5.1-13. Quality of coastal waters in port areas*. Puertos del Estado. [25](#)
- KOMENDANTOVA, N., MRZYGLOCKI, R., MIGNAN, A., KHAZAI, B., WENZEL, F., PATT, A. & FLEMING, K. (2014). Multi-hazard and multi-risk decision-support tools as a part of participatory risk governance: Feedback from civil protection stakeholders. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **8**, 50 – 67. [43](#)
- KULP, S. & STRAUSS, B. (2016). Global DEM Errors Underpredict Coastal Vulnerability to Sea Level Rise and Flooding. *Frontiers in Earth Science*, **4**, 36. [64](#)
- LINDSTROM, M., FAJARDO, R. & HEATH, C. (2017). *Small DATA: The Tiny Clues that Uncover Huge Trends*. John Murray Learning. [100](#)
- MAIER, H.R., II, J.C.A., WATTENBACH, M., RENSCHLER, C.S., LABIOSA, W.B. & RAVALICO, J.K. (2008). Chapter Five Uncertainty in Environmental Decision Making: Issues, Challenges and Future Directions. In A.R. A.J. Jakeman A.A. Voinov & S. Chen, eds., *Environmental Modelling, Software and Decision Support*, vol. 3 of *Developments in Integrated Environmental Assessment*, 69 – 85, Elsevier. [65](#)
- MATTHIES, M., GIUPPONI, C. & OSTENDORF, B. (2007). Environmental decision support systems: Current issues, methods and tools. *Environmental Modelling & Software*, **22**, 123 – 127. [4](#), [13](#), [102](#)

BIBLIOGRAFÍA

- MCINTOSH, B.S., II, J.C.A., TWERY, M., CHEW, J., ELMAHDI, A., HAASE, D., HAROU, J.J., HEPTING, D., CUDDY, S., JAKEMAN, A.J., CHEN, S., KASSAHUN, A., LAUTENBACH, S., MATTHEWS, K., MERRITT, W., QUINN, N.W.T., RODRIGUEZ-RODA, I., SIEBER, S., STAVENGA, M., SULIS, A., TICEHURST, J., VOLK, M., WROBEL, M., VAN DELDEN, H., EL-SAWAH, S., RIZZOLI, A. & VOINOV, A. (2011). Environmental decision support systems (EDSS) development – Challenges and best practices. *Environmental Modelling & Software*, **26**, 1389 – 1402. [74](#), [99](#), [102](#)
- METOCEAN-SOLUTIONS (2017). Kaikoura tsunami waves measured in wellington harbour. <http://www.metocean.co.nz/blog/2017/1/8/kaikoura-tsunami-waves-measured-in-wellington-harbour>, [Online; accedido 08-Enero-2017]. [89](#)
- MOKHTARI, M. (2011). *Tsunami in Makran Region and Its Effect on the Persian Gulf, Tsunami - A Growing Disaster*, chap. 8, 161–174. InTech, 1st edn. [42](#)
- MOKRECH, M., HANSON, S., NICHOLLS, R.J., WOLF, J., WALKDEN, M., FONTAINE, C.M., NICHOLSON-COLE, S., JUDE, S.R., LEAKE, J., STANSBY, P., WATKINSON, A.R., ROUNSEVELL, M.D.A., LOWE, J.A. & HALL, J.W. (2011). The Tyndall coastal simulator. *Journal of Coastal Conservation*, **15**, 325–335. [38](#)
- MYSIAK, J., GIUPPONI, C. & ROSATO, P. (2005). Towards the development of a decision support system for water resource management. *Environmental Modelling & Software*, **20**, 203 – 214. [99](#)
- NASA (2017a). NASA, NOAA Data Show 2016 Warmest Year on Record Globally. <https://go.nasa.gov/2nY5n2J>, [Online; accedido 05-Febrero-2017]. [5](#)
- NASA (2017b). NASA Releases Software Catalog, Granting the Public Free Access to Technologies for Earthly Applications. <https://go.nasa.gov/2o2G1QI>, [Online; accedido 10-Marzo-2017]. [65](#)
- NEWMAN, S., LYNCH, T. & PLUMMER, A.A. (2000). Success and Failure of Decision Support Systems: Learning as We Go. *Journal of Animal Science*, **77**, 1 – 12. [99](#)
- NSFCC (2007). Cyberinfrastructure Vision for 21st Century Discovery. Tech. rep., National Science Foundation Cyberinfrastructure Council, Virginia, USA. [11](#)
- NWQMC (2006). Water Quality Data Elements: A User Guide. Tech. rep., National Water Quality Monitoring Council, technical Report No. 3. [12](#)

- OECD (2017). Earth observation for decision-making. Tech. rep., Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France. [4](#)
- ONDIVIELA, B., GÓMEZ, A.G., PUENTE, A. & JUANES, J.A. (2013). A pragmatic approach to define the ecological potential of water bodies heavily modified by the presence of ports. *Environmental Science & Policy*, **33**, 320 – 331. [25](#), [98](#)
- ONTSI (2016). Perfil Socioeconómico de los internautas, Análisis de datos INE 2015. Tech. rep., Observatorio Nacional de las Telecomunicaciones y de la SI, Madrid, España, ISSN 2172-9212. [5](#)
- OTERO, P., BANAS, N.S. & RUIZ-VILLARREAL, M. (2015). A surface ocean trajectories visualization tool and its initial application to the Galician coast. *Environmental Modelling & Software*, **66**, 12 – 16. [77](#)
- PENNING-ROUSELL, E.C., DE VRIES, W.S., PARKER, D.J., ZANUTTIGH, B., SIMMONDS, D., TRIFONOVA, E., HISSEL, F., MONBALIU, J., LENDZION, J., OHLE, N., DIAZ, P. & BOUMA, T. (2014). Innovation in coastal risk management: An exploratory analysis of risk governance issues at eight THESEUS study sites. *Coastal Engineering*, **87**, 210 – 217. [98](#)
- POCH, M., COMAS, J., RODRÍGUEZ-RODA, I., SÀNCHEZ-MARRÈ, M. & CORTÉS, U. (2004). Designing and building real environmental decision support systems. *Environmental Modelling & Software*, **19**, 857 – 873. [13](#), [74](#)
- POKORNÝ, J. (2006). Database architectures: Current trends and their relationships to environmental data management. *Environmental Modelling & Software*, **21**, 1579 – 1586. [1](#), [12](#)
- RAMAMURTHY, M. (2016). Chapter 4 - Data-Driven Atmospheric Sciences Using Cloud-Based Cyberinfrastructure: Plans, Opportunities, and Challenges for a Real-Time Weather Data Facility. In T.C. Vance, N. Merati, C. Yang & M. Yuan, eds., *Cloud Computing in Ocean and Atmospheric Sciences*, 43 – 58, Academic Press. [92](#)
- RAOULT, B. & CORREA, R. (2016). Chapter 8 - Cloud Computing for the Distribution of Numerical Weather Prediction Outputs. In T.C. Vance, N. Merati, C. Yang & M. Yuan, eds., *Cloud Computing in Ocean and Atmospheric Sciences*, 121 – 135, Academic Press. [92](#)
- RIS, R.C., HOLTHUIJSEN, L.H. & BOOIJ, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification ", journal = "Journal of Geophysical Research: Oceans. **104**, 7667–7681. [79](#), [80](#)

BIBLIOGRAFÍA

- RIZZOLI, A.E. & YOUNG, W.J. (1997). Delivering environmental decision support systems: software tools and techniques. *Environmental Modelling & Software*, **12**, 237 – 249. [13](#), [91](#)
- ROBINSON, N., HOGBEN, R., PRUDDEN, R., POWELL, T., TOMLINSON, J., MIDDLEHAM, R., SAUNBY, M., STANLEY, S. & ARRIBAS, A. (2016). Chapter 6 - How We Used Cloud Services to Develop a 4D Browser Visualization of Environmental Data at the Met Office Informatics Lab. In T.C. Vance, N. Merati, C. Yang & M. Yuan, eds., *Cloud Computing in Ocean and Atmospheric Sciences*, 89 – 106, Academic Press. [77](#)
- RUTLEDGE, G.K., ALPERT, J. & EBUISAKI, W. (2006). NOMADS: A Climate and Weather Model Archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration. *American Meteorological Society*, 1–15. [79](#)
- SAMPSON, C.C., SMITH, A.M., BATES, P.D., NEAL, J.C. & TRIGG, M.A. (2016). Perspectives on Open Access High Resolution Digital Elevation Models to Produce Global Flood Hazard Layers. *Frontiers in Earth Science*, **3**, 85. [64](#)
- SCHMIDT, J., MATCHAM, I., REESE, S., KING, A., BELL, R., HENDERSON, R., SMART, G., COUSINS, J., SMITH, W. & HERON, D. (2011). Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling. *Natural Hazards*, **58**, 1169–1192. [38](#)
- SCHOLES, R.J., MACE, G.M., TURNER, W., GELLER, G.N., JÜRGENS, N., LARIGAUDERIE, A., MUCHONEY, D., WALTHER, B.A. & MOONEY, H.A. (2008). Toward a Global Biodiversity Observing System. *Science*, **321**, 1044–1045. [29](#)
- SCHOLES, R.J., WALTERS, M., TURAK, E., SAARENMAA, H., HEIP, C.H., TUAMA, E.O., FAITH, D.P., MOONEY, H.A., FERRIER, S., JONGMAN, R.H., HARRISON, I.J., YAHARA, T., PEREIRA, H.M., LARIGAUDERIE, A. & GELLER, G. (2012). Building a global observing system for biodiversity. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **4**, 139 – 146. [29](#)
- SHIM, J.P., WARKENTIN, M., COURTNEY, J.F., POWER, D.J., SHARDA, R. & CARLSON, C. (2002). Past, present, and future of decision support technology. *Decision Support Systems*, **33**, 111 – 126. [102](#)
- SHUEILI, K.A. (2015). *Towards a sustainable urban future in Oman: problem and process analysis (Muscat as a case study)*. Ph.D. thesis, The Glasgow School of Art. [61](#)
- SIGNELL, R.P. & CAMOSSO, E. (2016). Technical note: Harmonising metocean model data via standard web services within small research groups. *Ocean Science*, **12**, 633–645. [74](#)

- SIGNELL, R.P. & SNOWDEN, D.P. (2014). Advances in a Distributed Approach for Ocean Model Data Interoperability. *Journal of Marine Science and Engineering*, **2**, 194–208. [74](#), [77](#)
- SIGNELL, R.P., CARNIEL, S., CHIGGIATO, J., JANEKOVIC, I., PULLEN, J. & SHERWOOD, C.R. (2008). Collaboration tools and techniques for large model datasets. *Journal of Marine Systems*, **69**, 154 – 161. [73](#), [77](#)
- SÀNCHEZ-MARRÈ, M., G, K., SOJDA, R.S., STEYER, J.P., STRUSS, P., RODRÍGUEZ-RODA, I., COMAS, J., BRILHANTE, V. & ROEHL, E.A. (2008). Chapter Eight Intelligent Environmental Decision Support Systems. In A.R. A.J. Jakeman A.A. Voinov & S. Chen, eds., *Environmental Modelling, Software and Decision Support*, vol. 3 of *Developments in Integrated Environmental Assessment*, 119 – 144, Elsevier. [86](#), [99](#), [100](#)
- SWAIN, N.R., LATU, K., CHRISTENSEN, S.D., JONES, N.L., NELSON, E.J., AMES, D.P. & WILLIAMS, G.P. (2015). A review of open source software solutions for developing water resources web applications. *Environmental Modelling & Software*, **67**, 108 – 117. [4](#)
- SZARO, R.C., BERC, J., CAMERON, S., CORDLE, S., CROSBY, M., MARTIN, L., NORTON, D., O'MALLEY, R. & RUARK, G. (1998). The ecosystem approach: science and information management issues, gaps and needs. *Landscape and Urban Planning*, **40**, 89 – 101. [12](#)
- TIECKE, T. (2016). Open population datasets and open challenges. <https://code.facebook.com/posts/596471193873876/open-population-datasets-and-open-challenges/>, [Online; accedido 15-Diciembre-2016]. [64](#)
- TOMLINSON, R.F. (2007). *Thinking about GIS: geographic information system planning for managers*. ESRI Press. [1](#), [4](#)
- TORRESAN, S., CRITTO, A., RIZZI, J., ZABEO, A., FURLAN, E. & MARCOMINI, A. (2016). DESYCO: A decision support system for the regional risk assessment of climate change impacts in coastal zones. *Ocean & Coastal Management*, **120**, 49 – 63. [38](#)
- UNEP (2017). Managing Climate Change hazards in coastal areas - The coastal hazard Wheel Decision Support System. Tech. rep., UN Environment, Nairobi, Kenya. [38](#)
- UNISDR (2009). United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Terminology: Basic Terms of Disaster Risk Reduction. Tech. rep., United Nations, Geneva, Switzerland. [37](#)

BIBLIOGRAFÍA

- UNISDR (2015). The Human Cost of Weather related Disasters 1995-2015. Tech. rep., The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland. [6](#)
- UNISDR (2016). Tsunami Disaster Risk 2016. Past impacts and projections. Tech. rep., The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland. [6](#), [82](#)
- URAN, O. & JANSSEN, R. (2003). Why are spatial decision support systems not used? Some experiences from the Netherlands. *Computers, Environment and Urban Systems*, **27**, 511 – 526. [98](#)
- UUSITALO, L., LEHIKONEN, A., HELLE, I. & MYRBERG, K. (2015). An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support. *Environmental Modelling & Software*, **63**, 24 – 31. [65](#)
- VAFEIDIS, A.T., NICHOLLS, R.J., MCFADDEN, L., TOL, R.S.J., HINKEL, J., SPENCER, T., GRASHOFF, P.S., BOOT, G. & KLEIN, R.J.T. (2008). A New Global Coastal Database for Impact and Vulnerability Analysis to Sea-Level Rise. *Journal of Coastal Research*, 917–924. [38](#)
- VESCOUKIS, V., DOULAMIS, N. & KARAGIORGOU, S. (2012). A service oriented architecture for decision support systems in environmental crisis management. *Future Generation Computer Systems*, **28**, 593 – 604. [14](#)
- VITOLO, C., ELKHATIB, Y., REUSSER, D., MACLEOD, C.J.A. & BUYTAERT, W. (2015). Web technologies for environmental Big Data. *Environmental Modelling & Software*, **63**, 185 – 198. [3](#)
- WORLD-BANK (2014). Global Facility for Disaster Reduction and Recovery. Understanding risk in an evolving world: Emerging best practices in natural disaster risk assessment. Tech. rep., World Bank, 1818 H Street NW Washington DC. [61](#), [64](#), [65](#)
- ZANUTTIGH, B., SIMCIC, D., BAGLI, S., BOZZEDA, F., PIETRANTONI, L., ZAGONARI, F., HOGGART, S. & NICHOLLS, R.J. (2014). THESEUS decision support system for coastal risk management. *Coastal Engineering*, **87**, 218 – 239. [38](#), [41](#), [50](#), [59](#)