



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO DE PELIGROSIDAD POR TSUNAMI EN LA CIUDAD DE CÁDIZ

TSUNAMI HAZARD ASSESSMENT IN THE CITY OF CÁDIZ

Trabajo realizado por:

Leonid Lange

Dirigido:

Ignacio Aguirre Ayerbe

Mauricio González Rodríguez

Titulación:

*Máster Universitario
en Costas y Puertos*

Santander, septiembre de 2025

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DECLARACIÓN RESPONSABLE

El autor es el único responsable del contenido del Trabajo Fin de Master que se presenta. La Universidad de Cantabria, así como los profesores directores del mismo, no son responsables del contenido último de este Trabajo.

En tal sentido, el autor se hace responsable:

- 1. De la AUTORÍA Y ORIGINALIDAD del trabajo que se presenta.*
- 2. De que los DATOS y PUBLICACIONES en los que se basa la información contenida en el trabajo, o que han tenido una influencia relevante en el mismo, han sido citados en el texto y en la lista de referencias bibliográficas.*

El autor declara que el Trabajo Fin de Master tiene una extensión de entre 10.000 y 15.000 palabras, excluidas tablas, gráficos y bibliografía.

Fdo. El Autor: Leonid Lange

Índice de contenidos

Palabras clave	5
Resumen	5
Keywords	6
Abstract.....	6
Lista de abreviaturas, siglas, símbolos, etc.	7
Índice de figuras.....	8
Índice de tablas.....	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. MOTIVACIÓN.....	10
1.2. CONTEXTO NORMATIVO	11
1.3. OBJETIVO DEL TFM.....	11
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. TSUNAMIS: FORMACIÓN Y EFECTOS	12
2.1.1. Causas de los tsunamis	12
2.1.2. Características de los tsunamis	14
2.1.3. Terremotos	16
2.1.4. Modelo de Okada / Parámetros de fuentes sismo-tsunamigénicas	17
2.1.5. Evolución y propagación de un tsunami.....	19
2.2. CONCEPTO DE LA PELIGROSIDAD.....	23
2.2.1. Peligrosidad por tsunami.....	23
2.2.2. Métodos Deterministas y Probabilísticos.....	23
2.2.3. Peligro de tsunami máximo creíble, ETMC	24
3. REGIÓN CÁDIZ: GEOGRAFÍA Y PERFIL DE RIESGO	25
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS	25
3.1.1. Ubicación geográfica.....	25
3.1.2. Estructura de la ciudad de Cádiz	31
3.1.3. Características oceanográficas	36
3.2. GEOLOGÍA Y PELIGROSIDAD POR TSUNAMI EN EL GOLFO DE CÁDIZ ...	37
3.3. EVENTOS HISTÓRICOS	38

4.	EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD POR TSUNAMI EN CÁDIZ	40
4.1.	METODOLOGÍA	40
4.2.	RELIEVE	42
4.3.	CARACTERIZACIÓN EVENTOS TSUNAMIGÉNICOS	43
4.3.1.	Cádiz Wedge Fault	43
4.3.2.	Horseshoe Fault.....	44
4.3.3.	Marquês de Pombal Fault	44
4.3.4.	Gorringe Bank Fault	45
4.3.5.	Resumen de fallas consideradas	45
5.	MODELACIÓN NUMÉRICA	47
5.1.	MODELO Tsunami-HySEA.....	47
5.1.1.	Modelo físico y ecuaciones fundamentales	47
5.2.	MALLA.....	49
5.3.	Tsunami-HySEA	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.4.	SUMA LINEAL	51
6.	RESULTADOS.....	53
6.1.	ELEVACIÓN MÁXIMA DE LA SUPERFICIE LIBRE (η)	54
6.2.	PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN (h).....	56
6.3.	ARRASTRE (d).....	59
6.4.	TIEMPO DE LLEGADA (t)	62
6.5.	INFLUENCIA DE LA MAREA.....	64
6.6.	COMPARACIÓN SUMA-LINEAL / MODELACIÓN	65
6.7.	COMPARACIÓN ENTRE ENFOQUES DETERMINISTAS Y PROBABILISTAS	68
7.	CRÍTICA/DISCUSIÓN.....	73
8.	CONCLUSIÓN	74
8.	REFERENCIAS	76
	ANEXO I: Distribución general de mareas en Cádiz.....	85
	ANEXO II: Fuentes tsunamigénicas	86
	ANEXO III: Elevación máxima de altura de ola en el mar	87
	ANEXO IV: Profundidad de inundación	92
	ANEXO V: Arrastre	97

ANEXO VI: Tiempo de llegada	102
ANEXO VII: Código MatLab Suma-Lineal	107

Palabras clave

Tsunami, Peligrosidad por tsunami, Inundación por tsunami, Mapas de inundación, Modelación numérica tsunamis, Golfo de Cádiz tsunami, Tsunami Ready preparación

Resumen

El Golfo de Cádiz constituye una de las regiones de mayor peligrosidad tsunamigénica en la península ibérica, como lo evidencian registros históricos y la presencia de estructuras tectónicas activas. En este contexto, el presente trabajo aborda la evaluación de la *peligrosidad por tsunamis* en la ciudad de Cádiz mediante la elaboración de mapas de inundación y arrastre obtenidos a partir de simulaciones numéricas. Estos productos cartográficos permiten identificar áreas de especial impacto potencial y representan una herramienta básica para la planificación preventiva ante el riesgo de tsunami.

La metodología se basa en datos de batimetría y topografía de alta resolución, en la caracterización de fuentes tsunamigénicas relevantes del Atlántico nororiental y en la aplicación del modelo numérico Tsunami-HySEA (<https://edanya.uma.es/hysea/>, 2025). Se llevaron a cabo simulaciones deterministas de diferentes escenarios sísmicos y estados de marea, complementadas con aproximaciones simplificadas para contrastar resultados y explorar la sensibilidad de las condiciones de contorno.

De manera adicional, se evaluó el papel de la marea y su influencia en la extensión de las áreas inundadas, lo que permitió obtener una idea más precisa de cómo incorporar adecuadamente la variable de la marea en este tipo de análisis. Por otro lado, se contrastaron los enfoques de análisis determinista y probabilístico, no como métodos excluyentes, sino como aproximaciones complementarias que permiten enmarcar los resultados principales sobre *peligrosidad* en un contexto más amplio de incertidumbre.

En conclusión, el trabajo ofrece una visión integrada de la peligrosidad por tsunamis en Cádiz y sienta una base sólida para futuros análisis de riesgo, aportando herramientas útiles para la mejora de la preparación y la resiliencia en entornos costeros expuestos.

Keywords

Tsunami, Tsunami Hazard, Tsunami Inundation, Inundation Maps, Numerical Tsunami Modeling, Gulf of Cádiz Tsunami, Tsunami Preparedness

Abstract

The Gulf of Cádiz is one of the regions with the highest tsunami hazard in the Iberian Peninsula, as evidenced by historical records and the presence of active tectonic structures. In this context, the present work addresses the evaluation of tsunami hazard in the city of Cádiz through the development of inundation and flow-drag maps obtained from numerical simulations. These cartographic products make it possible to identify areas of particular potential impact and represent a basic tool for preventive planning and civil protection in the face of tsunami risk.

The methodology is based on high-resolution bathymetric and topographic data, on the characterization of relevant tsunamigenic sources in the northeastern Atlantic, and on the application of the Tsunami-HySEA (<https://edanya.uma.es/hysea/>, 2025) numerical model. Deterministic simulations of different seismic scenarios and tidal states were carried out, complemented by simplified approaches to contrast the results and to explore the sensitivity to boundary conditions.

In addition, the role of tides and their influence on the extent of inundated areas were evaluated, which allowed for a more precise understanding of how to adequately incorporate the tidal variable into this type of analysis. On the other hand, deterministic and probabilistic approaches were contrasted, not as mutually exclusive methods but as complementary perspectives that frame the main hazard results within a broader context of uncertainty.

In conclusion, this work provides an integrated view of tsunami hazard in Cádiz and establishes a solid foundation for future risk analyses, contributing useful tools for improving preparedness and resilience in exposed coastal environments.

Lista de abreviaturas, siglas, símbolos, etc.

CWF	Cadiz Wedge Fault
DG ECHO	Directorate-General for European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations
EDANYA	Differential Equations, Numerical Analysis and Applications Research Group
ETMC	Evento de tsunami máximo creíble
FTRT	Faster Than Real Time
GBF	Gorringe Bank Fault
GPU	Unidad de Procesamiento Gráfico
HSF	Horseshoe Fault
IHCantabria	Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria
INE	Instituto Nacional de Estadística
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission
MPF	Marquês de Pombal Fault
NEAMTWS	North-Eastern Atlantic, Mediterranean and Connected Seas Tsunami Warning System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PIB	Producto Interno Bruto
PMVE	Pleamar máxima
PTHA	Probabilistic Tsunami Hazard Analysis
PTWC	Pacific Tsunami Warning Centre
SIG	Sistema de Información Geográfica
TEWS	Tsunami Early Warning and Mitigation System
UMA	Universidad de Málaga
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction

Índice de figuras

Ilustración 2.1 - Generación de tsunamis debido al movimiento de un bloque de falla (Marghany, 2014).....	12
Ilustración 2.2 - Classification of ocean waves according to wave frequency, with relative energy, generating disturbances and restoring forces for each type of wave. B. Kinsman 1965.....	14
Ilustración 2.3 - Esquema de los parámetros necesarios para caracterizar una fuente sismo-tsunamigénica. Bryant 2008.....	18
Ilustración 2.4 - Iniciación de un tsunami. (https://www.usgs.gov/centers/pcmsc/life-tsunami).	19
Ilustración 2.5 - División de un tsunami. (https://www.usgs.gov/centers/pcmsc/life-tsunami).	20
Ilustración 2.6 - Amplificación de un tsunami. (https://www.usgs.gov/centers/pcmsc/life-tsunami).	21
Ilustración 2.7 - Esquema de las variables que comúnmente se representan en los mapas de inundación por tsunami, como parte de una evaluación del peligro de tsunami. (Padilla Álvarez, 2020).....	21
Ilustración 3.1 - Ubicación 1; Península Ibérica.....	26
Ilustración 3.2 - Ubicación 2; Comunidad Autónoma de Andalucía	27
Ilustración 3.3 - Ubicación 3; Provincia de Cádiz.....	28
Ilustración 3.4 - Ubicación 4; Municipio de Cádiz	29
Ilustración 3.5 - Área de estudio local, Casco urbano municipio Cádiz.....	31
Ilustración 3.6 - Playa la Caleta y Casco Viejo (InSpain.org)	32
Ilustración 3.7 - Castillo de San Sebastián y Playa la Cleta (InSpain.org)	32
Ilustración 3.8 - Puerto de Cádiz (puertocadiz.com).....	33
Ilustración 3.9 - Perfil de la Playa Santa María del Mar (InSpain.org).....	34
Ilustración 3.10 - Playa Santa María del Mar (InSpain.org)	34
Ilustración 3.11 - Playa de la Victoria / Extramuros (InSpain.org)	34
Ilustración 3.12 - Playa de la Victoria / Zona Industrial (InSpain.org).....	35
Ilustración 3.14 - Istmo de Cádiz (InSpain.org).....	36
Ilustración 3.13 - Cortadura (InSpain.org)	36
Ilustración 3.15 - Esquema tectónico del Golfo de Cádiz en el que se han cartografiado las principales estructuras tectónicas y deslizamientos de la región (Vazquez 2016).	37
Ilustración 4.1 - Esquema flujo de trabajo	41
Ilustración 4.2 - Modelo 3D con valores Z invertidos y exageración vertical	42
Ilustración 4.3 - Área de estudio y batimetría en el golfo de Cádiz. V. V. Lima 2010	43

Ilustración 4.4 - Visión general de las diferentes fallas tectónicas V. V. Lima 2010	46
Ilustración 5.1 - Dimensión de las mallas usadas	49
Ilustración 5.2 - Vista previa del escenario de inundación "Marquês De Pombal Fault" ...	50
Ilustración 5.3 - MatLab ilustración inundación previa	51
Ilustración 5.4 - MatLab ilustración inundación suma lineal	51
Ilustración 6.1 - Elevación máxima de la altura de ola en el mar; Mapa agregado	55
Ilustración 6.2 - Profundidad de inundación; Mapa agregado.....	58
Ilustración 6.3 - Arrastre; Mapa agregado	61
Ilustración 6.4 - Tiempo de llegada; Mapa agregado.....	63
Ilustración 6.5 - Influencia de la marea a la inundación	64
Ilustración 6.6 - Inundación (Tsunami-HySEA vs. Suma-Lineal) en el centro de Cádiz – Falla Marquês de Pombal	66
Ilustración 6.7 - Detalle MPF comparación zona Playa de la Victoria / Zona industrial	67
Ilustración 6.8 - Detalle MPF comparación zona Playa de Santa María del Mar.....	67
Ilustración 6.9 - Mapa de inundación según enfoques probabilístico y determinista	69
Ilustración 6.10 - Comparación manchas de inundación probabilístico y determinista.....	70
Ilustración 6.11 - Comparación probabilístico/determinista; Detalle Casco Viejo / Puerto	71

Índice de tablas

Tabla 2.1 - Velocidades de un tsunami por profundidad del agua	15
Tabla 4.1 - Total de las fallas tectónicas	45
Tabla 6.1 - Nivel de peligro por tsunami en función de la relación profundidad-velocidad, basado en Jonkman et al. (2008) y empleada en estudios previos como en Jelínek et al (2012) y Aguirre-Ayerbe et al. (2018).	59

1. INTRODUCCIÓN

Los tsunamis representan una de las amenazas naturales más destructivas a nivel global. Eventos como el del Océano Índico en 2004 (Aceh) o el de Japón en 2011 (Fukushima) han evidenciado la gran vulnerabilidad de las zonas costeras densamente pobladas frente a este tipo de fenómenos. A pesar de los avances científicos de las últimas décadas, la predicción exacta de la generación, propagación e impacto de los tsunamis sigue siendo un reto considerable. Este grado de incertidumbre refuerza la necesidad de estudios que profundicen en los análisis de peligrosidad y riesgo en contextos locales concretos.

Como respuesta, se han desarrollado diversas iniciativas internacionales orientadas a mejorar la comprensión del fenómeno y a establecer sistemas eficaces de alerta temprana. En este marco, la UNESCO ha impulsado el Sistema de Alerta y Mitigación de Tsunamis (TEWS), estructurado en cuatro sistemas regionales, entre los que destaca el NEAMTWS (North-Eastern Atlantic, Mediterranean and Connected Seas Tsunami Warning System), centrado en el Atlántico nororiental, el Mediterráneo y los mares adyacentes. En Europa, este sistema ha favorecido la creación de centros nacionales de alerta y la cooperación internacional, lo que ha permitido avanzar en la detección y monitorización de posibles tsunamis.

Dentro de la región NEAM, el litoral suroeste de la península ibérica se identifica como una de las zonas con un riesgo significativo, siendo el Golfo de Cádiz un área destacable por su ubicación frente a una zona sísmica activa, como demuestra el impacto que tuvo en la zona el devastador terremoto y tsunami de 1755, conocido como el terremoto y tsunami de Lisboa de 1755. Estos factores convierten a Cádiz en un sitio piloto idóneo para avanzar en el conocimiento científico y en el desarrollo de estrategias prácticas de preparación.

1.1. MOTIVACIÓN

La ubicación frente a una zona tsunamigénica activa, la alta densidad poblacional y los cortos tiempos de llegada aumentan la vulnerabilidad de Cádiz. Esto subraya la necesidad de profundizar en estudios de peligrosidad mediante simulaciones numéricas y mapas de inundación que permitan caracterizar con precisión la amenaza y sentar bases para futuros estudios de riesgo.

1.2. CONTEXTO NORMATIVO

En España, un paso decisivo en la gestión del riesgo de tsunamis fue la aprobación del Real Decreto 1053/2015, que establece la *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos*. Este marco normativo busca mejorar la capacidad de respuesta frente a emergencias de origen tsunamigénico y se estructura en cuatro ejes fundamentales:

- la evaluación del riesgo de maremotos,
- el establecimiento del Sistema Nacional de Alertas por Maremoto,
- la organización de la operatividad de los planes de protección civil, y
- la educación, información y preparación de la ciudadanía.

De estos ejes, el primero —la evaluación del riesgo— constituye la base sobre la que se enmarca el presente trabajo. El análisis detallado de la peligrosidad por tsunamis en Cádiz, mediante simulaciones numéricas y el desarrollo de mapas de inundación, contribuye a cubrir esta necesidad y a sentar una referencia científica sólida para futuras fases de planificación y gestión.

1.3. OBJETIVO DEL TFM

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo principal *evaluar la peligrosidad por tsunamis en la ciudad de Cádiz* mediante el uso de datos geoespaciales y simulaciones numéricas.

De manera específica, se plantean los siguientes objetivos:

- Elaborar mapas de inundación y evaluar la peligrosidad de la ciudad de Cádiz a partir de la modelación numérica de distintos escenarios de tsunami.
- Analizar la influencia de la variable de la marea en la extensión de las áreas afectadas, con el fin de valorar su adecuada incorporación en este tipo de estudios.
- Contrastar los enfoques determinista y probabilístico de análisis, evaluando sus aportaciones complementarias en la caracterización de la peligrosidad.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. TSUNAMIS: FORMACIÓN Y EFECTOS

Los tsunamis son olas generadas por eventos submarinos repentinos y pueden causar daños significativos debido a su enorme energía. El término “tsunami” proviene del japonés y significa literalmente “ola de puerto” (津波). Estos fenómenos suelen originarse por procesos geofísicos en los cuales se liberan grandes cantidades de energía en el océano, lo que provoca el desplazamiento masivo del agua y la generación de una serie de ondas de gran longitud (IOC, 2013).

2.1.1. Causas de los tsunamis

La causa más frecuente de la formación de un tsunami son los terremotos submarinos, en particular aquellos que ocurren en los límites de las placas tectónicas. Cuando estas placas interactúan entre sí, pueden generar terremotos al deslizarse lateralmente (tensión cortante), colisionar y empujarse una sobre otra (colisión) o cuando una placa se introduce bajo la otra en un proceso de subducción. Durante la acumulación de tensiones y su posterior liberación, el fondo marino puede experimentar un desplazamiento vertical abrupto, transmitiendo esta energía al agua y generando ondas que se propagan en todas direcciones tal como se ilustra en la Ilustración 2.1 (Tappin, 2017).

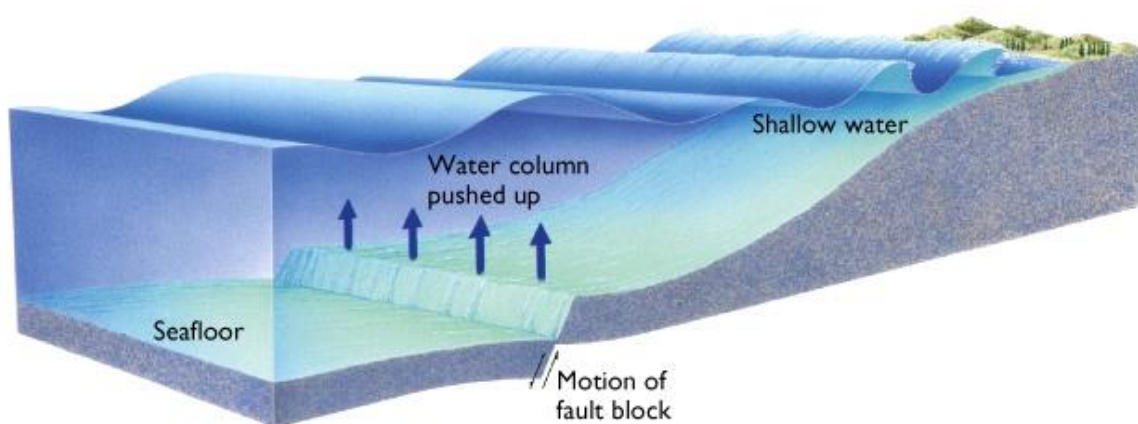


Ilustración 2.1 - Generación de tsunamis debido al movimiento de un bloque de falla (Marghany, 2014)

Además de los terremotos, los tsunamis pueden originarse por otros fenómenos naturales:

- **Actividad volcánica:** La erupción de un volcán submarino puede desplazar grandes volúmenes de agua, generando olas de tsunami. También, la explosión o el colapso de un volcán terrestre cercano a la costa puede generar el

desplazamiento repentino del agua, desencadenando un tsunami. (*Díaz et al., 2014*)

- **Deslizamientos de tierra:** Tanto los deslizamientos submarinos como los costeros pueden provocar tsunamis. Cuando grandes masas de sedimentos o rocas se desplazan rápidamente en el fondo marino, pueden empujar grandes volúmenes de agua. De manera similar, si una porción significativa de tierra cae directamente al mar, la onda de impacto resultante puede desencadenar un tsunami. (*Harbitz et al. 2005*)
- **Impactos de meteoritos:** Aunque extremadamente raros, los impactos de meteoritos en océanos o grandes cuerpos de agua pueden generar tsunamis de gran magnitud debido a la energía cinética liberada en la colisión.

2.1.2. Características de los tsunamis

Los tsunamis se caracterizan por ser ondas de gran longitud y periodo largo, lo que significa que pueden tener períodos que van desde los 5 hasta los 90 minutos. Este intervalo es significativamente mayor en comparación con las olas generadas por el viento, que tienen períodos de entre 5 y 20 segundos (Bryant, 2008), como se puede observar en la siguiente figura (Ilustración 2.2).

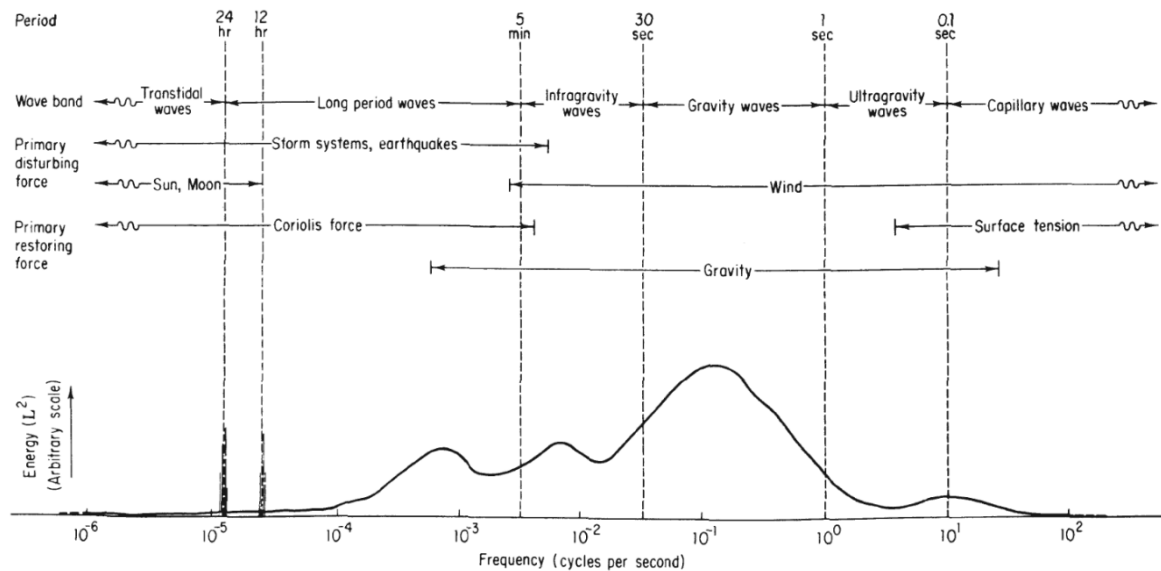


Ilustración 2.2 - Clasificación de las olas oceánicas según su frecuencia, con la energía relativa, los fenómenos generadores y las fuerzas restauradoras correspondientes a cada tipo de ola. B. Kinsman 1965.

La velocidad de un tsunami depende de la profundidad del agua en la que se propaga. En aguas profundas, puede alcanzar velocidades de hasta 800 km/h, comparables a las de un avión comercial (Maji et al. 2021). Sin embargo, a medida que la ola se acerca a la costa y la profundidad disminuye, su velocidad se reduce y su altura aumenta, un fenómeno conocido como *shoaling*. Este efecto puede amplificar significativamente la altura de la ola, haciendo que los tsunamis sean devastadores en zonas costeras.

Para clasificar una onda en función de la profundidad relativa del agua, se usa el cociente $\mu = h/L$, donde h es la profundidad del agua y L la longitud de onda. Si $\mu > 0,5$, la onda se encuentra en aguas profundas, mientras que si $\mu < 0,05$, la onda se considera en aguas someras. En el caso de los tsunamis, su longitud de onda es del orden de cientos de kilómetros, mientras que la profundidad media del océano Pacífico aproximadamente es de 4 km (National Geographic, 2022). Esto significa que, incluso en las regiones más profundas del océano, el valor de μ es muy pequeño, lo que implica que los tsunamis siempre se comportan como ondas en aguas someras.

Por esta razón, la velocidad de propagación de un tsunami puede calcularse mediante la ecuación de ondas en aguas someras. La fórmula que describe este comportamiento es:

$$c = \sqrt{g * h}$$

con: g = aceleración de gravedad ($9,81 \frac{m}{s^2}$)
 h = profundidad del agua

Esto implica que la velocidad del tsunami depende exclusivamente de la profundidad del agua, sin importar la longitud de onda o el período de la ola, como se indica en la investigación de *Bernard et al. (2006)*.

Para tener una idea de las dimensiones, consulte la Tabla 2.1 continuación.

Tabla 2.1 - Velocidades de un tsunami por profundidad del agua

Profundidad	Velocidad	
	[m/s]	[km/h]
8000	280	1009
5000	222	798
2500	157	565
1000	99	357
500	70	252
100	31	112

En aguas oceánicas profundas, las olas de un tsunami pueden tener alturas pequeñas, de apenas unos centímetros hasta aproximadamente un metro, lo que las hace imperceptibles para los barcos. No obstante, cuando estas olas alcanzan zonas de menor profundidad, su velocidad disminuye y su altura puede aumentar dramáticamente, superando los 10 metros en muchos casos e incluso los 30 metros en eventos extremos (*Bryant, 2008*).

Debido a sus longitudes de onda extremadamente largas - que pueden extenderse por cientos de kilómetros (*Bernard, 2006*) - los tsunamis pueden atravesar cuencas oceánicas enteras sin perder significativamente su energía. Esto les permite impactar costas situadas a miles de kilómetros de su punto de origen, causando devastación incluso en regiones lejanas al epicentro del evento que los generó (*IOC, 2013*).

Cuando un tsunami alcanza la costa, la liberación de su energía puede provocar inundaciones catastróficas, erosión del suelo, destrucción de infraestructuras y una pérdida considerable de vidas humanas (*NOAA, 2023*). Por ello, la comprensión de estos fenómenos y la implementación de sistemas de alerta temprana son esenciales para mitigar sus efectos y reducir el riesgo en comunidades costeras vulnerables.

2.1.3. Terremotos

La causa principal de los tsunamis se encuentra en los terremotos generados en regiones marinas y costeras (NOAA, 2023). Ya en 1977, *Kanamori y Anderson* identificaron que los tsunamis suelen originarse a partir de terremotos cuya profundidad focal es inferior a 20 km bajo el fondo oceánico y cuya magnitud supera $M_w = 7$, siendo M_w la magnitud de momento. Estas condiciones reflejan la necesidad de una liberación rápida y significativa de energía cerca de la superficie terrestre para provocar un desplazamiento vertical sustancial del lecho marino.

Con el avance de la investigación, estudios más recientes han corroborado estos principios fundamentales. *Bernard (2006)* sostiene que “*Los tsunamis se generan con mayor frecuencia por terremotos en regiones marinas y costeras. Los tsunamis de gran magnitud son producidos por terremotos fuertes (superiores a magnitud 7 en la escala de Richter) y de foco superficial (a menos de 30 km de profundidad), asociados con el movimiento de las placas tectónicas oceánicas y continentales.*” Aunque se observa una ligera diferencia en el criterio de profundidad —30 km en lugar de 20 km—, ambos enfoques coinciden en los elementos esenciales: magnitud elevada, foco superficial y ubicación en zonas de subducción.

A partir de esta comprensión sobre la energía sísmica y su medición mediante el momento sísmico, resulta fundamental considerar en qué casos un terremoto tiene el potencial de generar un tsunami. En este contexto, la fórmula desarrollada por *Hanks y Kanamori (1979)* sigue siendo una herramienta clave:

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0 - 10,7)$$

Esta expresión permite estimar con mayor precisión la magnitud sísmica real a partir del momento sísmico M_0 proporcionando una medida física más representativa de la energía liberada que las escalas tradicionales como la de Richter. La adopción de esta fórmula ha sido esencial para comparar diferentes tipos de eventos sísmicos y, especialmente, para evaluar su capacidad destructiva y su potencial tsunamigénico.

En relación con la generación de tsunamis, *Bernard (2006)* subraya que estos fenómenos se producen con mayor frecuencia como resultado de terremotos marinos o costeros que presentan tanto una magnitud considerable (superior a $M_w 7$) como un foco superficial (menos de 30 km de profundidad), típicamente asociados a zonas de subducción donde hay desplazamiento vertical del fondo oceánico. Aunque existe una ligera variación con respecto al límite de 20 km propuesto por *Kanamori y Anderson (1977)*, ambos enfoques coinciden en los elementos esenciales: magnitud elevada, ubicación marina o costera, y profundidad reducida.

Basándose en estos criterios, distintas instituciones como el *USGS/PTWC (2006)* y estudios como los de *Satake (2002)* y *Okal (2011)* han identificado umbrales generales de magnitud para la generación de tsunamis:

- **$M_w < 6.5$:** Generalmente no generan tsunamis significativos, salvo en presencia de deslizamientos submarinos.
- **$M_w 6.5 - 7.5$:** Posibilidad de tsunamis locales, especialmente si el sismo es poco profundo y se produce en una zona de subducción.
- **$M_w > 7.5$:** Alta probabilidad de tsunamis destructivos, sobre todo si hay un importante desplazamiento vertical del lecho marino.
- **$M_w \geq 8.0$:** Casi todos los terremotos de esta magnitud o superiores que ocurren en el mar generan tsunamis, algunos de ellos con propagación transoceánica.

Así, la combinación de una magnitud significativa según la fórmula de *Hanks y Kanamori (1979)*, una localización favorable y una mecánica de ruptura adecuada determina en última instancia el riesgo real de un tsunami. Esta comprensión es crucial no solo para la sismología teórica, sino también para el diseño de sistemas de alerta temprana eficaces en regiones propensas a estos fenómenos.

2.1.4. Modelo de Okada / Parámetros de fuentes sismo-tsunamigénicas

El modelo de *Okada (1985)* es una herramienta fundamental para la simulación de tsunamis generados por terremotos, especialmente aquellos que ocurren en fallas tectónicas submarinas. Este modelo se basa en la teoría de la elasticidad y se utiliza para calcular la deformación del fondo marino generada por un evento sísmico, que luego se traduce en la formación de olas de tsunami que se transmite a la columna de agua. La base del modelo es la relación entre el movimiento vertical o horizontal del fondo marino y la propagación de la onda en la superficie del océano.

En la Ilustración 2.3 se recogen los distintos parámetros que caracterizan una fuente sismo tectónica, parámetros que se describen a continuación:

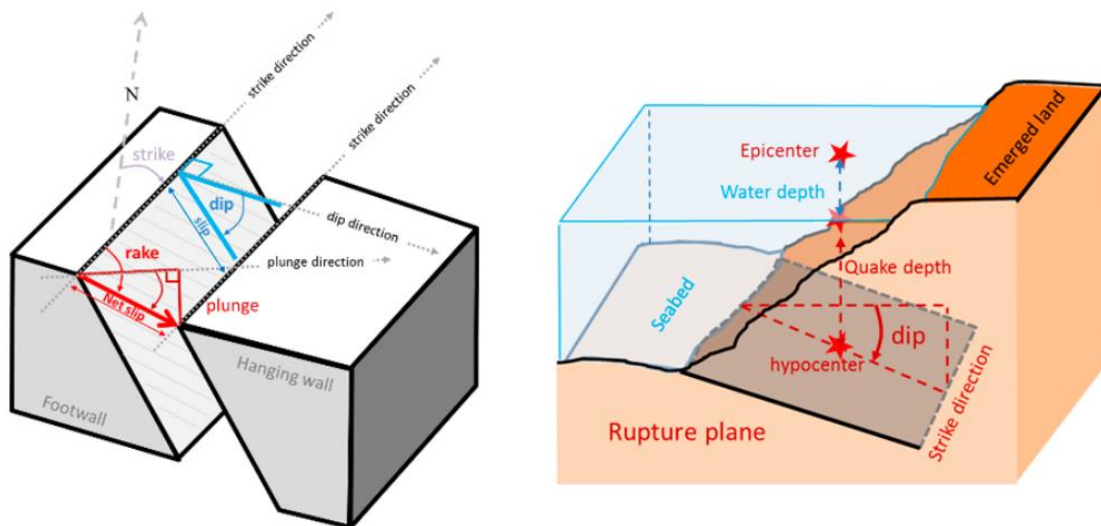


Ilustración 2.3 - Esquema de los parámetros necesarios para caracterizar una fuente sismo-tsunamigénica. Bryant 2008

- **Posición del epicentro (epicenter) (latitud, longitud, en °)**
Coordenadas geográficas del punto sobre la superficie terrestre directamente sobre el hipocentro del terremoto, determinando la ubicación del evento sísmico.
- **Profundidad del hipocentro (hypocenter) (h_{foc} , en km)**
La profundidad a la que ocurre el terremoto en el interior de la Tierra. Los terremotos más superficiales suelen ser más destructivos debido a la proximidad de la liberación de energía a la superficie.
- **Longitud y anchura del plano de falla (L, W, en m)**
Medidas de la extensión horizontal de la zona de ruptura en la corteza terrestre, donde se libera la energía sísmica.
- **Salto neto de falla (net slip, en m)**
El desplazamiento relativo entre los bloques de la falla a lo largo del plano de falla, que determina la magnitud de la liberación de energía sísmica y puede influir en la generación de tsunamis.
- **Rumbo de la falla (Strike θ , en °)**
La orientación del plano de falla en la superficie terrestre, medida en grados desde el norte hacia el este, que describe la alineación de la ruptura en el plano horizontal.
- **Inclinación de la falla (Dip δ , en °)**
El ángulo de inclinación del plano de falla respecto a la horizontal, que indica cómo se hunde la falla hacia el interior de la Tierra.

- **Ángulo de cabeceo (rake o Slip λ , en °)**

El ángulo de desplazamiento dentro del plano de la falla, que describe la dirección del movimiento relativo entre los bloques. Un ángulo cercano a 90° indica un movimiento predominantemente vertical, lo que es más efectivo para generar tsunamis.

2.1.5. Evolución y propagación de un tsunami

2.1.5.1. Iniciación

Los parámetros sismotectónicos descritos anteriormente determinan el patrón de deformación del fondo marino, el cual es crucial para la generación de un tsunami. Como resultado de esta deformación - ya sea una elevación o subsidencia permanente del lecho oceánico - se produce un desplazamiento vertical de la columna de agua que se encuentra por encima.

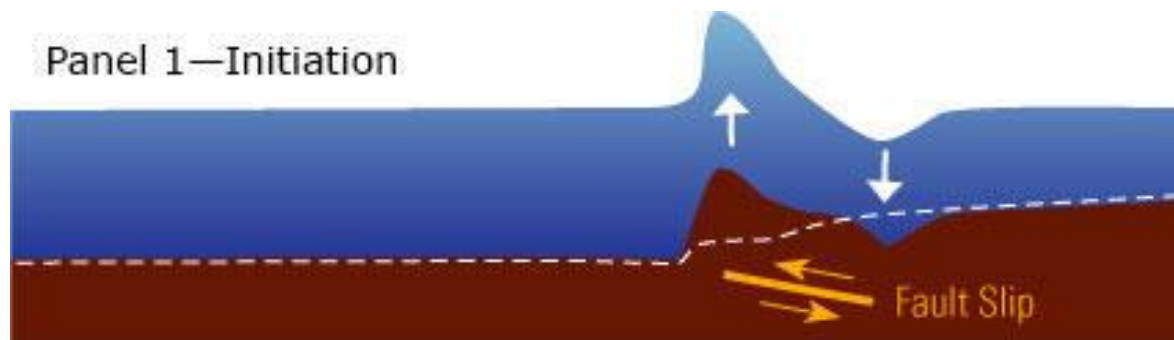


Ilustración 2.4 - Iniciación de un tsunami. (<https://www.usgs.gov/centers/pcmsc/life-tsunami>).

Este desplazamiento inicial de la masa de agua genera un desequilibrio que se manifiesta como un aumento de la energía potencial gravitatoria. Dicha energía se transforma posteriormente en energía cinética, lo que da lugar al inicio de la propagación del tsunami en forma de ondas de gravedad.

Es importante destacar que, en mar abierto, estas ondas tienen una gran longitud de onda (decenas a cientos de kilómetros) y una amplitud relativamente pequeña (pocos metros), lo que las hace imperceptibles para embarcaciones. (*Life of a Tsunami* | U.S. Geological Survey, 2020)

2.1.5.2. División

Pocos minutos después del sismo, la onda de tsunami se divide en dos frentes de onda:

- Un tsunami local, que se dirige hacia la costa cercana.
- Un tsunami lejano, que se propaga mar adentro hacia océano abierto.



Ilustración 2.5 - División de un tsunami. (<https://www.usgs.gov/centers/pcmssc/life-tsunami>).

Ambas ondas tienen una altura aproximadamente mitad de la onda original, y su velocidad depende de la raíz cuadrada de la profundidad del agua. Por lo tanto, la onda que viaja por aguas profundas se desplaza más rápido que la que se dirige hacia la costa. (*Life of a Tsunami* | U.S. Geological Survey, 2020)

2.1.5.3. Amplificación

A medida que el tsunami local se aproxima a la costa y asciende la pendiente continental, se producen varios fenómenos:

- Aumenta su amplitud (altura).
- Disminuye su longitud de onda.
- La onda se vuelve más empinada, lo que afecta directamente al run-up (altura que alcanza el agua tierra adentro).

Frecuentemente, la primera parte del tsunami que llega a la costa es una zona de depresión, lo que causa un retroceso repentino del mar. Este fenómeno sirve como señal natural de advertencia de un posible tsunami. (*Life of a Tsunami* | U.S. Geological Survey, 2020)

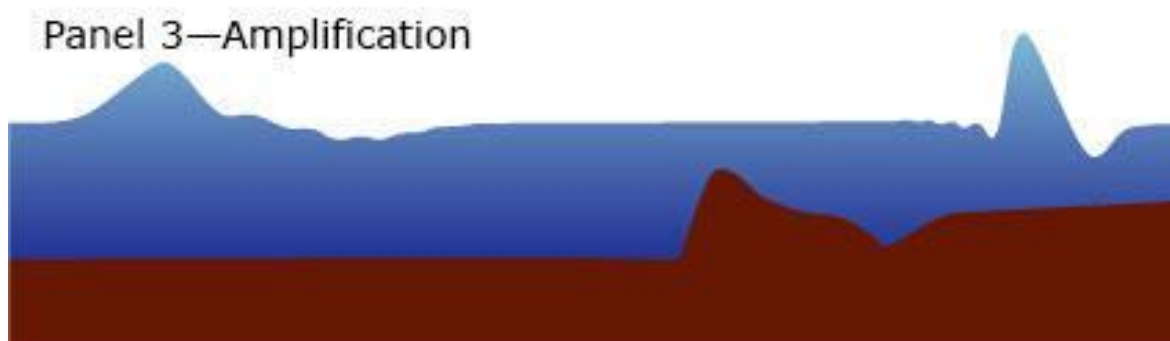


Ilustración 2.6 - Amplificación de un tsunami. (<https://www.usgs.gov/centers/pcmssc/life-tsunami>).

2.1.5.4. Run-Up e Inundación

El run-up se produce cuando el frente de la ola del tsunami se desplaza desde la zona costera hacia tierra firme, superando la línea de costa. Aunque en casos poco frecuentes la ola puede romper al llegar a la costa, formando un bore - una pared vertical de agua turbulenta -, este comportamiento es poco común. Por lo general, la ola de tsunami no se comporta como una ola rompiente tradicional, sino que se manifiesta como mareas extremadamente rápidas y potentes, que generan un aumento abrupto del nivel del mar.

Este fenómeno no solo representa un aumento del nivel del agua, sino también una combinación de variables dinámicas que definen el grado de peligrosidad y daño asociado:

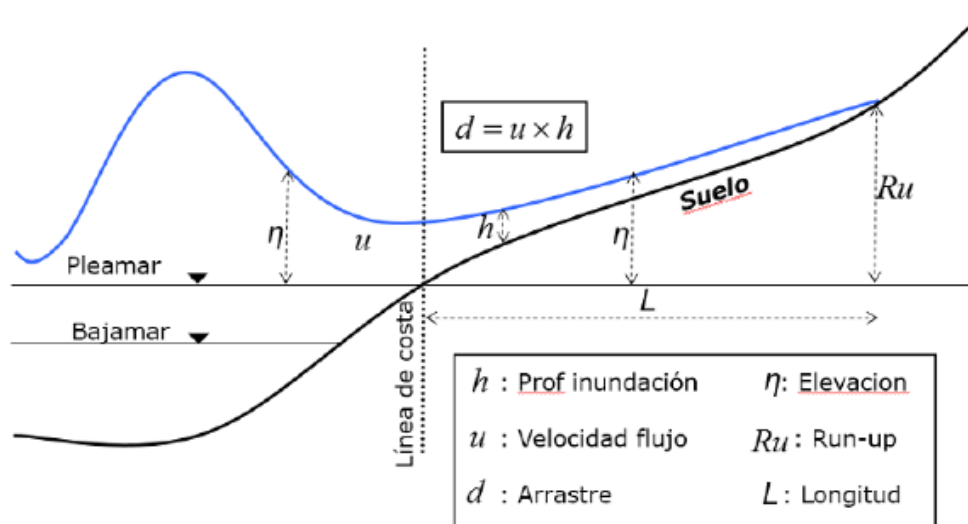


Ilustración 2.7 - Esquema de las variables que comúnmente se representan en los mapas de inundación por tsunami, como parte de una evaluación del peligro de tsunami. (Padilla Álvarez, 2020)

- i. **Elevación máxima de altura de ola en el mar (η):** Definida como la altura que tiene la superficie libre del mar medida desde datum vertical de referencia que se realice la inundación (para este caso pleamar).
- ii. **Profundidad de inundación (h):** Elevación de la lámina de agua respecto al suelo, es decir, la diferencia entre la elevación máxima de altura de ola y el terreno.
- iii. **Velocidad de flujo (u):** Velocidad de las partículas.
- iv. **Arrastre (d):** Refleja el producto de las variables velocidad de flujo y profundidad de inundación. Dicha variable nos sirve para cuantificar el riesgo de arrastre de una persona.
- v. **Run-up (Ru):** Es la elevación hasta el punto donde llegó la máxima inundación en tierra. (Elevación medida desde el nivel de referencia vertical). Dicho valor es igual al valor de la cota del terreno en el último punto del terreno inundado.
- vi. **Longitud de inundación (L):** distancia desde la línea de costa hasta el punto del terreno inundado más alejado.
- vii. **Tiempo de llegada (t):** Tiempo mínimo de la onda desde la generación al punto de estudio.

Además, elementos como escombros flotantes arrastrados por la corriente pueden aumentar considerablemente el riesgo de daños materiales y personales.

2.1.5.5. Persistencia y comportamiento posterior

Después del run-up, parte de la energía del tsunami se refleja hacia el océano y puede ser dispersada por irregularidades de la línea costera. También pueden formarse ondas atrapadas costeras (edge waves), que se desplazan paralelamente a la costa y provocan múltiples llegadas sucesivas del tsunami al mismo punto costero.

Por eso, la primera ola no siempre es la más destructiva, y es peligroso regresar a la costa poco tiempo después del impacto inicial. (*Life of a Tsunami* | U.S. Geological Survey, 2020)

2.2. CONCEPTO DE LA PELIGROSIDAD

Peligrosidad se refiere al potencial de ocurrencia de un proceso o fenómeno natural que puede causar daños a la vida, la salud, los bienes, el medio ambiente y la economía. Los factores que determinan la peligrosidad incluyen la intensidad, frecuencia, probabilidad de ocurrencia y ubicación del fenómeno. Además, la magnitud del evento es un factor clave para evaluar su peligrosidad (UNDRR, 2018).

2.2.1. Peligrosidad por tsunami

En el caso de los tsunamis, la peligrosidad está influenciada principalmente por la intensidad del evento inicial (como un terremoto submarino), su alcance geográfico, la frecuencia de ocurrencia de estos eventos en una región específica y la magnitud de las olas generadas. También, el cambio climático y otros factores ambientales pueden modificar la intensidad y la frecuencia de estos eventos, aumentando su peligrosidad (UNDRR, 2007).

2.2.2. Métodos Deterministas y Probabilísticos

Para evaluar la peligrosidad de tsunamis se emplean dos enfoques principales:

- Enfoque determinista: se centra en escenarios específicos con un alto impacto, normalmente utilizando un único evento considerado el “peor caso” bajo condiciones predeterminadas. Aunque este enfoque proporciona una referencia de peligro máximo, es importante reconocer que en la práctica pueden existir múltiples escenarios con impactos similares o incluso mayores, dependiendo de las condiciones exactas. En este trabajo se han analizado varios escenarios deterministas, lo que permite comparar sus efectos y superar la limitación de asumir un único “evento máximo”.
- Enfoque probabilístico: evalúa la probabilidad de ocurrencia de diferentes eventos de tsunami, considerando la frecuencia y magnitud de los mismos. En un análisis probabilístico de peligrosidad por tsunamis (PTHA), se modela una amplia gama de posibles fuentes y sus tasas de ocurrencia, la propagación y la inundación mediante modelos numéricos con batimetría y topografía de alta resolución, y se agregan los resultados según la probabilidad de la fuente y el impacto esperado. Este enfoque permite capturar la incertidumbre inherente al conocimiento incompleto sobre los mecanismos generadores, la frecuencia de eventos mayores y las limitaciones de los datos y modelos, proporcionando una visión más completa de la peligrosidad.

2.2.3. Peligro de tsunami máximo creíble, ETMC

Dentro del enfoque determinista, el ETMC define conceptualmente un escenario de máximo peligro que un tsunami podría generar en una localidad específica, basado en un único evento con condiciones extremas (*SATREPS, 2018*). Aunque útil como referencia metodológica, este concepto no necesariamente refleja la realidad completa, dado que múltiples escenarios deterministas pueden generar efectos comparables o superiores. Por ello, en este trabajo se han modelado varios escenarios deterministas para ilustrar la variabilidad del impacto y permitir comparaciones con enfoques probabilísticos.

3. REGIÓN CÁDIZ: GEOGRAFÍA Y PERFIL DE RIESGO

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS

3.1.1. Ubicación geográfica

Cádiz es una ciudad situada en el sur de España y capital de la provincia homónima en la Comunidad Autónoma de Andalucía. Se encuentra en la costa suroeste de la Península Ibérica y forma parte de la Costa de la Luz. Geográficamente, Cádiz está ubicada en las coordenadas 36°31'N, 6°17'O y está rodeada por el Océano Atlántico en tres de sus lados.

La ciudad se asienta sobre una estrecha y alargada franja de tierra que, originalmente, era parte de un antiguo archipiélago fenicio en la bahía de Cádiz, conformado por los islotes de Erytheia y Kotinoussa. Con el tiempo, la acción de la sedimentación natural y obras humanas transformaron este grupo de islas en un tómbolo, conectando la actual península de Cádiz con lo que hoy es San Fernando y el continente. Este entorno geológico, documentado en estudios geoarqueológicos, destacó la existencia de canales profundos y sedimentos finos que facilitaban la formación gradual del istmo (*Ortega et al., 2008*).

Además, Cádiz se benefició históricamente de un puerto natural bien protegido por su configuración insular original y la presencia de estos paleocanales, lo que la convirtió desde la Antigüedad en un enclave estratégico para el comercio marítimo y la defensa regional (*Ruiz Romero de la Cruz, 2004*).

Por estas razones, Cádiz se consolidó como punto clave del comercio marítimo y de las rutas de expansión en la Edad Antigua y Moderna, gracias a su privilegiada posición geográfica y sus características portuarias únicas (*Márquez Carmona, 2006*).

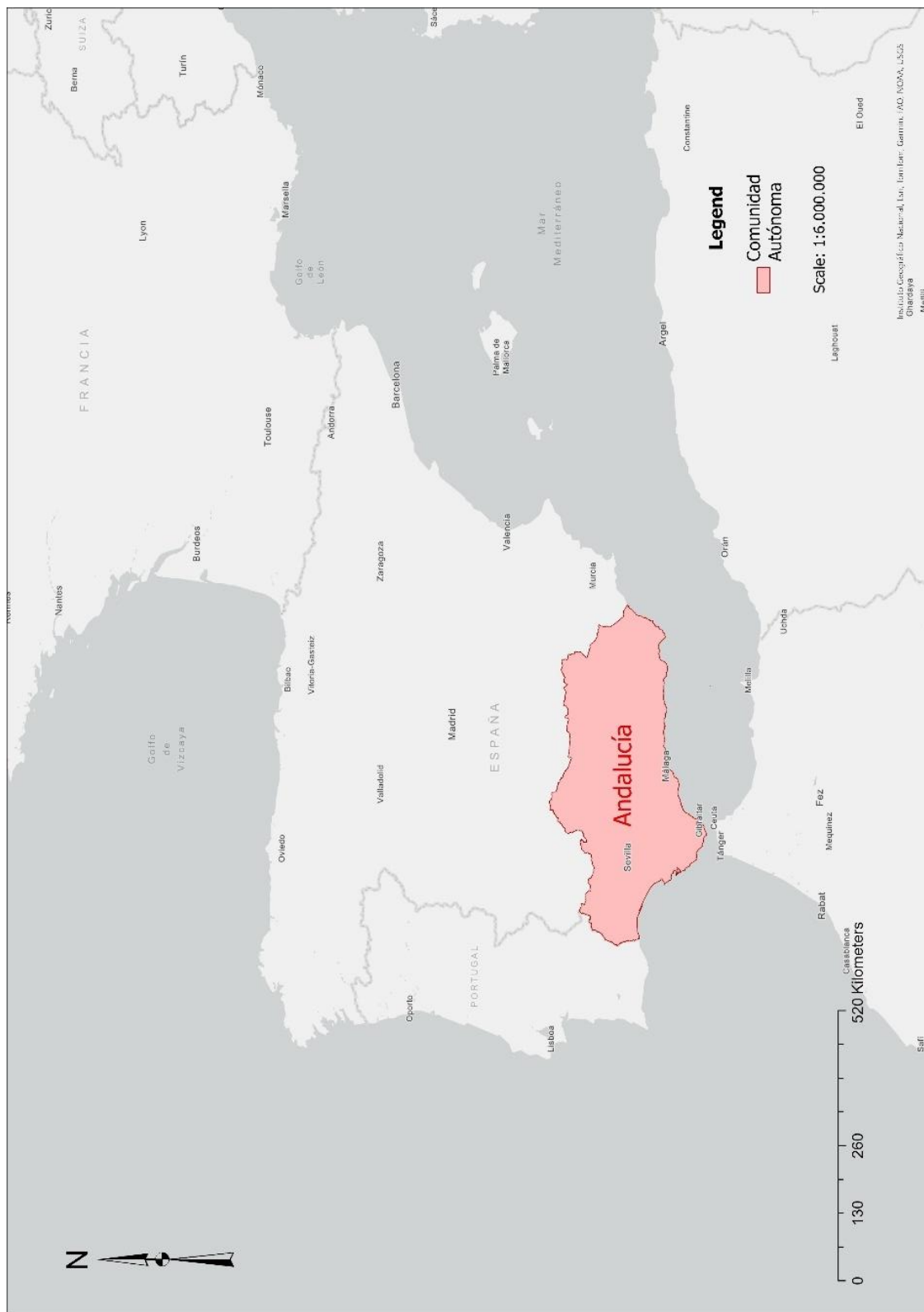


Ilustración 3.1 - Ubicación 1; Península Ibérica

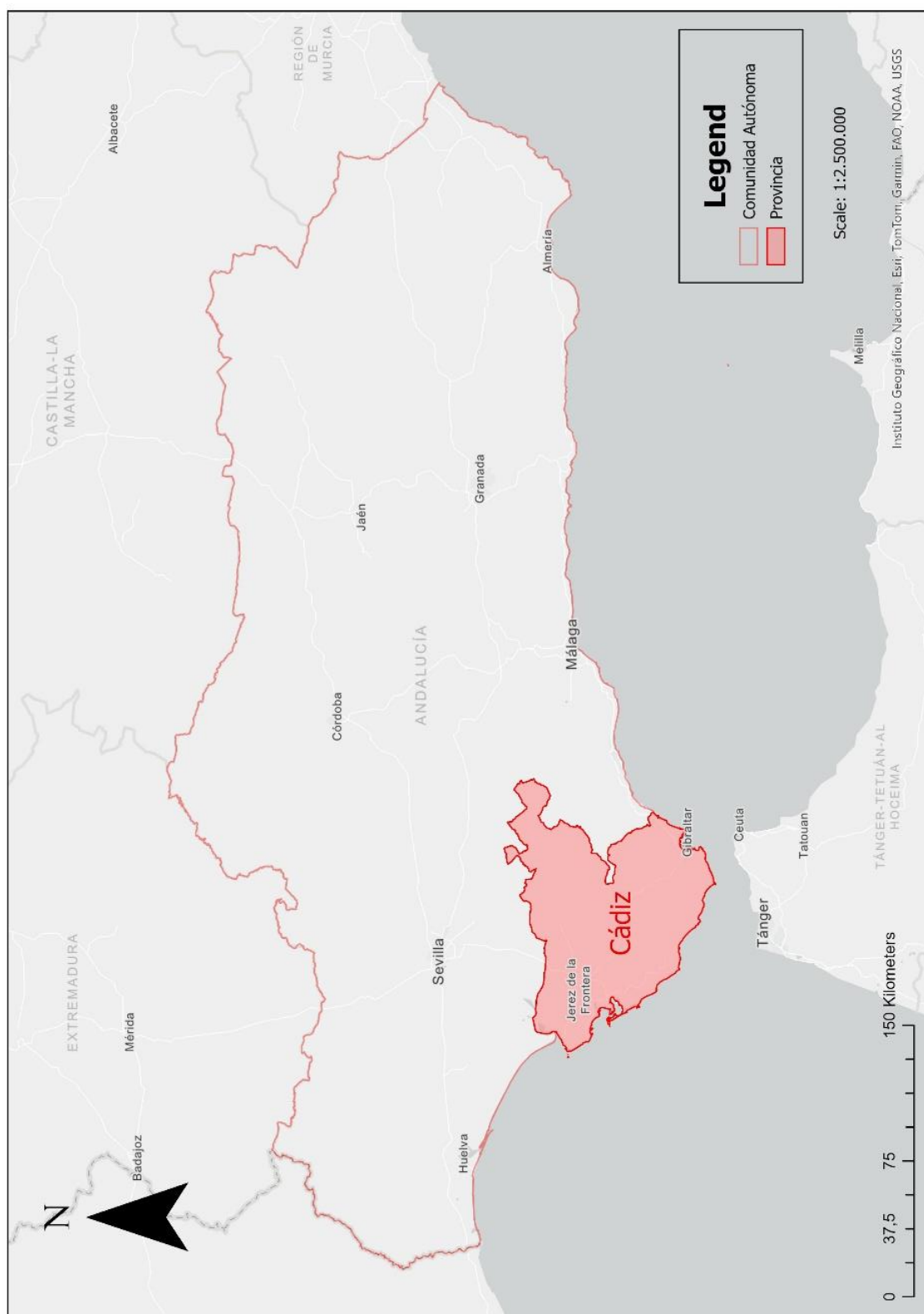


Ilustración 3.2 - Ubicación 2; Comunidad Autónoma de Andalucía

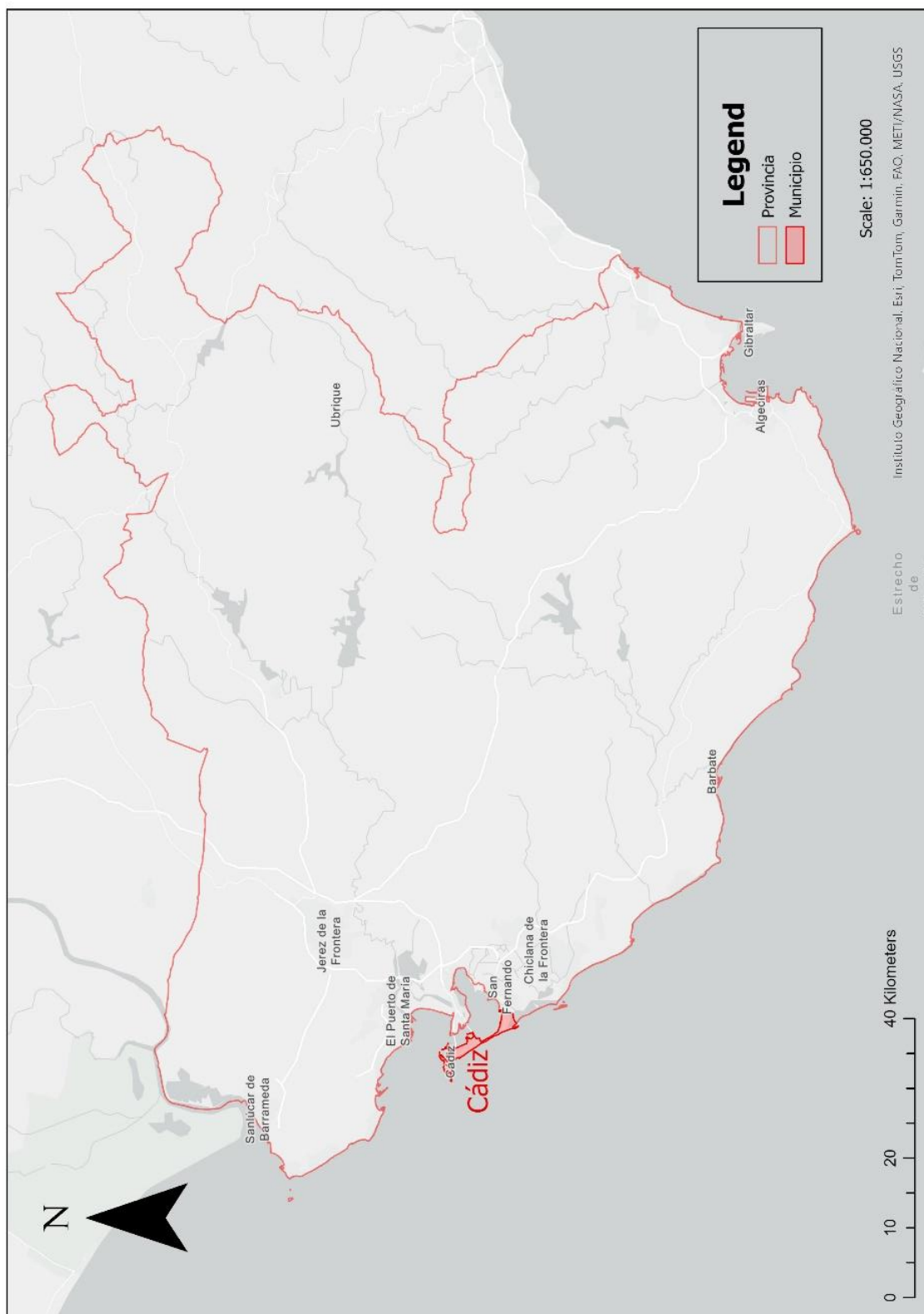


Ilustración 3.3 - Ubicación 3; Provincia de Cádiz

Con una población de 110.914 habitantes en 2024, según el Instituto Nacional de Estadística (INE), Cádiz se considera una ciudad de tamaño medio en el contexto urbano español.

El clima de Cádiz es mediterráneo marítimo, caracterizado por inviernos suaves y veranos cálidos. Las temperaturas medias oscilan entre los 12 °C en invierno y los 25 °C en verano, con la influencia del Atlántico moderando los extremos térmicos. La precipitación anual es de aproximadamente 520 mm, concentrándose principalmente entre los meses de noviembre y marzo. (AEMET, 2025)

La economía de Cádiz está fuertemente influenciada por su ubicación costera. Sus principales sectores económicos incluyen la actividad portuaria y la industria naval, especialmente la construcción y reparación de buques. El Puerto de la Bahía de Cádiz constituye un motor económico clave, ya que genera alrededor de 16.000 empleos y aporta más del 6 % del Valor Añadido Bruto de la provincia, consolidándose como un gran espacio industrial y de servicios con fuerte impacto en la comarca (*Federación Española de la Economía del Bien Común*, 2021).

Además, el turismo y el sector servicios desempeñan un papel fundamental, ya que Cádiz es un destino atractivo gracias a su riqueza histórica, sus playas y eventos culturales como el famoso Carnaval de Cádiz. De hecho, el turismo genera más de 143.000 empleos en la provincia y aporta aproximadamente un 16,7 % del PIB provincial de manera directa, alcanzando casi el 32 % si se consideran los efectos indirectos (*Diputación de Cádiz*, 2022). La industria aeroespacial también está presente en la región, con diversas plantas de producción en sus alrededores.

Por estas razones geográficas y económicas, Cádiz ocupa una posición singular dentro de Andalucía y España.

3.1.2. Estructura de la ciudad de Cádiz

La ciudad de Cádiz se ubica sobre un tómbolo que conecta la isla primitiva con el continente. La costa presenta un régimen mareal de tipo semidiurno, con un rango medio de 3,2 m en mareas vivas, lo que clasifica el litoral como mesomareal. La pleamar máxima (PMVE) puede alcanzar valores de hasta 1,8 m sobre el nivel medio del mar (*Puertos del Estado, 2025*). Con el fin de realizar la evaluación del riesgo asociado a tsunamis, el área de estudio se ha dividido en cinco zonas principales (véase Ilustración 3.5 - Área de estudio local, Casco urbano municipio Cádiz):

1. Casco Viejo
2. Puerto
3. Extramuros
4. Zona Industrial
5. Istmo/Cortadura



Ilustración 3.5 - Área de estudio local, Casco urbano municipio Cádiz

3.1.2.1. Zona 1: Casco Viejo

Situada al noroeste del municipio, corresponde al núcleo histórico de la ciudad. Se trata de una costa fuertemente urbanizada, con presencia de estructuras defensivas históricas y paseos marítimos que limitan con la línea de costa. En las ilustraciones 3.6 y 3.7 se observa tanto una vista aérea desde el norte como desde el oeste.

- Longitud aproximada (Playa de la Caleta): 500 m
- Anchura de playa: reducida (10–50 m), con variaciones según el sector
- Características: presencia de edificaciones históricas en primera línea, espacios de difícil evacuación debido a la trama urbana densa. La costa es rocosa en algunos tramos y reforzada con muros de contención.



Ilustración 3.6 - Playa la Caleta y Casco Viejo (InSpain.org)

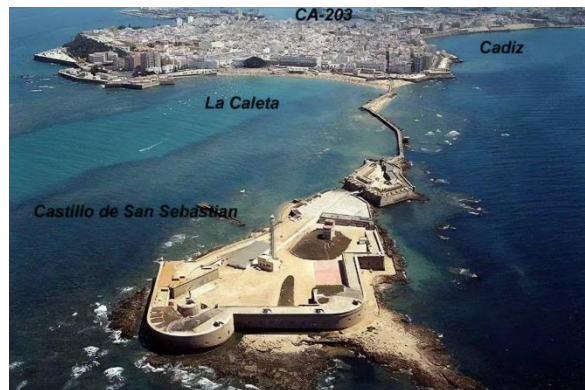


Ilustración 3.7 - Castillo de San Sebastián y Playa la Caleta (InSpain.org)

3.1.2.2. Zona 2: Puerto

Al este del Casco Viejo se ubica el área portuaria de Cádiz (Ilustración 3.8). Se trata de una franja litoral completamente transformada por instalaciones de carga, descarga y abrigo marítimo. Debido a su ubicación dentro de la bahía, el puerto se encuentra naturalmente protegido por la fachada de la isla de Cádiz.

- Playa: prácticamente inexistente, sustituida por muelles y diques
- Características: elevada exposición de infraestructuras portuarias críticas; la disposición de los diques puede influir en la propagación y reflexión de las olas de tsunami.

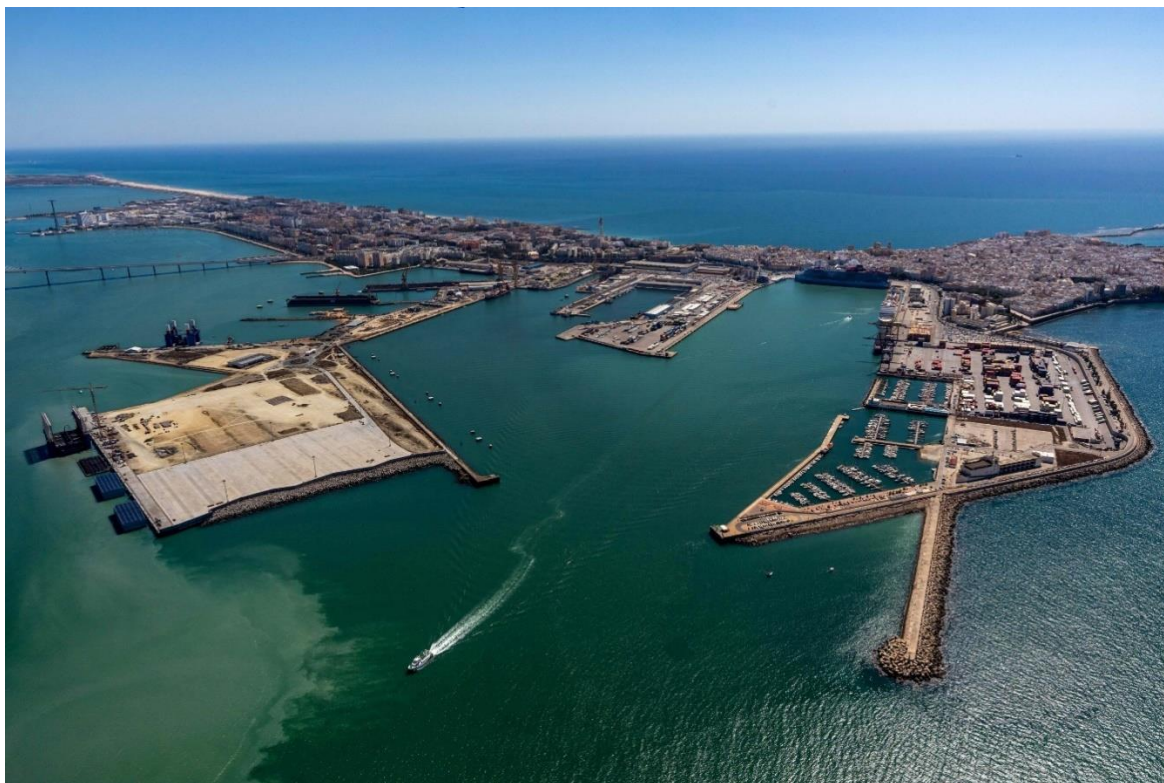


Ilustración 3.8 - Puerto de Cádiz (puertocadiz.com)

3.1.2.3. Zona 3: Extramuros

Al sur del Puerto se localiza la zona conocida como Extramuros, que presenta una mezcla de uso residencial y franjas arenosas.

En las ilustraciones 3.9 y 3.10 se observa una vista aérea de la Playa de Santa María del Mar, así como un perfil del límite del arenal. Se aprecia que la delimitación presenta un carácter poco natural debido a su construcción, aunque se ha generado ya una cierta diferencia de cota entre la playa y el paseo marítimo. A continuación de la Playa de Santa María del Mar se encuentra la playa de mayor extensión, la Playa de la Victoria, que aparece representada en la ilustración 3.11. Allí se aprecia, además, la proximidad de la edificación —principalmente bloques de viviendas de varias plantas— al borde mismo de la playa.

- Longitud aproximada (Playa de Santa María del Mar & Playa de la Victoria): 3 km
- Anchura de playa: 20–100 m, con tramos variables

- Características: playas de arena con fuerte uso recreativo, áreas residenciales directamente adyacentes a la costa. Baja protección natural frente al impacto de olas, lo que la hace especialmente vulnerable en caso de tsunami.



Ilustración 3.10 - Playa Santa María del Mar (InSpain.org)



Ilustración 3.9 - Perfil de la Playa Santa María del Mar (InSpain.org)



Ilustración 3.11 - Playa de la Victoria / Extramuros (InSpain.org)

3.1.2.4. Zona 4: Zona Industrial

Ubicada al sureste de Extramuros, constituye un sector con predominio de actividades industriales y logísticas. En el oeste persiste la edificación en bloques y la caracterización de la Playa de la Victoria (Ilustración 3.12) se prolonga, como se indicó en el apartado anterior, hasta el extremo sur de la isla.

- Longitud aproximada (Playa de la Cortadura): 1,2 km
- Anchura de playa: 15–100 m, en parte artificialmente estabilizada

- Características: costa reforzada con infraestructuras duras, limitada presencia de playas naturales. Potencial de daños económicos significativos ante un evento de inundación.



Ilustración 3.12 - Playa de la Victoria / Zona Industrial (InSpain.org)

3.1.2.5. Zona 5: Istmo/Cortadura

El tramo más meridional comprende el istmo (Ilustración 3.14) y la porción adyacente del continente (Ilustración 3.15). Esta zona presenta un desarrollo dunar destacado y playas extensas. Sin embargo, se encuentra a muy baja altitud sobre el nivel del mar. A pesar de los sistemas de dunas existentes, el riesgo de inundación es elevado, ya que la intervención humana ha modificado significativamente el área: en particular, la construcción de numerosos estanques para la extracción de sal reduce notablemente la función protectora natural.

- Longitud (Playa del Chato, Playa de Santibáñez & Playa de Torregorda: 5,5 km
- Anchura media: 50–100 m
- Sistema dunar: altura media entre 0,5–2,5 m, con máximos de hasta 4,5 m (*García, 2023*)
- Características: sector menos urbanizado, con presencia de dunas costeras que aportan cierto grado de protección natural. No obstante, la erosión y la baja tasa de aporte sedimentario comprometen la eficacia de esta defensa natural.



Ilustración 3.14 - Istmo de Cádiz (InSpain.org)



Ilustración 3.13 - Cortadura (InSpain.org)

3.1.3. Características oceanográficas

La zona marítima frente a la costa de Cádiz presenta una serie de características geográficas y oceanográficas que influyen en su dinámica marina. Cádiz se encuentra en el margen nororiental del océano Atlántico, en una región donde convergen diversas corrientes marinas y masas de agua con diferencias de temperatura y salinidad, lo que genera una hidrodinámica compleja. (Peliz *et al.*, 2009)

La circulación oceánica en esta región está influenciada por la corriente del Atlántico Norte y el intercambio de masas de agua en el Estrecho de Gibraltar, lo que da lugar a corrientes intensas y patrones de circulación diferenciados en distintas profundidades.

La batimetría del Golfo de Cádiz se caracteriza por una plataforma continental relativamente somera, acompañada de depresiones y montes submarinos, lo que influye en los procesos sedimentarios y la propagación de las olas. Estudios recientes basados en datos multihaz han documentado con detalle esta compleja morfología del fondo marino, destacando la presencia de cañones, relieves y montes submarinos en la región (Jiménez-Romero *et al.*, 2022). La reducción progresiva de la profundidad favorece el fenómeno de shoaling, aumentando la altura de las olas y su impacto en la costa.

Además, la presencia de canales submarinos y bancos de arena puede provocar efectos de refracción y concentración de energía en ciertas zonas, incrementando el riesgo de erosión e inundación ante eventos extremos como tormentas. Las actividades humanas también han modificado la dinámica costera y sedimentaria en la región. La construcción de infraestructuras portuarias, el dragado de canales de navegación y otras intervenciones han alterado la distribución de sedimentos y la circulación de las corrientes locales, influyendo en la evolución del litoral y en la estabilidad de los ecosistemas marinos.

3.2. GEOLOGÍA Y PELIGROSIDAD POR TSUNAMI EN EL GOLFO DE CÁDIZ

El Golfo de Cádiz es una región tectónicamente muy activa, caracterizada por la compleja interacción entre la placa euroasiática y la africana. Esta zona constituye una región de transición entre la placa abierta del Atlántico y el Mediterráneo, y presenta una gran variedad de estructuras geológicas formadas por el movimiento continuo de las placas tectónicas.

Una característica clave de la región es la denominada Zona de Fallas SWIM (Southwest Iberian Margin), un sistema de fallas de desgarre dextrales que se extiende a lo largo de 600 km y que ha sido interpretado como un posible nuevo límite de placa entre África e Iberia (Zitellini *et al.*, 2009). En el Esquema tectónico del Golfo de Cádiz (Ilustración 3.15) se muestran las principales estructuras tectónicas y deslizamientos de la región, así como fallas importantes presentes en la zona, como la Falla de Horseshoe, la Falla de Gorringe y la Falla del Banco Guadalquivir-Portimão (Vazquez, 2016).

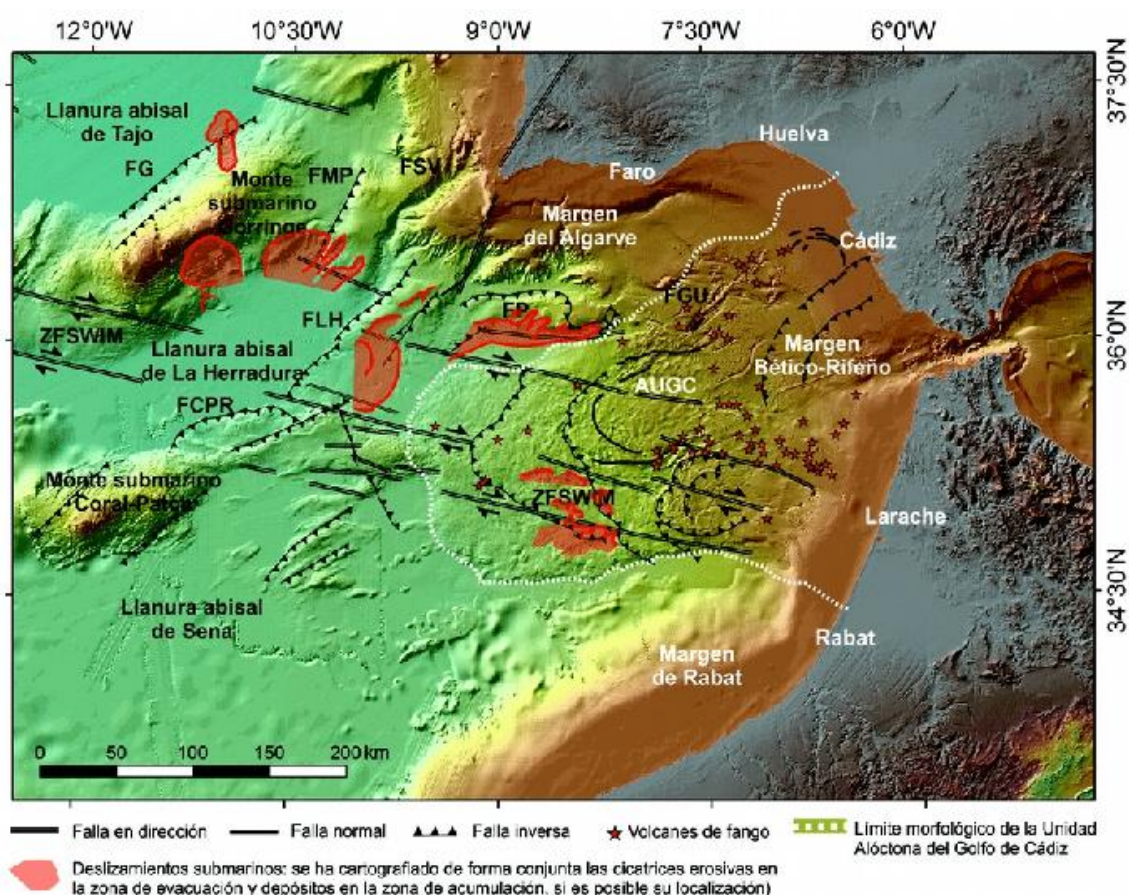


Ilustración 3.15 - Esquema tectónico del Golfo de Cádiz en el que se han cartografiado las principales estructuras tectónicas y deslizamientos de la región (Vazquez 2016).

La historia geológica del Golfo de Cádiz se remonta al Mesozoico, cuando la apertura del Atlántico Medio generó un margen pasivo con cuencas oceánicas profundas en el margen ibérico (*Maestro et al., 2015; Jiménez-Romero et al., 2022*). En etapas geológicas posteriores, la colisión entre las placas Africana y Euroasiática propició una fase compresiva desde el Eoceno/Mioceno, dando lugar al Orógeno Bético-Rifeño y al prisma de acreción del Golfo de Cádiz, caracterizado por cabalgamientos vergentes al oeste (*Medialdea et al., 2004; Druet et al., 2023*). Estos procesos tectónicos persisten en la actualidad, como lo evidencian las estructuras transpresivas activas del Arco de Gibraltar y la intensa actividad sísmica en la región.

Desde la perspectiva de la peligrosidad por tsunamis, muchas estructuras tectónicas activas en la región pueden estar asociadas con terremotos de gran magnitud. Estudios de Baptista y Álvarez han analizado el impacto del tsunami de Lisboa de 1755 y su posible efecto en áreas como Huelva y el estuario del Tajo, aportando información clave sobre la dinámica de estos eventos (*Baptista & Álvarez, 2010; Baptista et al., 2011*). Esto resalta la importancia de identificar fallas activas y su posible papel en futuros eventos tsunamigénicos.

3.3. EVENTOS HISTÓRICOS

La actividad sismotectónica en la región del Golfo de Cádiz está bien documentada históricamente y pone de manifiesto un riesgo recurrente de terremotos y tsunamis que debe considerarse relevante también en el futuro.

El 1 de noviembre de 1755 tuvo lugar uno de los eventos sísmicos más graves registrados en Europa occidental: un terremoto de magnitud 8,5 frente a la costa de Lisboa generó un tsunami de gran extensión que afectó a amplias zonas del litoral atlántico, incluyendo Portugal, España y Marruecos. En Cádiz se registraron alturas de ola de hasta 18 metros (*Heck, 1947*), con especial afectación en los barrios próximos al mar y en la desembocadura del Guadalquivir. Como consecuencia del tsunami, se produjeron importantes daños materiales y la muerte de aproximadamente 1.000 personas (*Campos, 1991*). Un testigo presencial describió como “*la ola golpeó las murallas y arrastró bloques de ocho o diez toneladas a más de cuarenta metros de distancia*” (*Berwick, 1755*), reflejando la enorme energía del fenómeno.

Las aguas penetraron incluso hasta la ciudad de Sevilla a través del cauce del río. A lo largo de la costa suroeste de la península ibérica, se documentaron alturas de ola de hasta 15 metros (*Baptista et al., 1997*). Este evento representa un punto de inflexión significativo tanto en la historia geológica como en la percepción social del riesgo en la región.

Tan solo seis años después, el 31 de marzo de 1761, se produjo otro terremoto de magnitud 8,5 en las proximidades del suroeste del Golfo de Cádiz. Este evento también generó un

tsunami, cuyos efectos se observaron en varios sectores costeros. En el sur de Portugal se registró un run-up de hasta 2,4 metros (*Baptista et al., 2006*). Si bien no existen datos precisos sobre la altura de las olas en Cádiz, las fuentes históricas mencionan importantes fluctuaciones del nivel del mar en localidades como Ayamonte y El Puerto de Santa María (*Wronna et al., 2019*). La localización del epicentro y los efectos observados evidencian que este evento también presentó un alto potencial tsunamigénico.

En épocas más recientes, se han registrado en la zona nuevos eventos sísmicos que, aunque de menor magnitud y con efectos mucho más moderados, también han generado tsunamis. Cabe destacar los ocurridos en 1969, 1975 y 1978. El tsunami de 1975, por ejemplo, alcanzó la costa de Cádiz 144 minutos después del sismo generador, con una amplitud máxima de tan solo 28 cm (*Campos, 1991*). Estos eventos recientes demuestran que la actividad sísmica en el Golfo de Cádiz persiste, y que los procesos tectónicos actuales continúan siendo capaces de generar tsunamis, aunque de menor escala.

El análisis de los eventos históricos y recientes permite concluir que el Golfo de Cádiz constituye una zona geodinámicamente activa, donde tanto los grandes terremotos como sus efectos secundarios, entre ellos los tsunamis, pueden producirse de forma cíclica. A la luz de los acontecimientos de 1755 y 1761, así como de la actividad sísmica continuada durante el siglo XX, es razonable considerar que la amenaza de futuros tsunamis en la región sigue siendo real y no debe subestimarse.

4. EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD POR TSUNAMI EN CÁDIZ

4.1. METODOLOGÍA

El presente estudio adopta un enfoque determinista para la modelación numérica de tsunamis, en el cual se parte de eventos sísmicos específicos previamente definidos, tal como se indica en el capítulo 4.3. En concreto, se han considerado cuatro escenarios distintos de generación de tsunami, cada uno asociado a un deslizamiento sísmico (falla) particular. Estos eventos han sido seleccionados y parametrizados con base en criterios geológicos y tectónicos representativos de la región de estudio.

El objetivo principal consiste en elaborar cartografía de peligrosidad para cada uno de estos eventos, incluyendo información sobre profundidad de inundación, arrastre y tiempo de llegada de la ola. Dichas cartas se generan inicialmente bajo el escenario de marea alta, al considerarse la condición más desfavorable para la ciudad.

Con el fin de evaluar la influencia de la marea en el impacto costero, se implementan dos metodologías complementarias:

1. Simulación directa con condiciones de marea realistas, considerando dos estados extremos:
 - Marea baja -1,5 (low tide)¹
 - Marea alta + 1,5 (high tide)¹
2. Suma lineal: en este caso, los resultados obtenidos bajo condiciones de marea baja se combinan posteriormente con valores de altura de marea fijos, representando distintos niveles de marea mediante una superposición lineal.

Este enfoque permite comparar dos maneras distintas de incorporar la marea al análisis: mediante simulación explícita frente a un tratamiento más simplificado. Asimismo, en algunos sectores seleccionados de la ciudad, los resultados obtenidos con ambas metodologías se contrastan de forma detallada para evaluar su plausibilidad.

¹ No se trata de los valores máximos de la marea, sino de los valores promedio de los intervalos máximos de la distribución general de mareas elegido (véase ANEXO I: Distribución general de mareas en Cádiz).

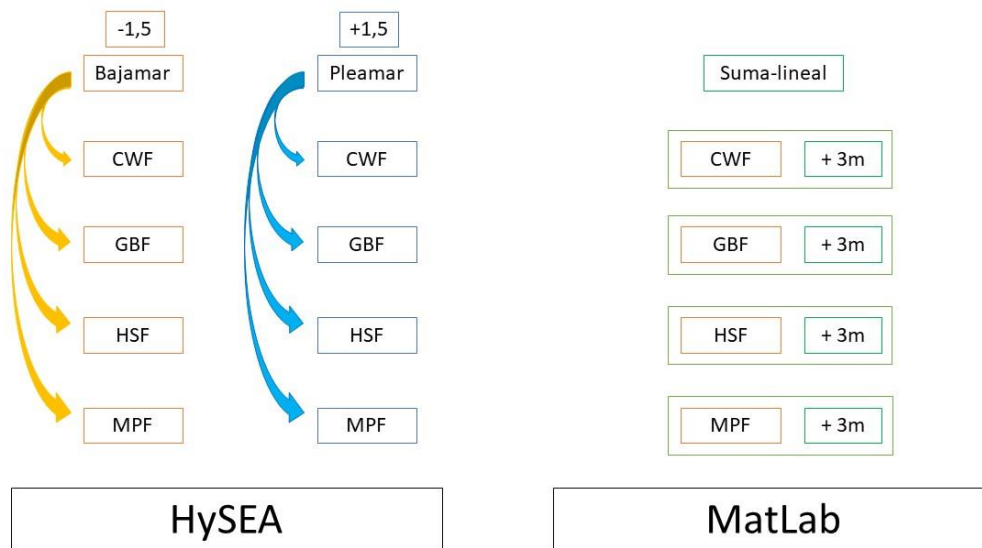


Ilustración 4.1 - Esquema flujo de trabajo

En consecuencia, el número total de simulaciones realizadas es de:

- 8 simulaciones numéricas completas (4 eventos $\times$ 2 condiciones de marea: baja y alta)
- Escenarios adicionales derivados por suma lineal, basados en los resultados de marea baja.

Posteriormente, se lleva a cabo un análisis comparativo entre los resultados obtenidos bajo condiciones de marea alta y aquellos derivados de la suma lineal. Asimismo, los resultados deterministas se contrastan con modelaciones de base probabilista, con el fin de situar las simulaciones generadas de manera determinista dentro de un marco probabilístico y asociarlas a un determinado nivel de ocurrencia. De esta manera, se presentan ambas aproximaciones —determinista y probabilista— con el propósito de identificar sus alcances metodológicos, sus posibles limitaciones y las diferencias que puedan observarse en las zonas de estudio.

4.2. RELIEVE

El relieve, es decir, el archivo que contiene la batimetría y la topografía fue proporcionado por el IHCantabria, garantizando así la homogeneidad de la base para eventuales comparaciones posteriores.

Existen diferentes archivos de relieve para los distintos escenarios, ya que en el software Tsunami-HySEA los valores positivos representan puntos situados bajo el nivel del agua, mientras que los valores negativos corresponden a la topografía emergida. La superficie del agua se define mediante el valor 0.

Dado que se analizan diferentes condiciones de marea, el valor cero se encuentra asociado a distintas cotas en cada caso.

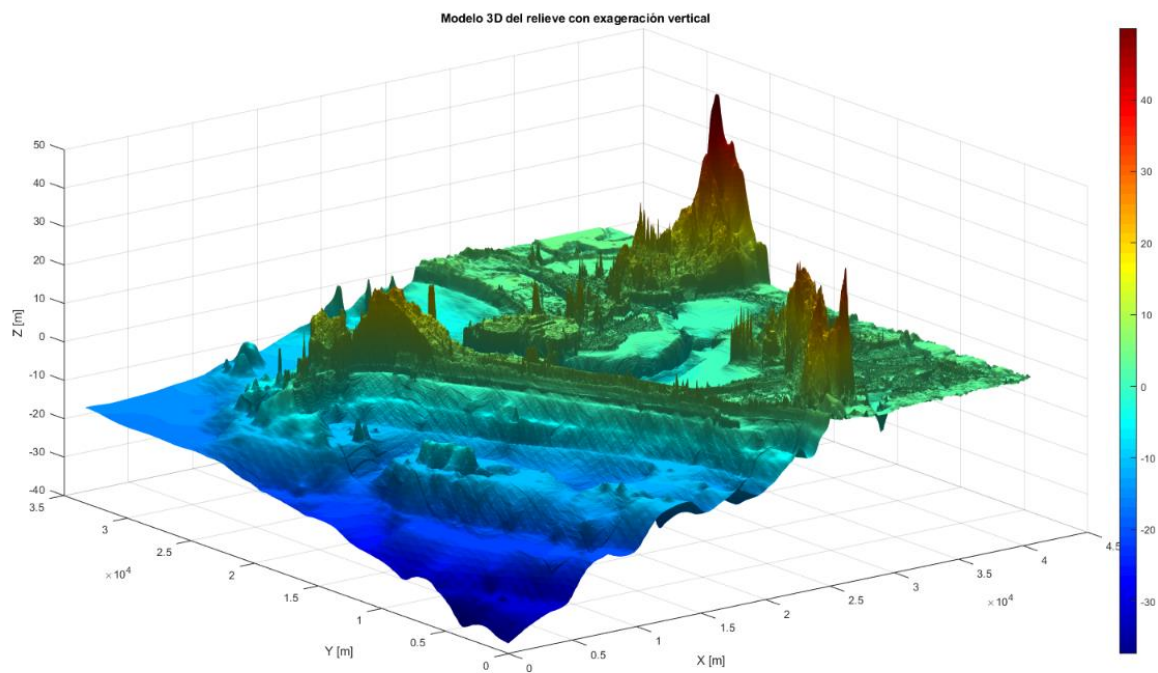


Ilustración 4.2 - Modelo 3D con valores Z invertidos y exageración vertical

4.3. CARACTERIZACIÓN EVENTOS TSUNAMIGÉNICOS

Como se describió en el capítulo anterior "GEOLOGÍA Y PELIGROSIDAD POR TSUNAMI EN EL GOLFO DE CÁDIZ", los eventos tectónicos pueden ser causados por diferentes fallas. Estas serán descritas en detalle en las siguientes secciones.

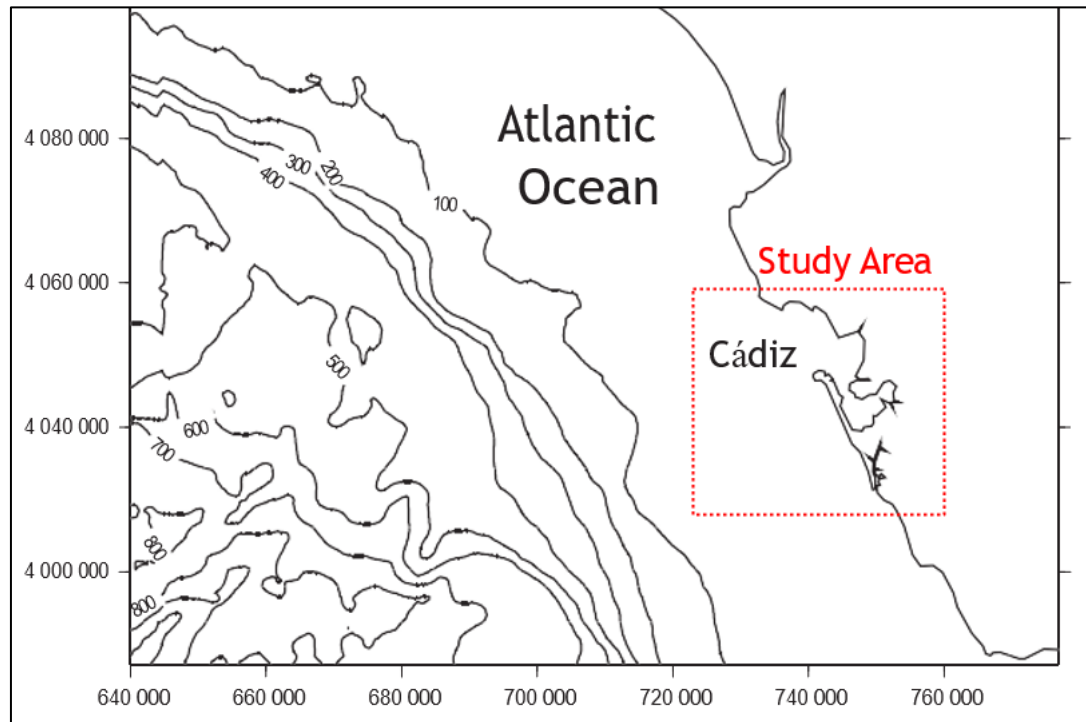


Ilustración 4.3 - Área de estudio y batimetría en el golfo de Cádiz. V. V. Lima 2010

4.3.1. Cádiz Wedge Fault

El Cádiz Wedge Fault (CWF) es una falla de cabalgamiento de bajo ángulo ($\sim 10^\circ$) ubicada dentro del prisma de acreción del Golfo de Cádiz, en la zona de convergencia entre las placas euroasiática y africana. Su orientación predominante es NNW–SSE (strike $\sim 339^\circ$), y el mecanismo de deslizamiento es inverso puro (rake $\sim 90^\circ$), lo que indica una compresión activa en la región (Lima et al., 2010; Gutscher et al., 2009).

El CWF es considerado una fuente sísmica importante, con el potencial de generar un evento sísmico significativo en la región. Modelos recientes sugieren que una ruptura completa de este plano de falla podría producir un terremoto de hasta M_w 8,75, un escenario de máxima magnitud basado en investigaciones previas (Bencheikroun & El Mouraouah, 2018). Este tipo de sismo tiene el potencial de generar un tsunami devastador que podría afectar las costas del sur de la Península Ibérica, particularmente las áreas cercanas a la

ciudad de Cádiz. Además, debido a la proximidad del epicentro a la costa, la ventana de tiempo para la llegada de las olas sería extremadamente corta, lo que requiere una pronta respuesta para mitigar los efectos catastróficos de este evento.

4.3.2. Horseshoe Fault

La Horseshoe Fault (HSF) es una falla de deslizamiento inverso ubicada en la margen suroeste de la Península Ibérica, en el Océano Atlántico. Esta falla forma parte de una estructura compleja asociada al levantamiento de la cuenca del Golfo de Cádiz, y su orientación predominante es NNE–SSW (strike $\sim 48^\circ$) con un ángulo de inmersión de aproximadamente 30° . El mecanismo de deslizamiento de la falla es inverso puro, lo que indica una compresión activa en la región (*Martínez-Loriente et al., 2018*).

Con una longitud de aproximadamente 109 km, la Horseshoe Fault se extiende a lo largo de la margen suroeste de la Península Ibérica, afectando tanto las zonas marinas como el fondo marino profundo (*Martínez-Loriente et al., 2018*). Esta falla es una fuente sísmica de considerable importancia y se ha identificado como un factor potencial para eventos sísmicos significativos en la región. Se estima que un evento de ruptura completa en la falla podría generar un terremoto de magnitud máxima M_w 8,5 (*Martínez-Loriente et al., 2021*), lo que lo convierte en un foco de potencial riesgo sísmico. Además, debido a su proximidad a la costa, los tsunamis generados por este tipo de sismos podrían afectar rápidamente las áreas cercanas.

A pesar de que la actividad sísmica en la falla es relativamente poco frecuente, la magnitud de los eventos y la corta distancia al litoral suroeste de la Península Ibérica hacen que este sistema de fallas sea una fuente de preocupación para la evaluación del peligro sísmico y tsunami en la región.

4.3.3. Marquês de Pombal Fault

La falla Marquês de Pombal (MPF) se localiza en la margen suroeste de la península ibérica, con una orientación promedio de $21^\circ \pm 5^\circ$ y una inclinación de $24^\circ \pm 5^\circ$ (*Martínez-Loriente et al., 2018*). Muestra un movimiento reverso con una tasa de deslizamiento vertical de 0,368 m/ky (*Serra et al., 2020*) y una longitud de aproximadamente 66 km. La falla está activa en el Cuaternario, con expresiones superficiales y depósitos de transporte masivo que sugieren una relación con el terremoto de Lisboa de 1755 (*Vizcaino, 2009*).

La profundidad estimada es de 40-50 km, y podría estar conectada con la falla Horseshoe en el sur (*Martínez-Loriente et al., 2018*). El desplazamiento neto es de aproximadamente 0,906 m/ky (*Gràcia et al., 2010*). Esta estructura geológica sigue siendo una fuente importante de actividad sísmica y representa un posible riesgo de tsunami para la región.

4.3.4. Gorringe Bank Fault

La Gorringe Bank Fault (GBF) es una estructura tectónica activa ubicada al sur de la Península Ibérica, con una orientación de 60° y un ángulo de inmersión de $55^\circ \pm 15^\circ$ (Lima et al., 2010). Con una longitud de 124 km a 200 km, esta falla de deslizamiento inverso se extiende desde el fondo marino hasta profundidades de hasta 50 km en el subsuelo (Grevenmeyer et al., 2017).

Aunque no se ha establecido una tasa de deslizamiento precisa, la actividad sísmica reciente sugiere que sigue siendo activa. Se estima que podría generar terremotos de hasta M_w 8,7, lo que representa un significativo riesgo sísmico para la región (Grevenmeyer et al., 2017). Esta falla es particularmente relevante debido a su potencial para generar tsunamis devastadores en las costas cercanas.

4.3.5. Resumen de fallas consideradas

En la siguiente tabla se resumen de manera clara los diferentes eventos con sus características.

N°	Ref	Length [m]	Width [m]	h_{Foc} [m]	h_{hypo} [m]	Lat	Long	Strike	Dip	Rake	Slip	M_w
1	CWF	170 000	200 000	5 000	13 000	34,53	-9,121	349	5	90	20	8,75
2	HSF	165 000	70 000	5 000	25 000	35,796	-9,913	42,1	35	90	15	8,5
3	MPF	110 000	70 000	5 000	27 943	36,656	-10,2	20,1	35	90	8	8,5
4	GBF	200 000	80 000	5 000	25 000	36,283	-11,35	53	35	90	10	8,7

Tabla 4.1 - Total de las fallas tectónicas

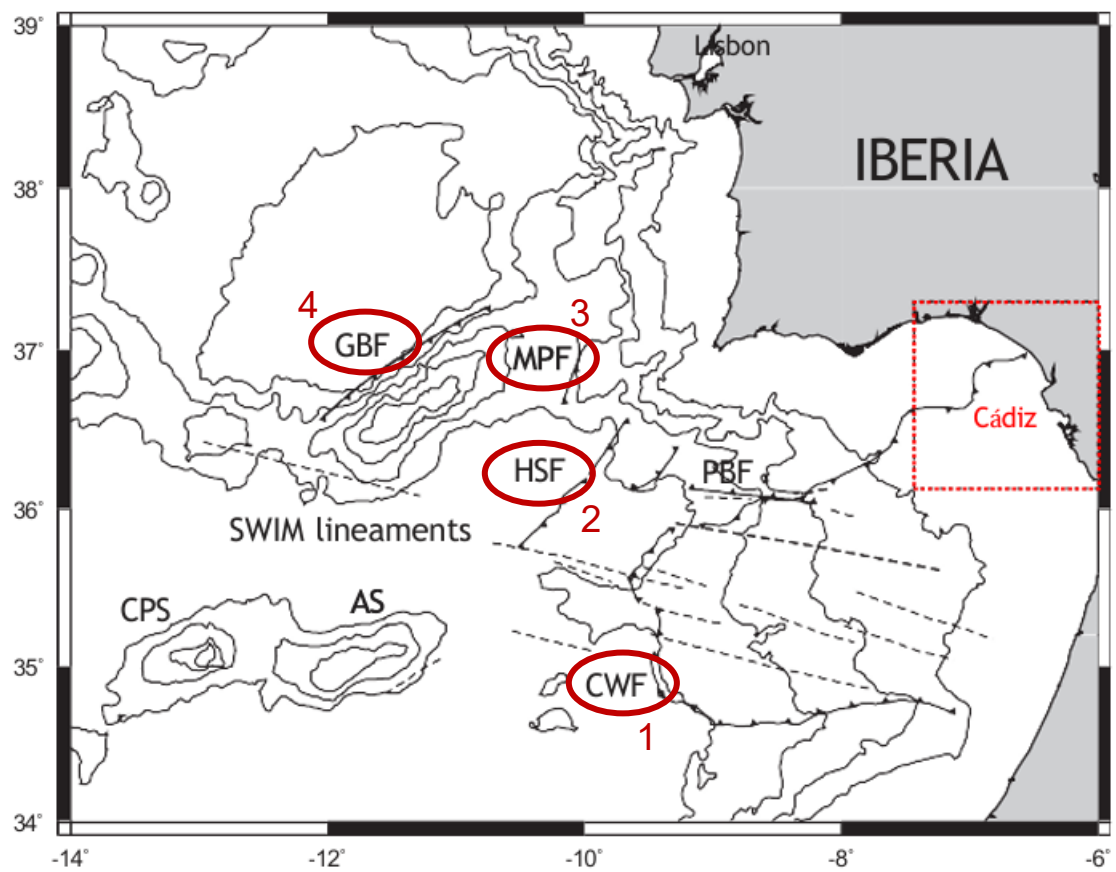


Ilustración 4.4 - Visión general de las diferentes fallas tectónicas V. V. Lima 2010

5. MODELACIÓN NUMÉRICA

5.1. MODELO Tsunami-HySEA

Tsunami-HySEA es un modelo numérico desarrollado por el grupo EDANYA de la Universidad de Málaga (UMA), específicamente diseñado para la simulación de tsunamis generados por terremotos. Forma parte de la familia de códigos Tsunami-HySEA y está optimizado para ejecutarse en GPU (procesadores gráficos), permitiendo simulaciones más rápidas que en tiempo real (FTRT, Faster Than Real Time).

Este modelo integra en un mismo código las tres fases de un tsunami: generación, propagación e inundación costera. Para la etapa de generación, se utiliza el modelo de deformación de fallas de *Okada (1985)*, que permite simular la deformación inicial del fondo marino tras un terremoto.

5.1.1. Modelo físico y ecuaciones fundamentales

Tsunami-HySEA resuelve el sistema de ecuaciones de aguas someras (shallow water equations), que describe la evolución del espesor de la columna de agua y el flujo másico horizontal. Las variables principales son:

- $h(x, t)$: altura total del agua (espesor de la columna de agua),
- $H(x)$: profundidad del fondo marino,
- $\eta(x, t) = h(x, t) - H(x)$: altura de la superficie libre,
- $q(x, t) = (q_x, q_y)$: flujo de masa,
- $u(x, t)$: velocidad media verticalmente integrada.

La relación entre flujo y velocidad es:

$$q(x, t) = h(x, t) * u(x, t)$$

El sistema se expresa como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -g h \frac{\partial H}{\partial x} + S_x$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) = -g h \frac{\partial H}{\partial y} + S_y$$

donde g es la aceleración de la gravedad, y S_x , S_y representan los términos de fricción.

5.1.1.1. Modelado de la fricción

Existen dos formulaciones para la fricción:

1. Ley de Manning:

$$S_x = -gh * \frac{M_n^2 u_x |u|}{h^{4/3}}, \quad S_y = -gh * \frac{M_n^2 u_y |u|}{h^{4/3}}$$

donde $M_n > 0$ es el coeficiente de Manning.

2. Ley cuadrática:

$$S_x = -c_f u_x |u|, \quad S_y = -c_f u_y |u|$$

donde $c_f > 0$ es el coeficiente de fricción. En todas las pruebas numéricas presentadas en este informe se utiliza la ley de Manning.

5.1.1.2. Generación del tsunami

La generación del tsunami se modela a partir del modelo de deformación de fallas de *Okada (1985)*, que calcula la deformación del fondo marino causada por un deslizamiento sísmico. Esta deformación se transfiere de forma instantánea a la superficie del mar como condición inicial para las ecuaciones de aguas someras. Se pueden combinar múltiples planos de falla con diferentes tiempos de activación para simular el proceso de ruptura completo.

5.1.1.3. Extensiones del modelo

Una versión extendida de Tsunami-HySEA incluye efectos dispersivos, basados en una generalización del modelo de *Yamazaki et al. (2009)*, donde se conserva el término vertical hw_t . También se incorpora un criterio de rompimiento de ola basado en una aproximación de viscosidad turbulenta (*Roeber et al., 2010*).

5.2. MALLA

Para la implementación del modelo numérico Tsunami-HySEA, se han empleado un total de cuatro dominios anidados (ventanas) con distinta resolución espacial, proporcionados y preconfigurados por el equipo técnico de IHCantabria. Estos dominios permiten capturar el fenómeno con distintos niveles de detalle, desde la escala regional hasta zonas muy localizadas con alta precisión.

Cada ventana, o "malla", se caracteriza por una resolución (anchura de píxel) específica:

- Malla 0: resolución de 320 metros por píxel
- Malla 1: resolución de 160 metros por píxel
- Malla 2: resolución de 80 metros por píxel
- Malla 3: resolución de 5 metros por píxel

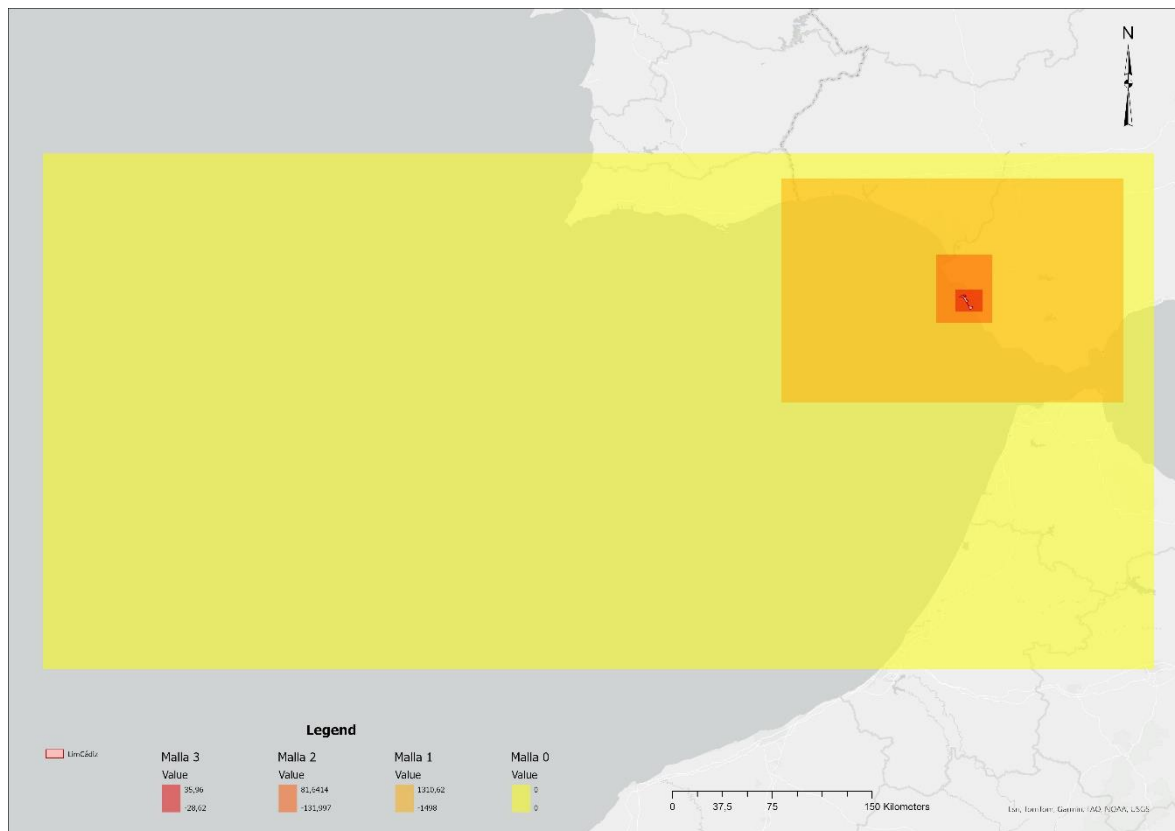


Ilustración 5.1 - Dimensión de las mallas usadas

Estas resoluciones han sido definidas de forma jerárquica y coherente, de modo que cada malla tiene una resolución que es un múltiplo exacto de la siguiente. Esta relación evita solapamientos asimétricos entre las ventanas y garantiza una transición suave de información entre los distintos niveles de resolución espacial.

El uso de una estructura anidada permite al modelo resolver de forma eficiente los procesos a distintas escalas: desde la generación y propagación del tsunami en mar abierto hasta su interacción con la costa y áreas urbanas en alta resolución.

En las siguientes figuras se presentan visualmente las distintas mallas utilizadas, incluyendo su ubicación geográfica y cobertura espacial.

5.3. FORMATOS Y PROCESAMIENTO DE SALIDA

El formato de salida del software Tsunami-HySEA es un archivo NetCDF. Para visualizar este archivo y georreferenciarlo correctamente, se convirtió en un ráster TIFF mediante la herramienta correspondiente en ArcGIS Pro.

De este modo, es posible cargar los diferentes escenarios de inundación y realizar una comparación detallada entre los distintos rásteres. Además, los rásteres pueden recortarse, combinarse entre sí o modificarse con diferentes paletas de colores para facilitar la comparación visual.

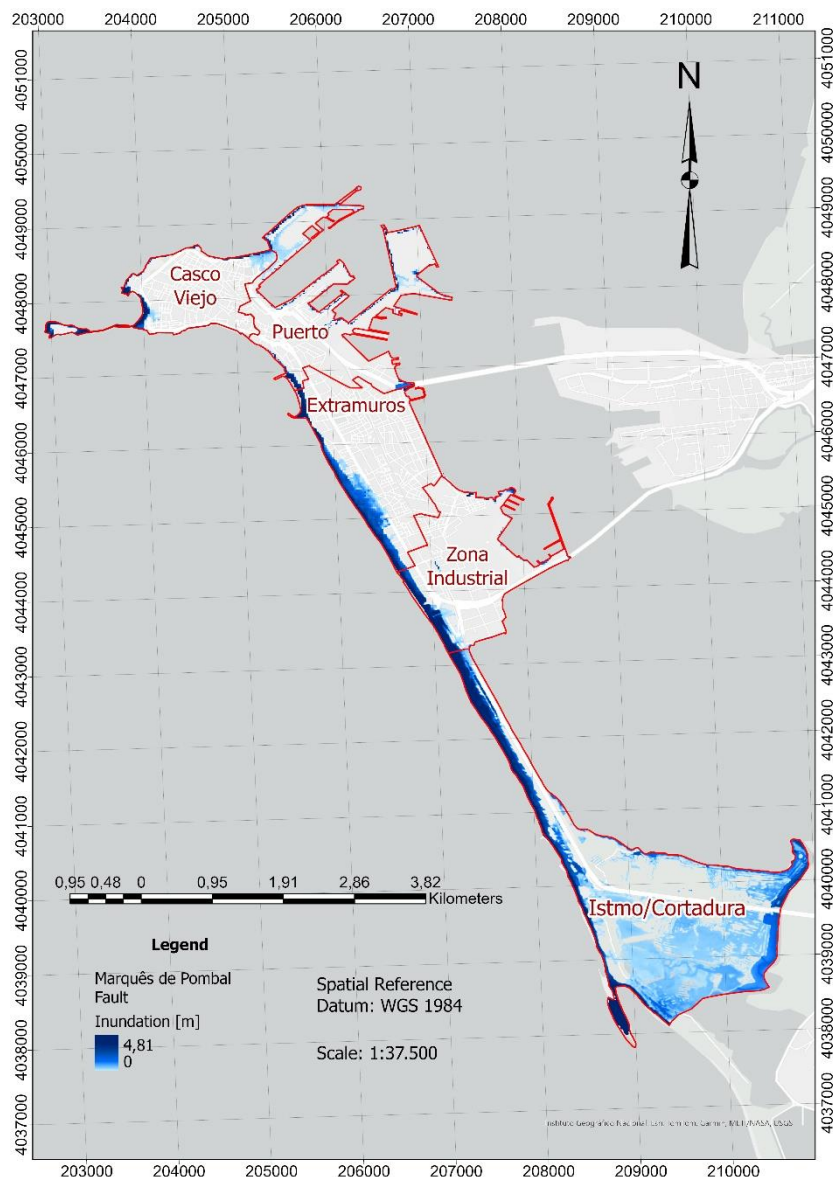


Ilustración 5.2 - Vista previa del escenario de inundación "Marquês De Pombal Fault"

Además de la superficie de inundación, es posible representar otras variables, como por ejemplo el tiempo de llegada del tsunami. Estas diferentes representaciones se muestran en el capítulo siguiente.

5.4. SUMA LINEAL

Para determinar la extensión de la inundación mediante el método de suma lineal, se desarrolló un programa en MATLAB, el cual toma como base la batimetría y la inundación modelada en condiciones de marea baja. Una simple adición del diferencial de marea al ráster únicamente produce una modificación en los valores Z, sin generar, sin embargo, una expansión de la superficie inundada en las direcciones X e Y.

Por esta razón, se implementó un procedimiento simplificado que calcula los niveles de agua píxel por píxel. Como base se utilizó la ventana de detalle Malla 3, descrita en la sección anterior (0), compuesta por 4056 x 3336 píxeles.

El algoritmo recorre de manera secuencial cada fila de píxeles y eleva el nivel del agua de forma lineal hasta alcanzar la cota deseada. Una vez que el nivel original del agua entra en contacto con el terreno, es decir, cuando no se genera más inundación en ese punto, el nuevo nivel se fija en 3 m (correspondientes a la diferencia entre marea baja y marea alta). Posteriormente, el proceso continúa iterando en los píxeles adyacentes hasta que este nuevo nivel de agua vuelve a intersectar con la topografía.

Este procedimiento se repite paso a paso en las 3336 filas que conforman la malla. El código correspondiente desarrollado en MATLAB se incluye en el Anexo VII de este documento.

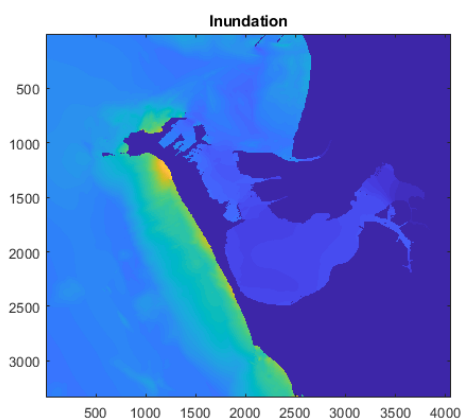


Ilustración 5.3 - MatLab ilustración inundación previa

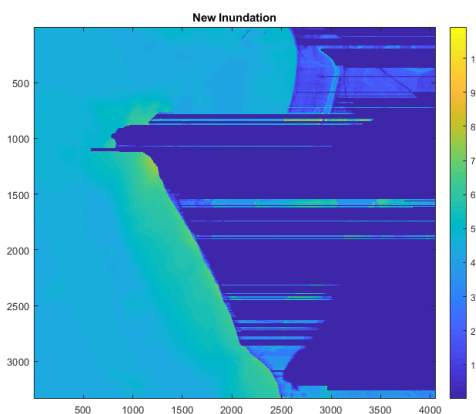


Ilustración 5.4 - MatLab ilustración inundación suma lineal

En las figuras se muestran tanto la inundación correspondiente a la marea baja como la nueva inundación calculada mediante el método de suma lineal. En ellas se aprecia claramente la presencia de píxeles aislados y la propagación de la inundación fila por fila. De este modo, el modelo únicamente genera, en la práctica, la expansión de la inundación en la dirección X.

Además, el modelo no es capaz de recalcular la propagación en los puntos donde la superficie ya ha sido inundada previamente, aunque en otras partes de la misma fila existan nuevamente masas de agua, ni puede ejecutar la propagación en la dirección opuesta.

Por estas razones, en los pasos siguientes se restringe el área de análisis a la costa occidental de la ciudad de Cádiz, con el fin de concretar la comparación entre los distintos métodos.

6. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados de las simulaciones de los escenarios de falla previamente definidos. Es importante destacar que el presente trabajo se enmarca en un análisis determinista, el cual considera en cada ejecución la situación más desfavorable en cada punto de la malla de cálculo.

Los mapas empleados en este trabajo corresponden a mapas agregados, contruidos a partir de la envolvente de los diferentes escenarios simulados. Estos no representan un único evento puntual, sino una aproximación al conjunto de condiciones más adversas que podrían presentarse en cada punto del dominio. Si bien esta forma de representación permite identificar de manera clara las zonas potencialmente más afectadas, también es importante señalar que no equivale necesariamente a un “peor escenario absoluto”. La utilidad de estos mapas radica en ofrecer una visión comparativa entre escenarios y facilitar la localización de áreas especialmente vulnerables, aunque sus resultados deben interpretarse con cautela, teniendo en cuenta las limitaciones del enfoque.

Los mapas elaborados a escala local forman parte de la evaluación de la peligrosidad en el área de estudio. Su utilidad principal es servir de base para diseñar medidas de mitigación y apoyar la planificación ante emergencias por maremotos.

En los apartados siguientes se analizan de forma individual las principales variables de interés —elevación máxima de la superficie libre, profundidad de inundación, arrastre, y tiempo de llegada— con el fin de caracterizar en detalle la peligrosidad asociada a cada escenario.

6.1. ELEVACIÓN MÁXIMA DE LA SUPERFICIE LIBRE (η)

En la ilustración 6.1 se presenta el mapa agregado de elevación de la superficie libre de inundación (η), expresado en metros sobre la cota de pleamar. Esta variable representa el run-up máximo alcanzado en los distintos sectores del litoral urbano e industrial de Cádiz bajo el escenario determinista más desfavorable.

Los resultados muestran una distribución espacial heterogénea de la inundación, con valores de η comprendidos entre 0,5 m y 12,5 m, según la escala de la leyenda. La máxima elevación se concentra en el frente atlántico central, particularmente en el tramo La Victoria–Santa María del Mar, donde se alcanzan hasta 12,5 m. En el sector meridional de Extramuros se identifican además bolsas interiores con η de hasta ~8 m. Asimismo, en el ámbito del istmo y en el sector occidental de Cortadura se registran valores de magnitud comparable, evidenciando la alta exposición de esta franja litoral.

En La Caleta los valores son menores, del orden de 6–7 m en el ámbito de playa. Las inundaciones moderadas ($\eta \approx 3\text{--}5$ m) se distribuyen principalmente en el Casco Viejo, en el interior de Extramuros y en la Zona Industrial, así como en Cortadura. Las zonas relativamente menos afectadas corresponden al sistema portuario — tanto el puerto principal al norte como las dársenas del área industrial — y a los sectores orientales del istmo de Cortadura, donde se registran valores bajos en comparación con el resto del litoral.

En términos de extensión horizontal, la inundación penetra de forma más acusada en el litoral oeste, alcanzando distancias del orden de varias centenas de metros tierra adentro, especialmente en la playa de La Victoria. En cambio, las áreas más orientadas hacia el interior de la bahía experimentan una propagación más lenta y una elevación de menor magnitud, debido al efecto de fricción y disipación generado tras el primer impacto en el frente occidental.

En síntesis, los resultados ponen de manifiesto que los sectores más críticos en Cádiz frente a la inundación por tsunami corresponden a las zonas costeras abiertas al Atlántico, donde se concentran los mayores valores de run-up, mientras que los sectores más orientados a la bahía, pese a presentar menores cotas de inundación, mantienen un riesgo latente debido a la vulnerabilidad del istmo y a su reducida elevación sobre el nivel del mar.

En el ANEXO III se presentan los mapas de elevación de la superficie libre de inundación de cada fuente tsunamigénica de manera individual.

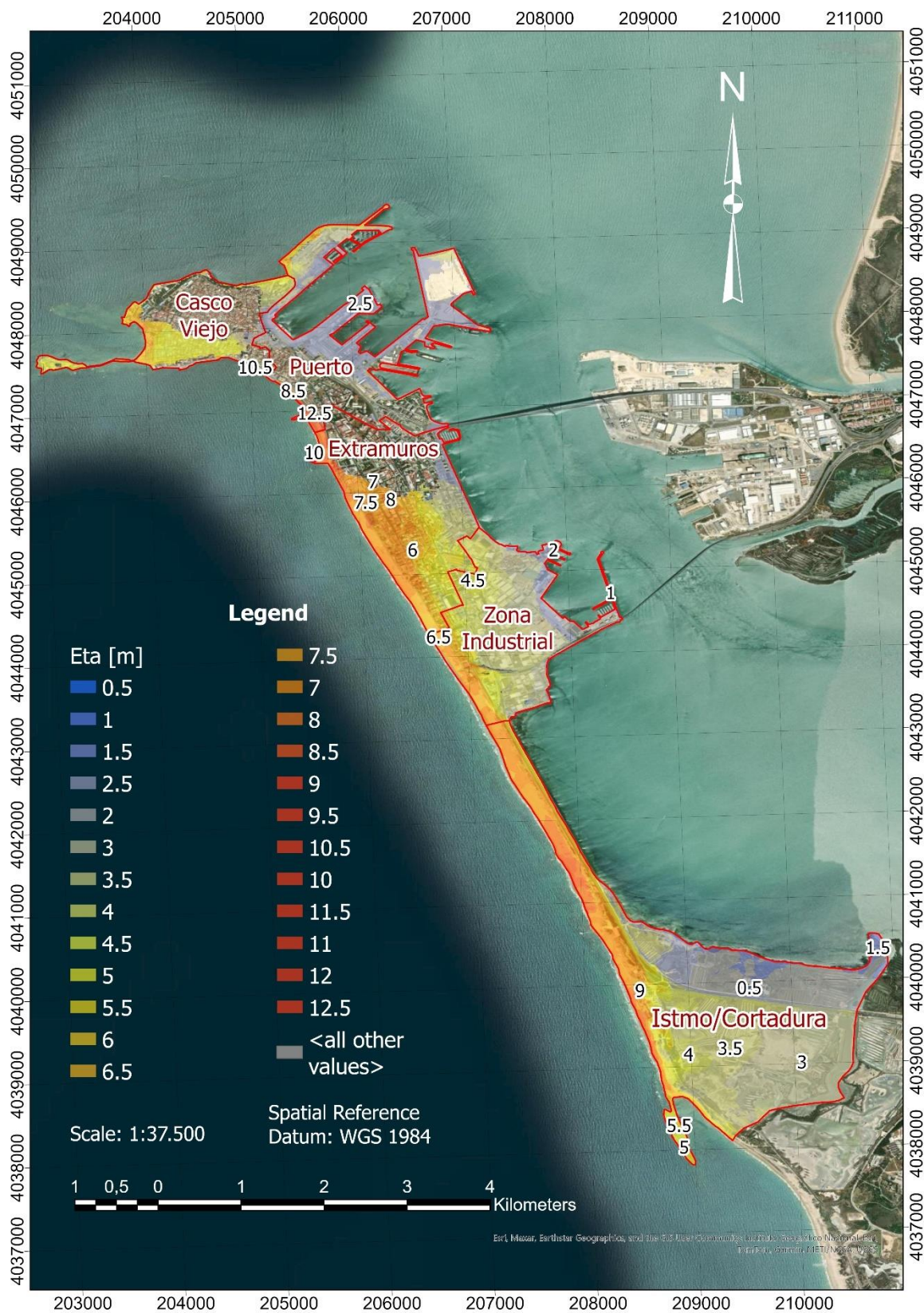


Ilustración 6.1 - Elevación máxima de la altura de ola en el mar; Mapa agregado

6.2. PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN (h)

En la figura siguiente (ilustración 6.2) se muestran las alturas de inundación agregadas en el área urbana de Cádiz. Se puede observar que algunas zonas de la ciudad se verían más afectadas y otras menos en caso de un tsunami. Los diferentes colores indican la altura de la columna de agua en cada área de la ciudad; así, las alturas de agua relativamente bajas están representadas en azul, mientras que las zonas más profundas se señalan en rojo/naranja.

Se observa que en la zona del Casco Viejo y de la Isla de San Sebastián, especialmente la parte oriental, se vería afectada por fuertes inundaciones. Esta área corresponde a la conexión que une la isla con el resto de Cádiz. En el casco viejo, el agua penetra principalmente por la Playa de La Caleta, donde en la zona de la playa se podrían esperar profundidades de hasta 9 metros, mientras que en el interior del casco viejo las profundidades del agua podrían alcanzar entre 3 y 4 metros. Por lo demás, las inundaciones se extienden de forma más limitada en la parte norte. En el oeste, la zona inundada estaría principalmente influenciada por la proximidad al área portuaria adyacente.

En la zona del puerto se observa que, debido a la construcción baja destinada al embarque y desembarque de los barcos, la mayor parte del puerto se inundaría, aunque con alturas de agua moderadas de entre 1 y 2 metros, ya que la totalidad de la ola no sobrepasaría inmediatamente los muros verticales del puerto. Sin embargo, en la base de los diques, las alturas del agua podrían alcanzar hasta 12,5 metros. Como se indicó en el apartado anterior, es posible que la inundación se extienda desde el puerto hacia el Casco Antiguo. La zona de la estación de tren y la estrecha parte interior de la isla en este punto no se verían afectadas.

En la zona de Extramuros, las alturas del agua son especialmente elevadas en el oeste (Playa de Santa María del Mar: 9,5 - 11 m), lo cual se explica porque la ola del tsunami impacta directamente contra la costa. La parte norte de la Zona 3 queda parcialmente protegida por la topografía, mientras que la zona sur (muy llana) se inundaría extensamente, con profundidades de 4-5 metros en las viviendas más cercanas a la playa de la Victoria, y columnas de agua de entre 2,5 y 4 metros incluso más hacia el interior.

Tendencias similares se observan también en la Zona 4 (Zona Industrial), donde toda el área es muy plana y las instalaciones portuarias en el este también se han construido a baja altura. Por ello, se puede suponer que esta zona se inundaría por completo. Los valores más altos se registran nuevamente en la Playa de la Victoria y la Playa de la Cortadura, pudiendo alcanzar entre 7 y 8,5 metros. En las áreas residenciales se observan profundidades de agua de 2-3 metros, mientras que en la zona industrial oriental los valores son algo menores, entre 1 y 2 metros.

Considerando el estrecho istmo, así como las dunas y marismas situadas en el continente en la zona de La Cortadura, se observa una inundación completa del área. Se trata de una zona muy plana que ha sido modificada por el ser humano para usos tradicionales, como la producción de sal. En la zona de playa (oeste) se esperan profundidades de agua de hasta 9,5 metros, mientras que en el interior del área aún pueden registrarse profundidades de 4-5 metros, lo cual es considerable dada su ubicación ya hacia el interior. Por ello, también se espera que las inundaciones se extiendan hacia los límites de la zona y en dirección a San Fernando.

En el ANEXO IV se presentan los mapas de profundidad de inundación de cada fuente tsunamigénica de manera individual.

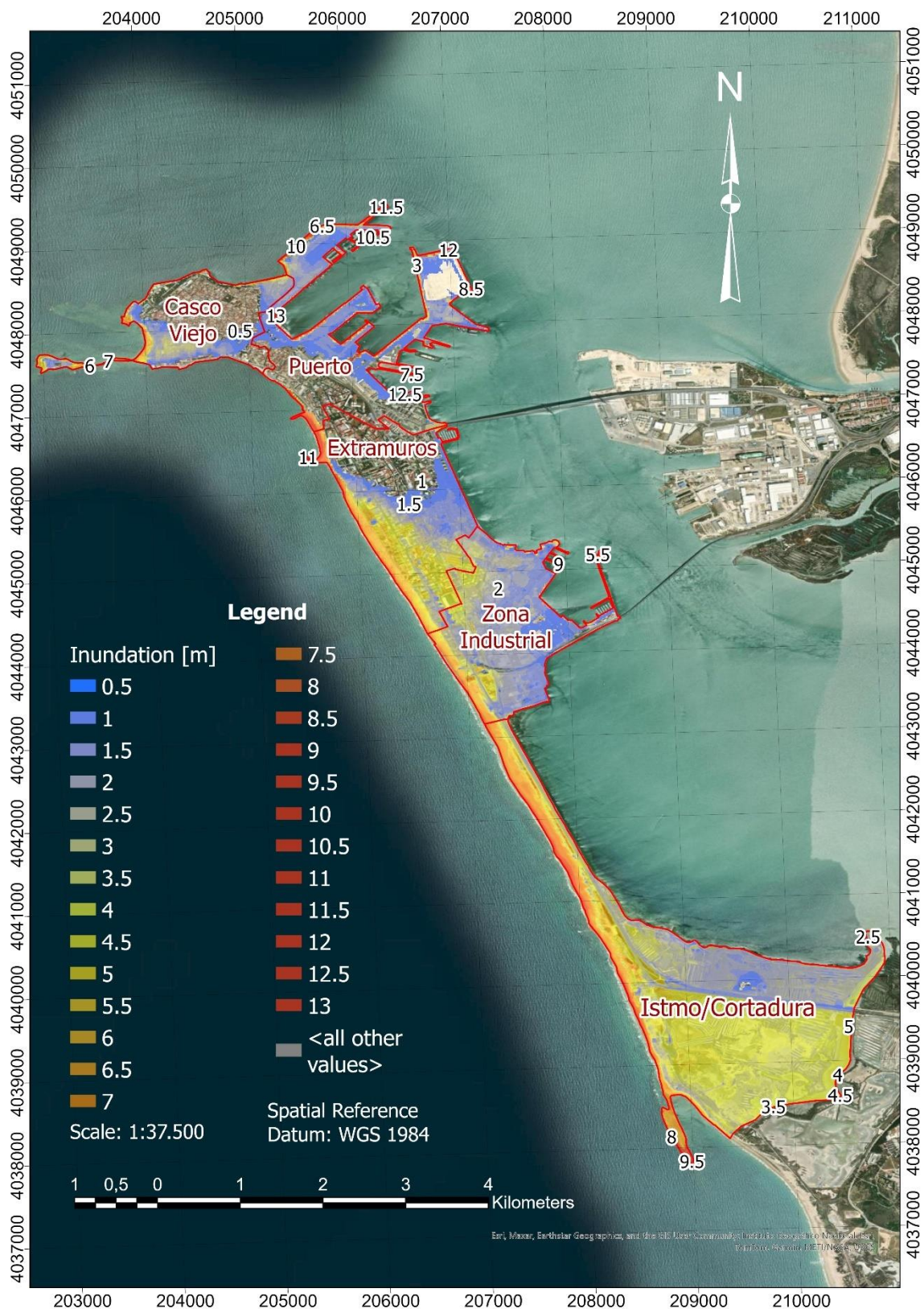


Ilustración 6.2 - Profundidad de inundación; Mapa agregado

6.3. ARRASTRE (d)

En la ilustración 6.3 se presentan los resultados del mapa de arrastre para el municipio de Cádiz. Cabe recordar que esta variable se obtiene de la combinación de la profundidad de la inundación con la velocidad de flujo. Esta clasificación, basada en el trabajo de *Jonkman et al. (2008)*, ha sido empleada en estudios previos, como en *Jelínek et al (2012)* y *Aguirre-Ayerbe et al. (2018)* (véase Tabla 6.1). El presente mapa constituye la representación determinista de los resultados del arrastre de cada ejecución, considerando los casos menos favorables.

Tabla 6.1 - Nivel de peligro por tsunami en función de la relación profundidad-velocidad, basado en Jonkman et al. (2008) y empleada en estudios previos como en Jelínek et al (2012) y Aguirre-Ayerbe et al. (2018).

Depth–velocity relation [m ² /s]	Description	Score	Hazard Level
< 0.6	No danger	1	Very Low
0.6 – 1.35	Danger for some	2	Low
1.35 – 2.0	Danger for most	3	Medium
2.0 – 5.0	Danger for all	4	High
> 5.0	Very dangerous	5	Very High

Como puede observarse, en el área del Casco Viejo y en la zona del Puerto predominan valores de peligrosidad baja y muy baja (aproximadamente 11,4 % y 14,4 % de la superficie total afectada, respectivamente), con algunas áreas puntuales de peligrosidad media (7,2 %) en sectores próximos a la línea costera. En la zona de Extramuros, los valores de arrastre se intensifican, presentándose áreas con peligrosidad media y alta, especialmente en los sectores más cercanos a la costa (19,5 %).

La Zona Industrial muestra un patrón heterogéneo, donde se identifican tanto áreas de peligrosidad baja como extensiones significativas clasificadas como altas, particularmente en las proximidades de la lámina de agua. En el área del Istmo/Cortadura se concentran las mayores extensiones de peligrosidad elevada, llegando los valores asociados a categorías “altas” y “muy altas” a cubrir aproximadamente el 47,5 % de la superficie afectada, penetrando en tierra firme con profundidades del orden de varias decenas de metros.

En términos generales, los resultados muestran que una proporción importante del municipio de Cádiz se encuentra expuesta a condiciones de arrastre clasificadas como “altas” y “muy altas” (aproximadamente 67 % combinadas), mientras que el resto del área

inundada se reparte principalmente entre categorías de peligrosidad baja y muy baja (aproximadamente 25,8 %).

En el ANEXO V se presentan los mapas de arrastre de cada fuente tsunamigénica de manera individual.

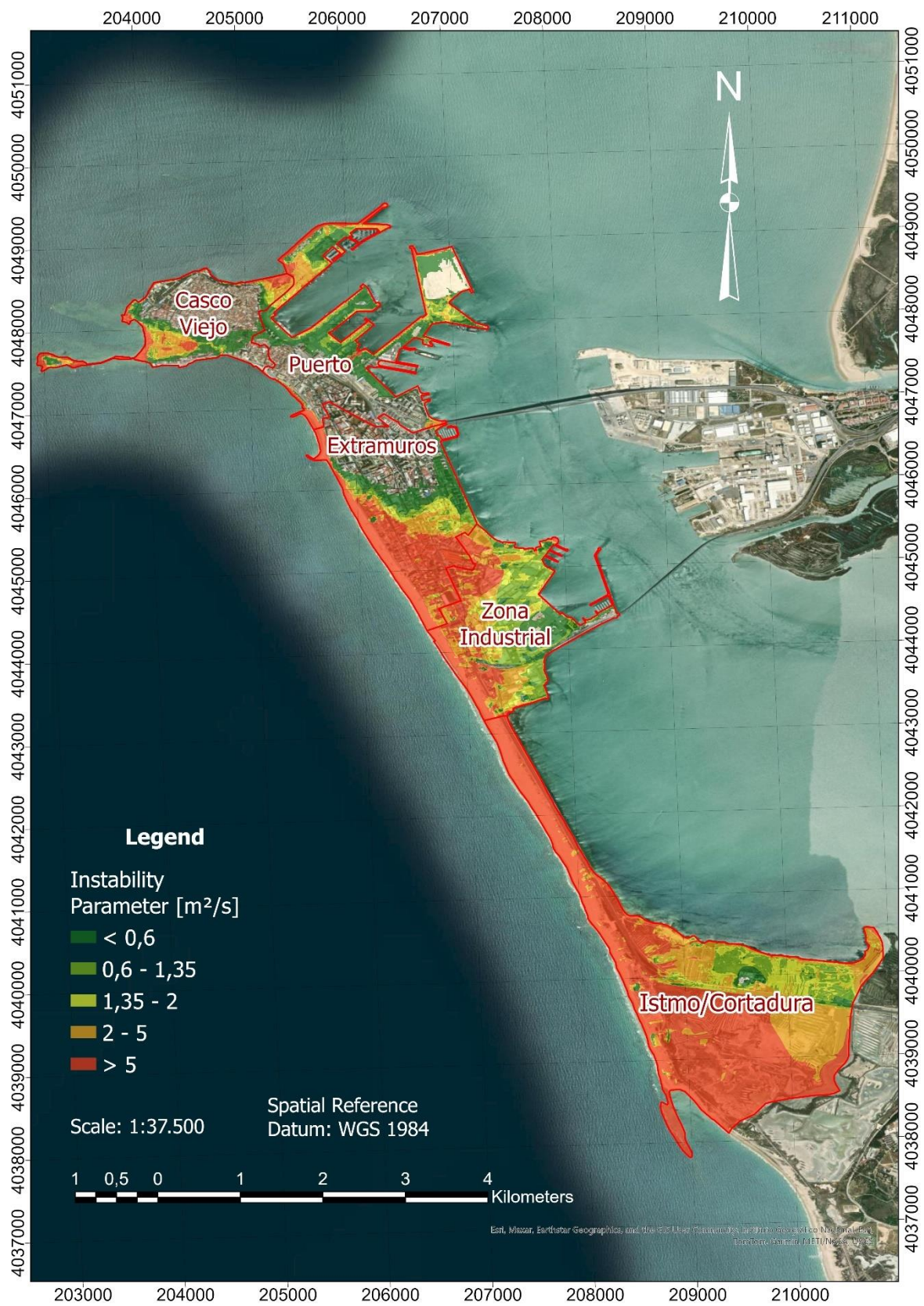


Ilustración 6.3 - Arrastre; Mapa agregado

6.4. TIEMPO DE LLEGADA (t)

En la siguiente figura se representa de forma visual el tiempo de llegada de la ola de tsunami en las distintas zonas de la ciudad de Cádiz, considerando intervalos temporales de 10 minutos. En este caso se muestra la situación más desfavorable en estado agregado: a diferencia de los mapas anteriores, no se representa el valor máximo de cada escenario, sino el mínimo de los cuatro casos simulados, ya que una llegada más temprana de la ola constituye evidentemente la condición de mayor riesgo.

Se observa que el tiempo estimado de arribo en el área urbana se sitúa principalmente entre 60 y 80 minutos, afectando a sectores como el Casco Viejo, el puerto, así como la parte meridional de Extramuros, la zona industrial y el área de La Cortadura.

Los primeros indicios de variación en el nivel del mar se registran en la parte occidental de la ciudad — en playas como Playa de la Victoria, Playa de Santa María del Mar, Playa de la Caleta, o en el entorno del Castillo de San Sebastián —, con un tiempo de llegada de aproximadamente 30 minutos tras la generación del tsunami. Este valor implica un impacto relativamente rápido en la región de Cádiz dentro del contexto global del fenómeno.

En contraste, las áreas situadas más al este, orientadas hacia el continente, experimentan la llegada de la ola en un intervalo significativamente mayor, estimado entre 2 y 3 horas. Esta diferencia se explica principalmente por el efecto de fricción y disipación de energía al impactar la ola primero en los sectores occidentales de la ciudad, lo que retrasa su propagación hacia las zonas más interiores.

En el ANEXO VI se presentan los tiempos de arribo de cada fuente tsunamigénica de manera individual.

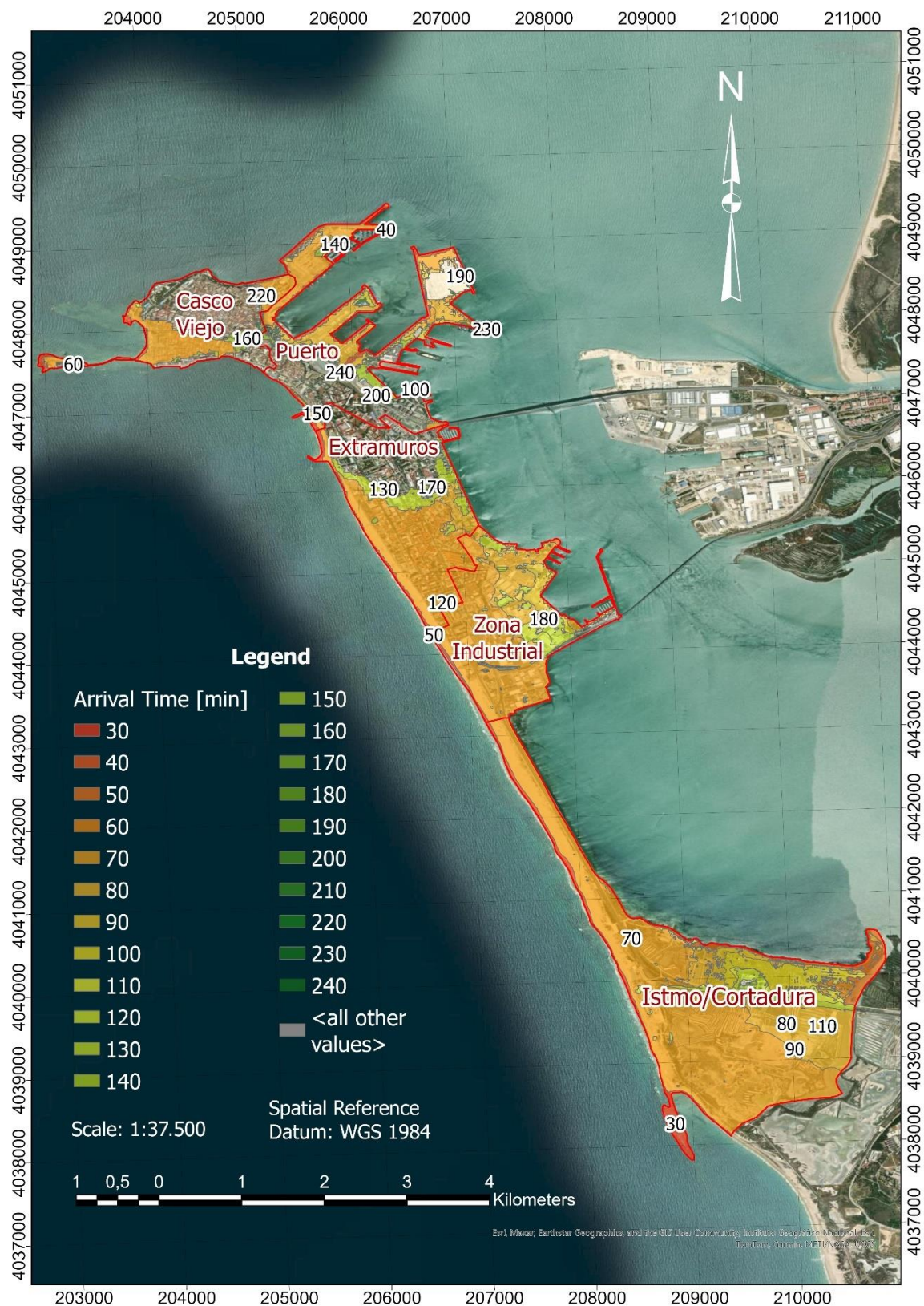


Ilustración 6.4 - Tiempo de Llegada; Mapa agregado

6.5. INFLUENCIA DE LA MAREA

Para evaluar la influencia de la marea, se seleccionó un único evento – el Horseshoe Fault– y se compararon las áreas inundadas en los distintos estados de la marea. En la Ilustración 6.5 se visualizan las zonas de inundación: el azul representa las áreas en pleamar, mientras que el rojo indica las zonas en bajamar.

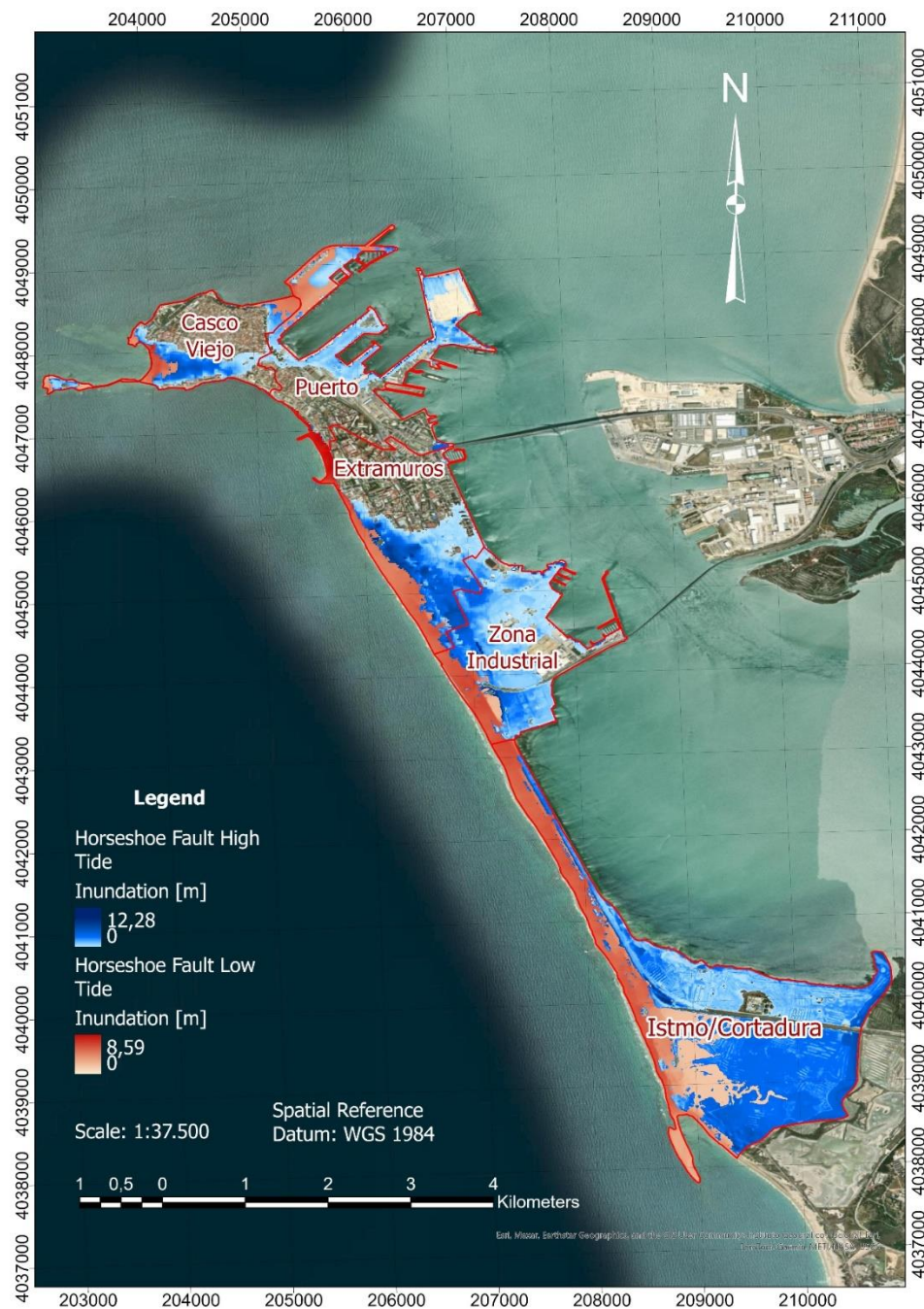


Ilustración 6.5 - Influencia de la marea a la inundación

El análisis muestra que los niveles máximos de agua en los distintos escenarios se producen partiendo de un cambio de marea de aproximadamente 3 m. Así, en bajamar se registra un nivel máximo de 8,59 m, mientras que en pleamar el nivel máximo alcanza 12,28 m. Aunque la marea solo varía 3 m, la superficie inundada se incrementa de manera significativa, alcanzando 9.169.159 m² en pleamar frente a 2.563.083 m² en bajamar, lo que representa un aumento de aproximadamente 258 %.

Estos resultados ponen de manifiesto que la condición de la marea tiene un efecto decisivo sobre la extensión espacial de las inundaciones. Mientras que en bajamar las inundaciones se concentran principalmente en áreas de menor altitud, en pleamar se observa una extensión amplia a lo largo de la costa, especialmente en las zonas de Casco Viejo, Extramuros, Zona Industrial e Istmo/Cortadura.

Estas observaciones subrayan que, para la planificación urbana y la protección civil, no solo debe considerarse la altura del nivel de agua, sino también la fase de la marea. Solo así pueden adaptarse adecuadamente las estrategias de evacuación y las medidas de protección a los riesgos reales.

6.6. COMPARACIÓN SUMA-LINEAL / MODELACIÓN

Como se explicó previamente en la sección 5.4, además de la modelización de distintos escenarios (Falla & Marea), se utilizó complementariamente la metodología SUMA-Lineal para validar los resultados en relación con la influencia de diferentes estados de marea. En la ilustración 6.5 se muestra el resultado para la falla Marquês de Pombal. La inundación generada por Tsunami-HySEA se representa en rojo, mientras que la inundación según Suma-Lineal se representa en azul.

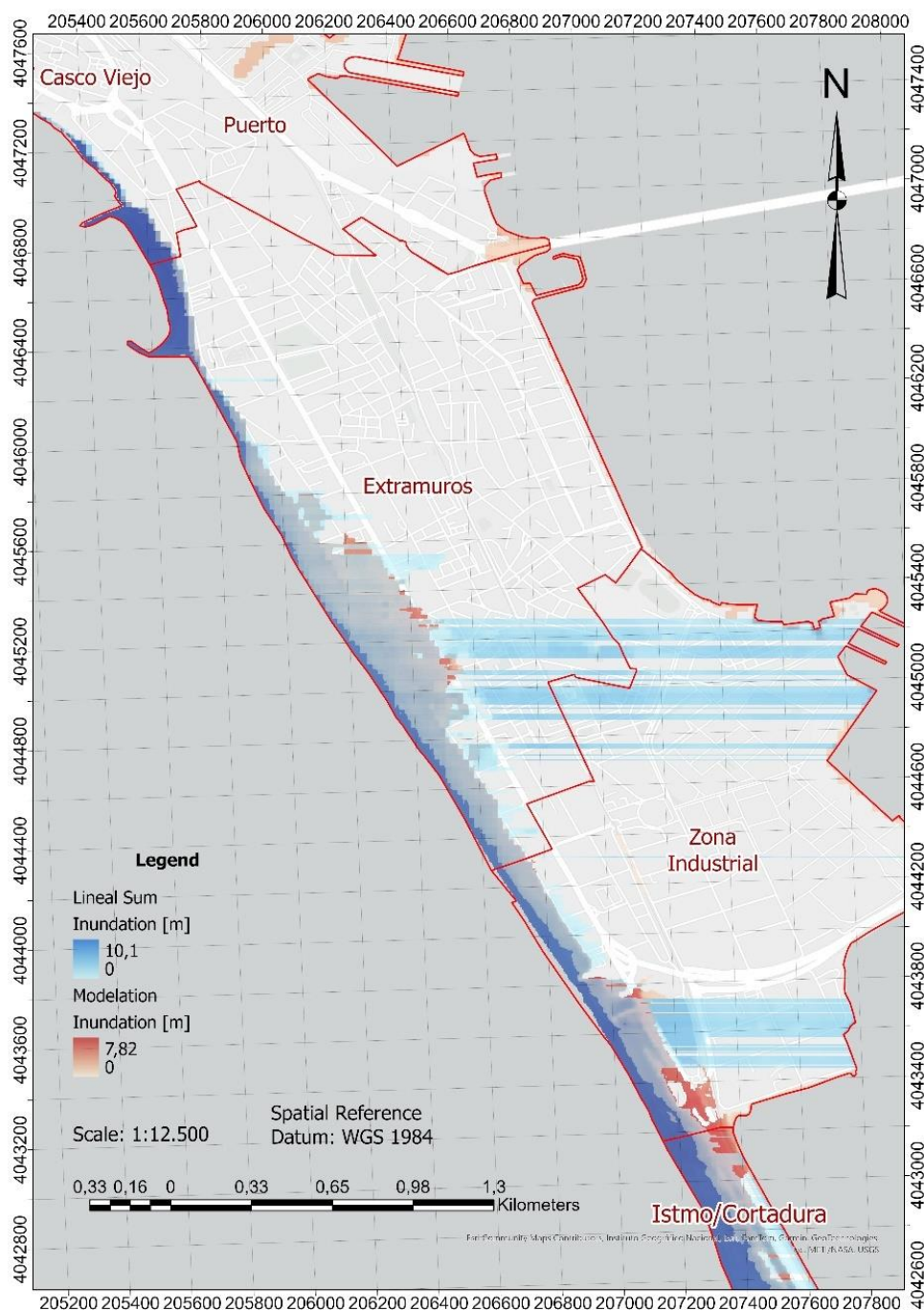


Ilustración 6.6 - Inundación (Tsunami-HySEA vs. Suma-Lineal) en el centro de Cádiz – Falla Marqués de Pombal

Como se puede observar en las vistas detalladas (6.7 y 6.8), la aproximación mediante el método Suma-Lineal proporciona una representación bastante adecuada en las zonas del norte. Sin embargo, en las zonas más al sur se presentan desviaciones significativas, provocando la inundación de grandes áreas que, según Tsunami-HySEA, deberían permanecer secas.

Cabe señalar que el perfil costero en el área de la Playa de Santa María del Mar es muy empinado, lo que frena rápidamente la masa de agua en expansión debido a la pendiente. En la parte más al sur de la Playa de la Victoria, el perfil es más variable y, en gran parte, relativamente plano, por lo que los límites de inundación difieren considerablemente del modelo Tsunami-HySEA.

La aproximación mediante Suma-Lineal se realizó a nivel de píxel y únicamente en la dirección x. Una modelización más compleja podría considerar también la propagación en la dirección y, lo que permitiría una mejor concordancia con los resultados de Tsunami-HySEA.



Ilustración 6.8 - Detalle MPF comparación zona Playa de Santa María del Mar



Ilustración 6.7 - Detalle MPF comparación zona Playa de la Victoria / Zona industrial

En general, se puede concluir que el método Suma-Lineal, ampliamente utilizado como simplificación, presenta errores y no puede representar adecuadamente la complejidad de las masas de agua que impactan sobre tierra. Factores como la fricción y la propagación tridimensional del agua son determinantes en la realidad y no pueden ser simplemente simplificados o ignorados.

6.7. COMPARACIÓN ENTRE ENFOQUES DETERMINISTAS Y PROBABILISTAS

En la figura adjunta se presentan dos enfoques metodológicos distintos aplicados a la modelización de la inundación por tsunami en la ciudad de Cádiz. La superficie azul corresponde al escenario determinista, que se emplea comúnmente como referencia del '*escenario de peor caso*' y que se caracteriza por mostrar una extensión de inundación considerablemente amplia, igual a la superficie considerada en los capítulos anteriores, basada en CWF, GBF, HSF y MPF. Por otro lado, la superficie en color rojo representa el resultado del análisis probabilístico, definido mediante el percentil 98 y una probabilidad de excedencia asociada a un período de retorno de 10.000 años. Este último resultado se ha obtenido a partir de la simulación de más de 8.760 escenarios sísmicos en el área de estudio. Ambos layers se han representado con cierta transparencia, por lo que en algunas áreas puede observarse una mezcla de colores donde se superponen.

La comparación espacial de ambos enfoques evidencia que gran parte de las áreas analizadas se inunda bajo ambos escenarios, aunque con diferencias significativas en la magnitud del evento: mientras que el enfoque probabilístico alcanza profundidades de hasta 5,7 m, el determinista llega hasta 12,5 m. Esto indica que, aunque la extensión general se solapa, la severidad de la inundación varía notablemente según el método. Véase Ilustración 6.9.



Ilustración 6.9 - Mapa de inundación según enfoques probabilístico y determinista

En cuanto a la distribución espacial de las superficies, también se observan diferencias importantes. Al norte de la ciudad (Casco Viejo & Puerto), predominan las inundaciones probabilísticas, mientras que al sur (Cortadura) predominan las áreas deterministas. Esta diferencia se aprecia claramente en la figura adjunta (6.10), donde las áreas comunes a ambos enfoques se representan en amarillo, las superficies deterministas en azul y las probabilísticas en rojo.

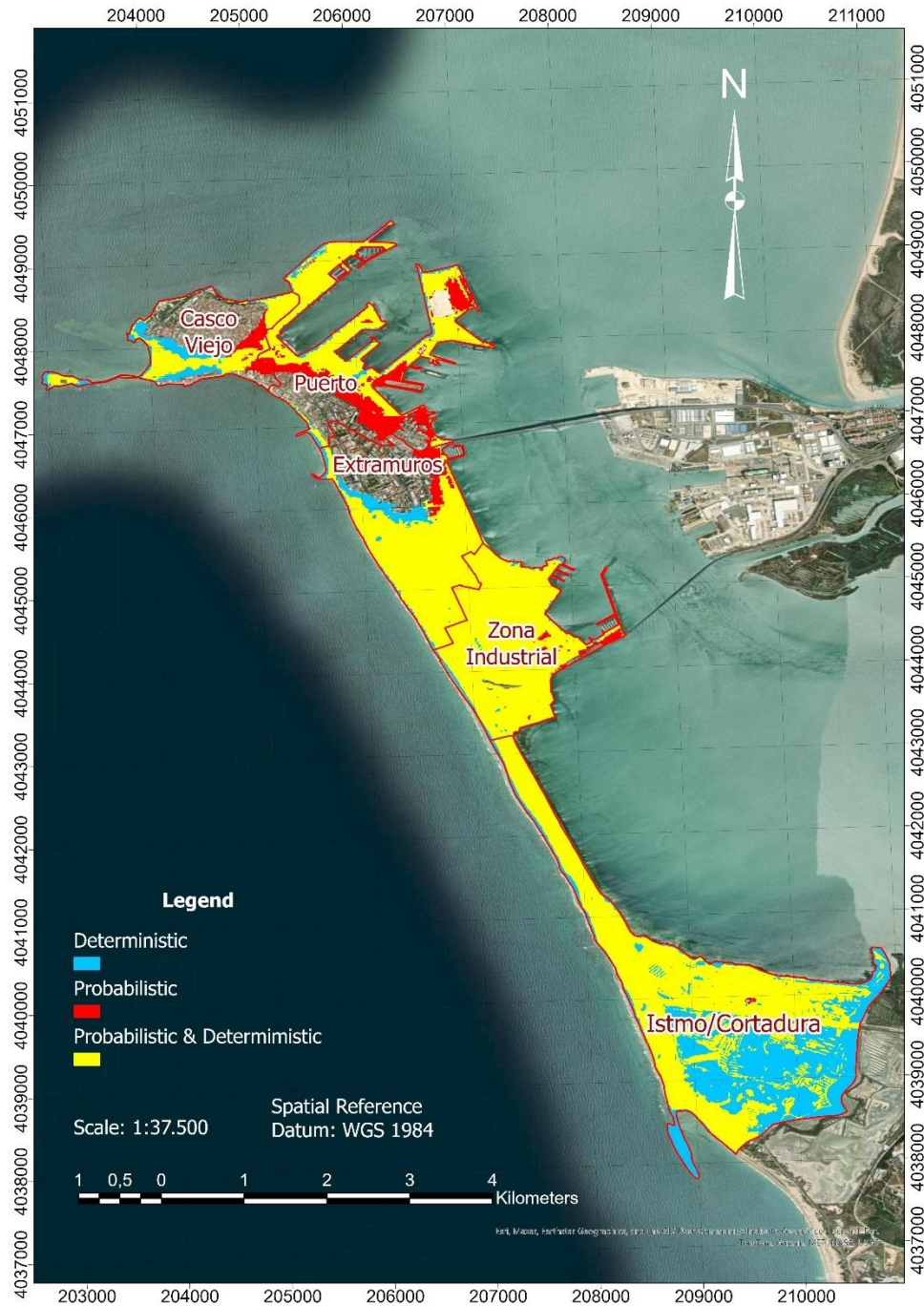


Ilustración 6.10 - Comparación manchas de inundación probabilístico y determinista

Estas divergencias se explican por la naturaleza de los métodos empleados. En el enfoque probabilístico se calcula, para cada celda de la malla de simulación, una distribución estadística entre el período de retorno y la profundidad máxima alcanzada, seleccionándose posteriormente el valor correspondiente al período de retorno considerado (10.000 años en este caso). En contraste, el enfoque determinista se ha utilizado ampliamente en la práctica ingenieril, ya que permite obtener resultados de manera más rápida y sencilla, especialmente en contextos con recursos computacionales limitados o sin especialistas en sismología. Aunque este enfoque suele presentarse como un escenario de alta peligrosidad, se manifiesta que no representa realmente el peor escenario posible, ya que diferentes condiciones locales podrían generar resultados distintos, como se observa en el caso de Cádiz.

Por ejemplo, si se analiza el detalle de Casco Viejo/Puerto (Ilustración 6.11), se observa que algunas áreas en el oeste tienden a inundarse más bajo el enfoque determinista, debido a que las fuentes generacionales se concentran hacia la parte occidental de la ciudad. Por otro lado, en el sector este, el enfoque probabilístico puede mostrar superficies de inundación más extensas, ya que no solo incorpora un mayor número de fuentes generacionales, sino que estas están mucho más distribuidas espacialmente, capturando así un abanico más amplio de posibles escenarios de inundación.



Ilustración 6.11 - Comparación probabilístico/determinista; Detalle Casco Viejo / Puerto

El enfoque determinista permite representar de manera efectiva las particularidades locales de un escenario de tsunami y obtener resultados rápidos y claros. Sin embargo, no contempla la totalidad de los escenarios posibles ni la incertidumbre inherente a los procesos generadores de tsunami. Por ello, su aplicación debe realizarse considerando los objetivos específicos del estudio, la disponibilidad de datos y recursos, así como los límites propios del método. Una comprensión crítica de los supuestos y restricciones de cada enfoque es fundamental para una evaluación rigurosa de la peligrosidad.

Si los resultados del evento determinista se proyectaran en un contexto probabilístico, estos equivaldrían aproximadamente a escenarios con períodos de retorno superiores a 20.000 años, reflejando que, aunque el determinista captura áreas críticas locales, no abarca la variabilidad completa de posibles inundaciones.

7. CRÍTICA/DISCUSIÓN

Como se ha mostrado en los resultados, la ciudad de Cádiz presenta una peligrosidad de inundación por tsunami significativa en varios sectores de su núcleo urbano. No obstante, es importante subrayar que no todas las fuentes generadoras producen los mismos niveles de impacto. En términos generales, las fuentes pueden clasificarse en dos grupos según la magnitud de sus efectos en la costa: por un lado, las simulaciones asociadas a la Cádiz Wedge Fault (CWF) y la Horseshoe Fault (HSF) generan los escenarios de mayor intensidad, mientras que, por otro lado, las fuentes Marquês de Pombal Fault (MPF) y Gorringer Bank Fault (GBF) producen niveles de inundación más moderados, aunque con tiempos de llegada relativamente cortos que no deben ser subestimados.

Cabe destacar que, incluso dentro del grupo de eventos más severos, existen diferencias espaciales relevantes. La localización geográfica del punto de generación condiciona de forma decisiva la distribución de las áreas afectadas: mientras un evento asociado a la HSF impacta con mayor intensidad en el Casco Viejo, un escenario originado en la CWF tiende a afectar de forma más acusada a la zona de Extramuros. Estas diferencias confirman la necesidad de considerar múltiples fuentes en el análisis de peligrosidad, ya que cada una de ellas contribuye a delinear un patrón de riesgo particular para la ciudad.

Al comparar los enfoques determinista y probabilista, se observa que las zonas situadas en el este de la ciudad permanecen en gran medida no afectadas incluso bajo los escenarios simulados. Sin embargo, esto no implica que estas áreas estén exentas de riesgo. La existencia de numerosos puntos generadores adicionales posibles sugiere que también en estas áreas podrían producirse impactos por eventos de tsunami no contemplados en las simulaciones actuales. Esta observación enfatiza la importancia de no basarse únicamente en escenarios individuales, sino de considerar un amplio espectro de fuentes potenciales en la evaluación del riesgo.

Se optó por un enfoque determinista para la evaluación de peligrosidad por tsunami, considerando criterios metodológicos como la simplicidad, la aplicabilidad y la disponibilidad de recursos. No obstante, en contextos donde se disponga de mayor capacidad computacional y experiencia técnica, un enfoque probabilista podría resultar más adecuado para capturar de manera más completa la incertidumbre inherente y la variabilidad de los escenarios generadores de tsunami. De este modo, los resultados obtenidos mediante el enfoque determinista deben interpretarse con cautela, comprendiendo sus limitaciones y el contexto específico de su aplicación.

Finalmente, es importante subrayar que las simulaciones presentadas son idealizadas y constituyen una aproximación al comportamiento real de un evento de tsunami. La simulación se basó únicamente en el relieve del terreno, sin incluir detalles urbanos o vegetación, siguiendo la práctica habitual en estudios de evaluación de peligrosidad. Por ello, los resultados deben interpretarse como una primera aproximación para la evaluación general de la peligrosidad y la comprensión del fenómeno, y no como una representación exacta de la realidad.

8. CONCLUSIÓN

- El municipio de Cádiz se encuentra **expuesto al impacto de tsunamis** de gran magnitud, ya que se ubica en una zona de elevada actividad sísmica, próxima a la franja de convergencia de placas tectónicas conocida como la falla de Azores-Gibraltar.
- De acuerdo con estudios previos, se han identificado **cuatro fuentes potenciales de generación** de tsunamis que podrían afectar directamente a Cádiz: Cádiz Wedge Fault, Horseshoe Fault, Marqués de Pombal Fault y Gorringe Bank Fault.
- Con base en estas fuentes se han elaborado **mapas deterministas de peligrosidad**, considerando el estado en pleamar y variables como la profundidad máxima de inundación, la elevación máxima de la superficie libre, la capacidad máxima de arrastre (definida por la relación entre velocidad del flujo y profundidad de la lámina de agua) y los tiempos mínimos de arribo.
- Los resultados de dichos mapas muestran que, en el escenario “más desfavorable”, Cádiz podría verse afectada por tsunamis con alturas incidentes de **ola de hasta 12,5 metros** en la zona de playa, medidas a partir del nivel de pleamar.
- En la zona del puerto y en el sector central de la ciudad se alcanzan profundidades de **inundación de hasta 12 m**. Asimismo, tanto en las inmediaciones de la Playa de la Caleta como en el sector sur de la ciudad se registran profundidades de hasta 5 m, que llegan a penetrar en áreas urbanas situadas más hacia el interior de la isla.
- La altura de la ola incidente máxima fue de 12,5 m presentado en la franja litoral de la **Playa Santa María del Mar** y elevaciones de la superficie libre del mar del orden 9 metros a lo largo de las playas la Caleta, Victoria y el Chato. La inundación por tsunami se presenta en **79 % del casco urbano**.
- La **peligrosidad por inestabilidad de arrastre** a las personas categorizada como “alta” o más se prevé en más del **67 % del casco urbano** del municipio de Cádiz.
- En relación con los tiempos mínimos de arribo a la costa, se estiman valores del orden de 30 minutos tras la ocurrencia del sismo, momento a partir del cual comienzan a hacerse visibles las primeras variaciones en el nivel del mar. Aproximadamente el **54 % del casco urbano** resultaría afectado por la inundación **en los primeros 80 minutos** desde la generación de la onda de tsunami en aguas profundas.

- Dado que cada una de las fallas se encuentra a distinta distancia de la costa y presenta diferentes momentos sísmicos, los tiempos de arribo de las ondas de tsunami varían (véase Anexo V). Esto pone de manifiesto que, para obtener una estimación más precisa, es fundamental identificar cuál de las fallas ha actuado como mecanismo generador.
- Se investigó la influencia de la marea a partir de un evento específico. Queda claramente demostrado que la **fase de la marea ejerce un impacto significativo** sobre la altura y la extensión de las inundaciones.
- En el caso del Horseshoe Fault, por ejemplo, se ha observado un **incremento de la superficie inundada superior al 250 %** al pasar de bajamar a pleamar. Estos resultados resaltan la importancia de considerar el estado de la marea en la planificación urbana y en la gestión de riesgos costeros.
- La comparación entre los enfoques determinista y probabilista muestra que, aunque la extensión general de la inundación se solapa, la severidad del evento varía notablemente: el enfoque determinista alcanza profundidades máximas de hasta 12,5 m, mientras que el probabilista llega a 5,7 m. Cabe destacar que el evento **determinista** representaría aproximadamente un escenario con un **período de retorno de 20.000 a 30.000 años**.
- El análisis espacial evidencia que el **enfoque determinista** permite identificar áreas críticas locales bajo **condiciones extremas**, en particular Casco Viejo, el sur de Extramuros, la zona industrial y el Istmo/Cortadura.
- Por el contrario, el **enfoque probabilístico** representa de manera más adecuada la **distribución a gran escala** de posibles escenarios de inundación –por ejemplo, también en la parte oriental de la ciudad, en el área portuaria– y abarca un espectro más amplio de fuentes generadoras.
- El municipio de Cádiz presenta un alto nivel de peligrosidad frente a tsunamis, agravado por su ubicación en una isla conectada al continente mediante solo tres accesos y sin elevaciones naturales de refugio. Esto genera una **exposición extremadamente alta de la población**, destacando la **necesidad de un plan local** específico de preparación y emergencia.

Finalmente, se ha cumplido este estudio como insumo para la obtención del título de Máster en Costas y Puertos.

8. REFERENCIAS

Aguirre-Ayerbe, Ignacio, Jara Martínez Sánchez, Íñigo Aniel-Quiroga, Pino González-Riancho, María Merino, Sultan Al-Yahyai, Mauricio González, & Raúl Medina. 2018. «From tsunami risk assessment to disaster risk reduction – the case of Oman». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18(8): 2241–2260. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2241-2018>

Álvarez-Gómez, José A., Omar Q. Gutiérrez Gutiérrez, Íñigo Aniel-Quiroga, & M. González. 2012. «Tsunamiogenic potential of outer-rise normal faults at the Middle America trench in Central America». *Tectonophysics* 574–575: 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.014>

Aniel-Quiroga Zorrilla, Íñigo. 2018. «Tsunami coastal impacts: Calculation of the run-up and stability analysis of rubble-mound breakwaters». Universidad de Cantabria.

Arrighi, Chiara, Hocine Oumeraci, & Fabio Castelli. 2017. «Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters». *Hydrology and Earth System Sciences* 21(1): 515–531. <https://doi.org/10.5194/hess-21-515-2017>

Arteaga, Oswaldo, Horst D. Schulz, & Anna-Maria Roos. 2008. «Geoarqueología dialéctica en la Bahía de Cádiz». <https://studylib.es/doc/6979667/geoarqueología-dialéctica-en-la-bahía-de-cádiz> (25 de junio de 2025)

Baptista, J.M., Miranda, J.F. Luis, & M.A. Baptista. 2006. «In search of the 31 March 1761 earthquake and tsunami source». *Bulletin of the Seismological Society of America* 96(2)

Baptista, M.A., J.M. Miranda, R. Omira, & C. Antunes. 2011. «Potential inundation of Lisbon downtown by a 1755-like tsunami». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11(12): 3319–3326. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3319-2011>

Baptista, M.A., S. Heitor, J.M. Miranda, P. Miranda, & L. Mendes Victor. 1998. «The 1755 Lisbon tsunami; Evaluation of the tsunami parameters». *Journal of Geodynamics* 25(1–2): 143–157. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(97\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(97)00019-7)

Benchekroun, Sabah, & Azelarab El Mouraouah. 2018. «Tsunami evacuation plan for the city of Tangier-Morocco based on GIS tools»

Bernard, E.N., H.O. Mofjeld, V. Titov, C.E. Synolakis, & F.I. González. 2006. «Tsunami: Scientific frontiers, mitigation, forecasting and policy implications». *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 364(1845): 1989–2007. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1809>

Bilek, S.L., & T. Lay. 2002. «Tsunami earthquakes possibly widespread manifestations of frictional conditional stability». *Geophysical Research Letters* 29(14): 18-1–18-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015215>

Bryant, Edward. 2008. *Tsunami: The underrated hazard*. Berlin: Springer

Campos, Maria Lourdes. 1991. «Tsunami hazard on the Spanish coasts of the Iberian Peninsula». *Science of Tsunami Hazards* 9(1)

Cardineau, Carlos Arteaga. «Analysis of tsunami hazards in Spain»

Clima Cádiz: Temperatura, climograma y temperatura del agua de Cádiz. <https://es.climate-data.org/europe/espana/andalucia/cadiz-2149/> (8 de julio de 2025)

Comunicacion.IHCantabria. 2025. «IHCantabria participated in the launching meeting of the UNESCO-IOC EU DG ECHO CoastWAVE 2.0 Project in Cadiz». IHCantabria. <https://ihcantabria.com/en/ihcantabria-participated-in-the-kickoff-meeting-of-the-unesco-ioc-eu-dg-echo-coastwave-2-0-project-in-cadiz/> (24 de junio de 2025)

Das, R., & C. Meneses. 2021. «Scaling relations for energy magnitudes». *J. Geophys.*

Definition: Hazard | UNDRR. 2007. <https://www.undrr.org/terminology/hazard> (2 de abril de 2025)

Dias, F., D. Dutykh, L. O'Brien, E. Renzi, & T. Stefanakis. 2014. «On the modelling of tsunami generation and tsunami inundation». *Procedia IUTAM* 10: 338–355. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2014.01.029>

Diputación aumenta un 22,8% el presupuesto del Patronato Provincial de Turismo para 2022. <https://www.dipucadiz.es/patronatoturismocadiz/actualidad/-El-sector-turistico-mantiene-mas-de-143.000-empleos-en-Cadiz-y-aporta-el-167-de-riqueza-al-PIB-provincial-de-manera-directa> (19 de agosto de 2025)

Druet, María, Fernando Bohoyo, Adolfo Maestro, Sandra Mink, Jesús García-Senz, Antonio Pedrera, & Roberto Rodríguez Fernández. 2023. «Tectonics of the Iberian continental margins and abyssal plains». *Journal of Maps* 19(1): 2237980. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2237980>

Earthquake Hazards Program | U.S. Geological Survey. 2025. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards> (5 de mayo de 2025)

El “beso geológico” que acerca el continente africano a Europa y que está detrás del terremoto de Marruecos. 2023. *La Razón*. <https://www.larazon.es/internacional/beso->

[geologico-que-acerca-continente-africano-europa-que-esta-detras-terremoto-marruecos_2023091164ff0d0ad60bc60001c59dab.html](https://www.researchgate.net/publication/35921591) (26 de marzo de 2025)

Federación Española de la Economía del Bien Común. 2021. *El puerto de Cádiz*

Fig. 2. Esquema tectónico del Golfo de Cádiz en el que se han... *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Esquema-tectonico-del-Golfo-de-Cadiz-en-el-que-se-han-cartografiado-las-principales_fig2_315921591 (7 de abril de 2025)

Galería fotográfica. *Puerto de la Bahía de Cádiz*. <https://www.puertocadiz.com/comunicacion/galeria-fotografica/> (22 de agosto de 2025)

García, Félix P. Martínez. 2023. «Transferencia espacial de datos de viento. Aplicación a la Duna de Valdevaqueros (Cádiz)»

Gràcia, Eulàlia, Juanjo Dañobeitia, Jaume Vergés, & PARSIFAL Team. 2003. «Mapping active faults offshore Portugal (36°N–38°N): Implications for seismic hazard assessment along the southwest Iberian margin». *Geology* 31(1): 83–86. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0083:MAFOPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0083:MAFOPN>2.0.CO;2)

Grevemeyer, Ingo, Dietrich Lange, Heinrich Villinger, Susana Custódio, & Luis Matias. 2017. «Seismotectonics of the Horseshoe Abyssal Plain and Gorringe Bank, Eastern Atlantic Ocean: Constraints from ocean bottom seismometer data». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 122(1): 63–78. <https://doi.org/10.1002/2016JB013586>

Guerra, José María Tomassetti, Carlos Arteaga Cardineau, Ildefonso Navarro, Leonor Parra Aguilar, Sayantani Neogi, Sean Taylor, Carlos Narváez, Francisco Torres Abril, & Javier Alcántara-Carrió. «Sedimentological, geoarchaeological and historical evidences of the 881 AD earthquake and tsunami in the western Mediterranean Sea (Estepona, Málaga)»

Gutscher, Marc-André, Stephane Dominguez, Graham K. Westbrook, Pascal Gente, Nathalie Babonneau, Thierry Mulder, Eliane Gonthier, et al. 2009. «Tectonic shortening and gravitational spreading in the Gulf of Cadiz accretionary wedge: Observations from multi-beam bathymetry and seismic profiling». *Marine and Petroleum Geology* 26(5): 647–659. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.11.008>

Hanks, Thomas C., & Hiroo Kanamori. 1979. «A moment magnitude scale». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 84(B5): 2348–2350. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>

Harbitz, Carl B., Finn Løvholt, Geir Pedersen, & Doug G. Masson. 2005. «Mechanisms of tsunami generation by submarine landslides: A short review». *Norwegian Journal of Geology*

Heck, N.H. 1947. «List of seismic sea waves». *Bulletin of the Seismological Society of America* 37(4)

IGME | InfoIGME | QAFI – Quaternary-Active Faults Database of Iberia. QAFI. <https://info.igme.es/qafi> (7 de abril de 2025)

InSpain.org. «Playas de Cádiz. Fotos». InSpain.org. <https://www.inspain.org/de/cadiz/cadiz/strande/la-caleta/fotos/> (22 de agosto de 2025)

IOC. «What are tsunamis? | Tsunami Programme UNESCO-IOC». <https://tsunami.ioc.unesco.org/en/what-are-tsunamis> (14 de abril de 2025)

Jelínek, Róbert, & Elisabeth Krausmann. 2009. «Tsunami risk analysis applied to the city of Cádiz»

Jiménez-Romero, Raúl, Luis Miguel Fernández-Salas, Desirée Palomino, Ricardo Félix Sánchez-Leal, & Yolanda Vila. 2022. «Discovering the fine-scale morphology of the Gulf of Cádiz: An underwater imaging analysis». *Journal of Marine Science and Engineering* 10(5): 651. <https://doi.org/10.3390/jmse10050651>

Jonkman, S.N., J.K. Vrijling, & A.C.W.M. Vrouwenvelder. 2008. «Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method». *Natural Hazards* 46(3): 353–389. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9227-5>

Kinsman, B. 1965. *Wind waves: Their generation and propagation on the ocean surface*. Dover Publications

Life of a Tsunami | U.S. Geological Survey. 2020. <https://www.usgs.gov/centers/pcmssc/life-tsunami> (1 de abril de 2025)

Lima, V.V., J.M. Miranda, M.A. Baptista, J. Catalão, M. Gonzalez, L. Otero, M. Olabarrieta, J.A. Álvarez-Gómez, & E. Carreño. 2010. «Impact of a 1755-like tsunami in Huelva, Spain». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10(1): 139–148. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-139-2010>

Llorente Isidro, Miguel, & Jorge Marcías Sánchez. 2018. *La necesidad y la oportunidad de estudiar el impacto económico de los tsunamis en las costas españolas*

Maestro, A., F. Bohoyo, J. López-Martínez, J. Acosta, M. Gómez-Ballesteros, E. Llave, A. Muñoz, P.G. Terrinha, & M. Dominguez. 2015. «Influencia de los procesos tectónicos y volcánicos en la morfología de los márgenes continentales ibéricos»

Maji, Dipannita, Shibam Manna, & Argyha Bandyopadhyay. 2021. «Hydrodynamic aspects of tsunami wave motion: A review». *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1007/s10236-021-01454-z>

mareografos.jpg (2748×1800).
<https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tsunami/mareografos.jpg> (26 de marzo de 2025)

Marghany, Maged. 2014. «Simulation of tsunami impact on sea surface salinity along Banda Aceh coastal waters, Indonesia». En *Advanced Geoscience Remote Sensing*, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/58570>

Márquez Carmona, Lourdes. 2006. *El sistema portuario de la Bahía de Cádiz durante el siglo XVIII*

Martínez-Loriente, Sara, Eulàlia Gràcia, Rafael Bartolome, Hector Perea, Dirk Klaeschen, Juan José Dañobeitia, Nevio Zitellini, Russell B. Wynn, & Douglas G. Masson. 2018. «Morphostructure, tectono-sedimentary evolution and seismic potential of the Horseshoe Fault, SW Iberian Margin». *Basin Research* 30(S1): 382–400. <https://doi.org/10.1111/bre.12225>

Martínez-Loriente, Sara, Valentí Sallarès, & Eulàlia Gràcia. 2021. «The Horseshoe Abyssal Plain Thrust could be the source of the 1755 Lisbon earthquake and tsunami». *Communications Earth & Environment* 2(1): 145. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00216-5>

Medialdea, T., L. Somoza, L.M. Pinheiro, M.C. Fernández-Puga, J.T. Vázquez, R. León, M.K. Ivanov, et al. 2009. «Tectonics and mud volcano development in the Gulf of Cádiz». *Marine Geology* 261(1-4): 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.007>

Meteorología, Agencia Estatal de. «Cádiz: Cádiz - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España». <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos> (8 de julio de 2025a)

Meteorología, Agencia Estatal de. «Valores climatológicos normales - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España». <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos> (8 de julio de 2025b)

Model Equations. <https://edanya.uma.es/hysea/index.php/models/tsunami-hysea/37-model-equations> (7 de julio de 2025)

Munk, Walter H. 1949. «The solitary wave theory and its application to surf problems». *Annals of the New York Academy of Sciences* 51(3): 376–424. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1949.tb27281.x>

Nacional Instituto Geográfico. «Instituto Geográfico Nacional». Geoportal oficial del Instituto Geográfico Nacional de España. <http://www.ign.es> (26 de marzo de 2025)

@NatGeoES. 2022. «Los secretos del océano Pacífico». *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/los-secretos-del-océano-pacifico> (15 de abril de 2025)

Natural Hazards Viewer. <https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards/?layers=0> (31 de marzo de 2025)

Navarro-Pons, Marina, Juan J. Muñoz-Pérez, Jorge Román-Sierra, & Santiago García. 2016. «Evidence of coastal dune mobility increases over the last half century in response to historical human intervention». *Scientia Marina* 80(2): 261–272. <https://doi.org/10.3989/scimar.04336.16A>

NCEI Hazard Runup Results. <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/runup-data?tsunamiEventId=468> (31 de marzo de 2025)

NOAA. «Tsunami dangers | National Oceanic and Atmospheric Administration». <https://www.noaa.gov/jetstream/tsunamis/tsunami-dangers> (15 de abril de 2025)

namirez. 2025. «HySEA - Home». *HySEA*. <https://edanya.uma.es/hyseal/> (7 de septiembre de 2025)

Oceanografía | Puertos del Estado. <https://www.puertos.es/servicios/oceanografia> (21 de agosto de 2025)

Okada, Yoshimitsu. 1985. «Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space». *Bulletin of the Seismological Society of America*

Okal, Emile A. 2011. «Tsunamigenic earthquakes: Past and present milestones». *Pure and Applied Geophysics* 168(6-7): 969–995. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0215-9>

Padilla Álvarez, Sergio. 2020. *Evaluación de la peligrosidad por tsunami en el municipio de Chipiona, Cádiz*. Santander: Universidad de Cantabria

(PDF) Influencia de los procesos tectónicos y volcánicos en la morfología de los márgenes continentales ibéricos. 2025a. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/280557029> Influencia de los procesos tectoni

[cos y volcanicos en la morfologia de los margenes continentales ibericos](#) (19 de agosto de 2025)

(PDF) Influencia de los procesos tectónicos y volcánicos en la morfología de los márgenes continentales ibéricos. 2025b. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/280557029_Influencia_de_los_procesos_tectonicos_y_volcanicos_en_la_morfologia_de_los_margenes_continentales_ibericos (19 de agosto de 2025)

(PDF) Tectonics and mud volcano development in the Gulf of Cadiz. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.007>

Peliz, Álvaro, Patrick Marchesiello, A. Miguel P. Santos, Jesus Dubert, Ana Teles-Machado, Martinho Marta-Almeida, & Bernard Le Cann. 2009. «Surface circulation in the Gulf of Cadiz: 2. Inflow-outflow coupling and the Gulf of Cadiz slope current». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114(C3). <https://doi.org/10.1029/2008JC004771>

PTWC. «North-Eastern Atlantic and Mediterranean | Tsunami Programme UNESCO-IOC». <https://tsunami.ioc.unesco.org/en/neam> (31 de marzo de 2025)

Roeber, Volker, & Kwok Fai Cheung. 2012. «Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments». *Coastal Engineering* 70: 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.06.001>

Ruiz Romero de la Cruz, Elena. 2004. *Historia económica de los puertos de la Bahía de Cádiz*. https://www.researchgate.net/publication/328415856_HISTORIA_ECONOMICA_DE_LOS_PUERTOS_DE_BAHIA_DE_CADIZ (8 de julio de 2025)

S. Serra, Cristina, Sara Martínez-Loriente, Eulàlia Gràcia, Roger Urgeles, Alexis Vizcaino, Héctor Perea, Rafael Bartolome, et al. 2020. «Tectonic evolution, geomorphology and influence of bottom currents along a large submarine canyon system: The São Vicente Canyon (SW Iberian Margin)». *Marine Geology* 426: 106219. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106219>

Satake, Kenji. 2002. «28 - Tsunamis». En *International Geophysics, International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*, eds. William H. K. Lee, Hiroo Kanamori, Paul C. Jennings, & Carl Kisslinger. Academic Press, 437–451. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(02\)80231-5](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80231-5)

SATREPS. 2018. *Guía para la estimación de peligro de tsunami*. Chile

Service, National Weather. «National Weather Service - Tsunami Hazards». <https://www.tsunami.gov/> (5 de mayo de 2025a)

Service, National Weather. «National Weather Service - Tsunami Hazards». <https://www.tsunami.gov/> (5 de mayo de 2025b)

Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/257211050_Shock-capturing_Boussinesq-type_model_for_nearshore_wave_processes (7 de julio de 2025)

Simoes, Jose Z, L. Mendes, Ana Baptista, Pedro Miranda, L. Mendes Victor, C. Andrade, R. DiMaro, et al. «Maximum entropy analysis of Portuguese tsunami: The tsunamis of 28/02/1969 and 26/04/1975»

Simulation of tsunami impact on sea surface salinity along Banda Aceh coastal waters, Indonesia | IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/46812> (31 de marzo de 2025)

Tappin, David R. 2017. «The generation of tsunamis». En *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd, 1–10. <https://doi.org/10.1002/9781118476406.emoe523>

Tsunami Generation: Earthquakes | National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.noaa.gov/jetstream/tsunamis/tsunami-generation-earthquakes> (7 de julio de 2025a)

Tsunami Generation: Earthquakes | National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.noaa.gov/jetstream/tsunamis/tsunami-generation-earthquakes> (7 de septiembre de 2025b)

UNDRR. 2018. «Tsunami hazard and risk assessment | UNDRR». <https://www.undrr.org/publication/tsunami-hazard-and-risk-assessment> (7 de septiembre de 2025)

Vazquez, Juan-Tomas. 2016. «Procesos generadores de maremotos en la región del Golfo de Cádiz». *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/315921591_Procesos_generadores_de_maremotos_en_la_region_del_Golfo_de_Cadiz (7 de abril de 2025)

Visualizador de tsunamis. <https://visualizadores.ign.es/tsunamis/> (31 de marzo de 2025)

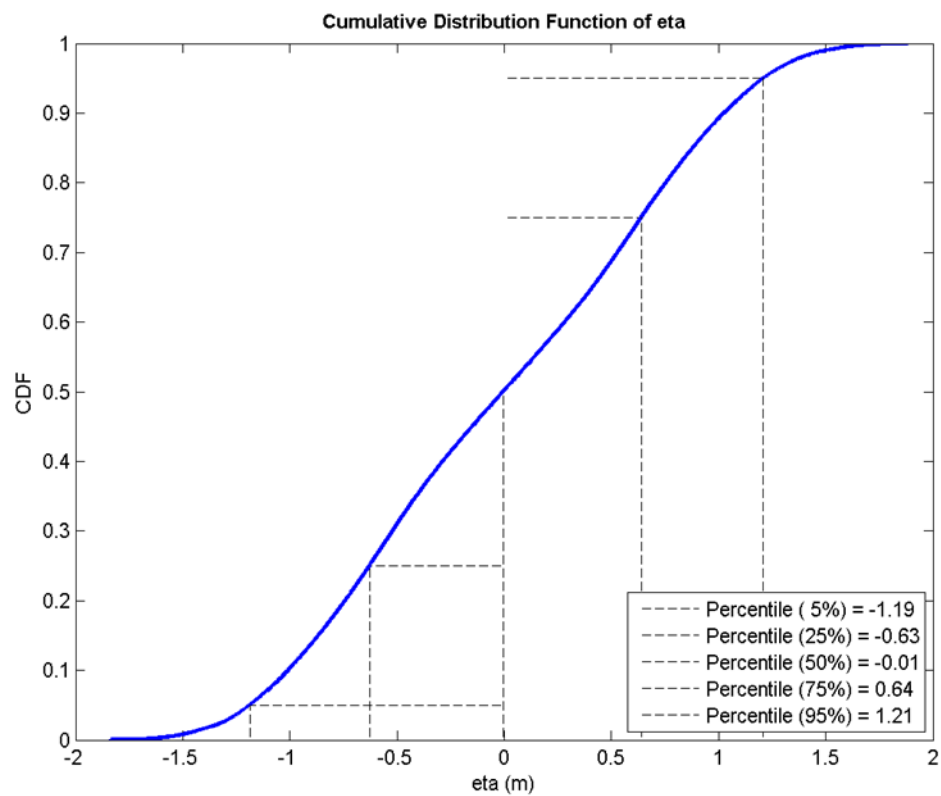
Vizcaino, A. 2009. «Processos sedimentaris d'edat Holocena al marge sud-oest de la Península Ibèrica: Aplicació a la paleosismologia marina». <https://digital.csic.es/handle/10261/101065> (7 de abril de 2025)

Wronna, Martin, Maria Ana Baptista, & Jorge Miguel Miranda. 2019. «Reanalysis of the 1761 transatlantic tsunami». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19(2): 337–352. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-337-2019>

Yamazaki, Yoshiki, Zygmunt Kowalik, & Kwok Fai Cheung. 2009. «Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and run-up». *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 61(5): 473–497. <https://doi.org/10.1002/fld.1952>

Zitellini, N., E. Gràcia, L. Matias, P. Terrinha, M.A. Abreu, G. DeAlteriis, J.P. Henriët, et al. 2009. «The quest for the Africa–Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar». *Earth and Planetary Science Letters* 280(1-4): 13–50. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.005>

ANEXO I: Distribución general de mareas en Cádiz



ANEXO II: Fuentes tsunamigénicas

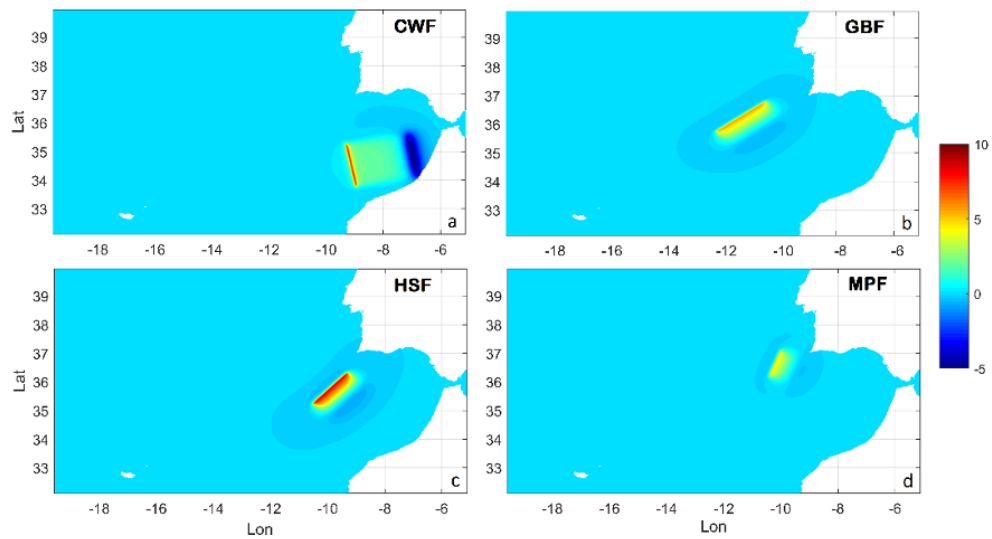
En el presente anexo se presentan los mapas de las fuentes tsunamigénicas, simuladas de manera individual.

a) Cádiz Wedge Fault (CWF).

c) Marqués Pombal Fault (MPF).

b) Horse shoe Fault (HSF).

d) Gorringe Bank Fault (GBF).



Nº	Ref	Length [m]	Width [m]	h_{Foc} [m]	h_{hypo} [m]	Lat	Long	Strike	Dip	Rake	Slip	M_w
a)	CWF	170 000	200 000	5 000	13 000	34,53	-9,121	349	5	90	20	8,75
b)	HSF	165 000	70 000	5 000	25 000	35,796	-9,913	42,1	35	90	15	8,5
c)	MPF	110 000	70 000	5 000	27 943	36,656	-10,2	20,1	35	90	8	8,5
d)	GBF	200 000	80 000	5 000	25 000	36,283	-11,35	53	35	90	10	8,7

ANEXO III: Elevación máxima de altura de ola en el mar

En el presente anexo se incluyen los mapas correspondientes a cada uno de los escenarios tsunamigénicos simulados de manera individual, mostrando la variable ***elevación de la superficie libre de inundación (η)***. En estos mapas se representa el run-up, definido como la elevación máxima alcanzada en tierra respecto al nivel de pleamar.

Ilustración a, Eta (η) - Cadiz Wedge Fault (CWF).

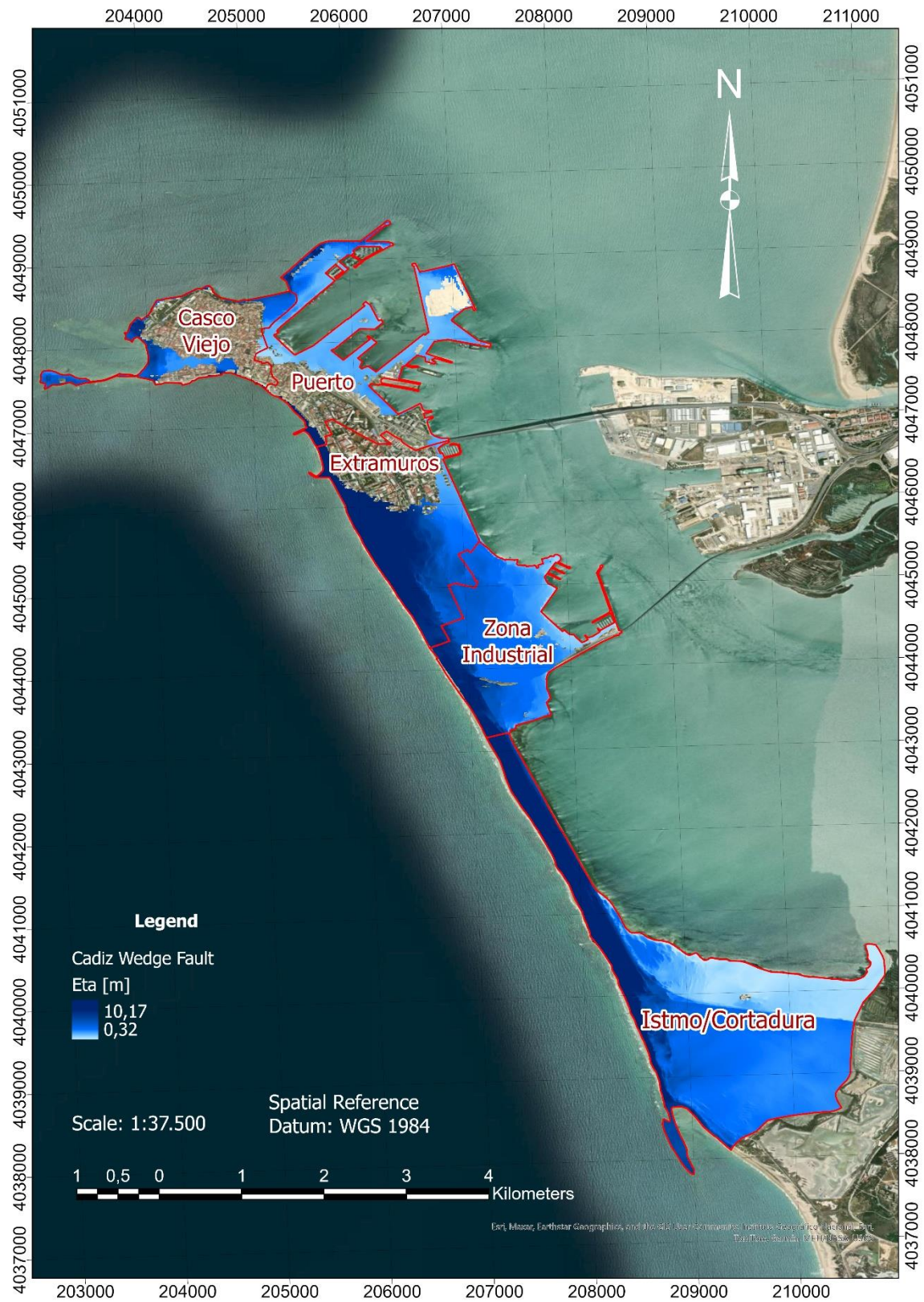


Ilustración b, Eta (η) – Horseshoe Fault (HSF).

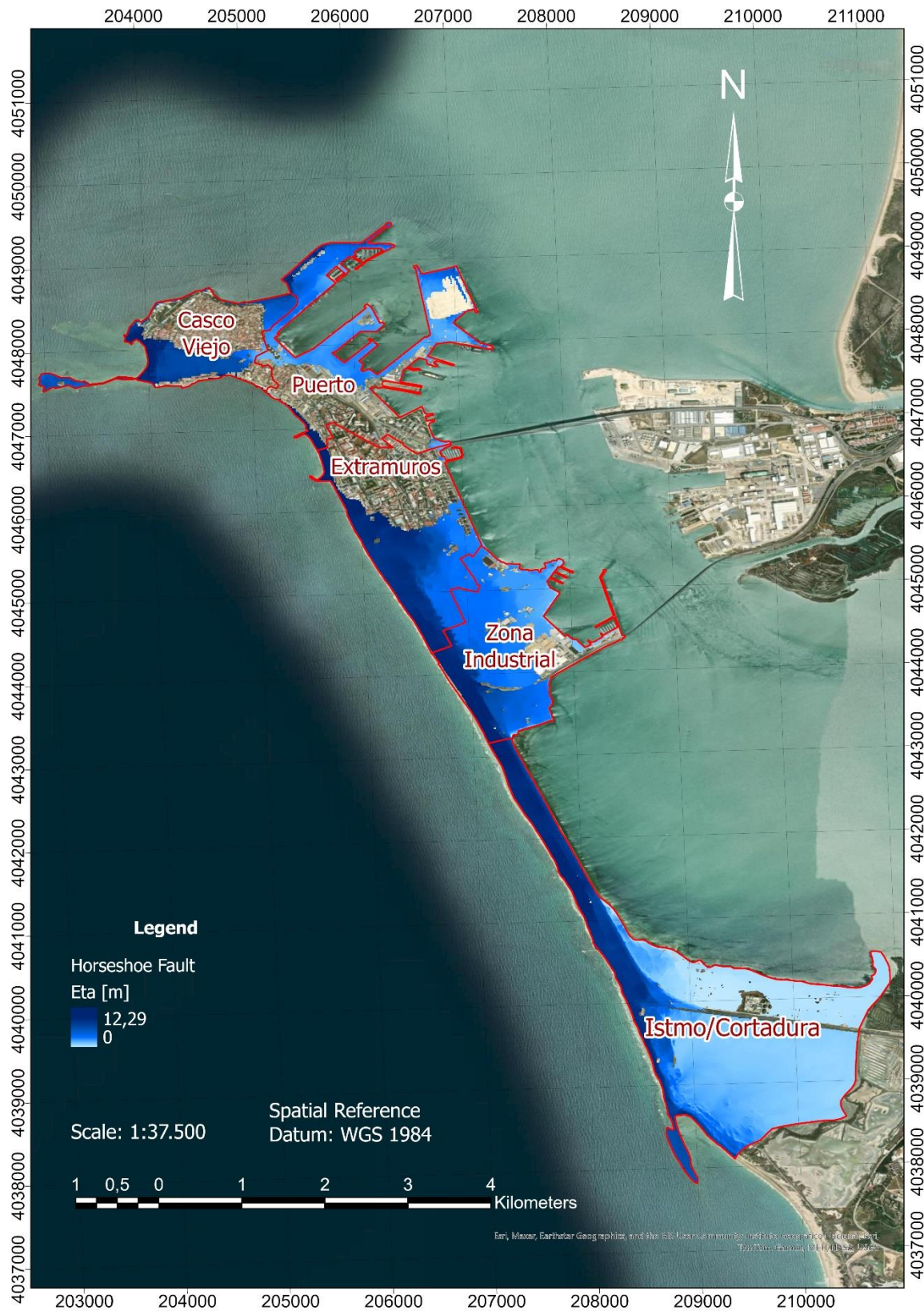
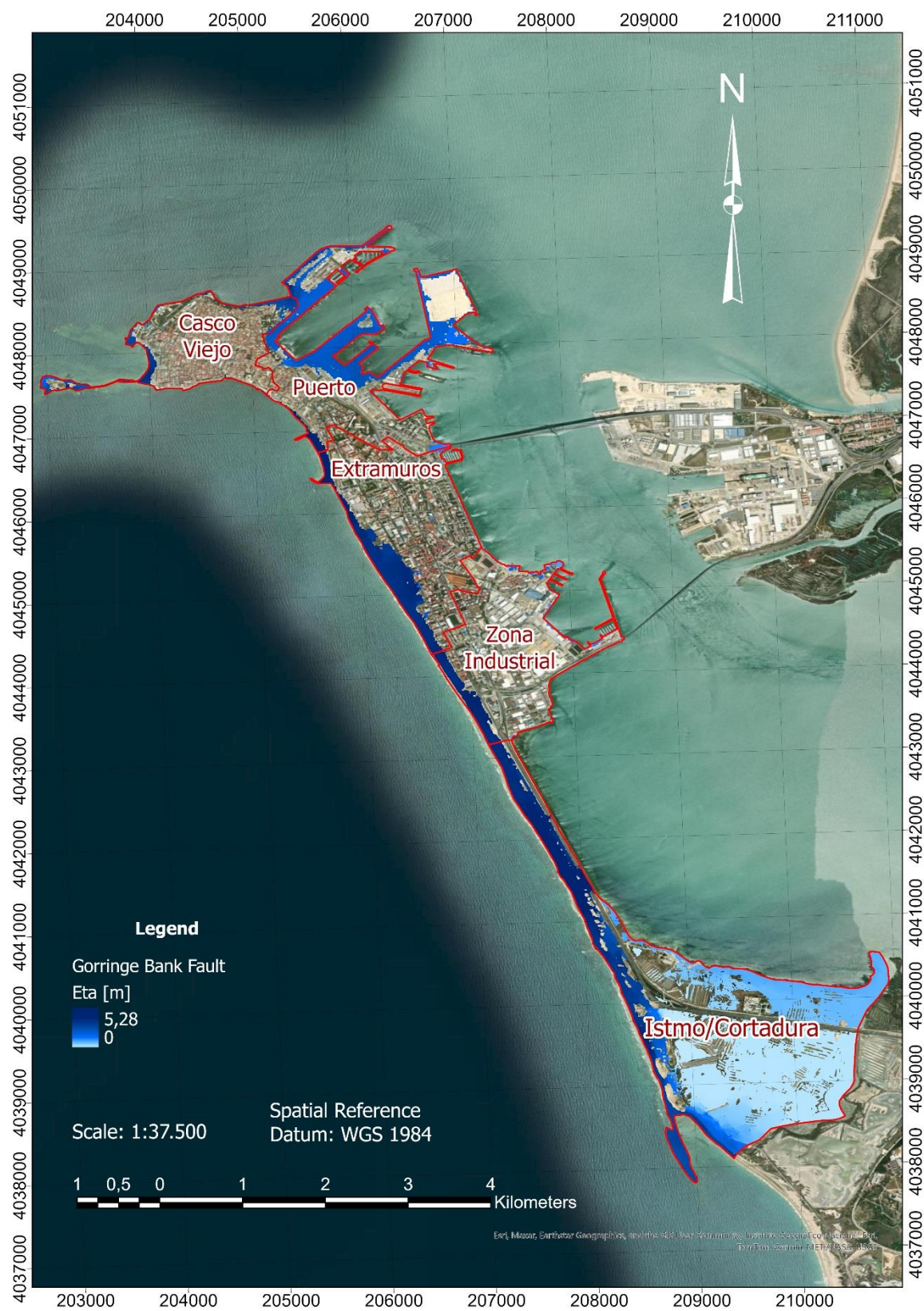


Ilustración c, Eta (η) – Marquês de Pombal Fault (MPF).



Ilustración d, Eta (η) – Gorringe Bank Fault (GBF).



ANEXO IV: Profundidad de inundación

En el presente anexo se incluyen los mapas correspondientes a cada uno de los escenarios tsunamigénicos simulados de manera individual, mostrando la variable ***profundidad de inundación (h)***. Esta variable se define como la elevación de la lámina de agua respecto al terreno, es decir, la diferencia entre la altura máxima alcanzada por la ola y la cota del suelo.

Ilustración a, Profundidad inundación - Cadiz Wedge Fault (CWF).

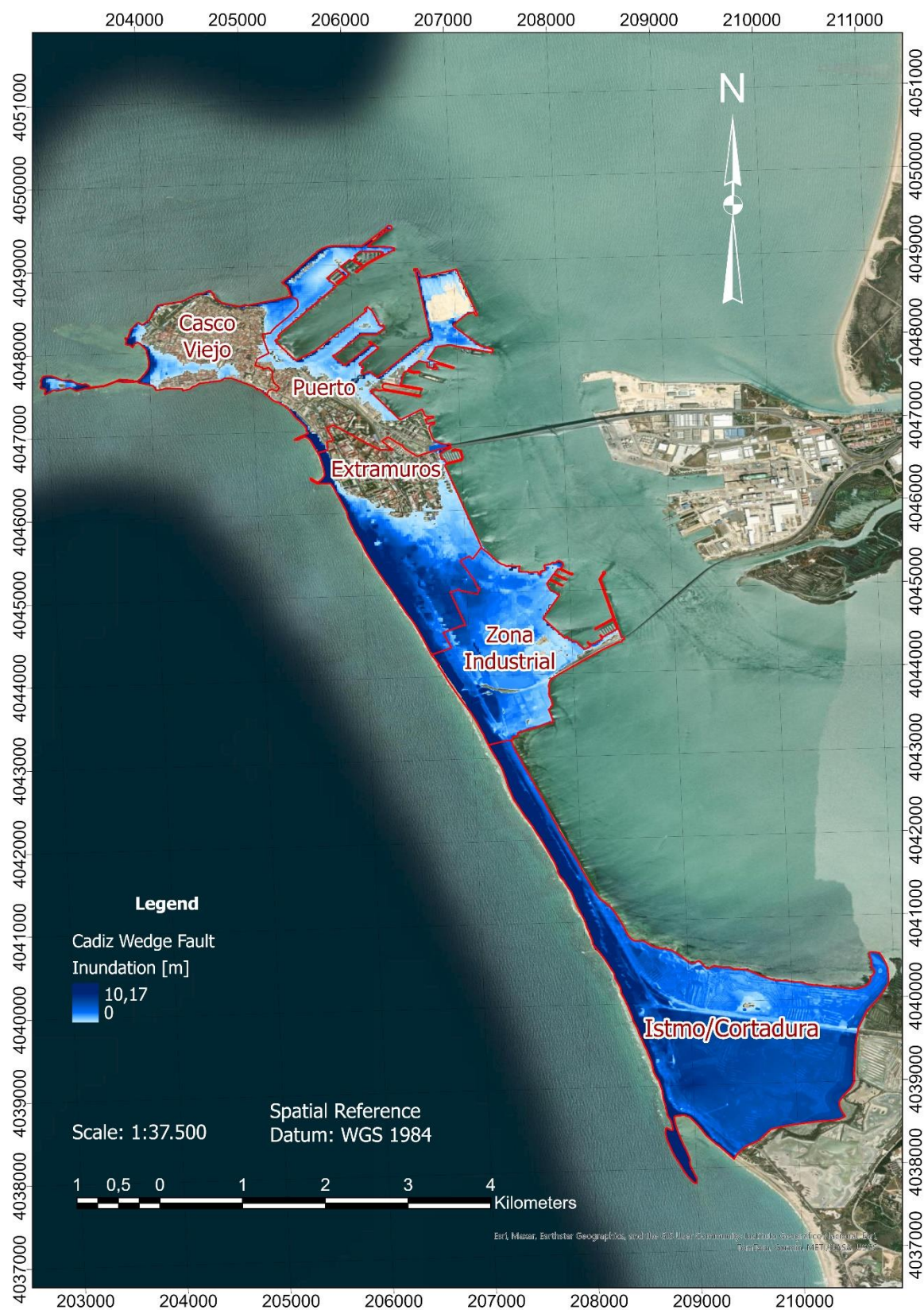


Ilustración b, Profundidad inundación – Horseshoe Fault (HSF).

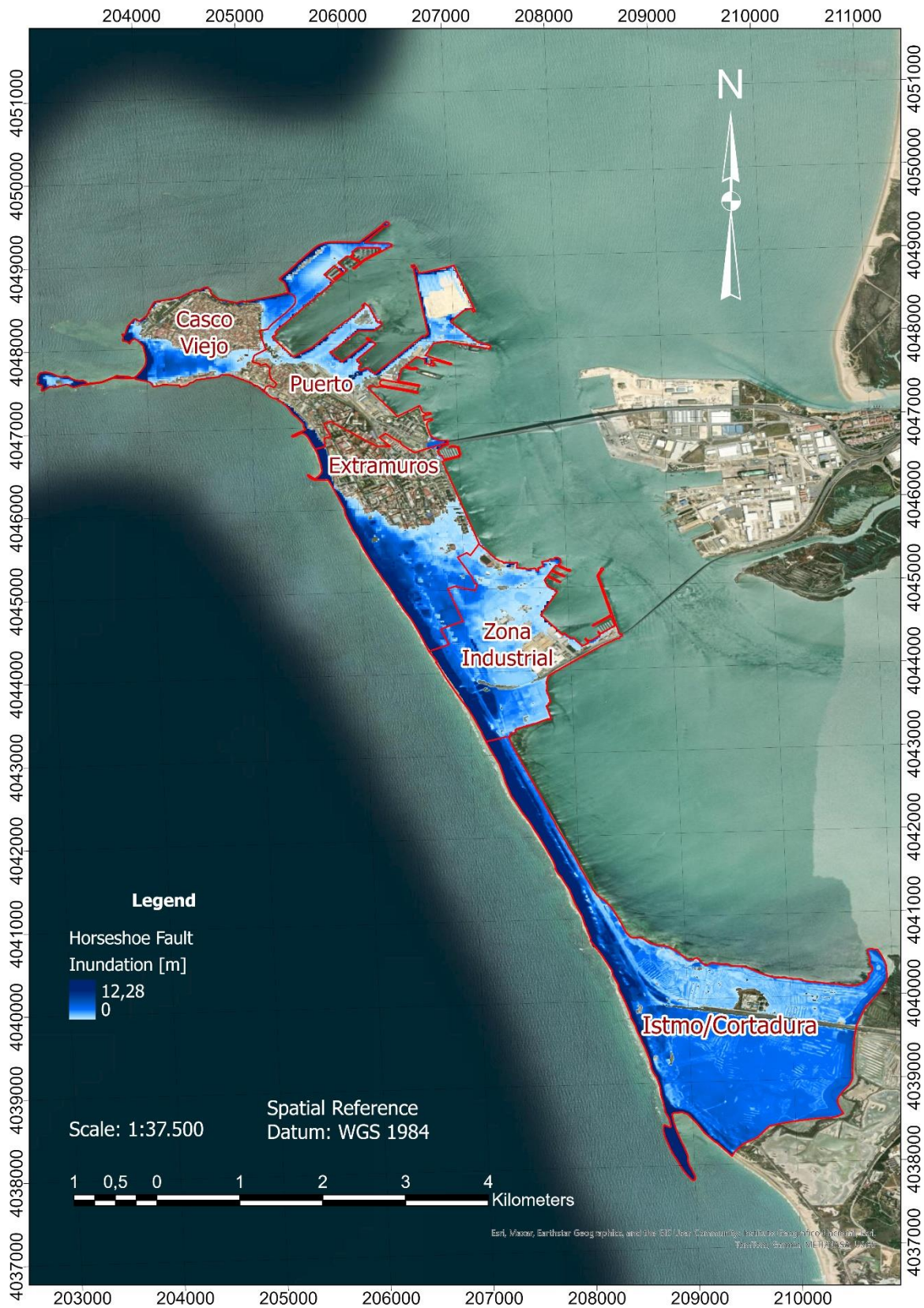
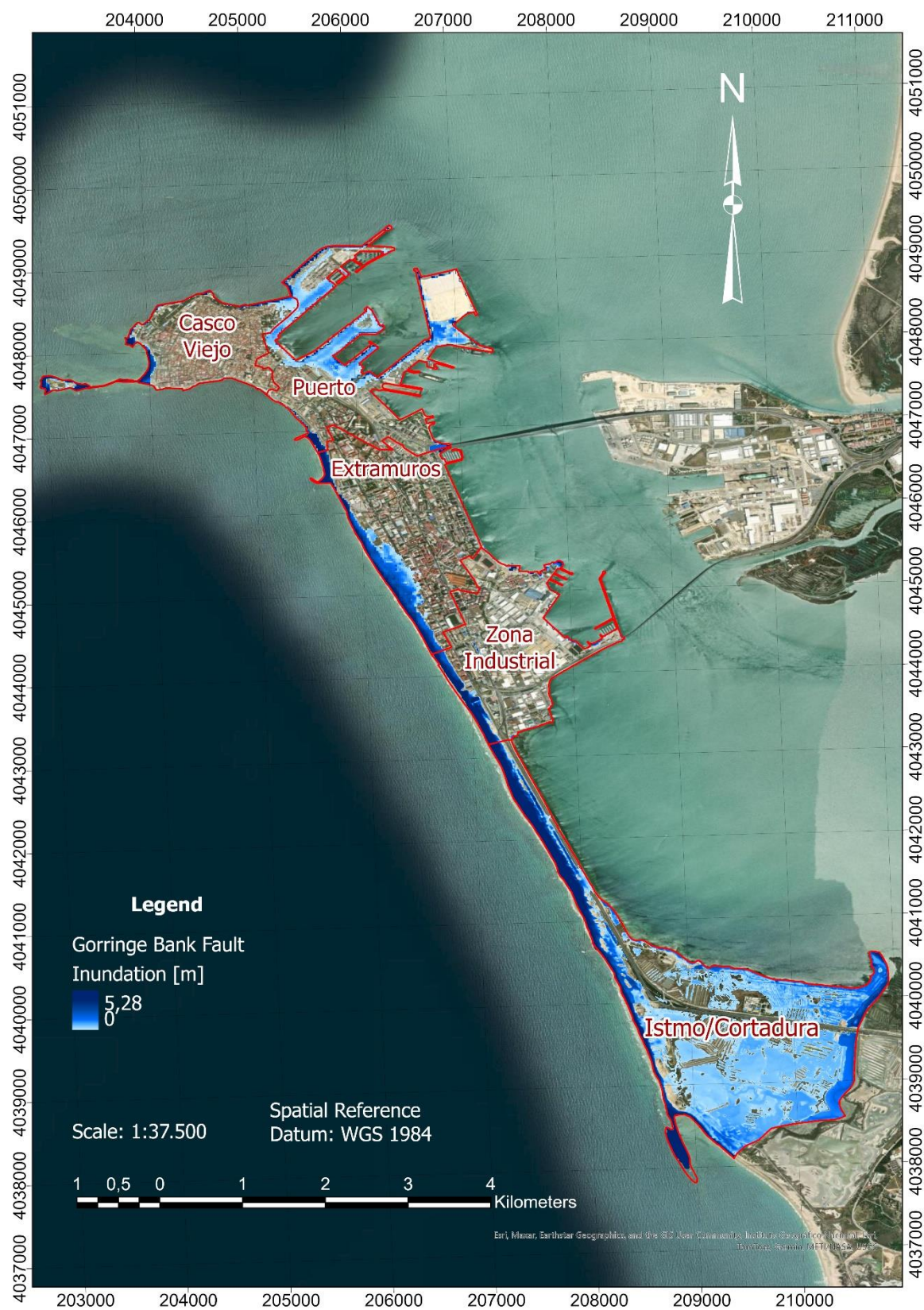


Ilustración c, Profundidad inundación – Marquês de Pombal Fault (MPF).



Ilustración d, Profundidad inundación – Gorringe Bank Fault (GBF).



ANEXO V: Arrastre

En el presente anexo se incluyen los mapas correspondientes a cada uno de los escenarios tsunamigénicos simulados de manera individual, mostrando la variable **arrastre (d)**. Esta variable se define como el producto entre la velocidad del flujo y la profundidad de inundación, y permite cuantificar el nivel de riesgo de arrastre que podría experimentar una persona.

Ilustración a, Arrastre (d) – Cadiz Wedge Fault (CWF).

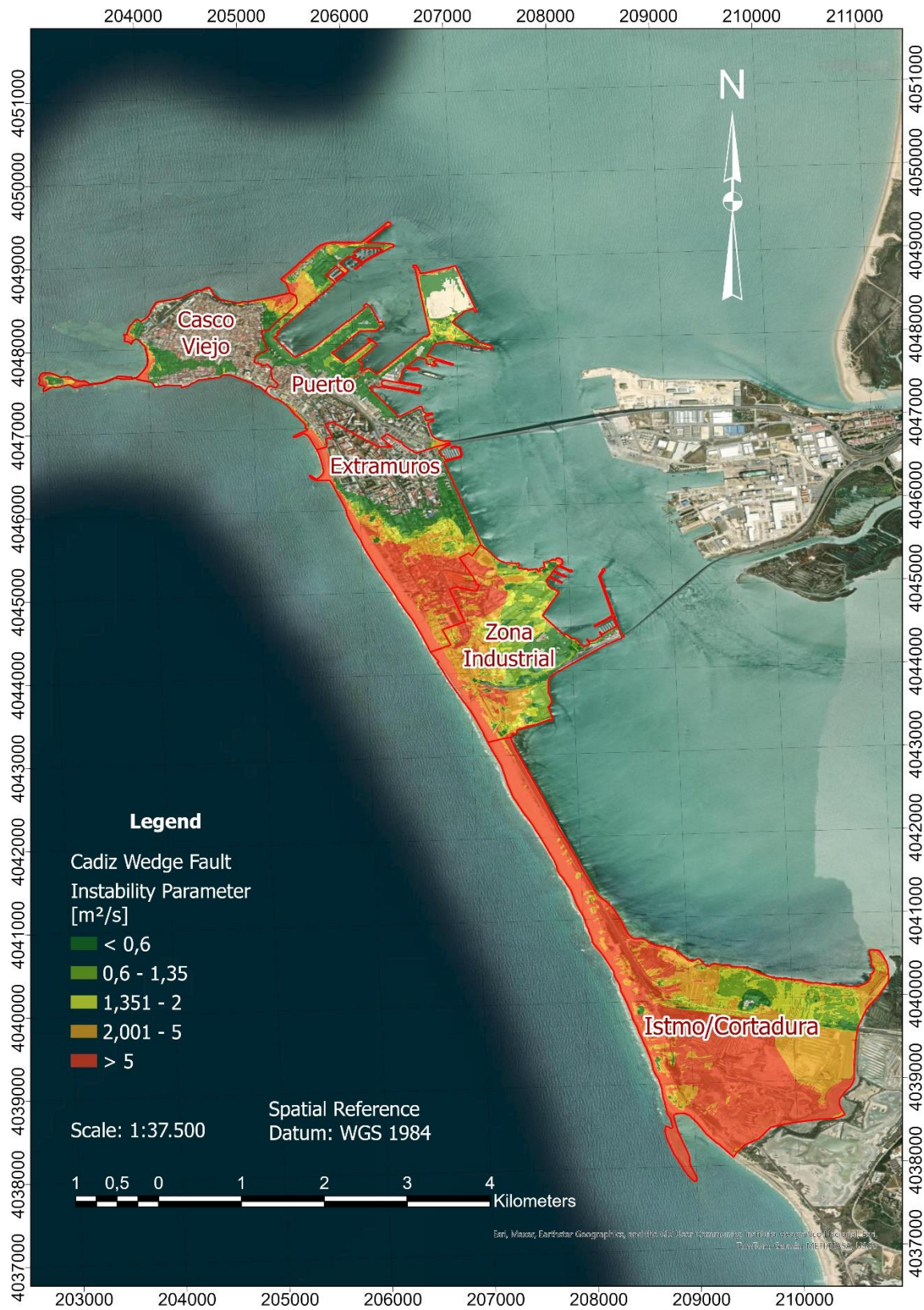


Ilustración b, Arrastre (d) – Horseshoe Fault (HSF).

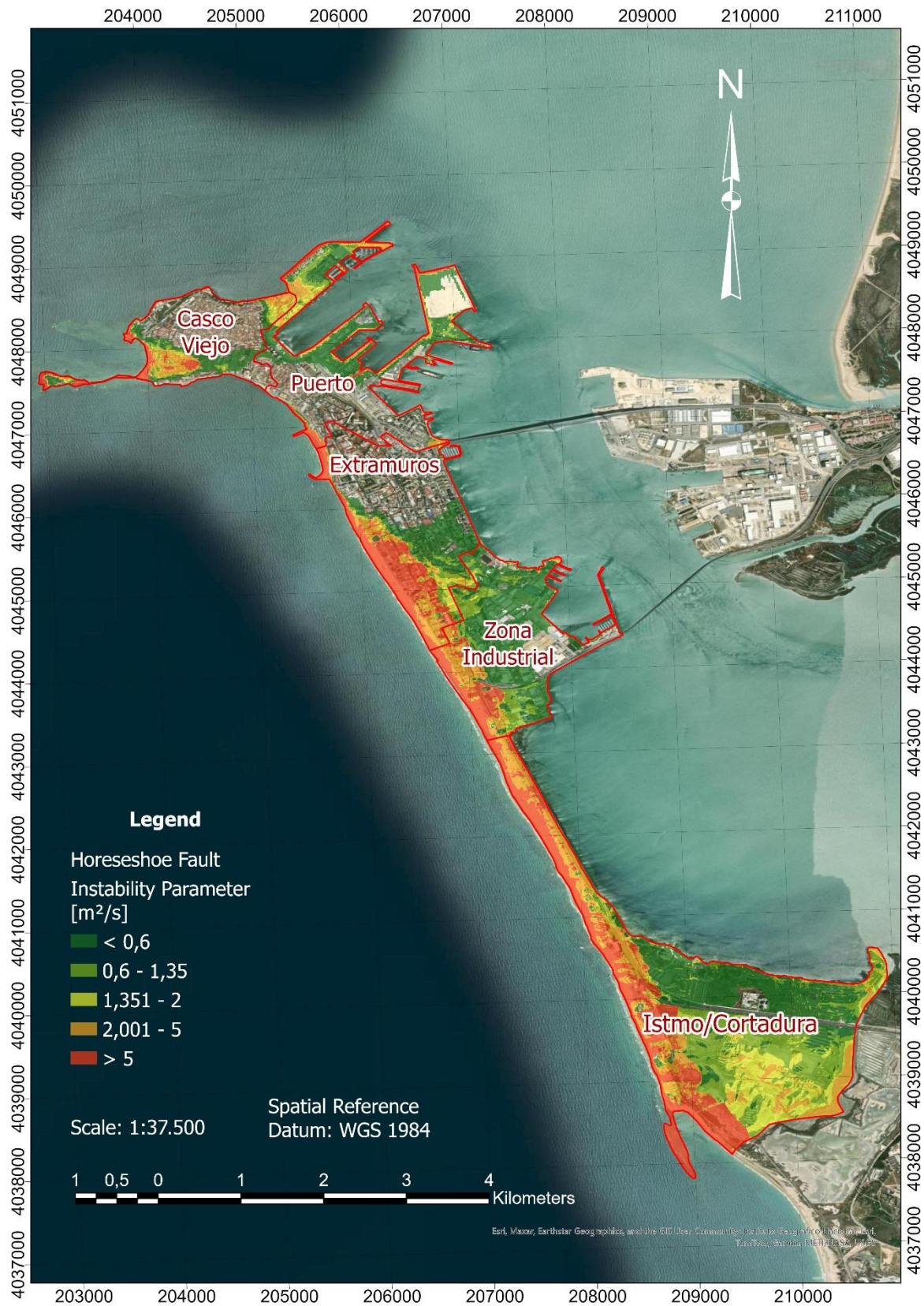
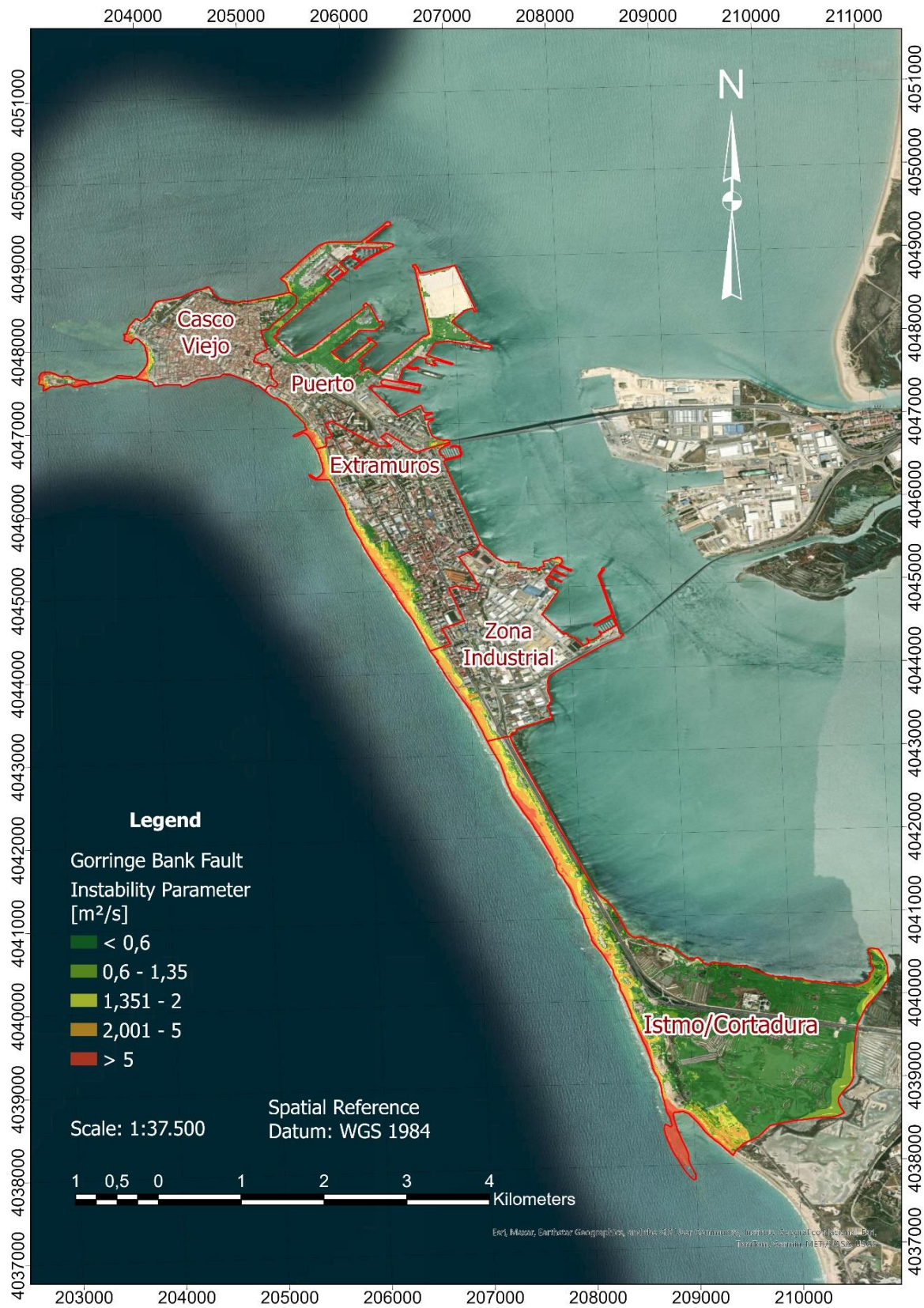


Ilustración c, Arrastre (d) – Marquês de Pombal Fault (MPF).



Ilustración d, Arrastre (d) – Gorringe Bank Fault (GBF).



ANEXO VI: Tiempo de Llegada

En el presente anexo se incluyen los mapas correspondientes a cada uno de los escenarios tsunamigénicos simulados de manera individual, mostrando la variable ***tiempo de llegada (t)***. Esta variable se define como el tiempo mínimo que tarda la onda en propagarse desde su generación hasta el punto de estudio.

Ilustración a, Tiempos de arribo – Cádiz Wedge Fault (CWF).

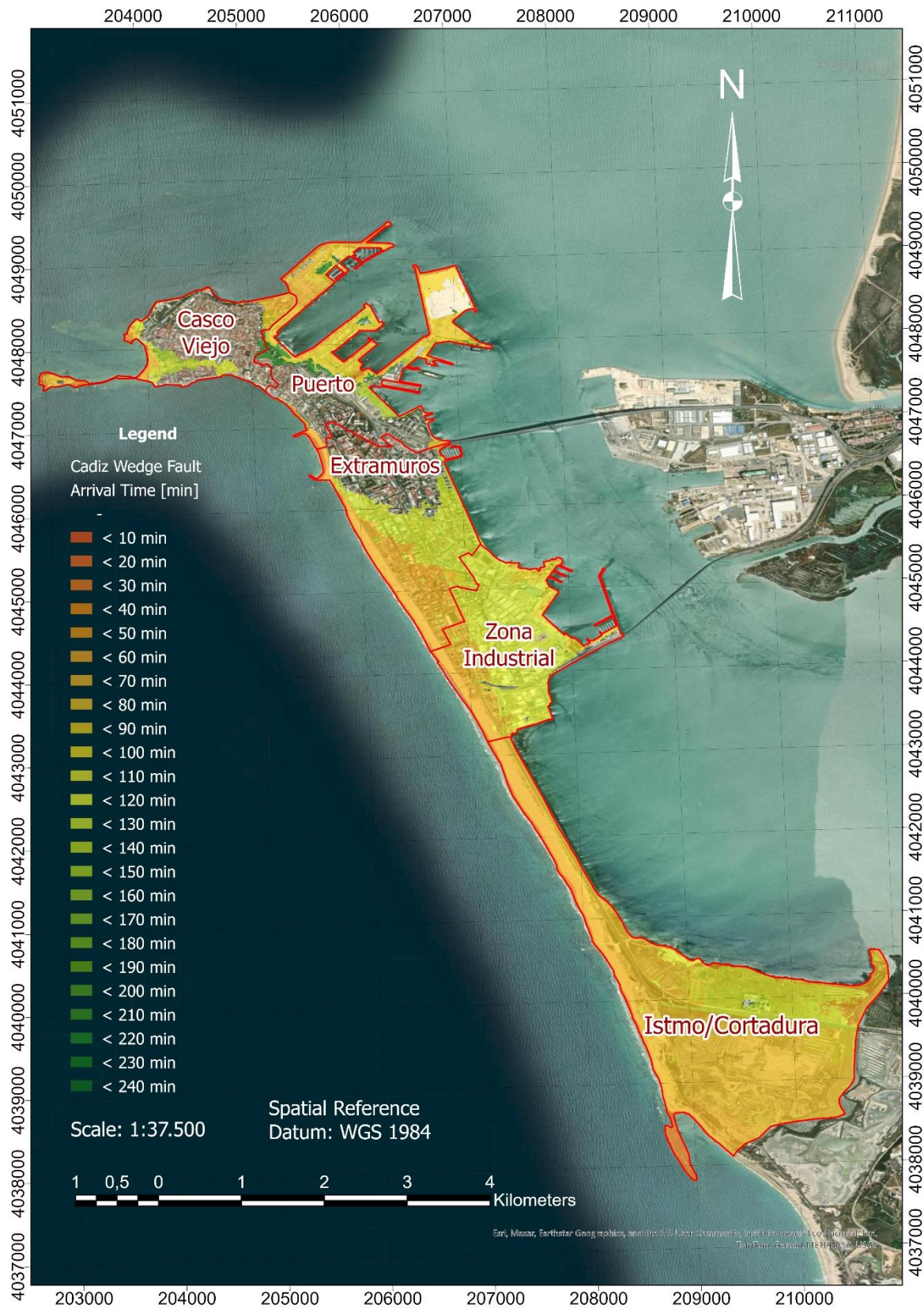


Ilustración b, Tiempos de arribo – Horseshoe Fault (HSF).

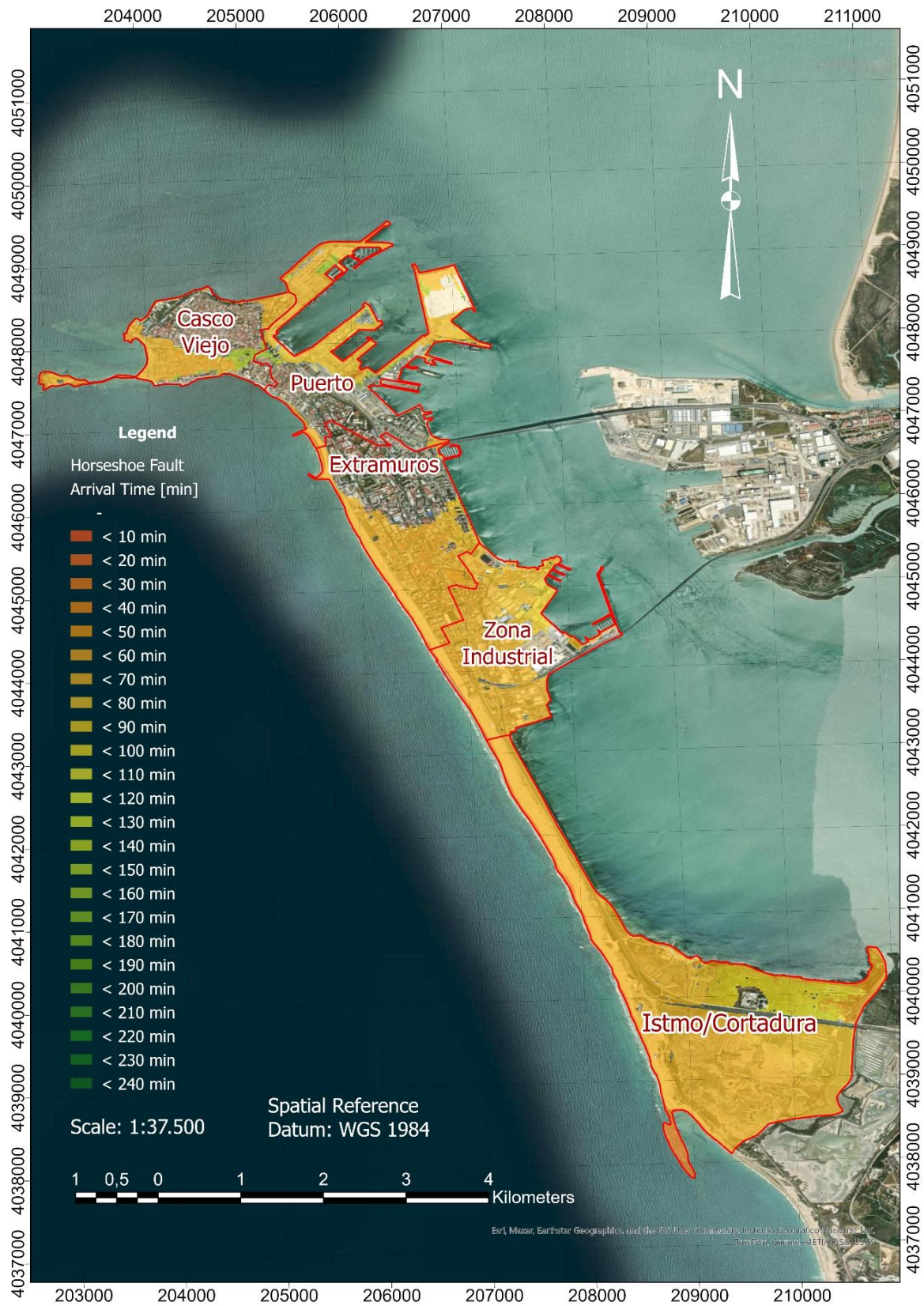


Ilustración c, Tiempos de arribo – Marquês de Pombal Fault (MPF).



Ilustración d, Tiempos de arribo – Gorringe Bank Fault (GBF).



ANEXO VII: Código MatLab Suma-Lineal

```
%% Master Tesis
%% Leonid Lange
%% 21.07.1995

clc
clear all
close all

% Set Path
ordner = 'D:\LEO\NetCDF_GBF'; % Path of data

% Find NetCDF
dateien = dir(fullfile(ordner, 'Malla_3L.nc'));
if isempty(dateien)
    error('There was no NetCDF-Data found');
end

% Complete Path
dateipfad = fullfile(ordner, dateien(1).name);

% Info
ncdisp(dateipfad);

%% Set Variables
max_height = ncread(dateipfad, 'max_height'); % [m]
bati = ncread(dateipfad, 'original_bathy'); % [m]

% Organize Dimensions
bati = -1*flipud(bati');
max_height = flipud(max_height');

% Cut Topo
Topo = bati;
Topo(Topo <= 0) = NaN;

max_height(isnan(max_height)) = 0;

%% Visualize

% Old Inundation
figure(1)
imagesc(max_height);
colorbar;
title('Inundation');
impixelinfo;
```

```

% Topography
figure(3)
imagesc(Topo);
colorbar;
title('Topography');
impixelinfo;

%% Calculation

[rows, cols] = size(Topo);
d_new = NaN(rows, cols); % NaN as standard

for i = 1:rows
    eta_carried = NaN; % surface of the water, just in case

    for j = 1:cols
        h = Topo(i, j);
        d_old = max_height(i, j);

        if d_old > 0
            % original depth & tide
            d_new(i, j) = d_old + 3;

        elseif isnan(eta_carried)
            eta_carried = h + 3;
            d_tmp = eta_carried - h;

            if d_tmp > 0
                d_new(i, j) = d_tmp;
            else
                d_new(i, j) = NaN;
                break; % if there's no more water
            end

        else

            d_tmp = eta_carried - h;

            if d_tmp > 0
                d_new(i, j) = d_tmp;
            else
                d_new(i, j) = NaN;
                break; % stop inundation
            end

        end
    end
end
end

```