UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

“EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DE PELIGRO Y RIESGO POR TSUNAMI DE ORIGEN CERCANO EN LA ZONA COSTERA DEL DISTRITO DE CHORRILLOS”

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

CARLOS FRANCISCO DÁVILA DE LA CRUZ
ID: 0000-0002-5671-0111

ASESOR:

PhD. MIGUEL LUIS ESTRADA MENDOZA
ID: 0000-0002-8646-3852

LIMA - PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados
“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”
Dávila de la Cruz, Carlos Francisco
carlos.davila.d@uni.pe
(+51) 964005070

DEDICATORIA

En memoria a las víctimas de sismos, tsunamis y otras amenazas naturales.

Mami, con mucho cariño te dedico este trabajo. Te amo inmensamente.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, cuyos estudiantes y docentes me alentaron a esforzarme y nunca conformarme. Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (Pronabec), gracias a su apoyo económico mediante la Beca Permanencia pude dedicarme completamente al estudio durante la carrera profesional. Y al Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), por brindarme sus equipos e infraestructura en el desarrollo de esta tesis. Me siento muy contento de ser parte de este centro de investigación.

Mi más profundo agradecimiento a mi asesor, el Dr. Miguel Luis Estrada Mendoza. Desde que llegué al CISMID, me ha demostrado su apoyo incondicionalmente. Su experiencia y recomendaciones me motivan a mejorar; no solo en lo profesional, sino también en lo personal. Valoro el tiempo que ha dedicado a la revisión de este y otros trabajos. Muchas gracias, Dr. Estrada, siempre aprendo algo nuevo de usted.

Agradezco también a mis coasesores, quienes amablemente me orientaron y resolvieron mis consultas: al Dr. Luis Ceferino, por su apoyo en el planteamiento y desarrollo de este trabajo, guiándome con paciencia y dedicación; al Mg. Jorge Morales, por brindarme la oportunidad de ser parte del Laboratorio de Geomática del CISMID y compartir sus conocimientos; y al Dr. Shunichi Koshimura, sus valiosas sugerencias me ayudaron a enriquecer el trabajo.

A mis amigos Ángel Quesquén, Oscar Solis y Brigitte Puchoc: su compañía en el laboratorio hizo que el desarrollo de esta tesis fuera más ameno. Gracias por todos los momentos que hemos compartido. A Fernando García, por enseñarme que investigar no es tan difícil como parece, siempre estuvo preocupado por mis avances y aconsejándome constantemente.

Finalmente, agradezco a mi familia por confiar en que lograría mis objetivos. Gracias, papi, por enseñarme que, con integridad y disciplina, lograré ser una mejor persona. Mami, te doy las gracias por cuidar de mí y darme los mejores consejos, tengo la suerte de tenerte. A mi hermana Sandra: te admiro por ser mi ejemplo de fortaleza y perseverancia. Karla, de ti aprendí a aspirar muy alto, te recordaré por siempre. A mi sobrino Diego: eres como mi hermano, gracias por tantas risas. Y, en especial, a Carol, por ser una enamorada maravillosa y mi compañía en este largo camino. Gracias por escucharme y alentarme a seguir adelante.

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y el Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA) en el marco del Concurso E073-2024-01 “Tesis de Pregrado y Postgrado en Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica”, según contrato N° PE501089680-2024-PROCIENCIA.

ÍNDICE

Resumen **3**

Abstract **4**

Prólogo **5**

Lista de tablas **6**

Lista de figuras **7**

Lista de símbolos y siglas **9**

Capítulo I: Introducción **13**
1.1 Generalidades 13
1.2 Descripción del problema de investigación 15
1.3 Objetivos del estudio 18
1.3.1 Objetivo General 18
1.3.2 Objetivos Específicos 18
1.4 Antecedentes investigativos 18
1.5 Metodología 22

Capítulo II: Marco teórico y conceptual **24**
2.1 Potencial sísmico de la zona central del Perú 24
2.1.1 Características sismotectónicas 24
2.1.2 Acoplamiento intersísmico 24
2.1.3 Catálogo histórico 26
2.2 Rupturas sísmicas 26
2.2.1 Estimación de parámetros sísmicos 26
2.2.2 Ocurrencia de rupturas sísmicas 27
2.2.3 Modelo independiente del tiempo 28
2.2.4 Modelo dependiente del tiempo 29
2.3 Amenaza por tsunami 32
2.3.1 Fase de generación 32
2.3.2 Fases de propagación e inundación 34
2.3.3 Teoría de aguas someras 35
2.3.4 Evaluación probabilística 36
2.4 Evaluación de daños por tsunami 37

2.4.1 Funciones de fragilidad 37
2.4.2 Simulación de Monte Carlo 40

Capítulo III: Modelado de rupturas sísmicas 42
3.1 Generación de escenarios sísmicos 42
3.2 Análisis de la ocurrencia de escenarios sísmicos 46
3.2.1 Análisis independiente del tiempo 46
3.2.2 Análisis dependiente del tiempo 48
3.3 Discusión de resultados 61

Capítulo IV: Peligro probabilístico por tsunami 62
4.1 Amenaza por tsunami 62
4.1.1 Deformación inicial de la superficie del océano 62
4.1.2 Propagación del tsunami 64
4.1.3 Inundación por tsunami 66
4.2 Curvas de peligro por tsunami 73
4.2.1 Análisis independiente del tiempo 73
4.2.2 Análisis dependiente del tiempo 74
4.3 Comparación entre análisis de peligro 75
4.3.1 Curvas de peligro 75
4.3.2 Mapas uniformes de peligro por tsunami 78
4.4 Discusión de resultados 80

Capítulo V: Riesgo por tsunami 82
5.1 Daños por tsunami 82
5.1.1 Clasificación de las edificaciones 82
5.1.2 Funciones de fragilidad por tsunami 86
5.1.3 Aplicación de las funciones de fragilidad 88
5.2 Pérdidas por tsunami 92
5.2.1 Funciones de factor de daño medio 92
5.2.2 Estimación de factores de daño medio 92
5.2.3 Mapas uniformes de factores de daño 93
5.3 Discusión de resultados 96

Conclusiones 97

Recomendaciones 99

Referencias bibliográficas 100

Anexo 106

RESUMEN

El estudio de los tsunamis en el Perú se ha realizado tradicionalmente desde un enfoque determinístico, lo que implica que no se consideren todos los escenarios sísmicos posibles ni sus respectivas probabilidades de ocurrencia. Para abordar este problema, la presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el peligro y riesgo por tsunami en la zona costera del distrito de Chorrillos, considerando la incertidumbre y acoplamiento espaciotemporal en la ocurrencia sísmica mediante un planteamiento probabilístico.

A través de una segmentación de la zona de subducción central del Perú, se generó un total de 433 escenarios sísmicos posibles con magnitudes entre 7.5 y 9.0 M_w. La frecuencia de estos escenarios fue evaluada usando un modelo de ocurrencia que captura la interacción en espacio y tiempo de los sismos para seis ventanas de tiempo: 1, 5, 20, 50, 150 y 450 años. Las simulaciones obtenidas fueron comparadas con un análisis independiente del tiempo para evaluar la influencia de la interacción espaciotemporal en la ocurrencia sísmica y peligro por tsunami.

Se realizó una evaluación probabilística del peligro por tsunami combinando las inundaciones generadas por los escenarios sísmicos con sus respectivas probabilidades de ocurrencia. Los resultados fueron representados en curvas de peligro que muestran las probabilidades de excedencia de las profundidades de inundación en una región. Analizando los siguientes 50 años, se generaron mapas de peligro para periodos de retorno de 475 y 2475 años, que representan las profundidades de inundación que son excedidas con 10 y 2 % de probabilidad, respectivamente.

Aplicando funciones de fragilidad, se estimaron las probabilidades de daño por tsunami en las manzanas del área de estudio considerando las profundidades de inundación. Mediante simulaciones de Monte Carlo, se desarrollaron curvas de daño que representan las probabilidades de excedencia del número de manzanas dañadas por tsunami. Finalmente, se evaluaron los factores de daño en las manzanas para los periodos de retorno de 475 y 2475 años como representación del grado de daño o pérdida que se tendría a causa del tsunami.

La evaluación probabilística muestra que el modelo de ocurrencia fue consistente con las observaciones históricas y capturó la influencia del silencio sísmico en el peligro por tsunami. Por otro lado, el análisis independiente del tiempo produjo un mayor peligro a largo plazo ($\geq$ 50 años), cuya diferencia se incrementó a medida que la ventana de tiempo fue mayor. Los mapas de peligro y factores de daño para los dos periodos de retorno mostraron que las regiones ubicadas al sur serían las más afectadas debido a su baja elevación en comparación con las demás.

Palabras clave: sismo, tsunami, peligro, riesgo, evaluación probabilística.

ABSTRACT

The study of tsunamis in Peru has traditionally been carried out from a deterministic approach, which implies that not all possible seismic scenarios and their respective probabilities of occurrence are considered. To address this problem, the main objective of this research is to assess the tsunami hazard and risk in the coastal zone of the district of Chorrillos considering the uncertainty and spatiotemporal coupling in the seismic occurrence from a probabilistic approach.

Through a segmentation of the central subduction zone of Peru, a total of 433 possible seismic scenarios with magnitudes between 7.5 and 9.0 M_w were generated. The frequency of these scenarios was evaluated using an occurrence model that captures the interaction in space and time of the earthquakes for six-time windows: 1, 5, 20, 50, 150 and 450 years. The obtained simulations were compared with a time-independent analysis to evaluate the influence of spatiotemporal interaction on seismic occurrence and tsunami hazard.

A probabilistic tsunami hazard assessment was performed by combining the inundation generated by the seismic scenarios with their respective probabilities of occurrence. The results were represented in hazard curves showing the probabilities of exceedance of inundation depths in a region. Analyzing the next 50 years, hazard maps were generated for return periods of 475 and 2475 years, which represent the inundation depths that are exceeded with 10 and 2 % probability, respectively.

Applying fragility functions, tsunami damage probabilities were estimated for the blocks of the study area considering the inundation depths. Using Monte Carlo simulations, damage curves were developed that represent the probabilities of exceeding the number of blocks damaged by tsunami. Finally, the damage factors in the blocks were evaluated for the return periods of 475 and 2475 years as a representation of the degree of damage or loss that would be caused by the tsunami.

The probabilistic evaluation shows that the occurrence model was consistent with historical observations and captured the influence of seismic silence on tsunami hazard. On the other hand, the time-independent analysis produced a higher long-term hazard ($\geq$ 50 years), the difference of which increased as the time window became longer. The hazard maps and damage factors for the two return periods showed that the regions located to the south would be the most affected due to their low elevation compared to the others.

Keywords: earthquake, tsunami, hazard, risk, probabilistic assessment.

PRÓLOGO

En esta tesis, Carlos Dávila ha evaluado el peligro y riesgo por tsunami en la zona costera del distrito de Chorrillos desde un enfoque distinto al que las instituciones de nuestro país han estado utilizando, ya que implementó un planteamiento probabilístico que permitió tener una perspectiva más completa del peligro y riesgo por tsunami en la zona de estudio.

La investigación consistió en la evaluación de las inundaciones producidas por todos los escenarios sísmicos posibles que afectan al área de estudio, así como el cálculo de sus probabilidades de ocurrencia. Lo novedoso de este trabajo fue que se combinaron estos dos resultados para desarrollar mapas probabilísticos de peligro y riesgo por tsunami que representan escenarios para dos periodos de retorno: 475 y 2475 años, de manera análoga a lo que la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente establece para la evaluación del peligro sísmico en el diseño de edificaciones sismorresistentes.

Según estudios recientes, se ha identificado que Lima presenta un gran silencio sísmico que podría desencadenar un sismo de gran magnitud en los próximos años y, en consecuencia, un tsunami devastador. Ante esta situación, se incorporó un modelo de ocurrencia que considera la interacción en espacio y tiempo de las rupturas sísmicas en la evaluación probabilística de tsunamis. Los resultados demostraron que este modelo logró capturar la influencia del silencio sísmico en el peligro por tsunami, a diferencia de un análisis independiente del tiempo, donde se asume que los sismos ocurren con la misma probabilidad independientemente del tiempo transcurrido desde el último evento.

Este estudio será de gran utilidad, ya que permitirá tomar decisiones más informadas y fundamentadas acerca del peligro y riesgo por tsunami en el distrito de Chorrillos. Además, al ser la primera aplicación de evaluaciones probabilísticas por tsunami en el Perú, representa un hito importante en la mejora de la gestión del riesgo de desastres por tsunami en las zonas costeras de nuestro país.

Asesor

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1.1: Tsunamis ocurridos en la zona central del Perú 14
Tabla N° 3.1: Parámetros de los escenarios sísmicos generados 44
Tabla N° 3.2: Magnitudes de los sismos históricos 46
Tabla N° 3.3: Probabilidades según la distribución de Gutenberg Richter 48
Tabla N° 3.4: Ocurrencia de los sismos históricos en cada sección 50
Tabla N° 3.5: Parámetros estadísticos en cada sección 51
Tabla N° 3.6: Parámetros estadísticos usando el método de MLE 52
Tabla N° 3.7: Probabilidad de ocurrencia de las magnitudes 61
Tabla N° 4.1: Deformaciones máximas de escenarios 9.0 M_w 64
Tabla N° 4.2: Características de los dominios de estudio 65
Tabla N° 4.3: Coeficientes de rugosidad según el uso de suelo 68
Tabla N° 4.4: Resultados de inundación para escenarios 8.6 M_w 70
Tabla N° 4.5: Resultados de inundación para escenarios 9.0 M_w 71
Tabla N° 5.1: Categorización de las edificaciones 83
Tabla N° 5.2: Categorización de las edificaciones del distrito de Chorrillos 84
Tabla N° 5.3: Niveles de daño por tsunami 86
Tabla N° 5.4: Parámetros de las funciones de fragilidad 88

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Mapa sísmico del Perú 13
Figura N° 1.2: Sismos recientes en la zona central del Perú 15
Figura N° 1.3: Carta de inundación de Chorrillos 16
Figura N° 1.4: Vistas de la zona costera del distrito de Chorrillos 17
Figura N° 1.5: Metodología del estudio 23
Figura N° 2.1: Fase intersísmica 24
Figura N° 2.2: Acoplamiento en la zona central del Perú 25
Figura N° 2.3: Catálogo sísmico de la zona central del Perú 26
Figura N° 2.4: Discretización de una falla 29
Figura N° 2.5: Parámetros que caracterizan las rupturas 33
Figura N° 2.6: Parámetros en la inundación por tsunami 34
Figura N° 2.7: Funciones de fragilidad 38
Figura N° 2.8: Construcción de una función de fragilidad 39
Figura N° 2.9: Ejemplo de simulación de Monte Carlo 40
Figura N° 3.1: Segmentación de la zona de subducción central del Perú 42
Figura N° 3.2: Rupturas sísmicas posibles en la región de estudio 43
Figura N° 3.3: Escenarios sísmicos a lo largo del buzamiento 45
Figura N° 3.4: Escenarios sísmicos generados 45
Figura N° 3.5: Tasa media anual de excedencia de las magnitudes . . . 47
Figura N° 3.6: Probabilidades de ocurrencia de cada magnitud 48
Figura N° 3.7: Segmentación del catálogo histórico 49
Figura N° 3.8: Distribuciones BPT y exponencial 52
Figura N° 3.9: Probabilidades de ocurrencia de rupturas 53
Figura N° 3.10: Catálogos simulados en los siguientes 450 años 54
Figura N° 3.11: Sensibilidad de los resultados con los valores de γ 55
Figura N° 3.12: Consistencia del modelo de ocurrencia 56
Figura N° 3.13: Resultados de las simulaciones 57
Figura N° 3.14: Catálogos simulados para tres periodos distintos 58
Figura N° 3.15: Probabilidades de ocurrencia para diferentes periodos . . 59
Figura N° 4.1: Deformación inicial por tramos de magnitud 62
Figura N° 4.2: Deformación inicial de escenarios 9.0 M_w 63
Figura N° 4.3: Dominios y ubicación de la zona de estudio 65
Figura N° 4.4: Topografía de la zona de estudio 66
Figura N° 4.5: Estimación de la rugosidad según el uso de suelo 67
Figura N° 4.6: Mapa de uso de suelo 68
Figura N° 4.7: Inundación de escenarios por tramos de magnitud 69
Figura N° 4.8: Inundación de escenarios a lo largo del rumbo 70

Figura N° 4.9: Inundación de escenarios 9.0 M_w 71
Figura N° 4.10: Mareogramas de escenarios de magnitud 9.0 M_w 72
Figura N° 4.11: Curvas de peligro independientes del tiempo 74
Figura N° 4.12: Curvas de peligro dependientes del tiempo 75
Figura N° 4.13: Curvas de peligro para los siguientes 20 años 76
Figura N° 4.14: Curvas de peligro para diferentes periodos 77
Figura N° 4.15: Mapas de peligro con un periodo de retorno de 475 años 78
Figura N° 4.16: Mapas de peligro con un periodo de retorno de 2475 años 80
Figura N° 5.1: Clasificación según el material de construcción 82
Figura N° 5.2: Malla texturizada en 3D 84
Figura N° 5.3: Categorización de las edificaciones 85
Figura N° 5.4: Funciones de fragilidad por tsunami 87
Figura N° 5.5: Factores de castigo a las funciones de fragilidad 88
Figura N° 5.6: Probabilidades de daño por tramos de magnitud 89
Figura N° 5.7: Curvas de daño por tsunami 90
Figura N° 5.8: Número de manzanas dañadas para un T_r de 2475 años 91
Figura N° 5.9: Funciones de factor de daño medio 92
Figura N° 5.10: Factores de daño por tramos de magnitud 93
Figura N° 5.11: Mapas de daño con un periodo de retorno de 475 años . 94
Figura N° 5.12: Mapas de daño con un periodo de retorno de 2475 años . 95

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

α_j	:	Coeficiente de variación de la distribución de probabilidad BPT
a	:	Tasa global de sismos en una región
$\hat{a}$	:	Ordenada en el origen de las relaciones de escala
b	:	Proporción relativa de magnitudes pequeñas y grandes
$\hat{b}$	:	Pendiente de la recta en las relaciones de escala
γ	:	Parámetro de correlación
δ	:	Buzamiento de la falla
δ_{jk}	:	Delta de Kronecker
d	:	Profundidad de la esquina superior izquierda de la falla
D	:	Profundidad total del agua
g	:	Aceleración de la gravedad
G	:	Rigidez promedio en la zona de subducción
h	:	Profundidad del mar
η	:	Amplitud de onda
θ	:	Parámetro de interés en relaciones de escala
Lat	:	Coordenadas latitud de la esquina superior izquierda de la falla
$Long$	:	Coordenada longitud de la esquina superior izquierda de la falla
L	:	Longitud de la falla
λ	:	Tasa de excedencia
λ'	:	Primera constante de Lamé
μ	:	Media de la función de densidad normal
μ'	:	Segunda constante de Lamé
μ_j	:	Media de la distribución de probabilidad BPT
M	:	Flujo de descarga en la dirección x
M_o	:	Momento sísmico
M_w	:	Magnitud de momento
ν	:	Media de la función de densidad lognormal
n	:	Coeficiente de rugosidad de Manning

N	:	Flujo de descarga en la dirección y
ξ	:	Desviación estándar de la función de densidad lognormal
$\rho_{i,j}$	:	Elementos de la matriz Σ
p_t	:	Probabilidad de ocurrencia de ruptura sísmica
σ	:	Desviación estándar de la función de densidad normal
Σ	:	Correlación de ocurrencia entre rupturas sísmicas
S	:	Área de la falla
τ_j	:	Tiempo entre ocurrencia de rupturas sísmicas
Δt	:	Intervalo de tiempo usado en la simulación
t	:	Tiempo
T_t	:	Cantidad de años desde el último sismo
T_r	:	Periodo de retorno
u	:	Dislocación de falla
Δu	:	Desplazamiento del suelo
$\widehat{u}$	:	Vector de velocidad en la dirección x
$\overline{u}$	:	Velocidad promedio en la dirección x
v	:	Velocidad de empuje de las placas durante el acoplamiento
v_0	:	Velocidad a largo plazo de la convergencia entre placas
$\widehat{v}$	:	Vector de velocidad en la dirección y
$\overline{v}$	:	Velocidad promedio en la dirección y
ω	:	Ángulo de incidencia de la falla
W	:	Ancho de la falla
ϕ	:	Azimut de la falla
Φ	:	Función de distribución normal estándar
x	:	Característica hidrodinámica del tsunami
Δx	:	Resolución espacial de las grillas
X_t	:	Ocurrencia de rupturas sísmicas en cierto año t
Z_t	:	Variable aleatoria del método de cópula

SIGLAS

ASCE	:	American Society of Civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles)
ASTER	:	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Radiómetro espacial avanzado de emisión térmica y reflexión)
BPT	:	Brownian passage-time distribution (distribución browniana del tiempo de paso)
BSI	:	Bare Soil Index (Índice de Suelo Desnudo)
CISMID	:	Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
CENEPRED	:	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres
DHN	:	Dirección de Hidrografía y Navegación
DN	:	Dorsal de Nazca
DS	:	Damage State (estado de daño)
EVAR	:	Evaluación del Riesgo de Desastres Originados por Fenómenos Naturales
FD	:	Factor de daño
FDM	:	Factor de daño medio
GEBCO	:	General Bathymetry Chart of the Ocean (Carta batimétrica general del océano)
GPS	:	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
GRD	:	Gestión del Riesgo de Desastres
IESDAS	:	Integrated Expert System for Damage Assessment (Sistema Integrado de Evaluación de Daños)
IGP	:	Instituto Geofísico del Perú
IM	:	Medida de intensidad
InSAR	:	Synthetic Aperture Radar Interferometry (Interferometría de Radar de Apertura Sintética)
ISC	:	Interseismic Coupling (Acoplamiento intersísmico)
MLE	:	Maximum-likelihood estimation (Estimación de máxima probabilidad)

MLIT	:	Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (Ministerio de Tierra, Infraestructura, Transporte y Turismo de Japón)
MML	:	Municipalidad Metropolitana de Lima
NDVI	:	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)
NIR	:	Near Infrared band (Banda de infarrojo cercano)
NOAA	:	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica)
PTHA	:	Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (Análisis probabilístico de peligro por tsunami)
PSHA	:	Probabilistic Seismic Hazard Assessment (Análisis probabilístico de peligrosidad sísmica)
RPAS	:	Remotely Piloted Aircraft System (Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente)
SIRAD	:	Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres
SWIR	:	Short-wave infrared (banda de infrarrojo de onda corta)
TFF	:	Tsunami Fragility Functions (Funciones de fragilidad por tsunami)
TUNAMI	:	Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Near-field Tsunami (Modelo de análisis numérico de la universidad de Tohoku para la investigación de tsunamis de origen cercano)
UNDRR	:	United Nations Office for Disaster Risk Reduction (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres)
USGS	:	United States Geological Survey (Servicio Geológico de Estados Unidos)
ZFM	:	Zona de Fractura de Mendaña

Capítulo I: Introducción

1.1 Generalidades

Un catálogo sísmico es una descripción paramétrica de los sismos ocurridos en una zona específica, donde se caracteriza a cada evento mediante su ubicación, hora, magnitud, entre otros parámetros (Woessner et al., 2010). En el Perú, el Instituto Geofísico del Perú (IGP, 2022) ha desarrollado un mapa usando el catálogo sísmico (Figura N° 1.1) que representa la distribución espacial de los sismos con magnitudes mayores que 4.0 M_w ocurridos desde el año 1960. Como puede notarse, el Perú tiene una alta peligrosidad sísmica que genera la posibilidad de ocurrencia de sismos de gran magnitud y, en consecuencia, de tsunamis. Esto se debe principalmente a la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana, donde las regiones centro y sur son las de mayor actividad sísmica (IGP, 2022).

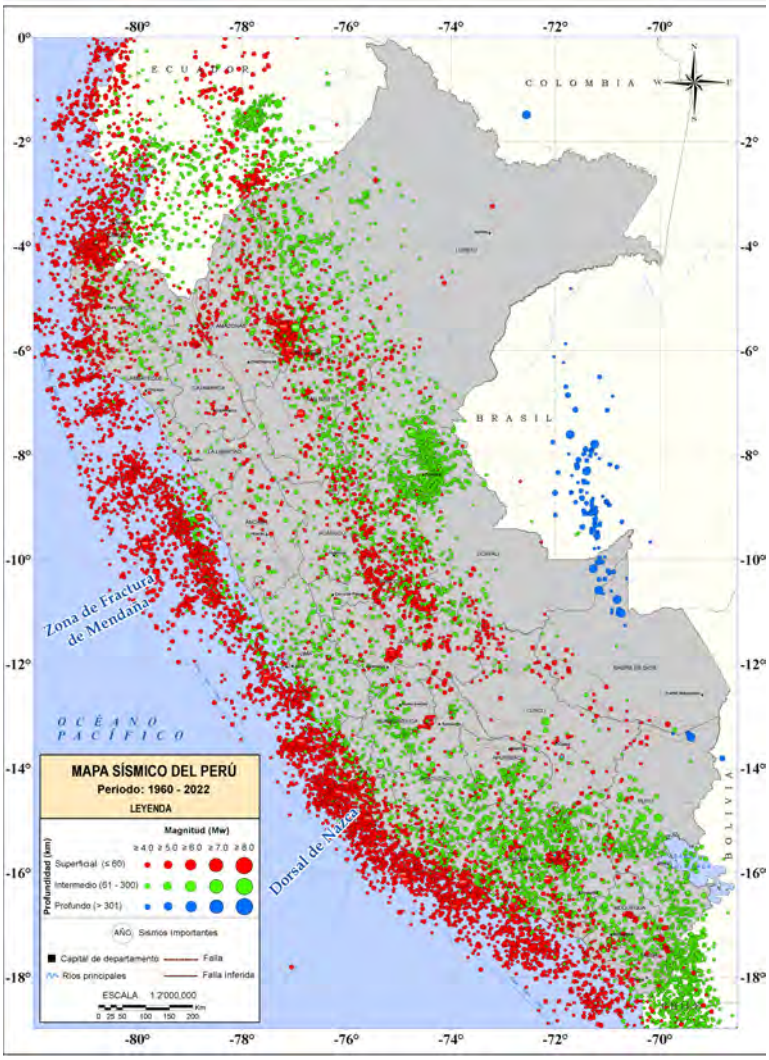


FIGURA N° 1.1: Mapa sísmico del Perú. Adaptado de IGP (2022).

Los tsunamis son amenazas naturales que se caracterizan por ser impredecibles y poco frecuentes, pero que cuando ocurren pueden llegar a ser muy destructivos y tener un gran impacto (Behrens et al., 2021). La costa peruana, situada cerca al límite entre las placas de Nazca y Sudamericana, ha sufrido grandes sismos que desencadenaron tsunamis devastadores (Okal et al., 2006). En la zona central del Perú, donde se encuentra la capital Lima, se tiene registro de los tsunamis descritos en la Tabla N° 1.1 (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2021; traducido como la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica).

TABLA N° 1.1: Tsunamis ocurridos en la zona central del Perú. Adaptado de NOAA (2021).

Fecha	Mw	Lat.	Long.	Max. altura de inund. (m)	Muertos	Heridos
10/07/1586	8.1	-12.3	-77.7	26	22	
18/06/1678	8.0	-9.0	-79.0			
20/10/1687	8.4	-13.5	-76.5		5000	
28/10/1746	8.6	-12.0	-77.2	24	5941	
01/12/1806	7.5	-12.1	-77.1	1		
24/05/1940	8.1	-10.5	-77.0	2	179	3500
17/10/1966	7.9	-10.7	-78.6	3	110	3000
3/10/1974	8.0	-12.3	-77.8	0.92	78	2414
15/08/2007	8.0	-13.4	-76.6	10.05	514	1090

Como se observa en la Tabla N° 1.1, el sismo ocurrido en el año 1746 fue el de mayor magnitud e impacto del cual se tiene registro en la zona central del Perú, puesto que afectó seriamente a Lima y el Callao (Walker, 2018). Según Silgado (1978), este sismo desencadenó un tsunami que irrumpió sobre la población del Callao, inundando a gran parte de ella. Para tener una idea del impacto que tuvo, de los 5000 habitantes del Callao, solamente 221 sobrevivieron (Mas et al., 2015).

En la Figura N° 1.2 se ilustra la extensión de las rupturas sísmicas del sismo histórico de 1746 y de los cuatro sismos de gran magnitud ($M_w \sim 8.0$) ocurridos en la zona central del Perú durante los últimos años. Si bien es cierto, la extensión de los sismos recientes encierra al de 1746, Villegas et al. (2016) determinaron que la suma de la energía liberada en los cuatro sismos es de tan solo la mitad o incluso menos que la del evento histórico. Esto sugiere que la zona central del Perú presenta un silencio sísmico de sismos de gran magnitud, cuya energía viene siendo acumulada desde entonces. Como señalaron Dorbath et al. (1990) y Okal et al. (2006), es probable que un evento similar al de 1746 ocurra en los próximos años, el cual ocasionaría un gran número de víctimas, daños a las construcciones y la caída de la economía peruana (Mas et al., 2014).

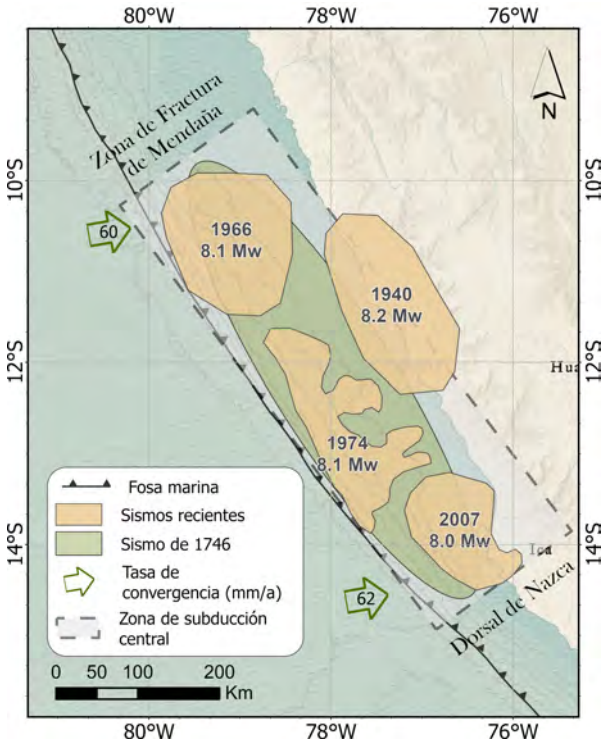


FIGURA N° 1.2: Sismos recientes en la zona central del Perú. Adaptado de Ceferino et al. (2021).

1.2 Descripción del problema de investigación

La Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN, 2011) ha elaborado cartas de inundación que muestran las zonas inundables por tsunami en toda la zona costera del Perú. En el caso de la región central, la DHN ha considerado dos escenarios sísmicos: el primero corresponde a un evento sísmico hipotético de magnitud $8.5\ M_w$, considerado como el de mayor probabilidad de ocurrencia; y el segundo, a un escenario análogo al sismo de 1746 (peor escenario ocurrido en nuestra historia) con una magnitud de $9.0\ M_w$ (Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres [SIRAD], 2010).

Si bien las cartas de inundación, como la mostrada en la Figura N° 1.3 para el distrito de Chorrillos, pueden ser usadas para desarrollar planes de evacuación y estrategias de mitigación, presentan limitaciones. Estas solo evalúan los dos escenarios mencionados y no otros; además, no cuantifican la frecuencia de ocurrencia de estos eventos, de manera que no podemos tener una idea de qué tan probables serán en los siguientes años. Estas evaluaciones son denominadas determinísticas y se caracterizan por evaluar el impacto que generaría un escenario de peligro determinado. Por otro lado, las evaluaciones probabilísticas consideran todos los escenarios posibles, así como sus probabilidades de ocurrencia (United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2015; traducido como la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres).

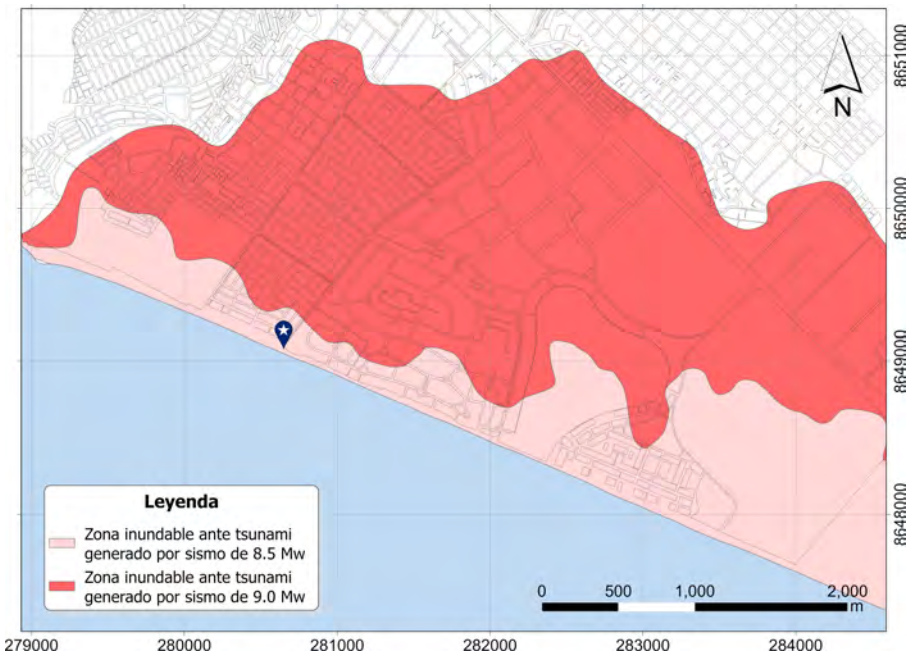


FIGURA N° 1.3: Carta de inundación de Chorrillos. Adaptado de DHN (2011).

Según la UNDRR (2015), la evaluación de pocos escenarios es insuficiente para anticipar los futuros eventos: el primero proviene de una suposición, donde es lógico pensar que uno de menor magnitud (e.g., $M_w \sim 8.0$) sea más probable; mientras que el segundo es insuficiente, puesto que los sucesos históricos no necesariamente proporcionan una buena guía para el futuro. Debido al conocimiento que se tiene sobre eventos pasados, se puede afirmar que la mayoría de los tsunamis que podrían suceder, aún no han ocurrido (UNDRR, 2015).

Una de las razones por las que se ha estudiado este fenómeno de manera determinística es la dificultad de caracterizar los escenarios sísmicos debido a la incertidumbre epistémica y aleatoria que tenemos acerca de los sismos. Esto se asocia a nuestro conocimiento limitado y variabilidad inherente en estos eventos, respectivamente (Fukutani et al., 2021). Ante ello, Ceferino et al. (2020) plantearon formulaciones probabilísticas para modelar las futuras rupturas sísmicas considerando la interacción en espacio y tiempo de los sismos. Sin embargo, no se ha incorporado este tipo de modelos en las evaluaciones de tsunamis en el Perú, de manera que no se ha logrado capturar el silencio sísmico presente desde el año 1746 en las cartas de inundación de la zona central del Perú.

Abordando de manera más específica este problema, el distrito de Chorrillos, por su ubicación geográfica (distrito costero), topografía relativamente baja, y diversidad en las construcciones, es uno de los distritos más vulnerables y expuestos ante tsunamis en Lima (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres [CISMID], 2010). Según el Instituto Nacional de Estadística e

Informática (INEI, 2017), este distrito cuenta con más de 300,000 habitantes. Asimismo, debido al crecimiento urbano, zonas con alta exposición por tsunami, que antes estaban desocupadas, ahora se encuentran habitadas. En la Figura N° 1.4, se muestran fotografías de esta región tomadas desde el punto en la costa, indicado en la Figura N° 1.3. Como se puede apreciar, gran parte de la región costera está ocupada por zonas residenciales. Lo más preocupante es que no se cuenta con construcciones de defensa para proteger a la población y las edificaciones ante un futuro evento (Figuras N° 1.4a y 1.4d). Además, no se observa un adecuado plan de uso de suelo, ya que se debió de haber dejado una franja frente al mar ocupada solo por construcciones que sean necesarias para las actividades marinas y recreativas (Kuroiwa, 2002).

FIGURA N° 1.4: Vistas de la zona costera del distrito de Chorrillos tomadas con sistema de aeronave tripulada remotamente (RPA) en las direcciones a) noroeste, b) norte, c) este y d) sureste.

En consecuencia, la alta densidad de población y viviendas expuestas por tsunami en la zona costera del distrito de Chorrillos conlleva a la apremiante necesidad de analizar este fenómeno, empleando métodos que consideren las incertidumbres en los posibles escenarios a fin de evitar que los resultados sean insuficientes. Asimismo, para una eficaz gestión de riesgos por tsunami, los daños generados también deben ser evaluados y así poder representar de manera más integral el impacto de esta amenaza (Goda y Song, 2016). En ese sentido, existe la necesidad de solucionar los siguientes problemas, siendo esta investigación la primera en aplicar formulaciones probabilísticas en la evaluación de tsunamis en el Perú:

Problema General

¿Cuál es el nivel de peligro y riesgo por tsunami en la zona costera del distrito de Chorrillos, considerando la incertidumbre y el acoplamiento espaciotemporal en la ocurrencia de sismos mediante un enfoque probabilístico?

Problemas Específicos

- ¿Cómo capturar los silencios de sismos de gran magnitud en el modelamiento de rupturas sísmicas?
- ¿Cuál es el peligro por tsunami de la zona de estudio a partir de una evaluación probabilística?
- ¿Qué daño tendrían las edificaciones por tsunami en la zona de estudio?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el peligro y riesgo por tsunami en la zona costera del distrito de Chorrillos considerando la incertidumbre y acoplamiento espaciotemporal en la ocurrencia sísmica mediante un planteamiento probabilístico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar las rupturas sísmicas cercanas a la zona de estudio considerando la interacción espaciotemporal entre sismos.
- Realizar simulaciones numéricas de tsunami para cada escenario sísmico y determinar las distribuciones probabilísticas de inundación por tsunami para diferentes periodos de estudio.
- Estimar los daños en las edificaciones por tsunami para cada periodo de estudio.

1.4 Antecedentes investigativos

Antecedentes nacionales

La Municipalidad Metropolitana de Lima (MML, 2021), en el trabajo titulado “Informe de evaluación del riesgo por tsunami, Zona de Reglamentación Especial de los Pantanos de Villa, distrito de Chorrillos, San Juan de Miraflores, Santiago de Surco y Villa El Salvador, provincia de Lima, departamento de Lima” tuvo como objetivos evaluar los niveles de peligro, vulnerabilidad y riesgo de la zona de reglamentación

especial de los Pantanos de Villa. Para alcanzar estos objetivos, la MML utilizó el procedimiento propuesto por el "Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales", con el cual identificaron los factores desencadenantes y condicionantes del tsunami. Mediante una ponderación de parámetros, determinaron los niveles de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo para un evento sísmico de magnitud 9.0 M_w. El trabajo concluyó en la presentación de mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo que muestran las regiones y edificaciones que serían afectadas con mayor grado por tsunami. Se determinó que los principales problemas de la zona de estudio son debidos a la mala planificación urbanística, ya que hay viviendas asentadas sobre materiales de relleno y laderas. En total, 350 y 35 manzanas tienen un nivel de riesgo alto y muy alto, respectivamente

Mas et al. (2014) en la investigación titulada "Simulación de la Inundación por Tsunami en el Centro de Perú a partir de futuros escenarios sísmicos" tuvieron como objetivo determinar el impacto por tsunami en la región de Lima-Callao a partir de 12 posibles escenarios sísmicos. Para alcanzar estos objetivos, los autores realizaron simulaciones numéricas de tsunami con estos escenarios y propusieron como evento más desfavorable a la envolvente de los mapas de inundación obtenidos. Los investigadores concluyeron que, si bien el escenario con los mayores deslizamientos generó la aceleración del terreno más grande en la zona de estudio, el escenario con el mayor deslizamiento a poca profundidad generó la mayor inundación por tsunami. Estos resultados fueron importantes, ya que no siempre el movimiento más fuerte producirá la mayor inundación por tsunami.

Adriano et al. (2014), en su investigación titulada "Escenarios de Probabilidad de Daños por Sismo y Tsunami en la Región del Callao, Perú, utilizando Funciones de Fragilidad por Tsunami" tuvieron como objetivo: simular los tsunamis para dos escenarios sísmicos en el Callao: el ocurrido el año 1746, de magnitud 9.0 M_w, y el futuro posible sismo, de 8.8 M_w, y determinar los daños por tsunami en las edificaciones Para alcanzar estos objetivos, los autores utilizaron la base de datos del INEI, que contiene el material de construcción y el número de pisos por manzana de las edificaciones de la zona de estudio. Estos datos fueron reclasificados como albañilería, madera, concreto armado y otros para poder utilizar las funciones de fragilidad. El análisis de peligro se realizó simulando los 2 escenarios sísmicos, que resultó en la distribución de profundidades de inundación por tsunami de toda la zona de estudio. Las profundidades fueron consideradas como la medida de intensidad de esta amenaza y utilizadas en las funciones de fragilidad para determinar los daños ocasionados en las edificaciones para cada caso. Los investigadores concluyeron que, para el primer escenario (9.0 M_w), aproximadamente el 60 % de las edificaciones tuvieron el estado de colapso; mientras que para el futuro posible sismo (8.8 M_w), al menos el 30 % se encontró con el tipo de daño alto.

Antecedentes internacionales

Goda y Song (2016), en su investigación titulada “Uncertainty modeling and visualization for tsunami hazard and risk mapping: a case study for the 2011 Tohoku earthquake” tuvieron como objetivos: caracterizar las fuentes sísmicas, realizar las simulaciones de inundación de los tsunamis y estimar los daños en las edificaciones, así como las pérdidas económicas en el sismo de Tohoku 2011. Para alcanzar estos objetivos, utilizaron un modelo de deslizamientos para generar escenarios sísmicos estocásticos que consideraron propiedades estadísticas de los escenarios iniciales generados por otros autores mediante un proceso de inversión. En total, 726 escenarios fueron generados para las simulaciones de tsunami de Monte Carlo„ obteniendo finalmente los mapas de inundación por tsunami. Para estimar los daños en las edificaciones y pérdidas económicas, utilizaron una base de datos de los materiales de construcción de las edificaciones y las curvas de fragilidad empíricas elaboradas luego del tsunami de Tohoku, las profundidades de inundación determinadas fueron usadas con estos datos para determinar las probabilidades de daños por tsunami en las edificaciones, los resultados fueron analizados por un proceso de Monte Carlo donde determinaron las curvas acumuladas de daños, las cuales junto con los modelos de costos de las edificaciones de la zona de estudio, fueron usadas para estimar las pérdidas económicas según el tipo de material de construcción. Los investigadores concluyeron que los mapas de inundación estocásticas, así como los mapas de probabilidad de daños en las edificaciones fueron útiles para presentar la información sobre esta amenaza. Además, las curvas de daño generadas fueron promovidas como herramientas efectivas de la gestión de riesgo de desastres. La metodología aplicada a la región de Tohoku representó una vista general del impacto por esta amenaza y facilitó el entendimiento de aspectos específicos del peligro y riego por tsunami en la zona de estudio.

Ceferino et al. (2020), en su investigación titulada “Probabilistic Space and Time Interaction Modeling of Mainshock Earthquake Rupture Occurrence” tuvieron como objetivo: desarrollar una formulación probabilística que considere la interacción en espacio y tiempo de las rupturas sísmicas, que tenga una consistencia preservando la distribución de los tiempos entre estas rupturas y conserve una interpretación física de acuerdo con las observaciones de las rupturas pasadas. Este modelo fue aplicado a la zona de subducción de Lima, Perú. Para alcanzar estos objetivos, los autores recopilaron las rupturas ocurridas en el pasado (desde el año 1500), discretizaron la zona de subducción en ocho secciones a lo largo del rumbo de la falla y estimaron los parámetros estadísticos de cada sección de acuerdo con las rupturas ocurridas en ellas. Los investigadores consideraron la distribución BPT (Brownian passage time) para capturar la interacción en tiempo de las rupturas y; correlogramas espaciales, para la interacción en espacio. El modelo fue simu-

lado considerando un proceso de Monte Carlo para las rupturas sísmicas de los siguientes 500,000 años, a partir del cual determinaron el parámetro de correlación adecuado para la zona de estudio y la consistencia del modelo comparando los resultados con los registros históricos, concluyendo que, el modelo fue apropiado para la estimación de peligro sísmico, replicó adecuadamente las tasas de ocurrencia y liberación del momento sísmico, y que, se desempeñó mejor que un modelo físico debido a una menor demanda computacional. Asimismo, los resultados de aplicar el modelo a la zona de subducción de la costa de Lima mostraron que el modelo se desempeñó mejor estadísticamente que un modelo simplificado.

Muhammad et al. (2022), en su investigación titulada "Time-dependent Probabilistic Tsunami Hazard Analysis for Western Sumatra, Indonesia, Using Space-Time Earthquake Rupture Modelling and Stochastic Source Scenarios" tuvieron como objetivos: predecir las futuras rupturas sísmicas en la zona de subducción de Indonesia, generar las distribuciones de deslizamiento estocásticas de estas rupturas, simular las etapas de propagación e inundación de los tsunamis ocasionados por estos sismos y determinar la distribución probabilística de profundidades de inundación por tsunami en la zona oeste de Sumatra. Para alcanzar estos objetivos utilizaron formulaciones probabilísticas para predecir las rupturas sísmicas considerando su interacción en espacio y tiempo tomando como base los sismos ocurridos en el pasado. Con las futuras rupturas sísmicas generaron distribuciones de deslizamientos estocásticos para seis magnitudes de momento (7.75 - 9.0 M_w) utilizando relaciones de escala y formulaciones estocásticas, con un total de 21 escenarios de tsunami, estas distribuciones fueron utilizadas para simular las etapas de propagación e inundación de tsunami y así obtener las profundidades de inundación de la zona de estudio. Los resultados de inundación fueron acoplados con las predicciones de las rupturas sísmicas para obtener las curvas de peligro por tsunami para siete diferentes periodos (1 - 450 años). Este análisis también se realizó considerando la independencia del tiempo para los periodos y probabilidades mencionados. Los investigadores concluyeron que el modelo de rupturas predijo satisfactoriamente los futuros sismos, ya que la tasa anual de liberación de momento sísmico fue consistente con las observaciones de los sismos pasados y, por tanto, que el modelo probabilístico capturó las incertidumbres de los futuros eventos tsunamigénicos. Por otro lado, los resultados considerando la dependencia o no del tiempo fueron similares; sin embargo, el modelo independiente del tiempo subestimó el peligro por tsunami para periodos cortos mientras que, para periodos largos, generó mayores probabilidades de peligro, por tanto, se recomendó un análisis dependiente del tiempo a corto plazo y uno independiente del tiempo para el peor escenario de tsunami en un análisis de peligro y riesgo.

1.5 Metodología

Para el desarrollo de esta tesis, se siguió la metodología descrita a continuación usando el diagrama de flujo mostrado en la Figura N° 1.5:

- **Revisión bibliográfica:** Acerca de la sismicidad en la zona central del Perú, modelado de ruptura de sísmicas, modelos probabilísticos para la ocurrencia de sismos, simulación numérica de tsunamis, funciones de fragilidad y estimación de daños por tsunami en edificaciones.
- **Modelado de rupturas sísmicas:** Obtención de parámetros de los posibles escenarios sísmicos adyacentes a la zona de estudio (panel A), así como la estimación de las probabilidades de ocurrencia de estos escenarios empleando un modelo independiente y dependiente del tiempo en base al catálogo histórico (panel B).
- **Evaluación de peligro por tsunami:** Simulación numérica de tsunami en el área de estudio para los escenarios generados (paneles C y D). Los resultados fueron acoplados con las probabilidades de ocurrencia de cada escenario para la generación de mapas y curvas probabilísticas de inundación por tsunami en un análisis independiente y dependiente del tiempo (panel E).
- **Estimación de daños por tsunami:** Empleando funciones de fragilidad empíricas (panel F), se determinaron las probabilidades de daño por tsunami en las edificaciones (panel G) para estimar los estados de daño mediante simulaciones de Monte Carlo. Finalmente, se utilizaron las probabilidades de ocurrencia de los escenarios para la generación de mapas de factores de daño en un análisis independiente y dependiente del tiempo (panel H).

Esta investigación es desarrollada en tres secciones: en el capítulo III se describe el procedimiento seguido para la generación de escenarios sísmicos y simulación de las futuras rupturas sísmicas adyacentes a la zona de estudio empleando un modelo independiente y dependiente del tiempo. El modelamiento de las fases de generación, propagación e inundación de los tsunamis producidos por estos escenarios sísmicos y el acoplamiento de las inundaciones con las probabilidades de ocurrencia de cada uno son abordados en el capítulo IV. Finalmente, en el capítulo V se muestra el procedimiento seguido para la estimación de daños por tsunami en las edificaciones utilizando funciones de fragilidad empíricas y simulaciones de Monte Carlo y el desarrollo de mapas de factores de daño por tsunami. Para una mejor comprensión de esta tesis, el capítulo II presenta un marco teórico con los conceptos y formulaciones utilizados.

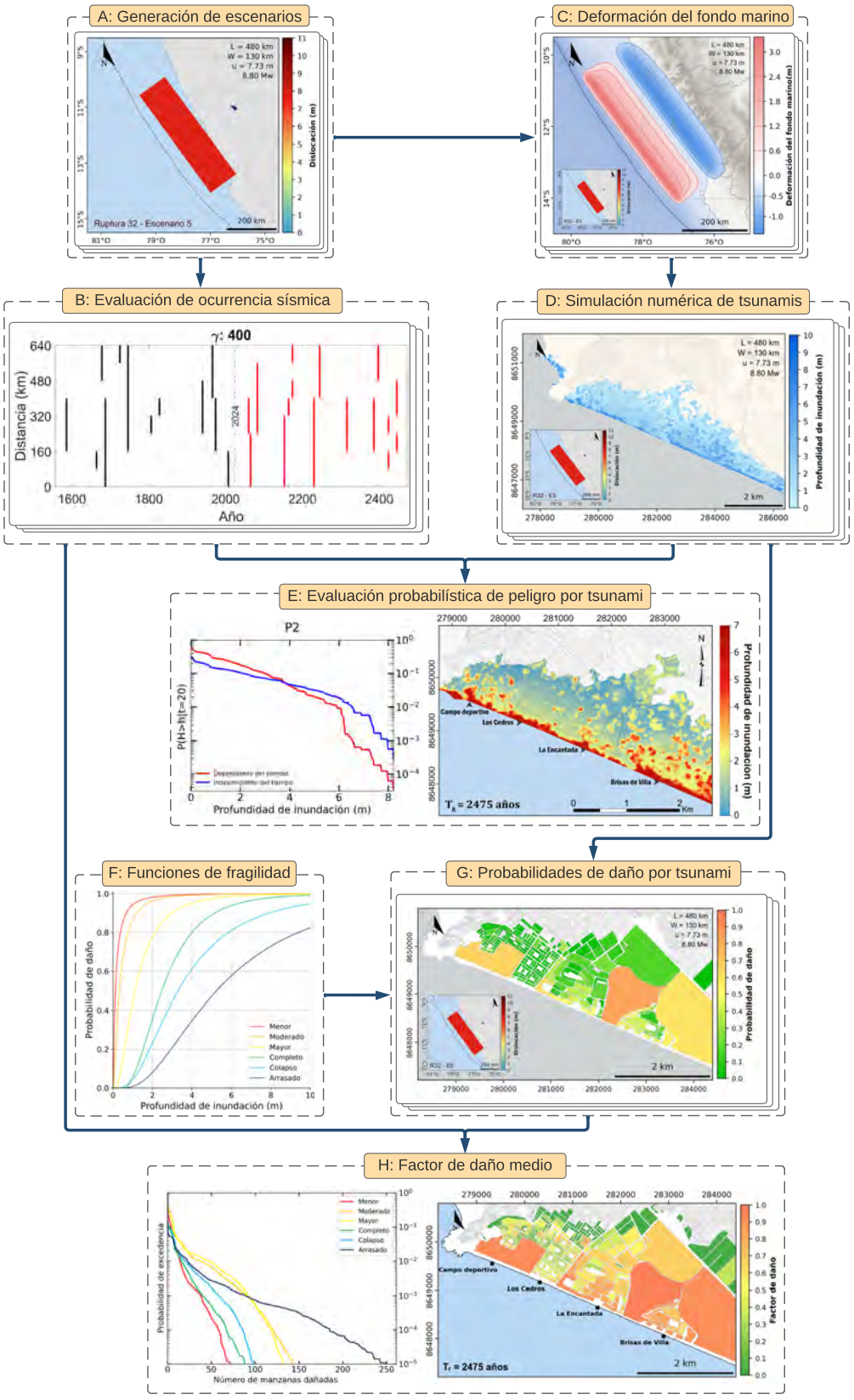


FIGURA N° 1.5: Metodología del estudio.

Capítulo II: Marco teórico y conceptual

2.1 Potencial sísmico de la zona central del Perú

2.1.1 Características sismotectónicas

A lo largo de la región occidental de Sudamérica, la placa de Nazca subduce debajo de la placa Sudamericana provocando: vulcanismo, deformación y sismicidad (Bilek, 2010). Desde un punto de vista temporal, la sismicidad de una región puede entenderse como un ciclo que consiste en una concentración de esfuerzos y una falla repentina en forma de ondas sísmicas, cuyas fases son: intersísmica, cosísmica y postsísmica (Reid, 1911). La fase intersísmica consiste en la acumulación de esfuerzos y energía en el contacto entre las placas hasta que en un determinado momento se logre vencer la resistencia entre ellas y se produzca nuevamente otra ruptura sísmica (Tanner y Brandes, 2020).

En la Figura N° 2.1, se ilustra el comportamiento de las placas de Nazca y Sudamericana durante la fase intersísmica. El movimiento de estas placas puede representarse mediante fuerzas gravitatorias y tectónicas (Albano et al., 2021) que generan acoplamiento entre las placas en la zona rígida y un desplazamiento vertical de larga duración en la corteza (Jolivet et al., 2020).

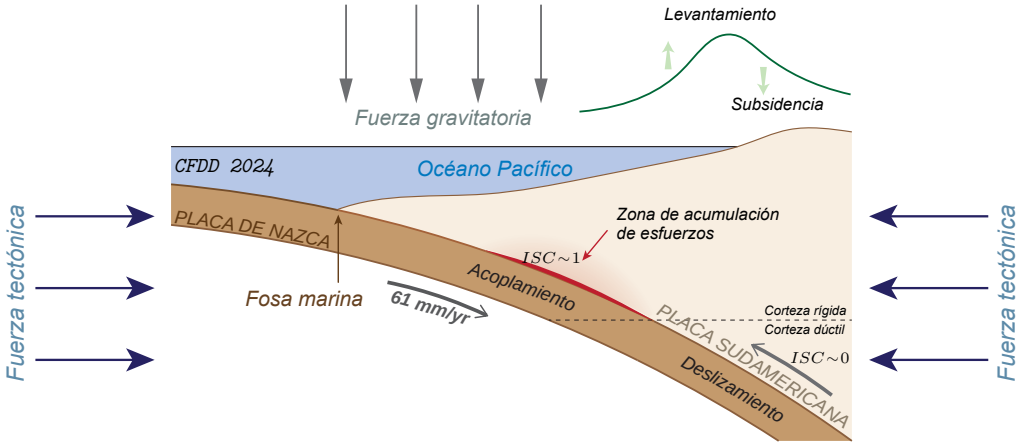


FIGURA N° 2.1: Fase intersísmica. Adaptado de Albano et al. (2021) y Jolivet et al. (2020).

2.1.2 Acoplamiento intersísmico

La caracterización de la fase intersísmica se ha llevado a cabo con el desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés, *Global Positioning System*) y la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR, por sus siglas en inglés, *Synthetic Aperture Radar Interferometry*), ya que ahora es posible medir con gran precisión los desplazamientos de la corteza asociados con la acu-

mulación de deformación intersísmica, así como la velocidad de convergencia de las placas tectónicas (Chlieh et al., 2011).

Villegas et al. (2016) recopilaron mediciones geodésicas durante décadas para caracterizar la deformación de la corteza en el Perú. Siguiendo un proceso de inversión de los desplazamientos medidos con GPS e interferogramas InSAR, los investigadores estimaron el acoplamiento intersísmico de la zona de subducción. Los modelos obtenidos con la inversión de estas mediciones muestran las áreas con mayor potencial sísmico. Esto permite anticipar la ubicación y extensión de los siguientes sismos de gran magnitud (Villegas, 2020).

El acoplamiento intersísmico (ISC, por sus siglas en inglés, *Interseismic Coupling*) es definido por la relación mostrada en la ecuación 2.1, donde v es la velocidad de empuje de las placas durante el acoplamiento; y v_0, la velocidad a largo plazo de la convergencia de estas, en consecuencia, un ISC igual a 0 indica un deslizamiento total ($v = v_0$) ; mientras que un ISC de 1, corresponde a un bloqueo total de las placas (Chlieh et al., 2011).

$$ISC = \frac{v_0 - v}{v_0} \tag{2.1}$$

La Figura N° 2.2 muestra el modelo de acoplamiento intersísmico de la zona central del Perú. Nótese que existen dos regiones donde el acoplamiento es mayor, y, por tanto, más probable de ocurrir un sismo. Se ha observado que en estas regiones, conocidas como asperezas, han ocurrido repetidamente sismos de gran magnitud que pueden observarse en el catálogo histórico (Villegas et al., 2016).

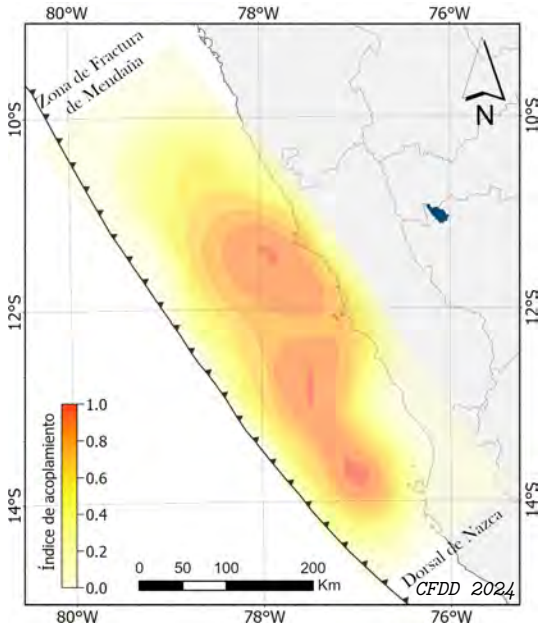


FIGURA N° 2.2: Acoplamiento en la zona central del Perú. Adaptado de Villegas et al. (2016).

2.1.3 Catálogo histórico

El catálogo histórico de la zona central del Perú tiene registro de los sismos de $M_w \geq 7.5$ desde el año 1586 (Tarazona et al., 2023). En la Figura N° 2.3, se presenta la distribución espacial y temporal de estos sismos. De color rojo se resaltan los sismos recientes (mostrados en la Figura N° 1.2), y con líneas azules aquellos que desencadenaron un tsunami (descritos en la Tabla N° 1.1). Las franjas naranjas que limitan esta región corresponden a la Zona de Fractura de Mendaña (ZFM) y al Dorsal de Nazca (DN). Según Villegas et al. (2016), debido a que no se conocen rupturas sísmicas que hayan atravesado estas zonas, pueden considerarse como barreras naturales en la propagación de estas rupturas, y, por tanto, como los límites de las tres regiones de la zona de subducción del Perú (norte, centro y sur). De esta forma, el catálogo histórico para la zona central puede ser analizado para identificar zonas con alta probabilidad de ocurrencia sísmica (conocidas como lagunas sísmicas), las cuales se caracterizan por estar rodeadas de regiones donde ya ocurrieron eventos importantes (Tavera y Bernal, 2005).

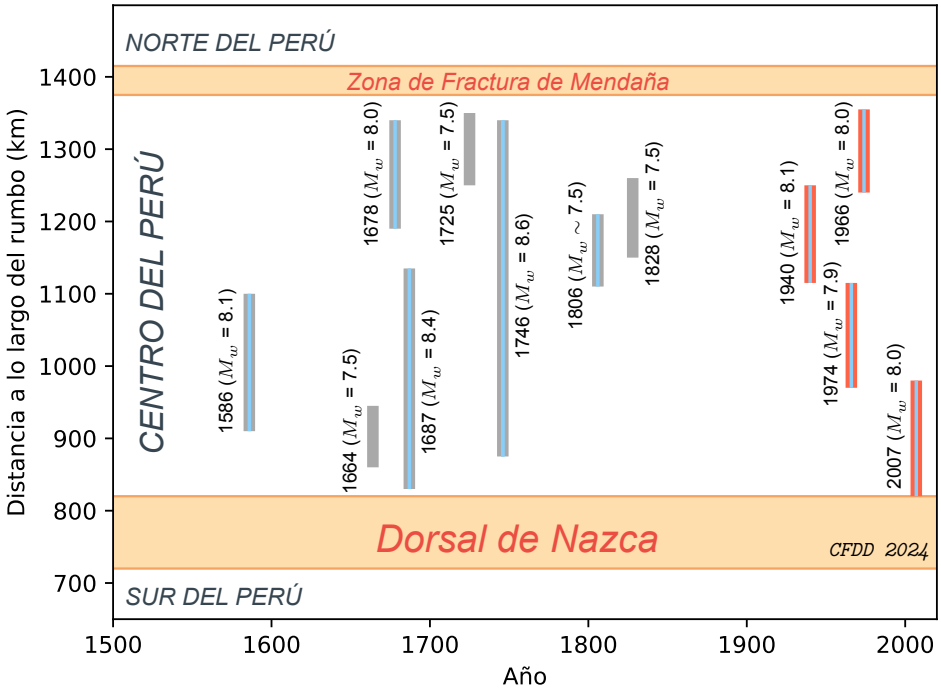


FIGURA N° 2.3: Catálogo sísmico de la zona central del Perú. Adaptado de Villegas et al. (2016).

2.2 Rupturas sísmicas

2.2.1 Estimación de parámetros sísmicos

Papazachos et al. (2004) han desarrollado relaciones de escala analizando una gran base de datos de los sismos históricos y recientes que relacionan los pa-

rámetros de la fuente con su magnitud de momento. La forma general de estas relaciones se muestra en la ecuación 2.2, donde θ es el parámetro de interés (e.g., longitud L de la falla); mientras que $\hat{a}$ y $\hat{b}$ son los parámetros de la regresión (Goda et al., 2016). Las fórmulas propuestas por Papazachos et al. (2004) relacionan a la magnitud de momento M_w con la longitud L (km), ancho W (km) y dislocación u (cm) de la ruptura sísmica, como se describe en la ecuación 2.3.

$$\log_{10}\theta = \hat{a} + \hat{b}M_w, \quad 6.7 \leq M_w \leq 9.2 \tag{2.2}$$

Donde:

$$\log L = -2.19 + 0.55M_w \tag{2.3a}$$

$$\log W = -0.63 + 0.31M_w \tag{2.3b}$$

$$\log u = -2.78 + 0.64M_w \tag{2.3c}$$

Siguiendo las fórmulas propuestas por Kanamori (1977), el momento sísmico M_o y magnitud de momento M_w de una ruptura sísmica pueden ser obtenidos a partir de sus parámetros L, W y u mediante las ecuaciones 2.4 y 2.5, respectivamente. Según Kanamori (1977), el momento sísmico M_o es un parámetro importante que mide la deformación global del sismo y puede ser expresado en términos de la energía de deformación liberada (ecuación 2.4), donde G representa la rigidez promedio de la zona de subducción; S, el área de la falla; y u, la dislocación media. De esta forma, se puede obtener la energía total liberada por la falla M_o (en dina.cm) y la magnitud de momento M_w equivalente (ecuación 2.5).

$$M_o = GSu \tag{2.4}$$

$$M_w = \frac{2}{3}\log M_o - 10.73 \tag{2.5}$$

2.2.2 Ocurrencia de rupturas sísmicas

Existen diversas formulaciones probabilísticas para modelar la ocurrencia de rupturas sísmicas, por ejemplo, en los modelos independientes del tiempo se considera que la ocurrencia de los sismos sigue la distribución de probabilidad de Poisson, ya que suceden con una tasa de ocurrencia constante y no dependen de la ocurrencia de sismos cercanos en espacio y tiempo (Baker et al., 2021).

Por el contrario, existen modelos que sí dependen de ciertos parámetros de los sis-

mos: en el caso de los modelos de interacción temporal, se considera la recurrencia temporal de las rupturas sísmicas basándose principalmente en la teoría del rebote elástico descrito por Reid (1911). Como propuso Matthews (2002), los intervalos de tiempo entre eventos pueden modelarse mediante la distribución Browniana del tiempo de paso (BPT, por sus siglas en inglés, *Brownian passage-time distribution*) que modela a las rupturas sísmicas como una liberación repentina de energía tras alcanzar el umbral de falla crítica considerando un componente aleatorio adicional.

En los modelos de interacción magnitud-tiempo, además de la recurrencia temporal, se incorpora la influencia de la magnitud del último sismo, por tanto, los grandes sismos conllevan largos tiempos de espera antes del siguiente evento (Anagnos y Kiremidjian, 1984). Finalmente, los modelos de interacción espacio-tiempo comprenden a los dos últimos casos, ya que logran capturar la influencia del tiempo, magnitud, y ubicación de las rupturas sísmicas (Ceferino et al., 2020). A continuación, se detalla las formulaciones para dos modelos: independiente del tiempo y de interacción espacio-tiempo, siendo el último más conocido como modelo dependiente del tiempo:

2.2.3 Modelo independiente del tiempo

Dado que las fallas tectónicas son capaces de generar sismos de distintas magnitudes, Gutenberg y Richter (1944) propusieron la ecuación 2.6 que representa la distribución del número de sismos en una región mayores a cierta magnitud. En esta ecuación λ_m denota la tasa de ocurrencia de sismos con magnitudes mayores que m, mientras que a y b son constantes que representan la tasa global de sismos en una región y la proporción relativa de magnitudes pequeñas y grandes, respectivamente. Estos parámetros pueden ser determinados mediante un análisis estadístico de las observaciones históricas.

$$\log_{10}\lambda_m = a - bm \tag{2.6}$$

A partir de la ecuación 2.6, se determina la función de distribución para la ocurrencia de sismos con magnitudes mayores que una magnitud mínima m_{min}, y menores que una máxima m_{max} utilizando el procedimiento descrito en la ecuación 2.7.

$$\begin{aligned} F_M(m) &= P(M \leq m | m_{min} < M < m_{max}) \\ &= \frac{\lambda_{m_{min}} - \lambda_m}{\lambda_{m_{min}} - \lambda_{m_{max}}} \\ &= \frac{1 - 10^{-b(m - m_{min})}}{1 - 10^{-b(m_{max} - m_{min})}}, \qquad m_{min} < m < m_{max} \end{aligned} \tag{2.7}$$

Además, mediante la ecuación 2.8 se puede aproximar la probabilidad de ocurrencia para un conjunto discreto de magnitudes m_j (donde $m_j < m_{j+1}$) usando la ecuación 2.7 (Baker, 2015).

$$P(M = m_j) = F_M(m_{j+1}) - F_M(m_j) \tag{2.8}$$

2.2.4 Modelo dependiente del tiempo

Ceferino et al. (2020) propusieron un modelo de ocurrencia para las rupturas sísmicas del tipo interacción espacio-tiempo (sección 2.2.2), el cual se caracteriza por ser consistente, con una técnica de calibración simple y con una interpretación física compatible con las teorías sobre rupturas sísmicas. En esta sección se describe las formulaciones de este modelo.

En primer lugar, la distribución multivariada de Bernoulli con parámetros de función correlacionados es usada para modelar la ocurrencia de las rupturas sísmicas mediante un vector de rupturas X_t en cierto año t, donde $X_t \in \{0,1\}^N$, N es el número total de secciones con las que se discretiza la zona de subducción (Figura N° 2.4); y t, el índice de tiempo utilizando intervalos de un año. Bajo estos parámetros, cada elemento del vector X_t, denotado por $X_t(j)$ (donde $j \in [1, N]$), representa el estado de la sección j de la falla analizada durante el año t: $X_t(j)$ será igual a 1 si se produce una ruptura en la subfalla j durante el año t; o será igual a 0, en caso contrario. Cabe mencionar que en el caso de que ocurran varias rupturas en secciones adyacentes (como las secciones pintadas en la Figura N° 2.4), se asume que estas fueron producidas por un solo sismo. En caso las rupturas ocurran en secciones lejanas, se considera que ocurrieron sismos diferentes durante el mismo año.

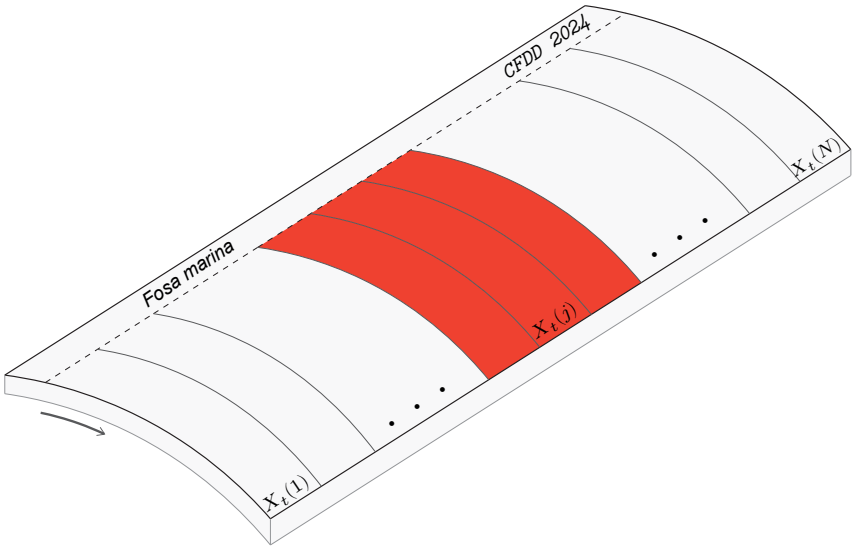


FIGURA N° 2.4: Discretización de una falla. Adaptado de Ceferino et al. (2020).

Se define a T_t como el vector de la cantidad de años que pasaron desde el último sismo en cada una de las secciones de la falla, donde $T_t \in \mathbb{N}^N$. Por ejemplo, considerando la sección j, $T_{t+1}(j)$ será igual a $T_t(j)+1$ si ningún sismo ocurrió en la sección j durante el año t ($X_t(j)=0$); o será igual a 1, en caso contrario ($X_t(j)=1$), ya que habrá pasado un año desde el sismo anterior. Las dos condiciones descritas para $T_{t+1}(j)$ son representadas en la ecuación 2.9.

$$T_{t+1}(j) = T_t(j)(1-X_t(j))+1 \tag{2.9}$$

Los parámetros de la distribución multivariada de Bernoulli (ecuación 2.10) son analizados mediante el vector p_t y la matriz Σ, que representan las probabilidades y correlación de ocurrencia de las rupturas, respectivamente, estos parámetros dependen del tiempo T_t desde la última ruptura.

$$\mathbf{X_t}|\mathbf{T_t} \sim Bernoulli\ Multivariada(\mathbf{p_t}, \mathbf{\Sigma}) \tag{2.10}$$

El vector p_t, con N elementos $p_t(j)$, puede ser estimado como se muestra en la ecuación 2.11. Cada uno de los elementos $p_t(j)$ depende del tiempo $T_t(j)$ desde la última ruptura, donde τ_j es una variable aleatoria que representa el tiempo entre rupturas de la sección j.

$$\begin{aligned} p_t(j) = P[X_t(j)=1|T_t(j)] &= P[\tau_j \leq T_t(j) | \tau_j > T_t(j)-1] \\ &= \left(\frac{P[T_t(j)-1<\tau_j\leq T_t(j)]}{1-P[\tau_j \leq T_t(j)-1]}\right) \end{aligned} \tag{2.11}$$

El parámetro τ_j es modelado con la distribución de probabilidad BPT, cuya función de densidad (ecuación 2.12) está definida por los parámetros μ_j (media) y α_j (coeficiente de variación), mientras que su función de distribución sigue la ecuación 2.13, donde Φ es la función de distribución normal estándar.

$$f_{\tau_j}(t) = \sqrt{\frac{\mu_j}{2\pi\alpha_j^2 t^3}} \cdot e^{-\frac{(t-\mu_j)^2}{2\mu_j\alpha_j^2 t}} \tag{2.12}$$

$$F_{\tau_j}(t) = P[\tau_j \leq t] = \Phi[u_1(t)] + e^{2/\alpha_j^2}\Phi[-u_2(t)] \tag{2.13}$$

Donde:

$$u_1(t) = \alpha_j^{-1}[t^{1/2}\mu_j^{-1/2} - t^{-1/2}\mu_j^{1/2}] \tag{2.14a}$$

$$u_2(t) = \alpha_j^{-1}[t^{1/2}\mu_j^{-1/2} + t^{-1/2}\mu_j^{1/2}] \tag{2.14b}$$

Reemplazando las ecuaciones 2.13 y 2.14 en la ecuación 2.11, las probabilidades de rupturas $p_t(j)$ pueden ser calculadas con la ecuación 2.15.

$$p_t(j) = \frac{(\Phi[u_1(T_t(j))] - \Phi[u_1(T_t(j)-1)]) + e^{2/\alpha_j^2}(\Phi[-u_2(T_t(j))] - \Phi[-u_2(T_t(j)-1)])}{1-(\Phi[u_1(T_t(j)-1)]) + e^{2/\alpha_j^2}\Phi[-u_2(T_t(j))]} \tag{2.15}$$

La matriz Σ representa la influencia que tiene la ruptura de una sección en el desencadenamiento de ruptura en las secciones adyacentes. Esta matriz tiene $N \times N$ elementos $\rho_{i,j}$ y es definida mediante un correlograma esférico que relaciona la ocurrencia de rupturas $X_t(i)$ y $X_t(j)$ entre las secciones i y j en cualquier año t, como se muestra en la ecuación 2.16. Nótese que la correlación disminuye en función del cuadrado de la distancia $Dist(i,j)$ entre secciones, haciendo menos probable la ocurrencia simultánea de sismos en secciones que se encuentren muy alejadas. En esta función el parámetro de correlación γ se define como la tasa a la cual dicha correlación disminuye con la distancia entre secciones.

$$\rho_{i,j} = e^{-\left(\frac{Dist(i,j)}{\gamma}\right)^2} \tag{2.16}$$

Dado que la distribución multivariada de Bernoulli con parámetros de función correlacionados no puede ser resuelta de forma analítica en términos de las probabilidades de ocurrencia p_t y correlación $\rho_{i,j}$, el método de cópula es usado como una aproximación (Jin, 2015). Para ello, se define al vector Z_t como una variable aleatoria de distribución normal con media igual al vector nulo y covarianza igual a la matriz Σ (ecuación 2.17). Finalmente, $X_t(j)$ es obtenido evaluando la desigualdad de la ecuación 2.18 entre $\Phi[Z_t(j)]$ y $p_t(j)$. Usando esta aproximación, la ocurrencia de rupturas en las secciones de la falla puede ser obtenida para cada año de estudio, de esta manera, es posible representar la distribución espacial y temporal de las futuras rupturas sísmicas en una ventana de tiempo de t años.

$$Z_t \sim \mathcal{N}(0,\Sigma), \qquad donde\, \Sigma = (\rho_{i,j})_{N\times N} \tag{2.17}$$

$$X_t(j) = \begin{cases} 1, & si\ \Phi[Z_t(j)] < p_t(j) \\ 0, & de\ lo\ contrario \end{cases} \tag{2.18}$$

Como el modelo de falla es discretizado en N secciones (Figura N° 2.4), existirán distintas formas de rupturas en el modelo, por ejemplo, se tendrán N eventos en los que se rompa solamente una sección; $N-1$ casos, para la ruptura de dos secciones adyacentes; $N-2$, para tres y así sucesivamente. Por consiguiente, el número

de escenarios posibles n_S en el modelo puede ser generalizado para cualquier discretización como $N \times (N+1)/2$.

Sea n el número de rupturas obtenidas en una simulación del modelo para los siguientes t años, dado que existen $N \times (N+1)/2$ escenarios posibles, se puede determinar la probabilidad de ocurrencia de cierto escenario sísmico s_i como la relación entre el número $n(S = s_i)$ de ocurrencias del escenario s_i en los siguientes t años y el número n total de rupturas simuladas. La forma general de esta expresión se muestra en la ecuación 2.19.

$$P(S = s_i|t) = \frac{n(S = s_i)}{n}, \qquad 1 \leq i \leq n_S \tag{2.19}$$

2.3 Amenaza por tsunami

Los tsunamis son fenómenos marinos que se componen de una serie de ondas causadas por el movimiento repentino de un volumen grande de agua, este movimiento puede ser producido por el movimiento sísmico del fondo marino, derrumbes submarinos, erupciones volcánicas o impacto de meteoritos (Koshimura, 2019).

En el caso de un movimiento sísmico, la región adherida a la zona de subducción libera gran cantidad de energía y se desplaza verticalmente empujando al mar que se encuentra sobre ella y generando así el tsunami (United States Geological Survey [USGS], 2001; traducido como el Servicio Geológico de Estados Unidos). Cabe mencionar que los tsunamis que provocan más daño son los de origen cercano, esto es, aquellos que son generados a decenas o pocos centenares de kilómetros desde el punto de observación (Kuroiwa, 2002). Este es el caso del Perú, donde los tsunamis pasados fueron generados debido a la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana (Figura N° 2.1).

Para comprender el comportamiento de los tsunamis y el procedimiento seguido para modelarlo, es necesario definir sus tres etapas: generación, propagación e inundación, explicadas a continuación.

2.3.1 Fase de generación

Se refiere a la perturbación del océano producida por cualquiera de los fenómenos mencionados anteriormente y que luego genera las ondas del tsunami. En el caso de tsunamis generados por sismos de origen tectónico (movimiento sísmico), la deformación del fondo oceánico puede ser estimada mediante la teoría de Okada (1985), que considera una deformación instantánea del suelo y asume que el área de ruptura se comporta como un plano rectangular caracterizado por los nueve parámetros mostrados en la Figura N° 2.5.

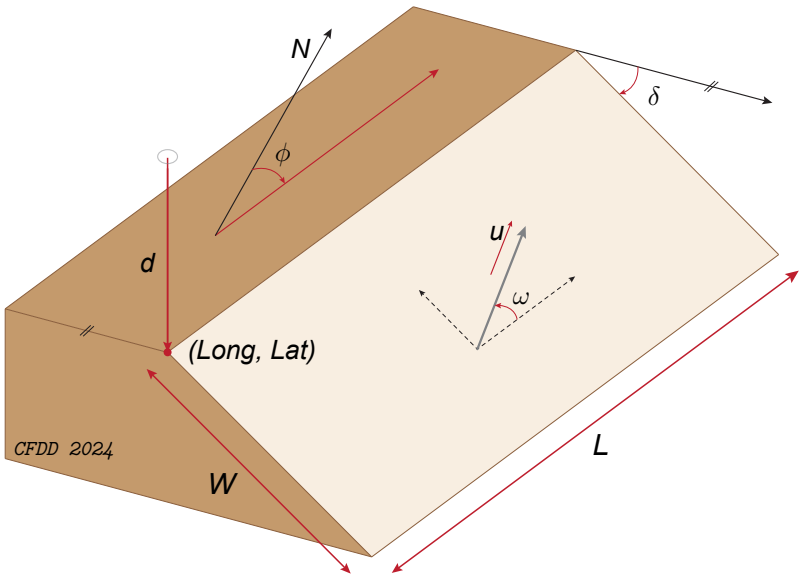


FIGURA N° 2.5: Parámetros que caracterizan las rupturas. Adaptado de Aránguiz et al. (2018).

Donde:

$Long, Lat$	: Coordenadas de la esquina superior izquierda de la falla
d	: Profundidad de la esquina superior izquierda de la falla
L	: Longitud de la falla
W	: Ancho de la falla
u	: Dislocación
ϕ	: Azimut de la falla
δ	: Buzamiento de la falla
ω	: Ángulo de incidencia

El modelo de Okada (1985) se basa en la formulación de Steketee (1958) mostrada en la ecuación 2.20, que estima los desplazamientos $\Delta u_i(x_1, x_2, x_3)$ generados por las dislocaciones $u_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ a través de la superficie Σ en un medio isotrópico donde: δ_{jk} es el delta de Kronecker; λ' y μ', las constantes de Lamé; v_k, el coseno director de la normal al elemento de superficie $d\Sigma$; y Δu_j^i, el componente "i" del desplazamiento en el punto (x_1, x_2, x_3) debido a la fuerza de magnitud F en la dirección "j" del punto (ξ_1, ξ_2, ξ_3).

$$\Delta u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} u_j \left[\lambda' \delta_{jk} \frac{\partial \Delta u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu' \left(\frac{\partial \Delta u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial \Delta u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k d\Sigma \qquad (2.20)$$

Debido a que el agua es un fluido incompresible y que los sismos ocurren en un periodo tan corto, se asume que la columna de agua alterada al generarse el tsunami no puede escaparse, y, por tanto, que la deformación inicial de la superficie del océano es igual a la del fondo marino (Moggiano, 2013), además, se supone

que no hay efectos relacionados con el tiempo de ascenso ni con la velocidad de ruptura en la generación del tsunami (Muhari et al., 2011). Así pues, en el modelamiento numérico de tsunami se considera a la deformación de la superficie del océano como la condición inicial del tsunami para las dos fases siguientes.

2.3.2 Fases de propagación e inundación

Al deformarse la superficie del océano, la gravedad actúa de inmediato como una fuerza restauradora formando ondas que se propagan en todas las direcciones (Moggiano, 2013). Como describió Kuroiwa (2002), la velocidad de propagación del tsunami es igual $\sqrt{gh}$, donde "h" es la profundidad del océano; y "g", la gravedad. A medida que las ondas se acercan a la costa, las velocidades de propagación disminuyen (energía cinética) debido a que la profundidad del océano es menor y, por conservación de energía, las alturas aumentan (energía potencial), llegando de esta manera con una fuerza destructiva en la costa (Levin y Nosov, 2016).

Como indicó la DHN (2013), la fase de inundación consiste básicamente en el arribo del tsunami a la costa, este es un proceso complejo, ya que la altura con la que llega dependerá de la interacción entre distintos factores como: batimetría, rugosidad, difracción y refracción de las ondas. Las características del tsunami en esta etapa cambian significativamente debido a que los efectos no lineales se vuelven importantes. Además, actúan fenómenos como la dispersión, reverberación y reflexión de las ondas (Aránguiz et al., 2018).

Para describir la inundación por tsunami, comúnmente se utilizan los parámetros mostrados en la Figura N° 2.6. La altura del tsunami representa el arribo del tsunami a la costa sobre un nivel de referencia de la marea en condiciones normales, la altura de inundación es la elevación total alcanzada por el tsunami en el terreno definida como la suma de la profundidad de inundación y la cota del terreno, por último, el run-up es la cota máxima que alcanza el tsunami durante la inundación del terreno (Aránguiz et al., 2018). Recientemente, se ha estudiado y determinado estos parámetros utilizando modelos numéricos que caracterizan la propagación e inundación por tsunami considerando la teoría de aguas someras.

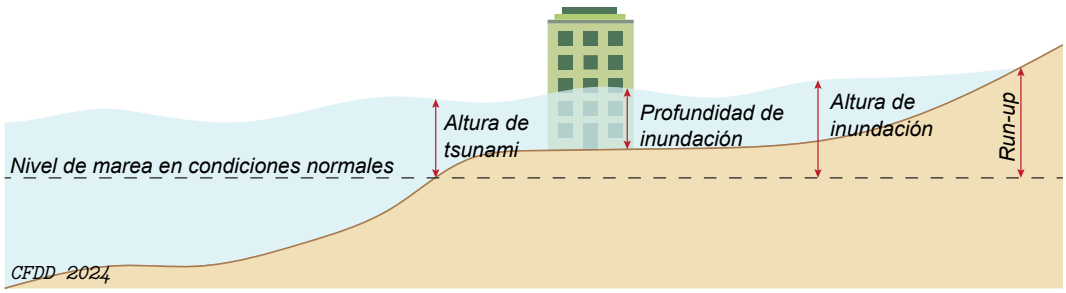


FIGURA N° 2.6: Parámetros en la inundación por tsunami. Adaptado de Koshimura (2019).

2.3.3 Teoría de aguas someras

Durante la etapa de propagación del tsunami, muy poca energía es disipada, ya que el efecto de fricción del fondo marino es considerado como de orden secundario, además, debido a que la profundidad del océano es en general muy pequeña en comparación con la longitud de onda del tsunami, la teoría de aguas someras puede ser utilizada (Aránguiz et al., 2018).

El método convencional para el modelamiento numérico de tsunamis consiste en resolver las formulaciones de la teoría de aguas someras (ecuaciones 2.21 - 2.24) como las de conservación de masa y momento para un fluido incompresible (Koshimura, 2019). En esta teoría, se asume que la aceleración vertical de las partículas de agua es despreciable comparada con la gravedad, esto es, se supone que la presión del fluido es la hidrostática (Imamura, 1996). La ecuación de continuidad del fluido se describe por la ecuación 2.21:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{2.21}$$

Donde:

$M\ y\ N$	: flujos de descarga en las direcciones $x\ e\ y$
η	: amplitud de onda
t	: tiempo

Por otro lado, la ecuación de momento (ecuaciones 2.22 y 2.23) describe cómo las velocidades y presión del fluido en movimiento están relacionadas (CISMID, 2010):

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{MN}{D}\right) = -gD\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{\frac{7}{3}}} M\sqrt{M^2+N^2} \tag{2.22}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{MN}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{N^2}{D}\right) = -gD\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{\frac{7}{3}}} N\sqrt{M^2+N^2} \tag{2.23}$$

Donde:

$$M = \int_{-h}^{\eta} \hat{u} dz = \overline{u}(\eta + h) \tag{2.24a}$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} \hat{v} dz = \overline{v}(\eta + h) \tag{2.24b}$$

$$D = \eta + h \tag{2.24c}$$

D	: profundidad total del agua
n	: coeficiente de rugosidad de Manning
$\hat{u}\, y\, \hat{v}$	: vectores de velocidad en las direcciones $x\, e\, y$
$\overline{u}\, y\, \overline{v}$	: velocidades promedio en las direcciones $x\, e\, y$
g	: aceleración de la gravedad
h	: profundidad del mar

Asimismo, debe considerarse la estabilidad numérica en el modelamiento de tsunamis para asegurar que la velocidad de propagación numérica no exceda a la del medio físico (CISMID, 2010), como se muestra en la ecuación 2.25.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gh_{max}}} \tag{2.25}$$

Donde:

Δt	: intervalo de tiempo usado en la simulación
Δx	: resolución espacial de las grillas en la batimetría

Finalmente, las fases de propagación e inundación del tsunami pueden ser estimadas usando el código Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Near-field Tsunami No.2 (TUNAMI-N2, traducido como el modelo de análisis numérico de la Universidad de Tohoku para la investigación de tsunamis de origen cercano), el cual fue modificado por Koshimura (2013) y resuelve las ecuaciones 2.21 - 2.24 discretizándolas mediante el método de diferencias finitas centrales y salto de rana escalonado en un sistema de grillas anidadas.

2.3.4 Evaluación probabilística

Como indicaron Baba et al. (2022), el análisis probabilístico de peligro por tsunami (PTHA, por sus siglas en inglés, *Probabilistic Tsunami Hazard Assessment*) es llevado a cabo a partir del estudio de la ocurrencia sísmica, conocido como análisis probabilístico de la peligrosidad sísmica (PSHA, por sus siglas en inglés, *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*). A continuación, se describe las formulaciones de PSHA y PTHA considerando un análisis independiente y dependiente del tiempo:

Considerando que el análisis independiente del tiempo sigue un proceso de Poisson (Baker et al., 2021), en el análisis de tsunami la probabilidad de que la profundidad de inundación H en una región sea mayor que cierta profundidad h, dentro de una ventana de tiempo de t años, puede ser calculada con la ecuación 2.26, donde $\lambda(H \geq h)$ es la tasa media anual de que $H \geq h$ (ecuación 2.27); $\lambda(M \geq m_{min})$, la tasa media anual de ocurrencia de sismos con magnitudes mayores que m_{min};

$P(H \geq h|m)$, la probabilidad de que la profundidad H sea mayor que h dado la ocurrencia de un sismo de magnitud m; y $f_M(m)$, la función de densidad del sismo de magnitud M (Muhammad et al., 2022).

$$P(H \geq h|t) = 1 - e^{-\lambda(H \geq h) \cdot t} \tag{2.26}$$

$$\lambda(H \geq h) = \lambda(M \geq m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} P(H \geq h|m) f_M(m) dm \tag{2.27}$$

Finalmente, para desarrollar estas funciones es práctico discretizar las distribuciones continuas de M, y convertir la integral de la ecuación 2.27 en una sumatoria discreta (ecuación 2.28), donde el rango de las posibles magnitudes M es discretizada en n_M intervalos (Baker, 2015).

$$\lambda(H \geq h) = \lambda(M \geq m_{min}) \sum_{i=1}^{n_M} P(H \geq h|m_i) P(M = m_i) \tag{2.28}$$

Por otro lado, en el análisis dependiente del tiempo el cálculo es más directo, ya que se conoce la ocurrencia de los escenarios en un horizonte de t años. Así pues, las probabilidades de excedencia son determinadas mediante la ecuación 2.29.

$$P(H \geq h|t) = \sum_{i=1}^{n_S} P(H \geq h|s_i) P(S = s_i|t) \tag{2.29}$$

2.4 Evaluación de daños por tsunami

2.4.1 Funciones de fragilidad

Las funciones de fragilidad son modelos probabilísticos que describen la probabilidad condicional P de que un estado de daño sea alcanzado o excedido bajo cierta intensidad im del peligro (Tarbotton et al., 2015), como se expresa en la ecuación 2.30. En el análisis de estas funciones es común considerar una serie de niveles de daño ds_i, donde mayores valores de i indican un nivel de daño más severo. En la Figura N° 2.7 se ilustra un ejemplo de funciones de fragilidad para cuatro estados de daño, como puede notarse, las probabilidades de exceder daños más severos son menores para un mismo valor de im, esto es, $P(DS \geq ds_{i+1}|IM = im) < P(DS \geq ds_i|IM = im)$, además, las probabilidades crecen a medida que IM es mayor (Goda y Song, 2016).

$$P = P(DS \geq ds_i|IM = im) \tag{2.30}$$

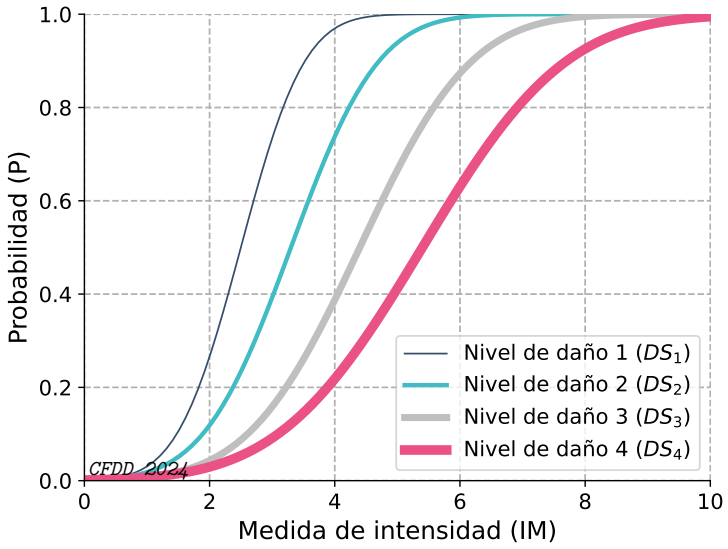


FIGURA N° 2.7: Funciones de fragilidad. Adaptado de Tarbotton et al. (2015).

A partir de la ecuación 2.30 es posible analizar un conjunto discreto de estados de daño, en el cual la probabilidad de encontrarse en cierto nivel de daño ds_i puede ser estimada con la ecuación 2.31 (Goda y Song, 2016).

$$p(ds_i|IM=im) = P(DS \geq ds_i|IM=im) - P(DS \geq ds_{i+1}|IM=im) \tag{2.31}$$

Koshimura et al. (2009) introdujeron el término fragilidad del tsunami (TFF, por sus siglas en inglés, *Tsunami Fragility Functions*) como una nueva medida para la estimación de daños estructurales por tsunami en edificaciones. Este indicador representa la probabilidad de daño en función de las características hidrodinámicas del tsunami: profundidad de inundación, velocidad del flujo o fuerza hidrodinámica. Análogamente a los estudios en sismos, las funciones de fragilidad siguen las expresiones mostradas en la ecuación 2.32, donde $P_D(x)$ es la probabilidad de daño en las edificaciones bajo cierta característica hidrodinámica del tsunami x ($\ln x$), y es expresada por una función de densidad normal (lognormal) estándar Φ con sus dos parámetros estadísticos μ (ν) y σ (ξ), que representan la media y desviación estándar de x ($\ln x$), respectivamente.

$$P_D(x) = \Phi\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right] = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \tag{2.32a}$$

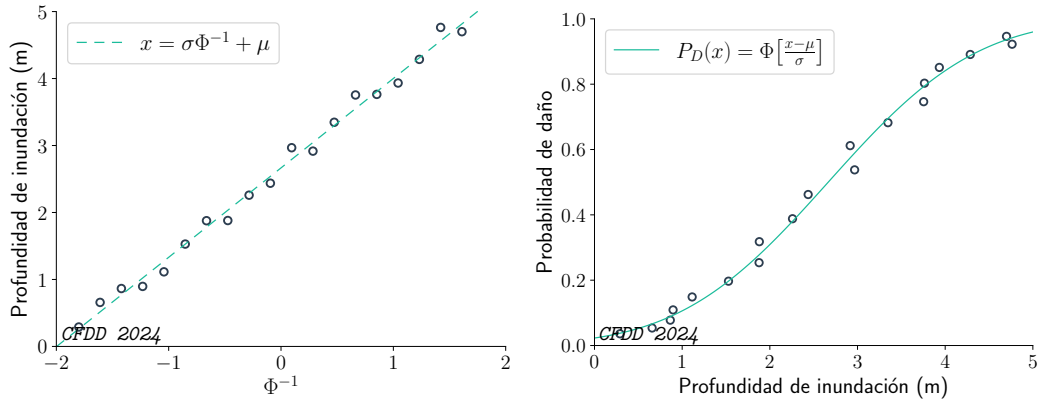
$$P_D(x) = \Phi\left[\frac{\ln x-\nu}{\xi}\right] = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi t} \exp\left(-\frac{(\ln t-\nu)^2}{2\xi^2}\right) dt \tag{2.32b}$$

Los parámetros μ (ν) y σ (ξ) de las funciones de fragilidad pueden ser obtenidos mediante una regresión lineal de la inversa de la función de densidad Φ^{-1} de las observaciones, como se muestra en la ecuación 2.33. La elección de cuál de las funciones deberá ser usada (normal o lognormal) dependerá del grado de ajuste de la curva con los datos analizados (Koshimura et al., 2009).

$$x = \sigma\Phi^{-1} + \mu \tag{2.33a}$$

$$\ln x = \xi\Phi^{-1} + \nu \tag{2.33b}$$

En la Figura N° 2.8b se muestra un ejemplo de la construcción de una función de fragilidad considerando una distribución normal y la profundidad de inundación como la característica hidrodinámica del tsunami. Como indicaron (Koshimura et al., 2009), primero se deben graficar los valores de x con la inversa de la función de densidad Φ^{-1} (Figura N° 2.8a) y luego, mediante un ajuste de mínimos cuadrados, se determinará los parámetros μ y σ de la función de fragilidad (Figura N° 2.8b).



(a) Ajuste por mínimos cuadrados

(b) Función de fragilidad

FIGURA N° 2.8: Construcción de una función de fragilidad. Adaptado de Koshimura et al. (2009).

Cabe mencionar que luego de un tsunami, los daños en las edificaciones pueden ser estimados utilizando la teledección (inspección visual de los daños usando imágenes satelitales tomadas antes y después del evento) o mediante trabajos de campo (Mas et al., 2012). En estas evaluaciones se suele relacionar a los daños con las profundidades de inundación (Figura N° 2.8a) debido a que otros parámetros, como la velocidad de flujo y fuerza hidrodinámica, son difíciles de estimar mediante herramientas actuales, tales como levantamientos de campo o modelamientos numéricos (Tarbotton et al., 2015).

Las funciones descritas son denominadas funciones de fragilidad empíricas, ya que se basan en los resultados de eventos pasados. Estas funciones pueden ser usa-

das para analizar la probabilidad de daño en las edificaciones de manera preventiva teniendo en cuenta que la eficiencia de las estimaciones dependerá del método utilizado, así como de la curva de fragilidad escogida (Vescovo et al., 2023).

2.4.2 Simulación de Monte Carlo

De acuerdo con Goda y De Risi (2018), es posible determinar el estado de daño en una edificación utilizando simulaciones de Monte Carlo. Por ejemplo, considere la edificación mostrada en la Figura N° 2.6 sometida a cierta profundidad de inundación por tsunami, usando las funciones de fragilidad por tsunami (Figura N° 2.7), las probabilidades de daño para tal medida de intensidad pueden ser estimadas y representadas como categorías ordinales (i.e., siguiendo una secuencia según el tipo de daño), como se ilustra en la Figura N° 2.9. La evaluación de daños consiste en muestrear una variable aleatoria uniforme n en el rango de 0 a 1 y comparar el valor simulado con las probabilidades de daño calculadas. En el ejemplo mostrado de la Figura N° 2.9, se puede observar que el valor de n se encuentra dentro del rango de probabilidades del nivel de daño 2 (DS_2), y, por tanto, la edificación analizada tendrá este estado de daño en la simulación.

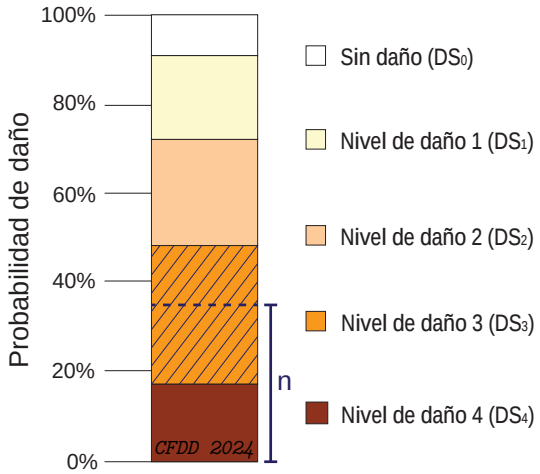


FIGURA N° 2.9: Ejemplo de simulación de Monte Carlo.

Sea n_{SMC} el número de simulaciones de Monte Carlo realizadas en la evaluación de daños por tsunami y n_{ds} el número de estados de daño utilizados. La probabilidad de que el número N de edificaciones en el estado de daño ds_i sea mayor que cierto número n de edificaciones es representada por la ecuación 2.34, donde $I(\bullet)$ es un indicador que será igual 1 cuando el número de edificaciones en el estado de daño ds_i es mayor o igual que n; y 0, de lo contrario (Goda y De Risi, 2018).

$$P(N \geq n|ds_i) = \frac{1}{n_{SMC}} \sum_{j=1}^{n_{SMC}} I(N_j \geq n|ds_i), \qquad 1 \leq i \leq n_{ds} \tag{2.34}$$

De manera similar a la evaluación probabilística de peligro por tsunami, la probabilidad de que se exceda cierto número n de edificaciones en el estado de daño ds_i dentro de una ventana de tiempo de t años es representada por las ecuaciones 2.35 y 2.36 para un análisis independiente y dependiente del tiempo, respectivamente.

Según Goda y Song (2016), este procedimiento puede interpretarse como una transformación del riesgo por tsunami, ya que consolida el impacto de esta amenaza en un recuento del número de manzanas dañadas en la región costera, lo cual es útil en la Gestión de Riesgo de Desastres (GRD).

$$P(N \geq n|ds_i,t) = 1 - e^{-\lambda(N \geq n|ds_i)\cdot t} \tag{2.35a}$$

$$\lambda(N \geq n|ds_i) = \lambda(M \geq m_{min}) \sum_{j=1}^{n_M} P(N \geq n|ds_i,m_j)P(M = m_j) \tag{2.35b}$$

$$P(N \geq n|ds_i,t) = \sum_{j=1}^{n_S} P(N \geq n|ds_i,s_j)P(S = s_j|t) \tag{2.36}$$

Finalmente, sea FD_i el factor de daño por tsunami que tendrían una edificación para cierto nivel de daño, este factor es usado generalmente para representar el daño como un porcentaje del costo de reparación/reemplazo (Goda y Song, 2016). Además, se define al factor de daño medio (FDM) como el daño por tsunami esperado en la edificación. Considerando cierta intensidad im del peligro, el FDM puede ser obtenido mediante la ecuación 2.37, donde $p(ds_i)$ es la probabilidad de daño correspondiente al estado de daño ds_i (Hwang y Lin, 2002).

$$FDM(IM = im) = \sum_{i=1}^{n_{ds}} p(ds_i|IM = im) \times FD_i \tag{2.37}$$

Así pues, es posible analizar las probabilidades de excedencia del FDM en una edificación para un análisis independiente y dependiente del tiempo con las ecuaciones 2.38 y 2.39, respectivamente.

$$P(FDM \geq fdm|t) = 1 - e^{-\lambda(FDM \geq fdm)\cdot t} \tag{2.38a}$$

$$\lambda(FDM \geq fdm) = \lambda(M \geq m_{min}) \sum_{i=1}^{n_M} P(FDM \geq fdm|m_i)P(M = m_i) \tag{2.38b}$$

$$P(FDM \geq fdm|t) = \sum_{i=1}^{n_S} P(FDM \geq fdm|s_i)P(S = s_i|t) \tag{2.39}$$

Capítulo III: Modelado de rupturas sísmicas

3.1 Generación de escenarios sísmicos

El distrito de Chorrillos se encuentra ubicado en la zona central del Perú, limitada por la Zona de Fractura de Mendaña y el Dorsal de Nazca (Figura N° 3.1). Como se describió en la sección 2.1.3, estas franjas actúan como barreras naturales y aíslan la actividad sísmica de las regiones adyacentes (Villegas et al., 2016). Por ello, se consideró a la zona de subducción central del Perú como la región de análisis para la generación de escenarios sísmicos en esta investigación.

El modelo de falla considerado fue una región rectangular de longitud y ancho igual a 640 y 200 km en las direcciones de rumbo y buzamiento, respectivamente. A fin de determinar los escenarios posibles en esta región, el modelo de falla fue discretizado en ocho secciones a lo largo del rumbo, cada una con una longitud de 80 km, como se muestra en la Figura N° 3.1.

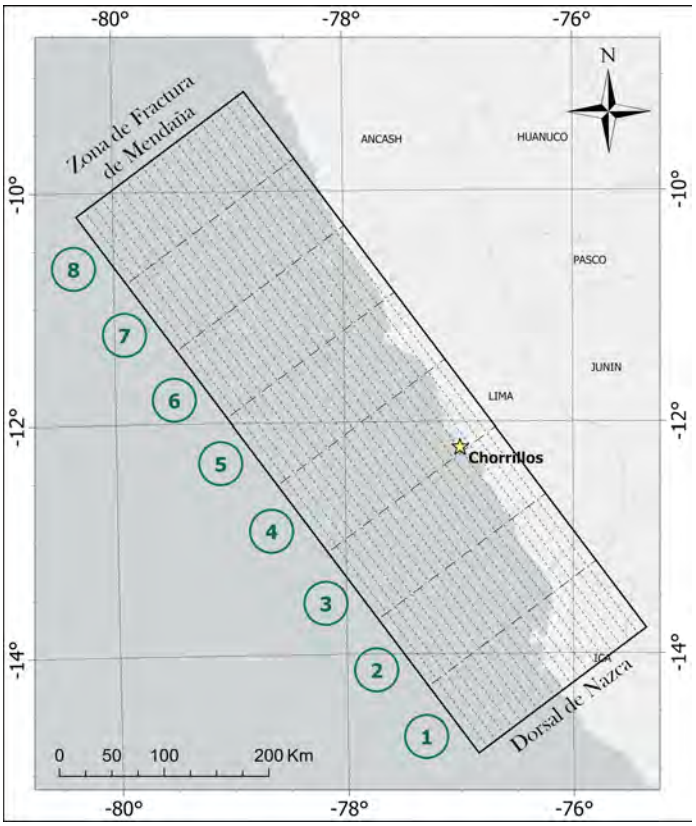


FIGURA N° 3.1: Segmentación de la zona de subducción central del Perú.

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 2.2.4, se determinaron en total 36 rupturas sísmicas posibles, las cuales son representadas unidimensionalmente en la Figura N° 3.2. Las rupturas tienen longitudes desde 80 hasta 640 km a lo largo del rumbo (en intervalos de 80 km) y que, usando la relación de escala $M_w - L$ (ecua-

ción 2.3a) propuesta por Papazachos et al. (2004), corresponden a las magnitudes de momento de 7.5, 7.9, 8.2, 8.5, 8.6, 8.8, 8.9 y 9.0 M_w, respectivamente.

La zona de subducción fue discretizada en 8 secciones de manera que el modelo genere escenarios con una magnitud mínima M_{min} de 7.5 M_w, similares a los sismos de menor magnitud del catálogo histórico (Figura N° 2.3). Esta magnitud mínima es apropiada para la evaluación probabilística de tsunami, ya que sismos con magnitudes menores son poco significativos en el peligro por tsunami (Muhammad et al., 2016). Además, si bien es posible discretizar la región en más secciones para caracterizar mejor la extensión y ubicación de las rupturas, los datos del catálogo son escasos y limitados a sismos con magnitudes mayores que 7.5 M_w. Por tanto, no son apropiados para una discretización más fina (Ceferino et al., 2020). Por otro lado, la magnitud máxima M_{max} considerada en el modelo fue de 9.0 M_w (correspondiente a la ruptura de las 8 secciones juntas), tal como sugiere Tarazona et al. (2023) para sismos de tipo interplaca en esta región.

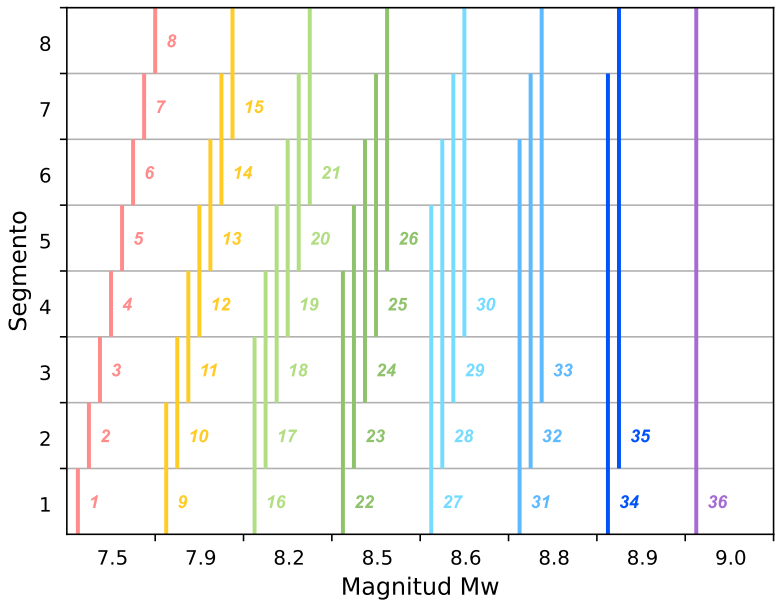


FIGURA N° 3.2: Rupturas sísmicas posibles en la región de estudio.

El análisis de las posibles rupturas del área de estudio fue llevado a cabo en una dimensión (Figura N° 3.2) debido a que el catálogo histórico (Figura N° 2.3) solamente se encuentra bien caracterizado a lo largo del rumbo. Sin embargo, para realizar las simulaciones numéricas de tsunami fue necesario determinar otros parámetros de las rupturas tales como el ancho y dislocación utilizando las relaciones de escala $M_w - W$ (ecuación 2.3b) y $M_w - u$ (ecuación 2.3c), respectivamente. Los resultados obtenidos, así como el número de rupturas posibles (Rup.), son mostrados en la Tabla N° 3.1 por cada tramo de magnitud. Nótese que, a medida que la magnitud es mayor, el número de rupturas posibles disminuye.

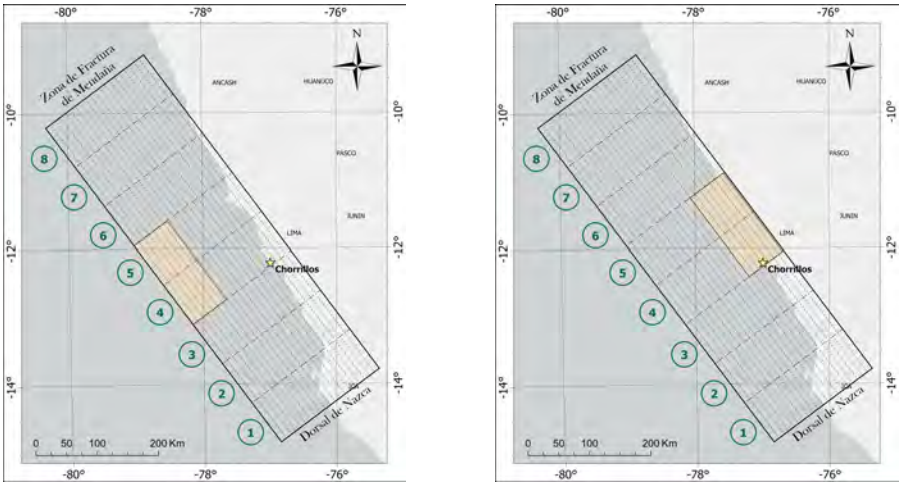
TABLA N° 3.1: Parámetros de los escenarios sísmicos generados.

Magnitud de momento (M_w)	Longitud (km)	Ancho (km)	Dislocación (m)	Rup.	Esc.	Total
7.5	80	50	0.96	8	16	128
7.9	160	70	2.15	7	14	98
8.2	240	90	3.45	6	12	72
8.5	320	100	4.82	5	11	55
8.6	400	120	6.25	4	9	36
8.8	480	130	7.73	3	8	24
8.9	560	140	9.25	2	7	14
9.0	640	150	10.81	1	6	6

Debido a que los anchos de rupturas calculados (Tabla N° 3.1) son menores al ancho del modelo de falla (200 km), las rupturas podrán tener distintas ubicaciones a lo largo del buzamiento en el modelo de falla (Figura N° 3.1). Por ello, se realizó una segmentación adicional a lo largo del buzamiento usando intervalos de 10 km (líneas punteadas en la Figura N° 3.1). De esta forma, el número de posibles escenarios fue determinado desplazando a las rupturas por cada uno de los segmentos generados (Figura N° 3.3). A modo de ejemplo, se detalla el procedimiento seguido para el caso de la ruptura N°12:

La ruptura N°12 tiene una magnitud de 7.9 M_w y representa al evento en el que las secciones 4 y 5 se rompen simultáneamente (Figura N° 3.2). De acuerdo con las relaciones de escala, esta ruptura tiene una longitud, ancho y dislocación de 160 km, 70 km y 2.15 m, respectivamente. Para determinar el número de escenarios posibles, se analizaron las ubicaciones de la ruptura a lo largo del ancho en el modelo de falla según su geometría (Figura N° 3.3), por ejemplo, en las Figuras N° 3.3a y 3.3b se ilustra el primer y último escenario posible, respectivamente. De esta manera, se determinaron en total 14 escenarios posibles para la ruptura N° 12 y, dado que las otras rupturas de magnitud 7.9 M_w tienen la misma geometría, el número de escenarios posibles también fue igual a 14. Así pues, como existen siete rupturas posibles con esta magnitud, se identificaron en total 98 escenarios.

Por consiguiente, la metodología propuesta fue aplicada a cada uno de los ocho tramos de magnitudes según la geometría de las rupturas. El número de escenarios posibles (Esc.) es mostrado en la Tabla N° 3.1, así como el total obtenido multiplicando el número de escenarios con el de rupturas posibles. Sumando los resultados, se determinaron en total 433 escenarios sísmicos para la segmentación propuesta en la región de estudio.



(a) Escenario 1 de la ruptura N° 12 (b) Escenario 14 de la ruptura N° 12

FIGURA N° 3.3: Escenarios sísmicos a lo largo del buzamiento.

El modelamiento de los escenarios sísmicos consistió en determinar los 9 parámetros que caracterizan a la fuente sísmica (Figura N° 2.5) y que son necesarios en el modelo de Okada (1985). La ubicación (latitud y longitud) fue obtenida de la segmentación del modelo de falla (Figura N° 3.1); la profundidad, a partir del modelo de acoplamiento heterogéneo de Villegas et al. (2016), mostrado en la Figura N° 2.2; la longitud, ancho y dislocación, usando las relaciones de escala (Tabla N° 3.1). Asimismo, se consideraron como constantes los siguientes parámetros para todos los escenarios: un azimut de 323° paralelo a la fosa marina en la zona central del Perú, buzamiento de 15° (Villegas et al., 2016) y un ángulo de incidencia de 90° para una máxima deformación vertical (Jimenez et al., 2013).

Bajo este procedimiento, se generaron y representaron los 433 escenarios posibles en mapas temáticos simbolizados según su dislocación. Para una mejor comprensión de los resultados, la Figura N° 3.4 muestra nueve ejemplos de los escenarios sísmicos generados, en los cuales se detalla en el extremo superior derecho la longitud, ancho, dislocación y magnitud de cada uno de ellos.

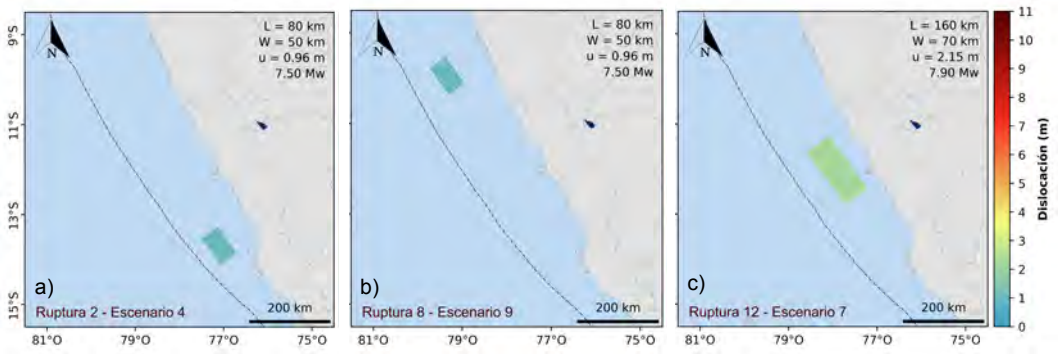


FIGURA N° 3.4: Escenarios sísmicos generados (continúa).

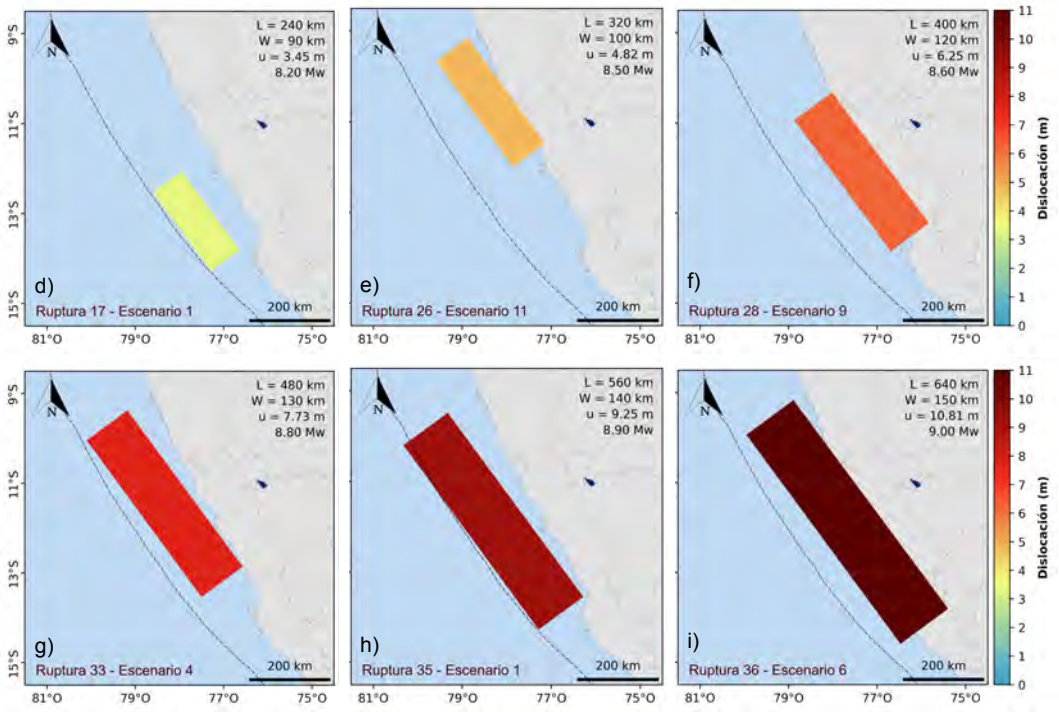


FIGURA N° 3.4: Escenarios sísmicos generados.

3.2 Análisis de la ocurrencia de escenarios sísmicos

3.2.1 Análisis independiente del tiempo

Debido a que el análisis independiente del tiempo analiza las magnitudes de los sismos pasados, la Tabla N° 3.2 resume las magnitudes del catálogo histórico (Figura N° 2.3) en la zona central del Perú según su año de ocurrencia.

TABLA N° 3.2: Magnitudes de los sismos históricos. Adaptado de Ceferino et al. (2020).

Año	**Magnitud (M_w)**	**Año**	**Magnitud (M_w)**
1586	8.1	1806	7.5
1664	7.5	1828	7.5
1678	7.85	1940	8.2
1687	8.4	1966	8.1
1725	7.5	1974	8.1
1746	8.6	2007	8.0

A través de un análisis estadístico con las magnitudes de los sismos históricos (Tabla N° 3.2), las constantes a y b fueron estimadas siguiendo la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter (ecuación 2.6): primero se calculó el logaritmo decimal de la tasa de excedencia de los eventos considerando un periodo de 450 años del

catálogo, luego, mediante un ajuste de mínimos cuadrados, se determinaron los valores a y b de la función, que resultaron iguales a 6.13 y 1.01, respectivamente.

La función obtenida mostrada en la Figura N° 3.5 representa la tasa media anual con la cual se exceden las magnitudes de los sismos en la zona de estudio, por ejemplo, la tasa de sismos $\geq$ 7.5 M_w (M_{min}) fue calculada usando la ecuación 2.6, donde $\lambda(M \geq M_{min})$ resultó ser igual a 0.037, es decir, se espera que 0.037 sismos con magnitudes $\geq$ 7.5 M_w ocurran en promedio cada año. Cabe mencionar que esta función se mantendrá constante incluso si el silencio sísmico aumenta. Esto, debido a que se trata de un análisis independiente del tiempo; no obstante, deberá ser actualizada en caso ocurriese un sismo considerando solamente su magnitud.

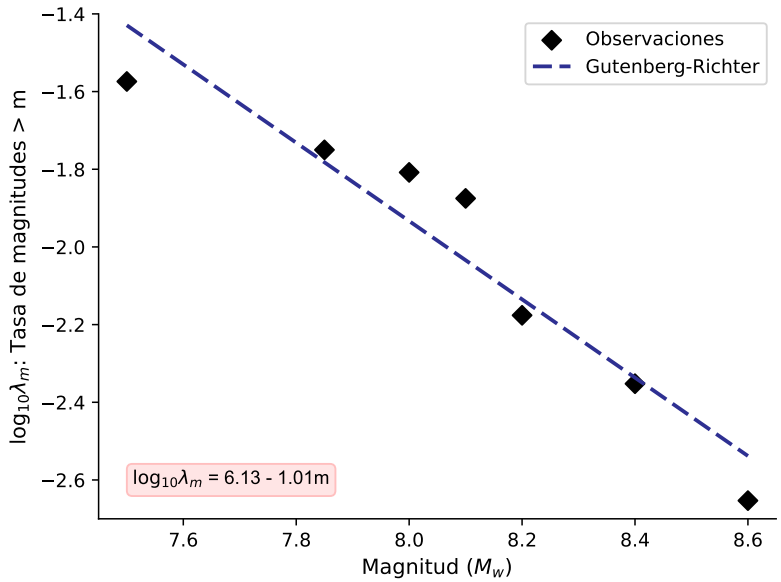


FIGURA N° 3.5: Tasa media anual de excedencia de las magnitudes.

Con los valores a y b de la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter se calcularon las probabilidades de ocurrencia de los ocho tramos de magnitud analizados (Tabla N° 3.1) usando las ecuaciones 2.7 y 2.8. Para ello, se consideró un conjunto discreto de magnitudes entre 7.5 M_w (M_{min}) y 9.0 M_w (M_{max}) definido por los valores medios de los tramos de magnitud m_i analizados. La Tabla N° 3.3 muestra los resultados obtenidos de este análisis: en la primera columna se presenta el conjunto discreto de magnitudes utilizado; en la segunda, las funciones de distribución acumuladas de estas magnitudes utilizando la ecuación 2.7; en la tercera, los tramos de magnitud analizados; y en la última, las probabilidades de ocurrencia obtenidas con la ecuación 2.8.

Nótese que en esta evaluación se está asumiendo que las magnitudes de este conjunto discreto son las únicas posibles en la zona de estudio, por ello, los sismos $\leq$ 7.5 M_w tienen una probabilidad de cero; y los $\leq$ 9.0 M_w, de uno.

TABLA N° 3.3: Probabilidades según la distribución de Gutenberg Richter.

m	$F_M(m)$	m_i	$P(M = m_i)$
7.50	0.000	7.5	0.383
7.70	0.383	7.9	0.361
8.05	0.744	8.2	0.144
8.35	0.888	8.5	0.053
8.55	0.942	8.6	0.027
8.70	0.968	8.8	0.019
8.85	0.987	8.9	0.009
8.95	0.996	9.0	0.004
9.00	1.000		

Como resultado del análisis anterior, la Figura N° 3.6 presenta un gráfico de barras con las probabilidades de ocurrencia asociadas a cada magnitud. A medida que la magnitud es mayor, las probabilidades de ocurrencia son menores, siendo los sismos de 7.5 y 7.9 M_w los de mayor ocurrencia.

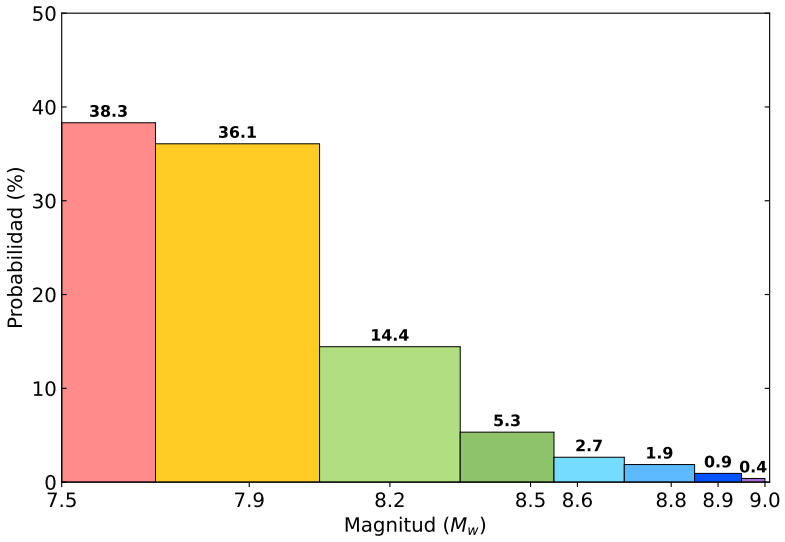


FIGURA N° 3.6: Probabilidades de ocurrencia de cada magnitud.

3.2.2 Análisis dependiente del tiempo

Como se detalló en la sección 2.2.4, para realizar un análisis dependiente del tiempo, la distribución tanto espacial como temporal del catálogo histórico (Figura N° 2.3) debe ser considerada. Por ello, las rupturas del catálogo fueron proyectadas de acuerdo con la segmentación de la Figura N° 3.2. Siguiendo la metodología propuesta por Ceferino et al. (2020), los segmentos de las rupturas fueron discre-

tizados y asociados a cada una de las ocho secciones analizadas (Figura N° 3.7) despreciando aquellas porciones de las rupturas que tuvieran una longitud inferior a la mitad de la longitud de la sección (40 km). Cabe mencionar que el análisis dependiente del tiempo de esta investigación fue desarrollado usando el modelo de ocurrencia de Ceferino et al. (2020), al cual se incorporaron los eventos sísmicos de 1806 y 1828, tal como se hizo en el estudio de Ceferino et al. (2021).

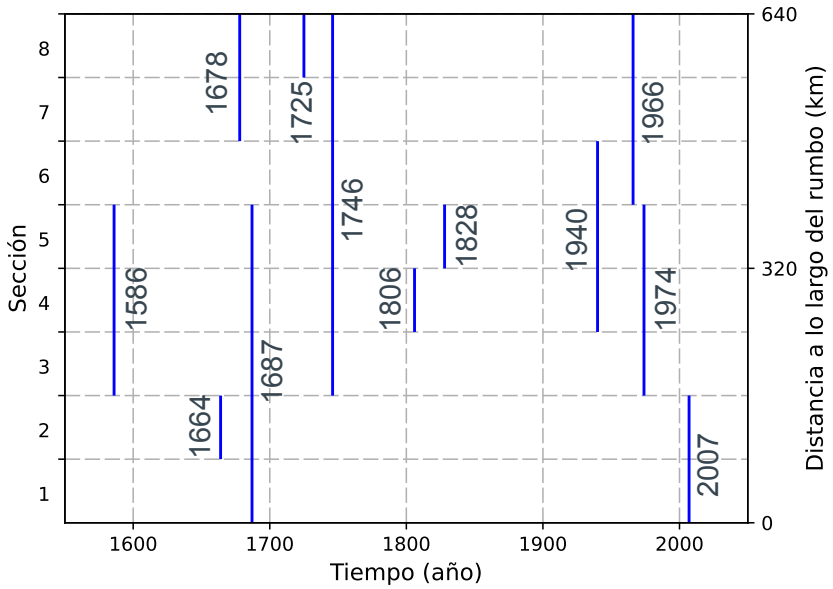


FIGURA N° 3.7: Segmentación del catálogo histórico. Adaptado de Ceferino et al. (2021).

A partir de la información mostrada en la Figura N° 3.7, se resumió la ocurrencia de los sismos históricos en cada sección: en la Tabla N° 3.4 se detalla el número de eventos sísmicos, los años de ocurrencia, así como el sismo más reciente en cada sección a fin de comparar la recurrencia sísmica entre secciones. Nótese que las secciones 4 y 5 son las que han experimentado una mayor recurrencia de sismos en el área de estudio, seguido de las secciones 3 y 8. Por otro lado, considerando al último evento ocurrido en cada sección, se puede notar que las secciones 1 y 2 contienen al sismo más reciente, ocurrido en Pisco el 2007, mientras que las secciones 6, 7 y 8 son las que tienen un mayor silencio sísmico, ya que el último evento fue el de Huacho en 1966.

La distribución espacial de los sismos del catálogo histórico fue obtenida mediante la segmentación de la Figura N° 3.7. En cambio, para analizar la distribución temporal, no solamente fue necesario determinar cuándo ocurriendo estos sismos (Tabla N° 3.4) sino también el tiempo que pasó entre ellos, de manera que se pueda tener un mejor punto de vista de la recurrencia sísmica en cada una de las secciones. Por ello, el modelo de ocurrencia de Ceferino et al. (2020) analiza los tiempos transcurridos entre sismos, así como desde el último evento en cada sección.

TABLA N° 3.4: Ocurrencia de los sismos históricos en cada sección.

Sec.	N° Eventos	Año de ocurrencia						Últ. evento
8	4	1678	1725	1746	1966			1966
7	3	1678	1746	1966				1966
6	3	1746	1940	1966				1966
5	6	1586	1687	1746	1828	1940	1974	1974
4	6	1586	1687	1746	1806	1940	1974	1974
3	4	1586	1687	1746	1974			1974
2	3	1664	1687	2007				2007
1	2	1687	2007					2007

Los datos del catálogo sísmico segmentado (Tabla N° 3.4) fueron usados para estimar los parámetros μ_j y α_j (ecuación 2.15), así como el parámetro de correlación espacial γ (ecuación 2.16) del modelo de ocurrencia. Según Ceferino et al. (2018), se pueden usar dos métodos para estimar estos parámetros: el primero consiste en evaluar individualmente los parámetros μ_j y α_j en cada sección y luego calibrar el parámetro de correlación γ hasta obtener el mejor ajuste entre los catálogos simulados y el catálogo histórico; mientras que el segundo, utiliza una actualización Bayesiana para estimar todos los parámetros del modelo simultáneamente en lugar de por separado.

Si bien el segundo método es más efectivo al reducir la incertidumbre epistémica de los parámetros del modelo, particularmente en secciones con pocas o ninguna ruptura conocida (Ceferino et al., 2021), se caracteriza por ser computacionalmente intensivo y requiere del uso de otros métodos como la implementación de la cadena de Monte Carlo Markov, así como de catálogos sísmicos sintéticos basados en procesos físicos (Ceferino et al., 2020). Además, ambos métodos mostraron resultados similares al ser aplicados en la zona central del Perú para un PSHA (Ceferino et al., 2018), por esta razón, se optó por utilizar el primer método dado su sencillez de aplicación en el modelo de ocurrencia.

La Tabla N° 3.5 muestra los valores obtenidos de μ_j y α_j en cada sección utilizando los tiempos transcurridos entre eventos consecutivos (τ_j) a partir de la Tabla N° 3.4. Al comparar los valores de μ_j, se observa que las secciones 4 y 5 tienen una mayor recurrencia de sismos con respecto a las otras secciones. Por otro lado, se puede notar que se tienen pocos registros disponibles de τ_j, que conllevan a que la estimación de estos parámetros no sea tan confiable, por ejemplo, el coeficiente de variación de la sección 1 fue igual a cero debido a que solamente se tienen registrados dos eventos; situación similar se observa en las secciones 2, 6 y 7, donde los parámetros fueron calculados a partir de 3 eventos.

TABLA N° 3.5: Parámetros estadísticos en cada sección.

Sección	**Tiempo entre eventos**					**Media**	**Desviación**	**CV**
(j)	(τ_j)					(μ_j)	**estándar**	(α_j)
8	47	21	220			96.0	108.17	1.13
7	68	220				144.0	107.48	0.75
6	194	26				110.0	118.79	1.08
5	101	59	82	112	34	77.6	31.61	0.41
4	101	59	60	134	34	77.6	39.64	0.51
3	101	59	228			129.3	87.99	0.68
2	23	320				171.5	210.01	1.22
1	320					320.0	0.00	0.00

Para mejorar la precisión de estas estimaciones, se optó por utilizar el método de estimación de máxima probabilidad (MLE, por sus siglas en inglés, *maximum-likelihood estimation*) que calcula μ_j y σ_j^2 mediante las formulaciones propuestas por Tweedie (1957) de la ecuación 3.1, donde τ_{jk} representa el conjunto de tiempos entre eventos $\tau_{j1}, \tau_{j2}, ..., \tau_{jn}$, siendo n es la cantidad de eventos ocurridos en la sección j. Así pues, el coeficiente de variación $\hat{\alpha}_j$ puede ser estimado luego con la relación $\hat{\sigma}_j/\hat{\mu}_j$ (Ceferino et al., 2020).

$$\hat{\mu}_j = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\tau_{jk}, \quad \hat{\sigma}_j^2 = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\hat{\mu}_j^3}{\tau_{jk}} - \hat{\mu}_j^2\right) \tag{3.1}$$

Los parámetros μ_j y α_j obtenidos usando el método de MLE son mostrados en la Tabla N° 3.6 para cada sección. Analizando los resultados obtenidos, se pudo notar que los valores de α_j en las secciones 2, 6 y 8 fueron notoriamente mayores respecto a los obtenidos en otras secciones. Además, nótese que α_1 resultó ser cero al igual que en la estimación anterior (Tabla N° 3.5).

Debido a la limitada cantidad de datos en el catálogo histórico, los parámetros atípicos fueron consideraron poco confiables. Para resolver ello, se asignó un valor de 0.7 a los parámetros α_2, α_6 y α_8 dada su cercanía a los valores de α_j en otras secciones y a los obtenidos usando la estimación Bayesiana en la misma zona de estudio (Ceferino et al., 2018). Asimismo, dado que la sección 1 cuenta únicamente con dos observaciones, se asumió que los valores de μ_1 y α_1 son iguales a los de la sección 2, como recomendaron (Ceferino et al., 2020). Así pues, los resultados finales de α_j en cada sección se denotan por α_j' en la Tabla N° 3.6. De esta forma se pudo estimar los parámetros necesarios del modelo de ocurrencia, quedando pendiente la calibración del parámetro de correlación γ.

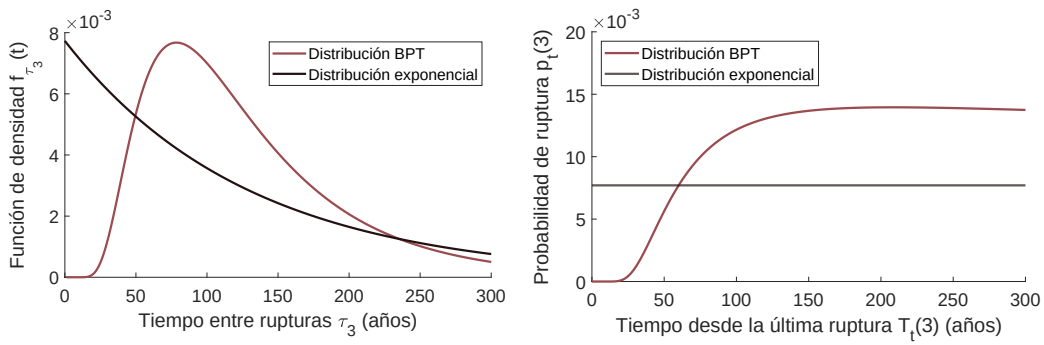
TABLA N° 3.6: Parámetros estadísticos usando el método de MLE.

Sección	1	2	3	4	5	6	7	8
μ_j	172	172	129	78	78	110	144	96
α_j	0.00	1.73	0.59	0.50	0.45	1.18	0.62	1.16
α'_j	0.70	0.70	0.59	0.50	0.45	0.70	0.62	0.70

Usando los parámetros definidos en la Tabla N° 3.6, se evaluó la distribución BPT en cada una de las secciones. Como ejemplo, la Figura N° 3.8 muestra los resultados para la sección 3, en los cuales se incluye la distribución exponencial a fin de comparar el análisis con uno independiente del tiempo. Para ello, se utilizó el parámetro $\lambda_3 = 1/\mu_3$ de la distribución de Poisson, que representa el número promedio de eventos sísmicos que ocurren cada año en esta sección (Arroyo et al., 2014).

En la Figura N° 3.8a se muestra la función de densidad de las dos distribuciones. Como se observa, la distribución exponencial tiene probabilidades mayores que la distribución BPT para tiempos pequeños; sin embargo, nótese que esta diferencia se invierte a medida que los tiempos se acercan a la media de la distribución (μ_3).

Por otro lado, la Figura N° 3.8b presenta la probabilidad $p_t(j)$ de que ocurra una ruptura en el siguiente año, dado que no hubo ninguna en los últimos $T_t(j)$ años. Se observa en la distribución BPT, que la probabilidad $p_t(j)$ es nula luego de haber ocurrido el sismo (i.e., liberación de la energía acumulada), la cual se va incrementando con el transcurso del tiempo (i.e., acumulación de energía) hasta un punto máximo a partir del cual decrece ligeramente aproximándose a una asíntota (Ceferino et al., 2020). En cambio, se puede notar en la distribución exponencial, que la probabilidad $p_t(j)$ se mantiene constante en el tiempo incluso si el silencio sísmico aumenta. En ese sentido, la distribución BPT tiene probabilidades menores que la distribución exponencial luego de ocurrido el sismo, pero se van incrementando con el silencio sísmico hasta que en cierto momento se vuelven mayores.



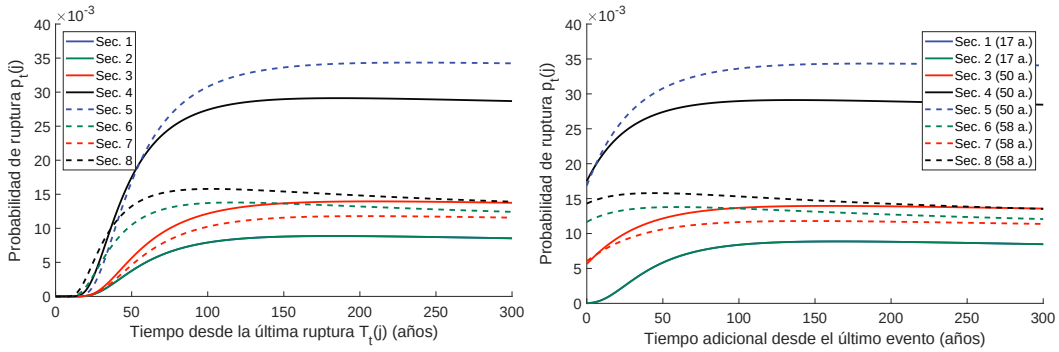
(a) Funciones de densidad.

(b) Probabilidad de ocurrencia de ruptura.

FIGURA N° 3.8: Distribuciones BPT y exponencial.

La Figura N° 3.9 ilustra las probabilidades de ruptura usando la distribución BPT de todas las secciones analizadas. Como se aprecia en la Figura N° 3.9a, las secciones 4 y 5 tienen una probabilidad más alta de ruptura en comparación con las otras secciones. Esta tendencia concuerda con la mayor recurrencia de los sismos históricos en esta sección, como se mostró en la Tabla N° 3.5. Nótese también que, a partir de los 200 años de silencio sísmico, las probabilidades en todas las secciones se van acercando a su valor límite.

Debido a que los silencios sísmicos en las secciones analizadas son diferentes, la Figura N° 3.9b muestra como ejemplo las probabilidades de ruptura en los siguientes años considerando el silencio sísmico existente hasta el año 2024. Como se observa, las probabilidades de ruptura aumentaron en todos los casos, siendo las secciones 1 y 2 las de menor cambio debido al menor silencio sísmico presente (17 años) con respecto a otras secciones.



(a) Sin silencio sísmico.

(b) Con silencio sísmico.

FIGURA N° 3.9: Probabilidades de ocurrencia de rupturas.

Con los parámetros μ_j y α_j definidos en cada sección (Tabla N° 3.6), se modelaron las futuras rupturas sísmicas usando el modelo de ocurrencia de Ceferino et al. (2020). Este modelo considera el silencio sísmico en cada sección, el cual se va actualizando cada año dependiendo de la ocurrencia de rupturas en la simulación. Debido a que se evaluará el peligro por tsunami del distrito de Chorrillos en los siguientes años, se modificó el modelo de ocurrencia para analizar un horizonte de tiempo corto a diferencia de Ceferino et al. (2020), quienes evaluaron las rupturas sísmicas en los siguientes 500,000 años.

Dado que el modelo de ocurrencia utiliza el método de Monte Carlo, cada catálogo simulado será diferente. Por lo tanto, es necesario determinar el número apropiado de catálogos N_{sim} que deberán ser generados (Muhammad et al., 2022). Para ello, se evaluó la estabilidad de las simulaciones como la frecuencia relativa de cada uno de los 36 escenarios posibles (Figura N° 3.2) en función de N_{sim} como la relación entre el número de rupturas simuladas de cada escenario y el total de rupturas obtenidas en todas las simulaciones. Por ejemplo, primero se analizó un horizonte

de 450 años, donde se determinó que 100,000 simulaciones son suficientes para garantizar la estabilidad de los catálogos simulados, ya que las frecuencias relativas de los escenarios no variaron significativamente al aumentar el valor de N_{sim}.

En la Figura N° 3.10 se muestran algunos de los catálogos simulados para los siguientes 450 años. Estos catálogos representan la extensión y años de ocurrencia de las futuras rupturas sísmicas. Los sismos históricos son mostrados en color negro, mientras que las rupturas simuladas en rojo. El modelo fue evaluado usando valores de γ iguales a 350, 400, 450 y 500 km a fin de calibrar este parámetro y seleccionar aquel que genere resultados consistentes con los del catálogo histórico.

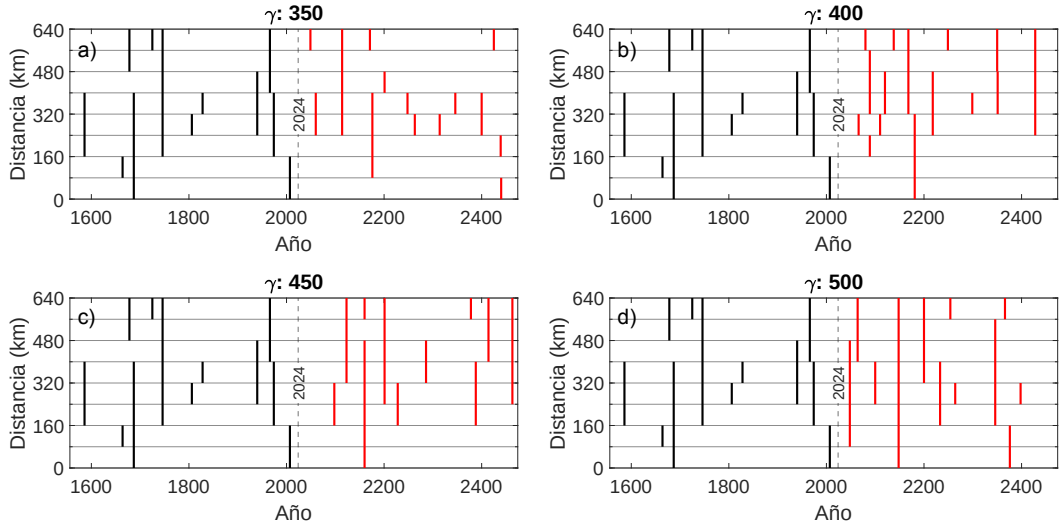


FIGURA N° 3.10: Catálogos simulados en los siguientes 450 años.

Con el objetivo de calibrar el parámetro γ del modelo, se realizaron tres análisis de sensibilidad a partir de los catálogos simulados para los cuatro valores de γ evaluados (Figura N° 3.11). El análisis consistió en comparar los resultados de las simulaciones con los obtenidos a partir de los sismos históricos y escoger aquel valor de γ que tenga una mejor aproximación, como se detalla a continuación.

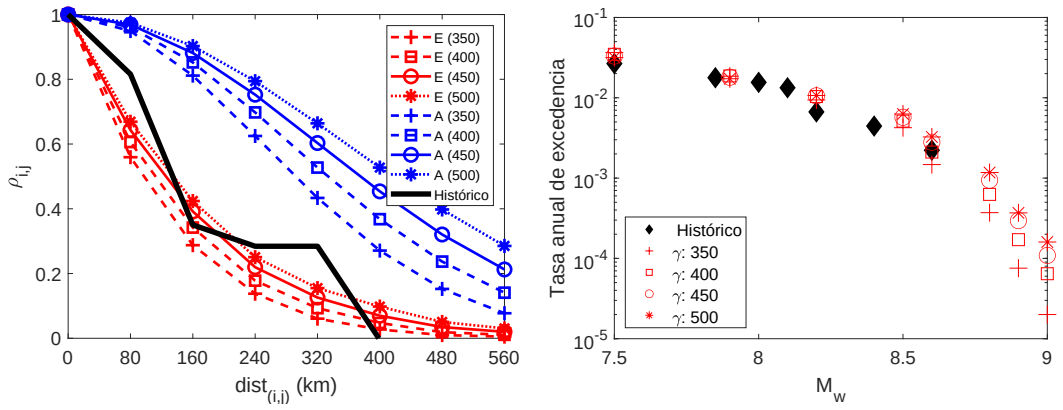
El primer análisis consistió en evaluar la correlación entre secciones, por ejemplo, la Figura N° 3.11a muestra la correlación entre la sección 1 y las demás secciones, esta comienza en 1 y va decreciendo a medida que la distancia entre las secciones aumenta. Nótese también que para mayores valores de γ la tasa a la cual disminuye esta correlación se vuelve más lenta. La correlación del vector Z_t (ecuación 2.17), denominada aparente (A), fue modelada usando la ecuación 2.16; mientras que la correlación del vector X_t, denominada efectiva (E), a partir de los catálogos simulados. Como indicaron Ceferino et al. (2020), el método de cópula reduce la correlación de las rupturas simuladas (E) con respecto a la del correlograma (A). La Figura N° 3.11a presenta también la correlación entre secciones a partir de las rupturas del catálogo histórico, como se puede observar, esta es relativamente ma-

yor que las correlaciones efectivas hasta una distancia de 320 km, a partir del cual decrece rápidamente.

En el segundo análisis se evaluaron las tasas anuales de excedencia de las magnitudes simuladas y del catálogo histórico. Estas funciones representan el número de eventos que igualan o exceden a una magnitud dada en promedio cada año. Como se observa en la Figura N° 3.11b, la ocurrencia de sismos más grandes es mayor a medida que el valor de γ aumenta debido a que existe una mayor correlación entre secciones (Figura N° 3.11a), y, por tanto, mayor probabilidad de que secciones adyacentes se rompan simultáneamente. Por otro lado, al comparar los resultados de las simulaciones con el histórico, se observó que hay una buena coincidencia en los cuatro valores de γ para las magnitudes entre 7.5 y 8.6 M_w. Debido a que 8.6 M_w es la máxima magnitud del catálogo, no fue posible concluir acerca de la consistencia en los resultados para magnitudes mayores.

La Figura N° 3.11c muestra el último análisis para la calibración del parámetro γ, en el cual se comparó el momento sísmico anual liberado en cada sección de las simulaciones y del catálogo histórico. Como se mencionó previamente, valores más altos de γ aumentan la probabilidad de ocurrencia de sismos de mayor magnitud, por esta razón, el momento sísmico liberado se incrementa con el valor de γ. Asimismo, se observa en la Figura N° 3.11c que las secciones 4 y 5 tuvieron un mayor momento sísmico liberado con respecto a las otras secciones debido a que tienen una probabilidad más alta de ruptura (Figura N° 3.9a). En general, se puede notar que existe una buena coincidencia de las simulaciones con el catálogo histórico para los cuatro valores de γ.

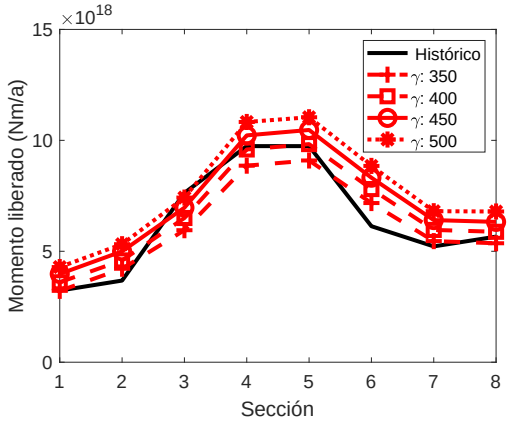
Así pues, analizando los tres gráficos presentados en la Figura N° 3.11, se determinó que las simulaciones usando γ igual a 400 km mostraron una mayor consistencia con los resultados del catálogo histórico. Así pues, se logró terminar de estimar todos los parámetros del modelo de ocurrencia.



(a) Correlación entre secciones.

(b) Tasa anual de excedencia.

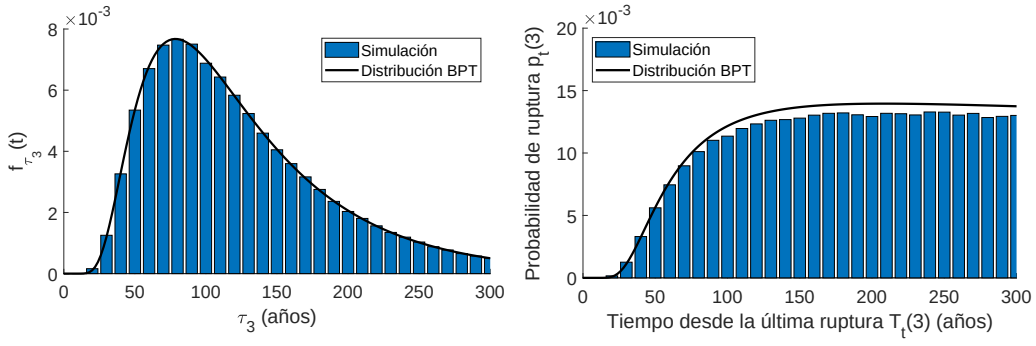
FIGURA N° 3.11: Sensibilidad de los resultados con los valores de γ (continúa).



(c) Momento anual liberado.

FIGURA N° 3.11: Sensibilidad de los resultados con los valores de γ.

Con el objetivo de evaluar la consistencia del modelo utilizando el valor de γ seleccionado, se compararon las funciones de la distribución BPT con los resultados obtenidos de las simulaciones (Figura N° 3.12). Ceferino et al. (2020) demostraron matemáticamente que una vez incluida la interacción espacial (γ) en el modelo de ocurrencia, la distribución de los tiempos entre rupturas τ_j de las simulaciones concuerda con la distribución BPT. Por ejemplo, las Figuras N° 3.12a y 3.12b muestran la consistencia del modelo en la sección 3 para las funciones de densidad y probabilidad de ocurrencia de ruptura, respectivamente (véase también las Figuras N° 3.8a y 3.8b). Las curvas negras representan las funciones correspondientes a la distribución BPT; mientras que las barras azules, el histograma normalizado de los valores τ_j obtenidos en las 100,000 simulaciones. En las Figuras A.1 y A.2 se muestra la verificación de la consistencia del modelo en las demás secciones.



(a) Función de densidad.

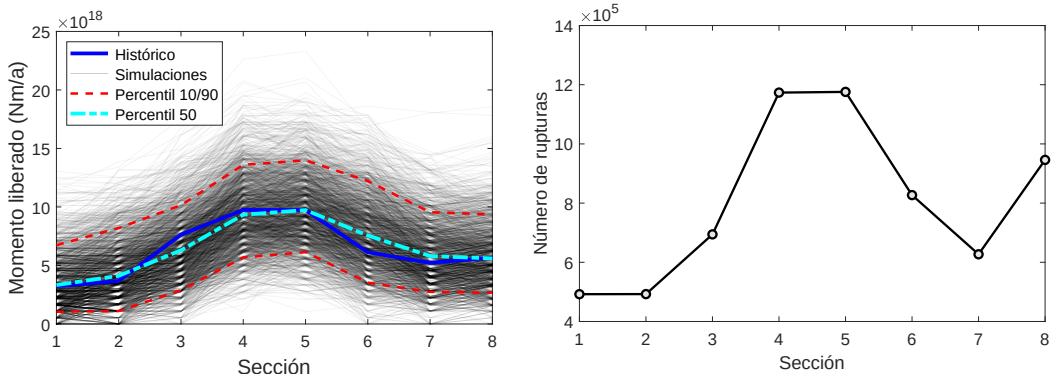
(b) Probabilidad de ocurrencia de ruptura.

FIGURA N° 3.12: Consistencia del modelo de ocurrencia.

Adicionalmente, se compararon los momentos sísmicos liberados en las simulaciones con las observaciones históricas a través de los percentiles 10, 50 y 90. Como se aprecia en la Figura N° 3.13a, las simulaciones fueron consistentes con los del

catálogo histórico, ya que se aproximaron bien a los datos. Por tanto, en base a los resultados mostrados, se concluyó que el modelo de ocurrencia tiene consistencia y es apropiado para la evaluación probabilística en la zona de estudio.

Por otra parte, se determinó el número de rupturas ocurridas en cada sección para las 100,000 simulaciones. Tal como se estuvo observando en los análisis anteriores respecto a la sismicidad de las secciones (consulte la Tabla N° 3.4 y Figura N° 3.9a), la Figura N° 3.13b evidencia que las secciones 4 y 5 presentaron la mayor ocurrencia sísmica en la región de estudio, seguidas por la sección 8. Por el contrario, las secciones 1 y 2 tuvieron menor sismicidad debido a sus bajas probabilidades de ruptura. Estos resultados indican un alto peligro sísmico en el distrito de Chorrillos y, por ende, de tsunami, debido a su proximidad con las secciones 4 y 5, como se muestra en la Figura N° 3.1.



(a) Momento sísmico liberado en las simulaciones. (b) Número de rupturas ocurridas en cada sección.

FIGURA N° 3.13: Resultados de las simulaciones.

De manera análoga al análisis de ocurrencia sísmica en los siguientes 450 años, se evaluaron cinco ventanas de tiempo adicionales: 1, 5, 20, 50 y 150 años. Para ello, primero se determinó el valor apropiado de N_{sim} en cada caso evaluando la estabilidad de las frecuencias relativas de los escenarios. Los resultados mostraron que 10,000,000 de simulaciones fueron necesarias para los horizontes de 1 y 5 años, 1,000,000 para 20 y 50 años, y 200,000 para 150 años.

A modo de ejemplo, la Figura N° 3.14 muestra un catálogo simulado para los horizontes de 5, 50 y 450 años. Como se observa, en los siguientes 5 años solamente ocurrió una ruptura debido a las bajas probabilidades de rupturas en las secciones (Figura N° 3.9), por lo que incluso es posible que no ocurra ningún evento. En el caso de los siguientes 50 años, se observa que el número de eventos se incrementó, siendo posible sismos de mayor magnitud como el escenario N° 27 de 8.6 M_w. Finalmente, las rupturas aumentaron significativamente en los siguientes 450 años, ya que este horizonte de tiempo supera los valores de μ_j (Tabla N° 3.6) y hace posible la ocurrencia de un mismo escenario más de una vez.

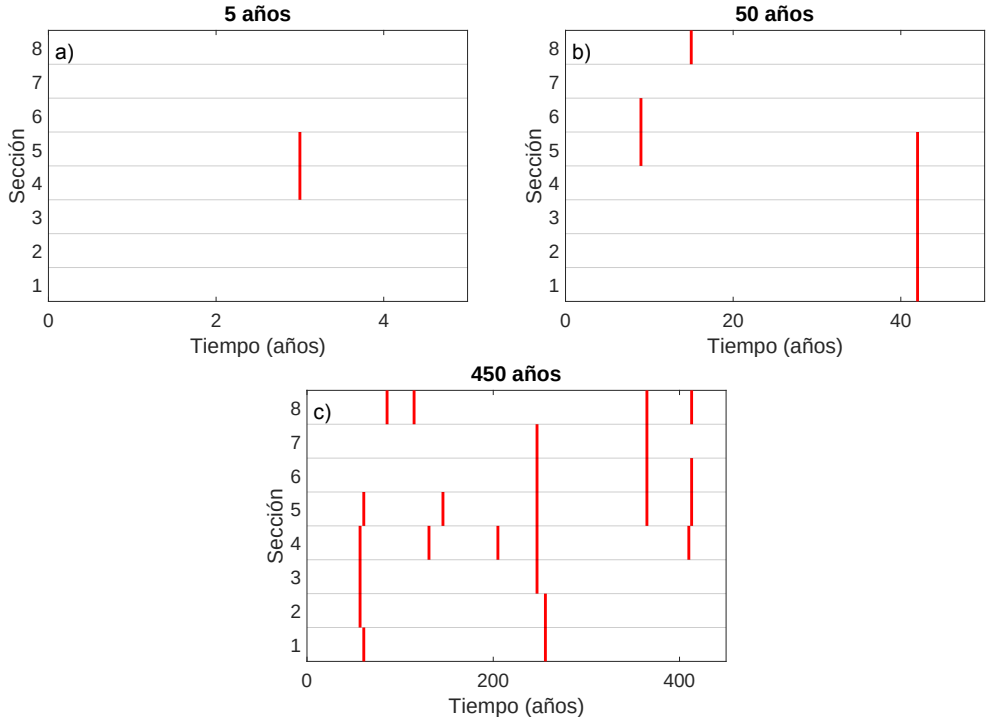


FIGURA N° 3.14: Catálogos simulados para tres periodos distintos.

A partir de los catálogos simulados, se evaluaron las ocurrencias de las 36 rupturas sísmicas posibles (Figura N° 3.2). La Figura N° 3.15 presenta el histograma de probabilidades de ocurrencia en los seis periodos analizados. Se puede observar que, para los periodos entre 1 y 50 años, las posibilidades de que las secciones 1 y 2 se rompan (de forma aislada o simultáneamente) son relativamente bajas, por ejemplo, la probabilidad de ocurrencia del escenario N° 9 en los siguientes 50 años (Figura N° 3.15g) fue igual a 1.22 %, y se fue incrementando a medida que el periodo de análisis fue mayor. Asimismo, debido a que los valores de μ_1 y μ_2 son iguales a 172, la ocurrencia de rupturas es baja para los periodos cortos, pero aumenta en el caso de 150 y 450 años. Esta tendencia refleja la actividad sísmica reciente en estas secciones debido al sismo de Pisco en el año 2007.

Por otro lado, los resultados muestran que los escenarios generados por las secciones 4, 5 y 8 (e.g., escenarios N° 12, 19 y 30) tienen mayores probabilidades de ruptura con respecto a los otros escenarios de una misma magnitud debido a que estas secciones tienen un menor intervalo de recurrencia μ_j (78 y 96 años) y un mayor silencio sísmico que las demás. Nótese también que el escenario N° 8 fue el de mayor recurrencia sísmica de todos los escenarios, por ejemplo, en los siguientes 50 años, este escenario tuvo una probabilidad de ocurrencia de 17.53 %. Si bien las secciones 4 y 5 tienen una mayor probabilidad de ruptura que la sección 8 según la distribución BPT (Figura N° 3.9a), al tener más combinaciones en espacio con las demás secciones dan lugar a una mayor posibilidad de ocurrencia de

sismos de mayor magnitud, ya que el modelo considera la interacción espacial entre secciones, por esta razón, la probabilidad de que las secciones 4 y 5 se rompan de forma asilada fue menor que la sección 8.

La Figura N° 3.15 ilustra el histograma de probabilidades de ocurrencia en función de los tramos de magnitud evaluados. En general, se observa que los sismos de mayor magnitud ($\geq$ 8.8 M_w), los cuales generan un mayor impacto por tsunami, tuvieron probabilidades de ocurrencia bajas (<2 %) en todos los periodos analizados. Esto se debe a que no se tiene registro de sismos $\geq$ 8.8 M_w en el catálogo histórico; sin embargo, como el modelo considera la interacción espacial de las secciones, es posible que sismos más grandes ocurran al romperse por lo menos seis secciones simultáneamente. Por ejemplo, nótese que las probabilidades de sismos de magnitud 9.0 M_w dejaron de ser cero en los periodos mayores a 50 años y fueron aumentando hasta 0.2 % a medida que el horizonte de tiempo era más largo.

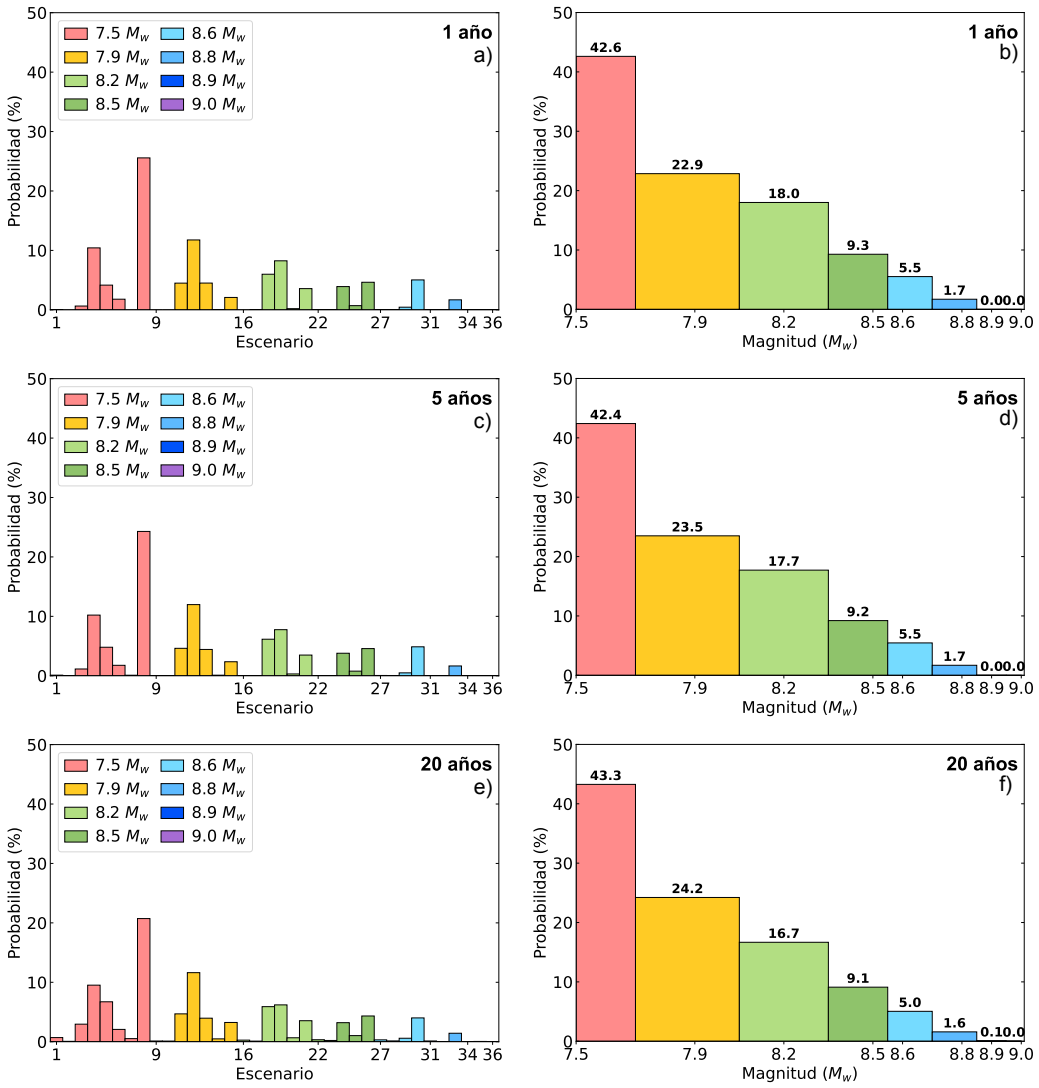


FIGURA N° 3.15: Probabilidades de ocurrencia para diferentes periodos (continúa).

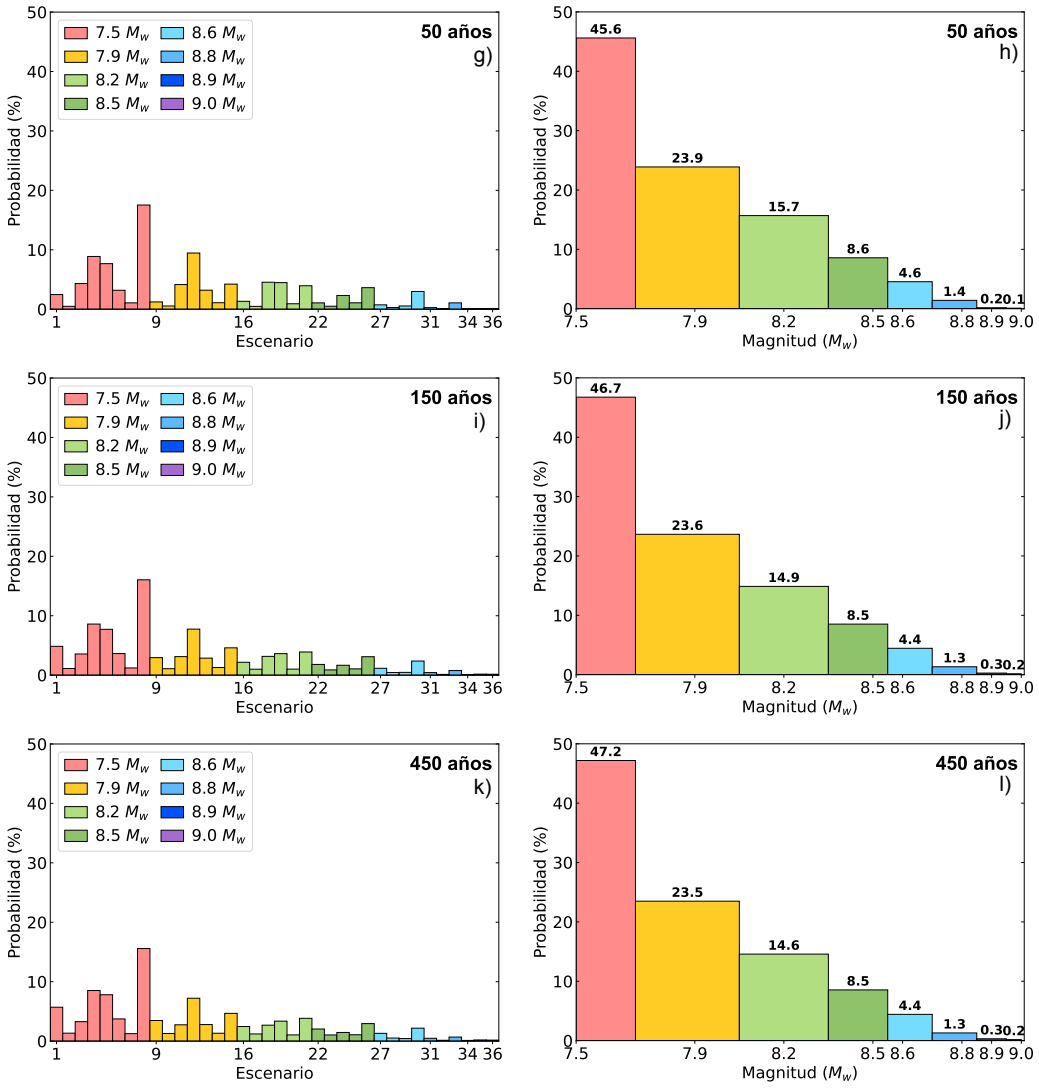


FIGURA N° 3.15: Probabilidades de ocurrencia para diferentes periodos.

Finalmente, se realizó una comparación de las probabilidades de ocurrencia en los seis horizontes de tiempo (Figura N° 3.15) con las obtenidas en el análisis independiente del tiempo (Figura N° 3.6) para cada tramo de magnitud. Como se muestra en la Tabla N° 3.7, las probabilidades de magnitudes $\leq$ 8.6 M_w fueron mayores en el análisis dependiente del tiempo (a excepción de la magnitud 7.9 M_w), mientras que los sismos $\geq$ 8.8 M_w tuvieron más posibilidades en el análisis independiente del tiempo. Estas diferencias fueron consecuencia de que el análisis dependiente del tiempo sí consideró la influencia en espacio y tiempo de las rupturas, por esta razón, las probabilidades de ruptura volvían a ser cero cada vez que un evento ocurría haciendo menos probable los sismos $\geq$ 8.8 M_w. Por el contrario, debido a que las probabilidades de ruptura en el análisis independiente del tiempo no dependieron del silencio sísmico, las probabilidades de sismos grandes fueron mayores.

TABLA N° 3.7: Probabilidad de ocurrencia de las magnitudes.

Análisis en el tiempo	Probabilidad de ocurrencia (%)							
	7.5	**7.9**	**8.2**	**8.5**	**8.6**	**8.8**	**8.9**	**9.0**
Independiente	38.3	36.1	14.4	5.3	2.7	1.9	0.9	0.4
Dependiente (1 año)	42.6	22.9	18.0	9.3	5.5	1.7	0.0	0.0
Dependiente (5 años)	42.4	23.5	17.7	9.2	5.5	1.7	0.0	0.0
Dependiente (20 años)	43.3	24.2	16.7	9.1	5.0	1.6	0.1	0.0
Dependiente (50 años)	45.6	23.9	15.7	8.6	4.6	1.4	0.2	0.1
Dependiente (150 años)	46.7	23.6	14.9	8.5	4.4	1.3	0.3	0.2
Dependiente (450 años)	47.2	23.5	14.6	8.5	4.4	1.3	0.3	0.2

3.3 Discusión de resultados

En este capítulo se generaron los escenarios sísmicos posibles en el área de estudio y se determinaron las probabilidades de ocurrencia de cada uno de ellos bajo un análisis independiente y dependiente del tiempo. En base a los resultados mostrados se puede afirmar lo siguiente:

- De acuerdo con la segmentación propuesta en la zona de subducción central del Perú (Figura N° 3.1), se determinaron en total 433 escenarios sísmicos posibles cuyas magnitudes se encuentran entre 7.5 y 9.0 M_w.
- Bajo un análisis independiente del tiempo, se determinó que la tasa anual a la cual se exceden los sismos mayores a la magnitud mínima $\lambda(M \geq 7.5\ M_w)$ fue igual a 0.037 (Figura N° 3.5). A partir de la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter, se calcularon las probabilidades de ocurrencia de cada magnitud (Figura N° 3.6).
- La calibración del parámetro de correlación γ del modelo de ocurrencia dio como resultado que 400 km tuvo las mejores aproximaciones con las observaciones históricas (Figura N° 3.11), además de ser consistente con la distribución BPT (Figura N° 3.12).
- El modelo de ocurrencia permitió la simulación de las rupturas sísmicas para seis ventanas de tiempo: 1, 5, 20, 50, 150 y 450 años. Los resultados mostraron las probabilidades de ocurrencia de cada escenario sísmico y su variación en función de cada periodo (Figura N° 3.15). El análisis independiente del tiempo generó mayores probabilidades de ocurrencia en los sismos de mayor magnitud; sin embargo, las probabilidades en el análisis dependiente del tiempo fueron aumentando a medida que el periodo fue mayor.

Capítulo IV: Peligro probabilístico por tsunami

4.1 Amenaza por tsunami

4.1.1 Deformación inicial de la superficie del océano

A partir de los 433 escenarios sísmicos generados, se determinaron las deformaciones iniciales de la superficie del océano (condición inicial del tsunami) mediante las ecuaciones propuestas por Okada (1985). En la Figura N° 4.1 se muestra la distribución espacial de las deformaciones iniciales de ocho escenarios sísmicos, cada uno correspondiente a un tramo de magnitud. En adelante, se identificaron a los resultados con las abreviaciones ”R” y ”E” para ruptura y escenario, respectivamente. Además, los parámetros L, W, u y M_w de cada falla fueron detallados en la esquina superior derecha de los mapas. Las áreas rojas y azules representan elevaciones y hundimientos, que coincidieron con la ubicación de los escenarios y en algunos casos con la costa, respectivamente. Además, se muestran las curvas de nivel de las deformaciones con intervalos variables detallados en las leyendas de los mapas. Nótese que en los escenarios $\geq$ 8.8 M_w, pese a que el incremento de magnitud fue de solo 0.1 M_w, las deformaciones aumentaron notablemente.

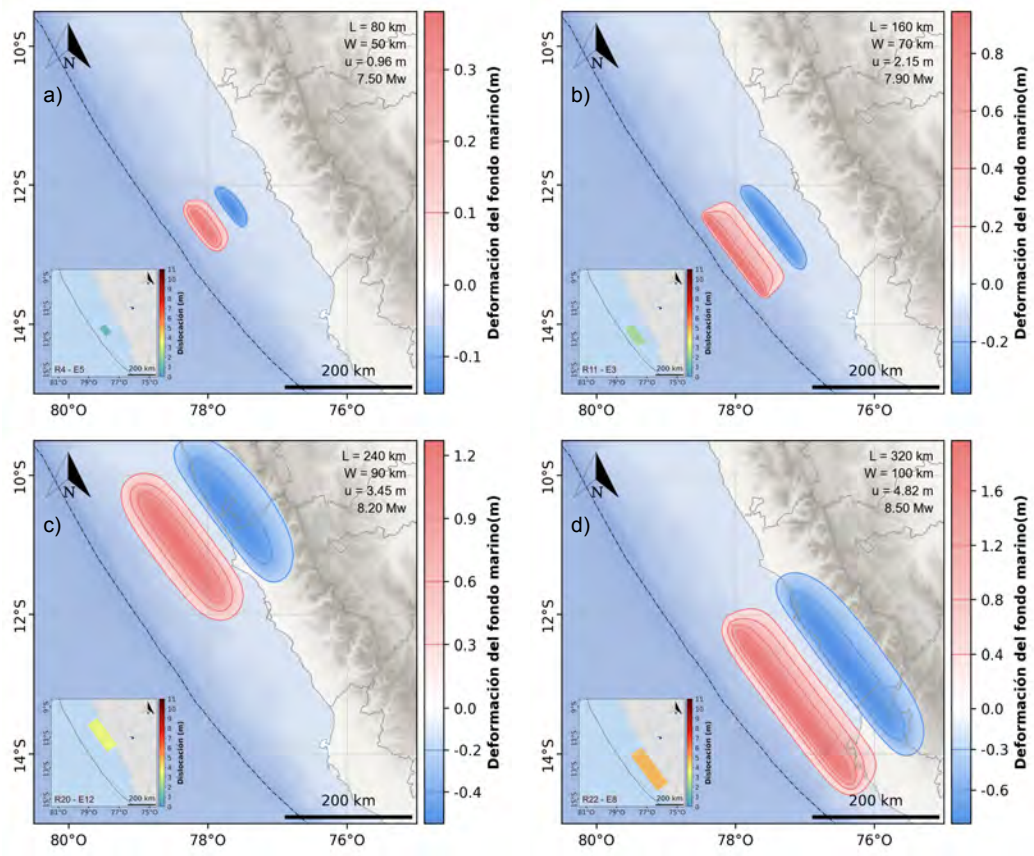


FIGURA N° 4.1: Deformación inicial por tramos de magnitud (continúa).

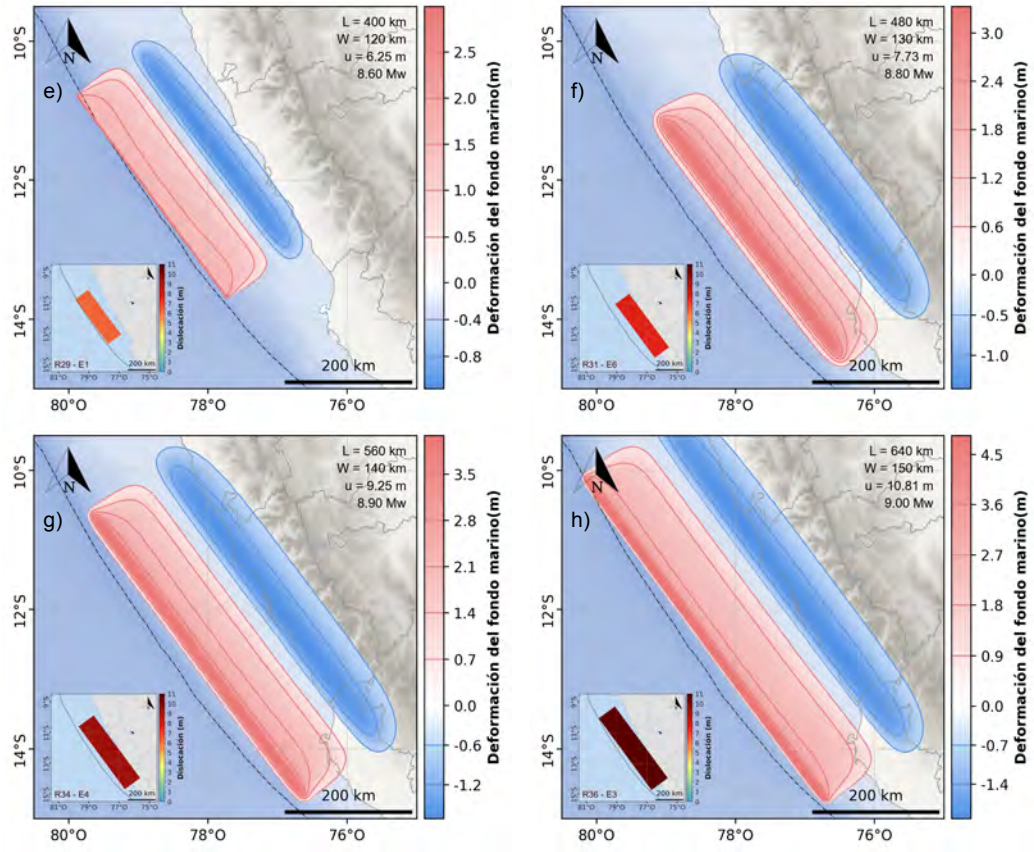


FIGURA N° 4.1: Deformación inicial por tramos de magnitud.

Asimismo, la Figura N° 4.2 presenta las deformaciones obtenidas con los escenarios de magnitud 9.0 M_w a fin de analizar la diferencia en los resultados conforme las rupturas se alejan de la fosa marina y se vuelven más profundas. Las deformaciones máximas y mínimas de cada escenario son resumidas en la Tabla N° 4.1. Como puede apreciarse, las elevaciones fueron menores en las rupturas más profundas, mientras que los hundimientos no variaron significativamente.

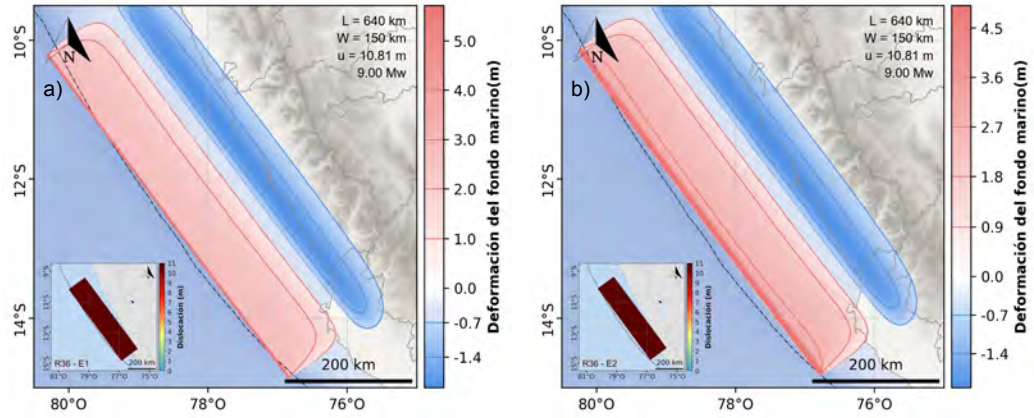


FIGURA N° 4.2: Deformación inicial de escenarios 9.0 M_w (continúa).

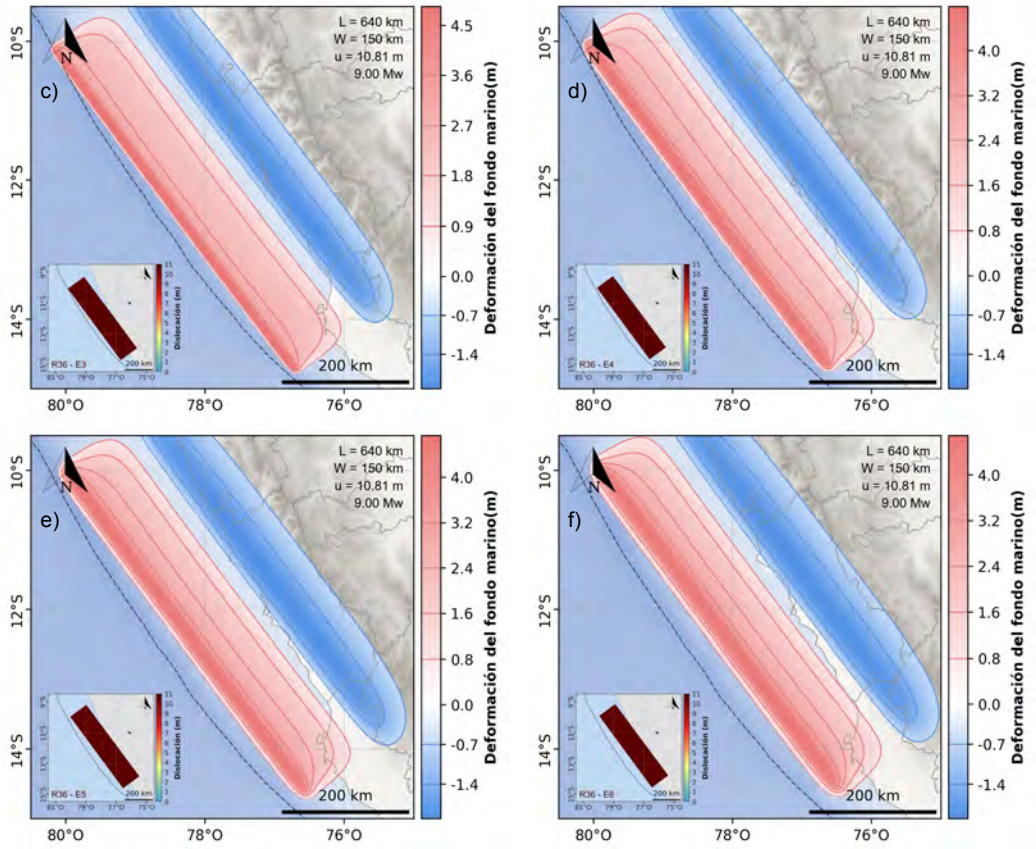


FIGURA N° 4.2: Deformación inicial de escenarios 9.0 M_w.

TABLA N° 4.1: Deformaciones máximas de escenarios 9.0 M_w.

Escenario	**E1**	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**	**E6**
Elevación máx. (m)	5.72	4.91	4.84	4.79	4.74	4.69
Hundimiento máx. (m)	-2.02	-2.02	-2.02	-2.01	-2.01	-2.00

4.1.2 Propagación del tsunami

La propagación e inundación del tsunami fueron determinadas utilizando el código TUNAMI-N2 a partir de las deformaciones previamente calculadas. Como se explicó en la sección 2.3.3, las ecuaciones 2.21 - 2.24 deben ser discretizadas mediante el método escalonado de salto de rana en un sistema de grillas anidadas. Para ello, se dividió la zona de estudio en cuatro dominios cuyas resoluciones espaciales varían desde 405 hasta 15 m. La extensión de estos dominios se muestra en el mapa de la Figura N° 4.3. El dominio 1 fue trazado de manera que contenga la zona de subducción central del Perú, a partir del cual los siguientes dominios fueron acercándose a la zona de estudio y mejorando en resolución espacial.

Además, la Figura N° 4.3 presenta la ubicación de la zona costera del distrito de Chorrillos, que se encuentra en la provincia y departamento de Lima. Se señala también los mareogramas y puntos de análisis descritos más adelante correspondientes a las urbanizaciones del área de estudio: Campo deportivo (1), Los Cedros (2), La Encantada (3) y Las Brisas de Villa (4).

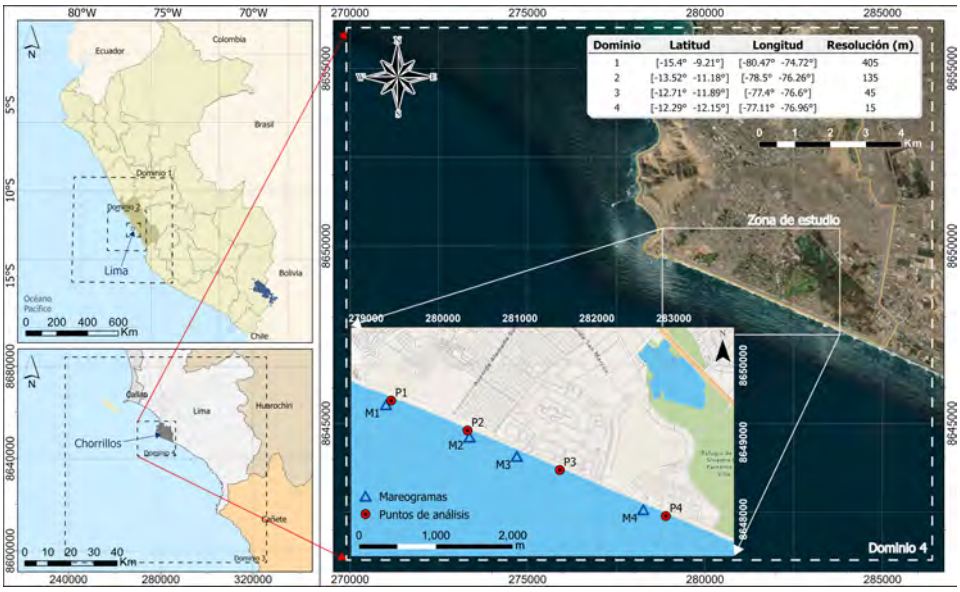


FIGURA N° 4.3: Dominios y ubicación de la zona de estudio.

Para el modelamiento numérico de tsunami, se definieron la batimetría y topografía de cada uno de los dominios de estudio con las características mostradas en la Tabla N° 4.2. En los tres primeros dominios, la batimetría y topografía fueron obtenidas a partir de la Carta Batimétrica General del Océano (GEBCO, por sus siglas en inglés, *General Bathymetry Chart of the Ocean*) con 30 segundos de resolución, interpolados a 405, 135 y 45 m, respectivamente. Para el dominio N° 4, se utilizó la batimetría de la DHN, obtenida de portulanos y cartas de recalada, mientras que la topografía, a partir del Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión (ASTER, por sus siglas en inglés, *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) con 1 segundo de resolución, interpolado a 15 m.

TABLA N° 4.2: Características de los dominios de estudio.

Dom.	Límites		Resolución	Fuente de datos	
	Latitud	Longitud	espacial (m)	Batim.	Topog.
1	[-15.4° - 9.21°]	[-80.47°-74.72°]	405	GEBCO	GEBCO
2	[-13.52°-11.18°]	[-78.5° -76.26°]	135	GEBCO	GEBCO
3	[-12.71°-11.89°]	[-77.4° - 76.6°]	45	GEBCO	GEBCO
4	[-12.29°-12.15°]	[-77.11°-76.96°]	15	DHN	ASTER

En la Figura N° 4.4 se muestra la topografía obtenida de ASTER con el fin de analizar las elevaciones de la zona de estudio. En este mapa se tuvo como referencia la carta de inundación publicada por la DHN (2011) ya que se representaron solamente las elevaciones hasta la cota de 10 m que, como se observa, se asemeja al área inundada del sismo histórico de 9.0 M_w (Figura N° 1.3). De esta manera, se puede apreciar mejor la variación de las elevaciones en cada una de las regiones de la zona de estudio.

En primer lugar, se puede observar que, en el campo deportivo y la urbanización Los Cedros, las elevaciones se incrementan rápidamente cerca de la línea de costa hasta llegar a los 4 m aproximadamente. En la Figura N° 1.4a se muestra una fotografía de estas regiones, donde se aprecia dicha diferencia en la topografía. Por el contrario, nótese que en el caso de la urbanización Las Brisas de Villa y en cierta parte de La Encantada, se tiene una topografía más plana donde las elevaciones son menores en comparación con las demás regiones y, en consecuencia, más expuestas ante un tsunami.

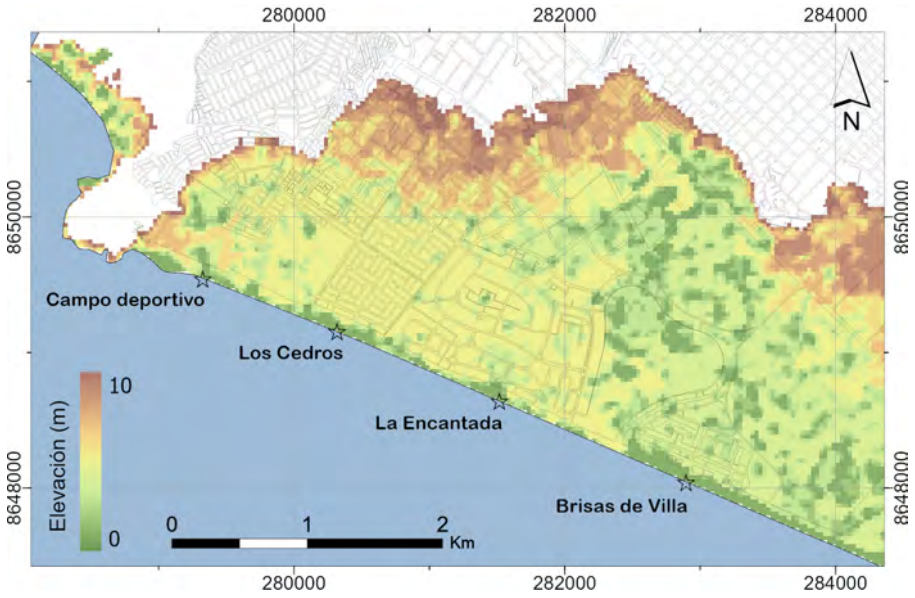


FIGURA N° 4.4: Topografía de la zona de estudio.

4.1.3 Inundación por tsunami

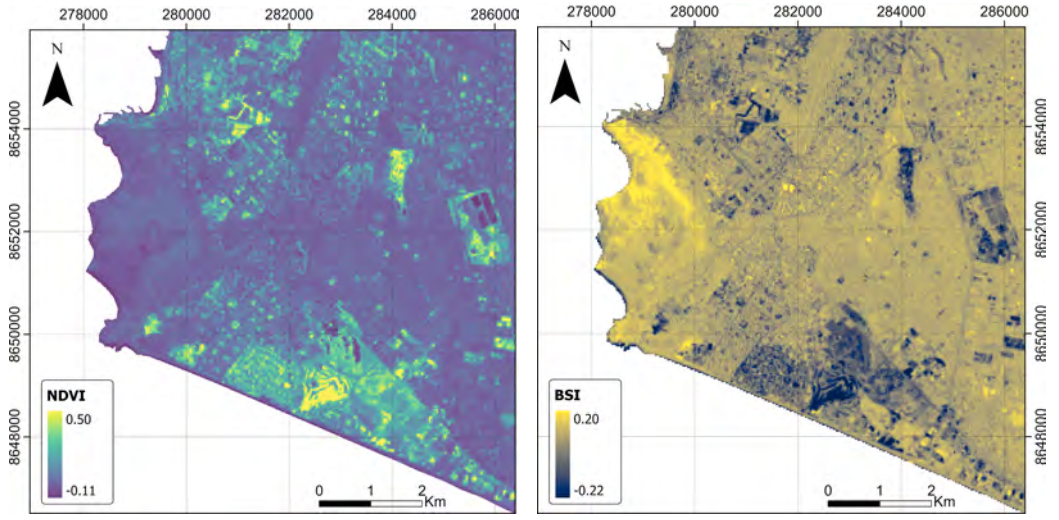
Debido a que no contó con un modelo detallado de la topografía, se optó por emplear adicionalmente un modelo de rugosidad equivalente, basado en el uso de suelo de la zona de estudio. Este procedimiento consiste en asignar un coeficiente de rugosidad a las grillas anidadas que refleje la influencia del uso de suelo en la propagación de las ondas, debido a que los obstáculos presentes (e.g., viviendas) ofrecen una resistencia que induce la disipación de energía (Muhari et al., 2011).

El modelo de rugosidad fue determinado a partir de imágenes satelitales LANDSAT 8 con 30 m de resolución, interpoladas a 15 m. El análisis de estas imágenes consistió en evaluar la diferencia de reflectancia entre bandas para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés, *Normalized Difference Vegetation Index*) y el Índice de Suelo Desnudo (BSI, por sus siglas en inglés, *Bare Soil Index*) mediante la ecuación 4.1. Para ello, se utilizaron la banda de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés, *Near Infrared band*), banda roja (R), banda de infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés, *Short-wave infrared*) y la banda azul (B), como describieron Mzid et al. (2021).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \tag{4.1a}$$

$$BSI = \frac{(SWIR_1 + R) - (NIR + B)}{(SWIR_1 + R) + (NIR + B)} \tag{4.1b}$$

Los resultados de NDVI mostrados en la Figura N° 4.5a representan los valores de reflectancia de la cobertura vegetal, donde valores más altos corresponden a una vegetación más densa. De manera similar, la Figura N° 4.5b muestra los valores de BSI para la reflectancia en las zonas de suelo. En este estudio, se establecieron como límites los valores de 0.15 y 0.04 para la selección de los índices NDVI y BSI, respectivamente, en base a una comparación visual de los resultados con una imagen a color natural de la zona de estudio. Los valores restantes fueron considerados como zonas urbanas.



(a) Análisis del NDVI.

(b) Análisis del BSI.

FIGURA N° 4.5: Estimación de la rugosidad según el uso de suelo.

Los resultados de la clasificación son presentados en el mapa de la Figura N° 4.6 según la zona urbana, vegetación y suelo desnudo. Nótese que existen algunas deficiencias en la clasificación debido a la baja resolución de las imágenes satelitales;

sin embargo, se ha logrado caracterizar el uso de suelo en regiones como el Morro Solar, los Pantanos de Villa, y las áreas verdes de la urbanización La Encantada (Figura N° 1.4c y d). Los coeficientes de rugosidad fueron asignados a partir de los valores propuestos por Kotani et al. (1998), como se detalla en la Tabla N° 4.3.

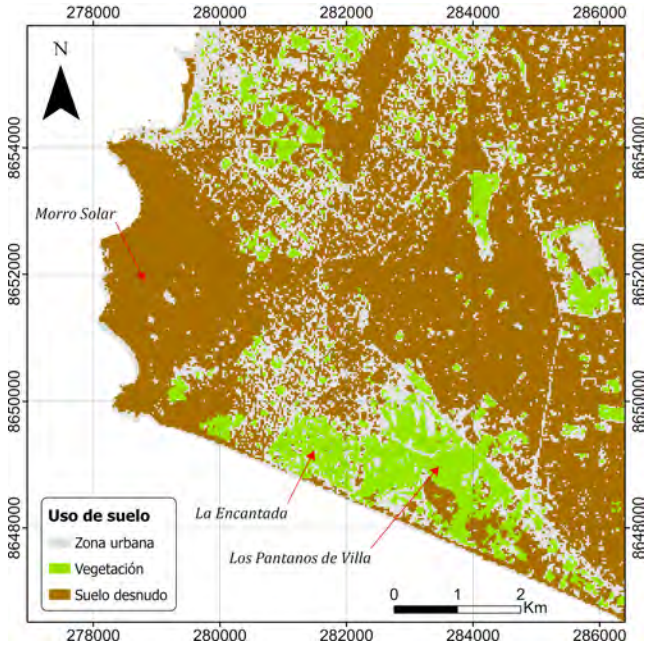


FIGURA N° 4.6: Mapa de uso de suelo.

TABLA N° 4.3: Coeficientes de rugosidad (n) según el uso de suelo.

Uso de suelo	n
Zona urbana	0.045
Vegetación	0.030
Suelo desnudo	0.025

El modelamiento numérico de tsunami se realizó para las primeras tres horas después de ocurrido el evento sísmico con un intervalo de tiempo de 0.20 segundos para garantizar la estabilidad numérica en la simulación (ecuación 2.25). La inundación fue modelada en el dominio N° 4, con una resolución de 15 m y una grilla de 1100 x 1000 en las direcciones de longitud y latitud, respectivamente. La Figura N° 4.7 presenta los mapas de inundación correspondientes a los ocho escenarios sísmicos mostrados en la Figura N° 4.1, que representan las profundidades máximas de inundación durante las tres horas de simulación. Se puede notar que, al considerar diferentes tramos de magnitud, se logró una perspectiva más completa de esta amenaza, por ejemplo, en el caso de los sismos $\geq$ 8.8 M_w (véase la Figura B.1), las profundidades y área de inundación tuvieron un mayor impacto.

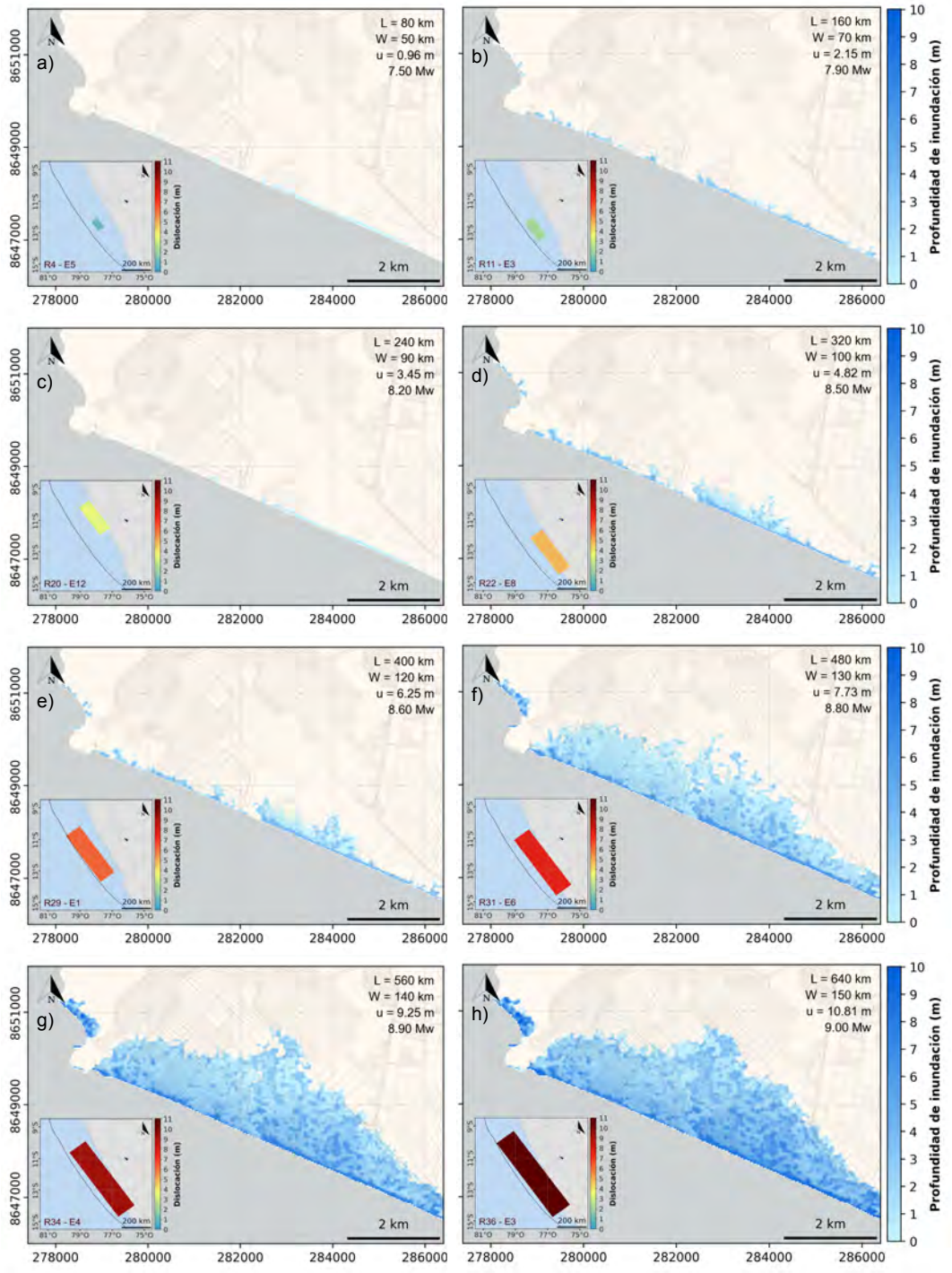


FIGURA N° 4.7: Inundación de escenarios por tramos de magnitud.

Con el objetivo de analizar la variación en las inundaciones a medida que los escenarios se desplazan a lo largo del rumbo, se llevó a cabo otro análisis comparativo para los sismos de magnitud 8.6 M_w. Para ello, se analizaron las rupturas 27, 28, 29 y 30 en el caso del escenario N°2, de manera que los eventos se encuentren a una misma profundidad. Como se observa en la Figura N° 4.8 y se resume en la

Tabla N° 4.4, las inundaciones fueron mayores para los escenarios situados más al sur, pese a que todos tuvieron la misma deformación inicial. Esta diferencia se debió principalmente a las distancias entre la zona de estudio y cada uno de los escenarios, así como a la batimetría a través de la cual se propagaron las ondas.

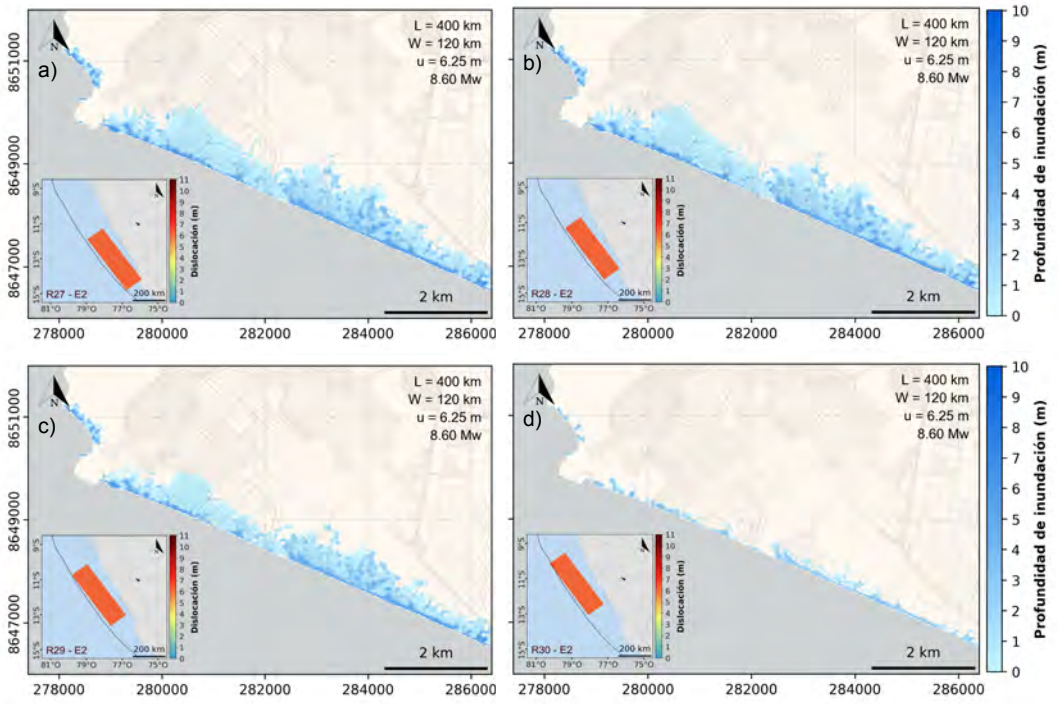


FIGURA N° 4.8: Inundación de escenarios a lo largo del rumbo.

TABLA N° 4.4: Resultados de inundación para escenarios 8.6 M_w.

Ruptura	**R27**	**R28**	**R29**	**R30**
Profundidad máxima (m)	7.58	7.57	7.25	4.47
Área de inundación (km²)	5.98	5.98	4.79	1.41

Finalmente, de manera análoga al análisis realizado con las deformaciones iniciales para los sismos de magnitud 9.0 M_w, la Figura N° 4.9 y Tabla N° 4.5 muestran la variación de los resultados de inundación a medida que las rupturas se alejan de la fosa marina y se vuelven más profundas. Como puede apreciarse, inicialmente las inundaciones tendieron a aumentar a medida que las rupturas se acercaban a la zona de estudio, ya que las ondas recorrieron una menor distancia. Sin embargo, las inundaciones disminuyeron a partir del cuarto escenario debido a que no toda el área de la ruptura coincidía con el fondo marino, lo que redujo el volumen de agua deformada. Como se observa en la Tabla N° 4.5, los eventos más desfavorables fueron los escenarios N°2, con la mayor área de inundación, igual a 11.95 km²; y N°4, con la mayor profundidad de inundación, igual a 10.09 m.

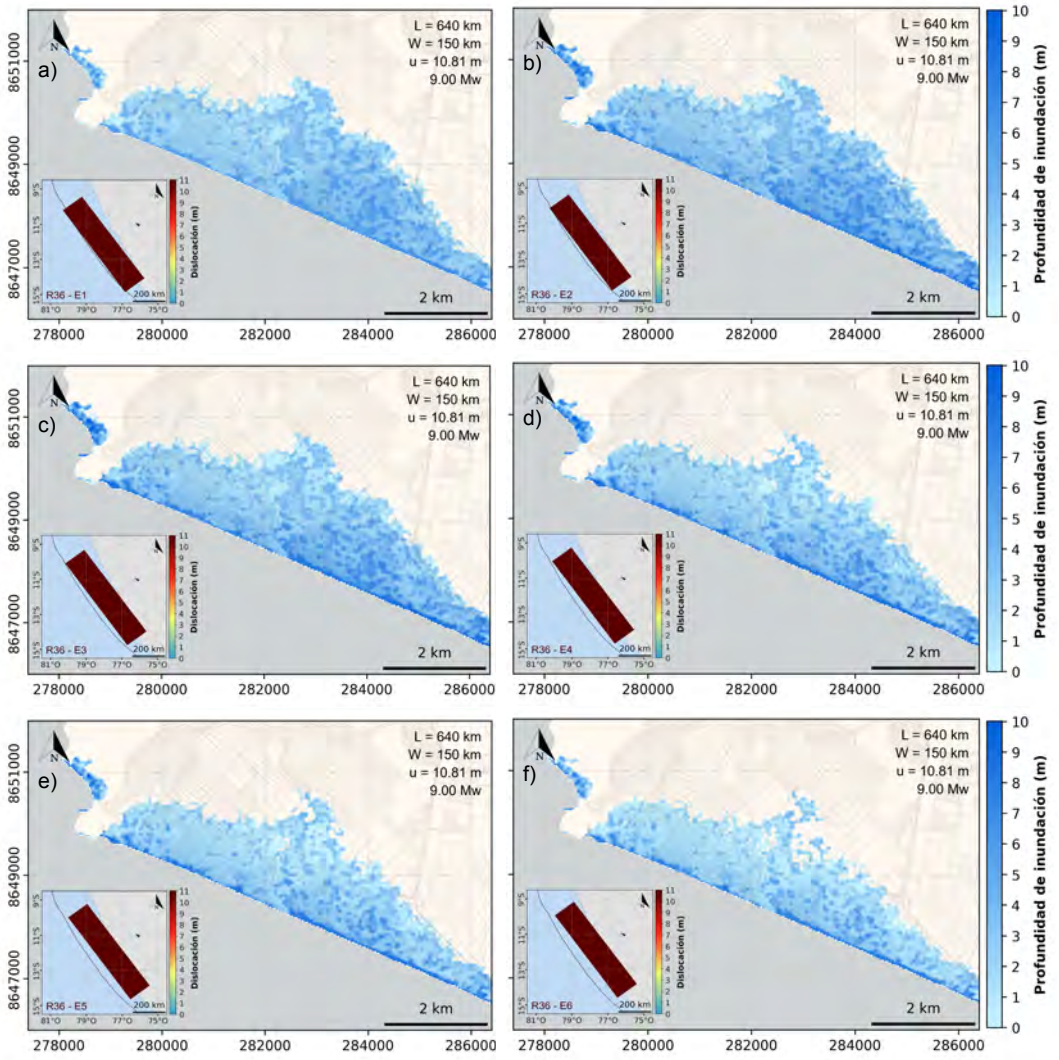


FIGURA N° 4.9: Inundación de escenarios 9.0 M_w.

TABLA N° 4.5: Resultados de inundación para escenarios 9.0 M_w.

Escenario	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Profundidad máxima (m)	7.19	9.26	9.85	10.09	9.52	8.21
Área de inundación (km²)	11.62	11.95	11.70	10.91	10.39	9.56

Los mapas de inundación anteriores mostraron las profundidades máximas de inundación en las tres horas de simulación, adicionalmente, se llevó a cabo un análisis temporal colocando cuatro mareógrafos sintéticos ubicados frente al Campo Deportivo de Chorrillos (M1), a las urbanizaciones Los Cedros (M2), La Encantada (M3) y Las Brisas de Villa (M4), como se muestra en la Figura N° 4.3.

Los mareogramas obtenidos fueron graficados para los sismos de magnitud 9.0 M_w. Estos representan la variación de las alturas de inundación durante las tres

horas de simulación. Como puede notarse en la Figura N° 4.10, los tiempos de llegada del tsunami variaron notablemente (8 - 18 minutos) debido a las diferencias en las deformaciones iniciales y a las distancias entre la zona de estudio y las rupturas, siendo el tsunami del primer escenario el que tardó más en arribar a la costa. Se observa también que los tiempos en que se alcanzaron las alturas máximas del tsunami fueron similares (aproximadamente 35 minutos) y ocurrieron con la primera ola; sin embargo, nótese que, a partir de la segunda ola, los mareogramas mostraron diferencias significativas, especialmente con los escenarios N° 4, 5 y 6, cuyas olas tuvieron un mayor periodo.

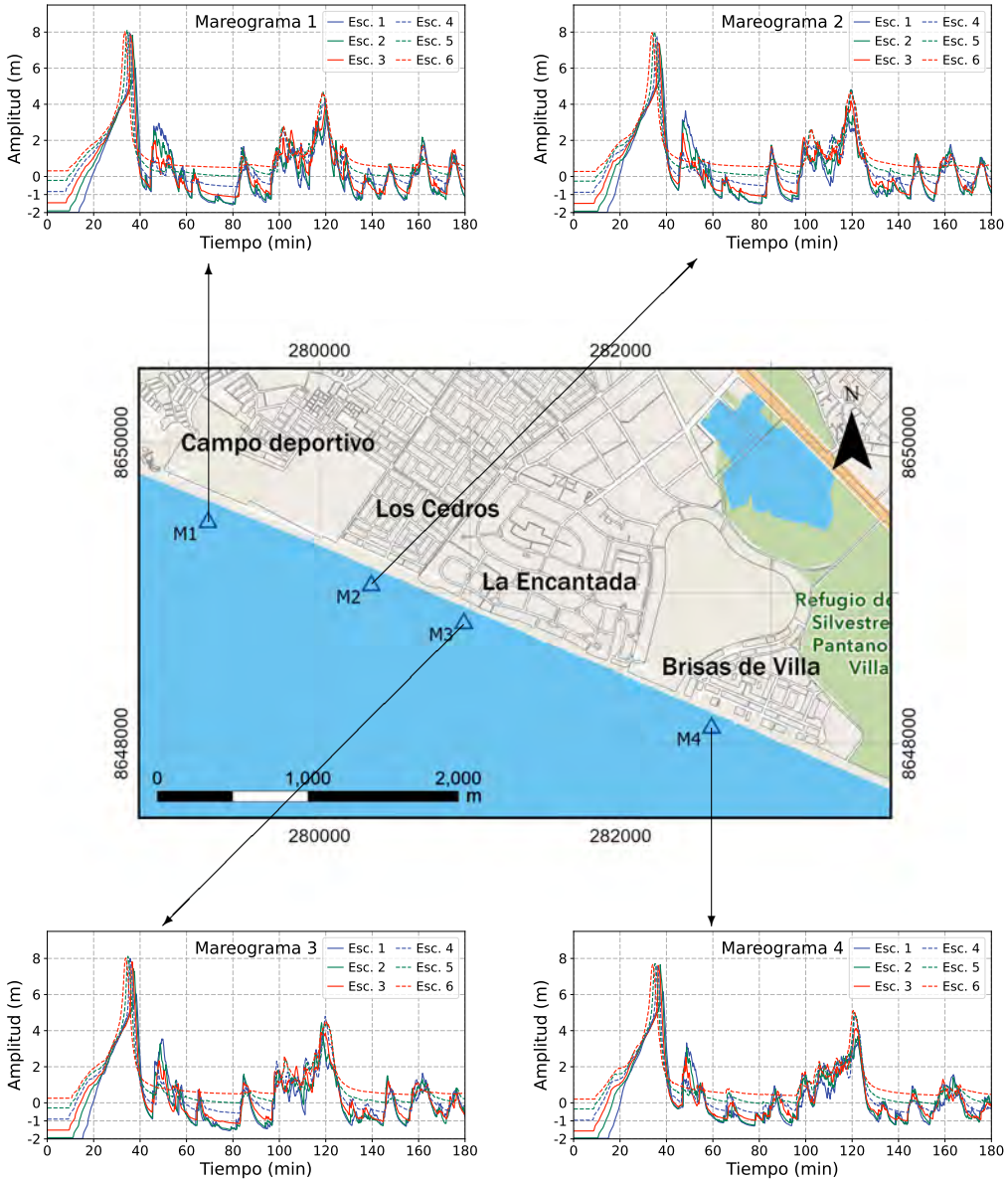


FIGURA N° 4.10: Mareogramas de escenarios de magnitud 9.0 M_w.

4.2 Curvas de peligro por tsunami

El desarrollo de las curvas de peligro consistió en acoplar los resultados obtenidos en el análisis de la ocurrencia sísmica (sección 3.2) con los de peligro por tsunami (sección 4.1). Para ello, se analizó cada grilla del dominio N° 4 con la información mostrada en la ecuación 4.2: un vector h que incluye las 433 profundidades de inundación correspondientes a cada escenario sísmico, cuyas probabilidades de ocurrencia están representadas por el vector $P(E)$. En esta sección, se presenta los resultados obtenidos para cuatro puntos de análisis en la línea costera adyacentes al Campo Deportivo de Chorrillos (P1), a las urbanizaciones Los Cedros (P2), La Encantada (P3) y Las Brisas de Villa (P4), mostrados en la Figura N° 4.3.

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{P(E)} = \begin{bmatrix} P(E_1) \\ P(E_2) \\ P(E_3) \\ \vdots \\ P(E_n) \end{bmatrix}, \qquad donde\ n = 433 \tag{4.2}$$

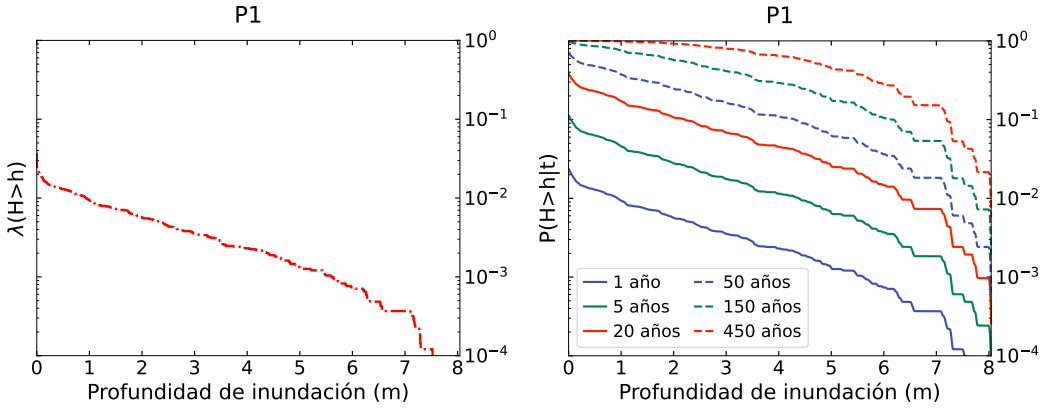
4.2.1 Análisis independiente del tiempo

En este análisis, primero se determinó la tasa anual de excedencia de las profundidades de inundación $\lambda(H \geq h)$ mediante la ecuación 2.28. Debido a que en este análisis se consideraron únicamente las magnitudes de los escenarios sísmicos, las profundidades de inundación del vector h fueron agrupadas de acuerdo con el número total de escenarios por tramo de magnitud (Tabla N° 3.1), como se muestra en la ecuación 4.3. Los otros parámetros de la ecuación, como las probabilidades $P(m)$ de cada magnitud, fueron determinadas previamente (Figura N° 3.6), así como $\lambda(M \geq 7.5M_w)$, que fue igual a 0.037 (Figura N° 3.5).

$$\mathbf{h} = \Big[\underbrace{h_1 \ ... \ h_{128}}_{m_1} \quad ... \quad \underbrace{h_{428} \ ... \ h_{433}}_{m_8}\Big], \quad \mathbf{P(m)} = \Big[P(m_1) \quad ... \quad P(m_8)\Big] \tag{4.3}$$

De esta manera, la función mostrada en la Figura N° 4.11a representa el número de veces en las que se excede cierta profundidad de inundación por tsunami en promedio cada año para el punto P1. Lógicamente, a medida que las profundidades son mayores, las tasas de excedencia disminuyen debido a que la ocurrencia de sismos más grandes es menor. Finalmente, aplicando el modelo de Poisson (ecuación 2.26) a la tasa de excedencia obtenida, se determinaron las curvas de peligro

(Figura N° 4.11b) para las seis ventanas de tiempo analizadas: 1, 5, 20, 50, 150 y 450 años, que representan las probabilidades de exceder cierta profundidad de inundación en los siguientes t años. Como el análisis independiente del tiempo no considera la influencia del tiempo transcurrido desde los últimos sismos, las curvas de peligro dependieron solamente del tamaño de la ventana de tiempo, donde las probabilidades fueron mayores en los periodos más largos.



(a) Tasa anual de excedencia.

(b) Probabilidades de excedencia.

FIGURA N° 4.11: Curvas de peligro independientes del tiempo.

4.2.2 Análisis dependiente del tiempo

Para este análisis, las probabilidades de excedencia fueron directamente calculadas con la ecuación 2.29. De manera análoga al análisis independiente del tiempo, las profundidades de inundación del vector h fueron agrupadas de acuerdo con la segmentación de la zona de estudio (Figura N° 3.2), como se muestra en la ecuación 4.4, donde las probabilidades de ocurrencia de cada ruptura fueron determinadas previamente según la ventana de tiempo t analizada (Figura N° 3.15).

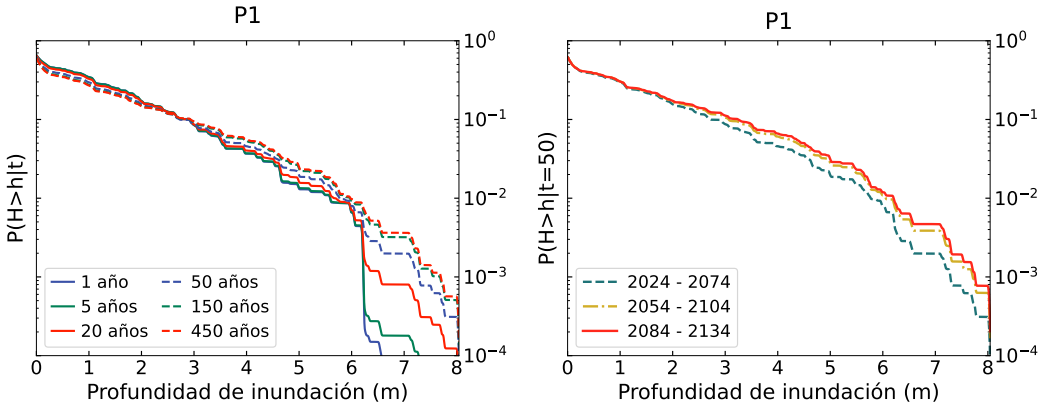
$$\mathbf{h} = \Big[\underbrace{h_1 \dots h_{16}}_{s_1} \quad \dots \quad \underbrace{h_{428} \dots h_{433}}_{s_{36}}\Big], \quad \mathbf{P(s|t)} = \Big[P(s_1|t) \quad \dots \quad P(s_{36}|t)\Big] \tag{4.4}$$

Aplicando la ecuación 2.29, se determinaron las curvas de peligro en el punto P1 para cada periodo de estudio (Figura N° 4.12a). Como se observa, las curvas difirieron principalmente en las profundidades más altas, donde las probabilidades de excedencia fueron mayores en los periodos más largos. Esto se debe a que los sismos de mayor magnitud, que generan estas profundidades, tuvieron mayores probabilidades de ocurrencia en estos casos (Tabla N° 3.7).

Por otro lado, a fin de evaluar el efecto del silencio sísmico en el peligro por tsuna-

mi, se llevó a cabo un análisis dependiente del tiempo para un periodo de 50 años extendiendo el silencio sísmico en 30 y 60 años adicionales. Esto equivale a analizar los periodos desde 2054 hasta 2104, y desde 2084 hasta 2134, asumiendo que no ocurrirán sismos hasta los años 2054 y 2084, respectivamente.

Los resultados de la Figura N° 4.12b evidencian que, al incrementar el silencio sísmico, el peligro por tsunami aumenta, ya que las probabilidades de exceder una misma profundidad de inundación son mayores. Esta variación se debe al incremento de la probabilidad de ruptura en cada sección (Figura N° 3.9a) a medida que el silencio sísmico se prolonga. En tal sentido, incrementar el silencio sísmico aún más no cambiaría significativamente las curvas de peligro, ya que las probabilidades de ruptura se irían acercando a su valor límite. Asimismo, los resultados demuestran que, a diferencia del análisis independiente del tiempo, el modelo de ocurrencia sí logró capturar la influencia del tiempo transcurrido desde el último sismo en el peligro por tsunami.



(a) Probabilidades de excedencia.

(b) Influencia del silencio sísmico.

FIGURA N° 4.12: Curvas de peligro dependientes del tiempo.

4.3 Comparación entre análisis de peligro

4.3.1 Curvas de peligro

En esta sección, se realizó una comparación de los resultados obtenidos en el análisis independiente y dependiente del tiempo con el objetivo analizar la influencia de la interacción espacio temporal de los sismos en el peligro por tsunami. Como ejemplo, la Figura N° 4.13 ilustra las curvas de peligro para un periodo de 20 años en los cuatro puntos de análisis de la zona de estudio. Como se puede apreciar, en todos los casos el análisis dependiente del tiempo generó un mayor peligro que el independiente del tiempo para profundidades de inundación menores a 4 m, ya que los sismos de menor magnitud tuvieron mayores probabilidades de ocurrencia en el análisis dependiente del tiempo (Tabla N° 3.15). Sin embargo, esta diferencia

se invirtió para profundidades más altas, debido a que los sismos ≥ 8.8 M_w apenas ocurrieron en este periodo, mientras que en el análisis independiente del tiempo sí tuvieron mayor recurrencia (Tabla N° 3.15).

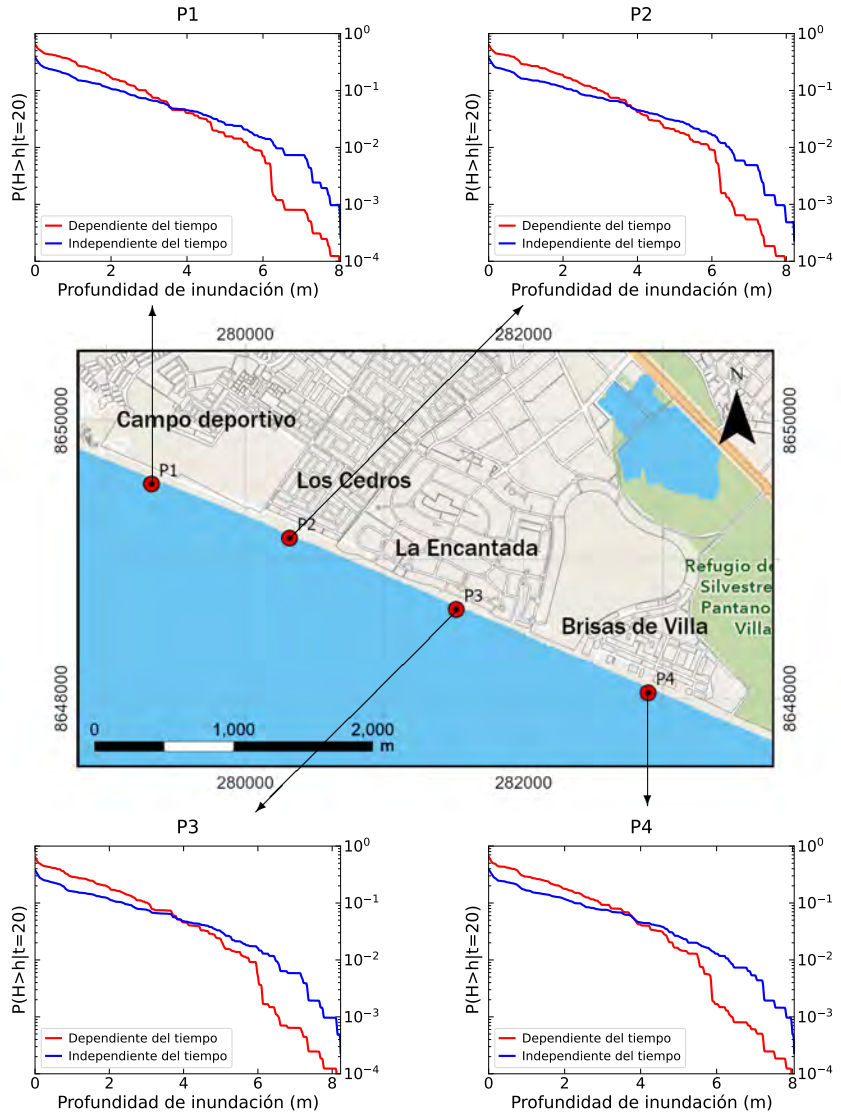


FIGURA N° 4.13: Curvas de peligro para los siguientes 20 años.

En la Figura N° 4.14 se muestra la comparación de los análisis independiente y dependiente del tiempo para todos los periodos de estudio. Los resultados indicaron que la tendencia observada para los próximos 20 años (Figura N° 4.13) ocurrió también en los periodos de 1 y 5 años. Esto se debe a que la frecuencia de ruptura en las secciones 4, 5 y 8 fue alta para periodos cortos en el análisis dependiente del tiempo (Figura N° 3.15a, c y e). Por ello, en el caso del periodo de 1 año, las probabilidades de exceder 0.3 m, donde el tsunami puede arrastrar a una persona, y 2 m, donde las viviendas son seriamente afectadas (Baba et al., 2022), fueron un 40 y 20 % más altas que en el análisis independiente del tiempo, respectivamente.

Aunque esta diferencia disminuyó en los periodos de 5 y 20 años, las probabilidades de exceder estas profundidades siguieron siendo importantes, lo que evidencia el alto peligro por tsunami en la zona de estudio durante los siguientes años.

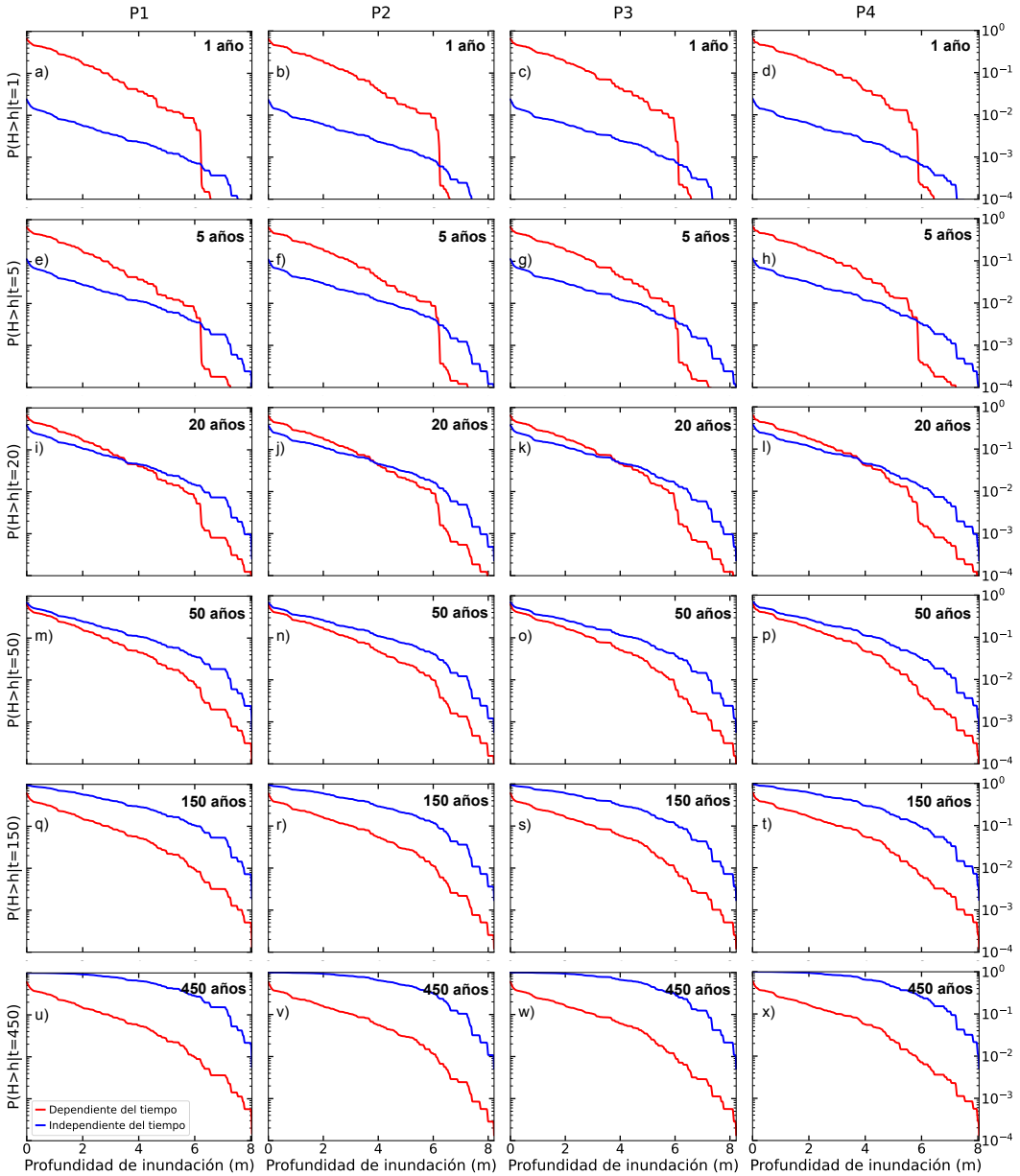


FIGURA N° 4.14: Curvas de peligro para diferentes periodos.

Por otro lado, en la Figura N° 4.14 se observa que, a partir de los 50 años, el análisis independiente del tiempo generó un mayor peligro que el dependiente del tiempo en todas las profundidades de inundación. Para entender esta diferencia, debe recordarse que, en el análisis independiente del tiempo, la probabilidad de ocurrencia de los sismos es constante cada año, por tanto, los sismos $\geq$ 8.8 M_w pudieron ocurrir con la misma posibilidad independientemente de si ocurrieron un

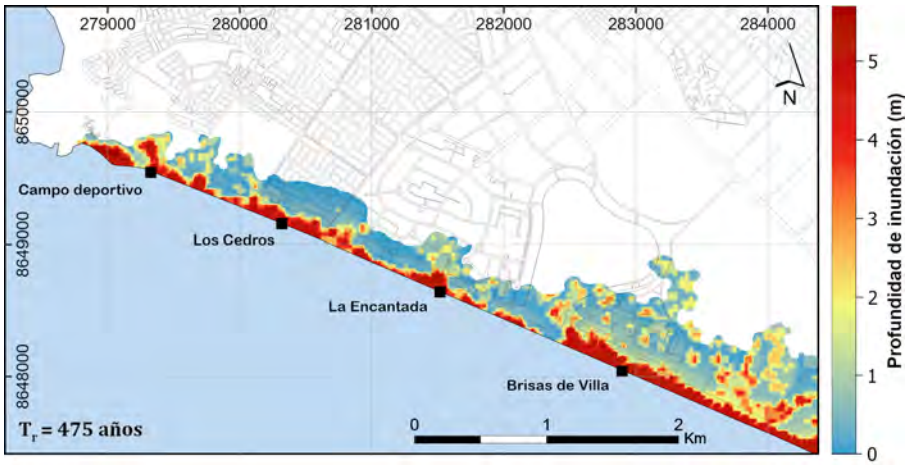
año anterior, en cambio, la ocurrencia de estos sismos en el análisis dependiente del tiempo se vio influida por el silencio sísmico.

Dado que los valores de μ_j (Tabla N° 3.6) en cada sección fueron generalmente menores que los periodos largos, las probabilidades de ruptura en cada sección se reiniciaron en promedio cada μ_j años, por esta razón, no se observó un cambio significativo para periodos más largos en las curvas de peligro dependientes del tiempo (Figura N° 4.12a), a diferencia del análisis independiente del tiempo (Figura N° 4.11b). En tal sentido, puede concluirse que el análisis independiente del tiempo tiende a sobrestimar el peligro por tsunami a medida que el periodo de análisis es más largo, como se observa en la Figura N° 4.14.

4.3.2 Mapas uniformes de peligro por tsunami

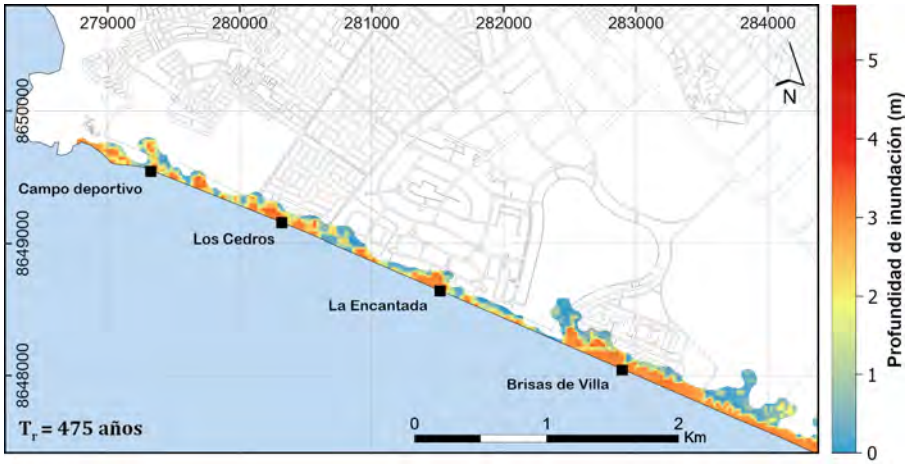
Siguiendo el procedimiento descrito en la sección anterior, se determinaron las curvas de peligro en cada grilla de la zona de estudio considerando tanto un análisis independiente como dependiente del tiempo. De acuerdo con De Risi y Goda (2017), estas curvas de peligro pueden emplearse para generar mapas uniformes de peligro por tsunami, los cuales representan las profundidades de inundación que son excedidas con la misma probabilidad en una región determinada.

La Figura N° 4.15 presenta los mapas uniformes de las profundidades de inundación que son excedidas con un 10 % de probabilidad en los siguientes 50 años. Esto equivale a un periodo de retorno (T_r) de 475 años, es decir, las profundidades de inundación mostradas en los mapas son excedidas en promedio cada 475 años. Nótese que existe una diferencia moderada entre los resultados del análisis independiente con el dependiente del tiempo como consecuencia de la diferencia en las curvas de peligro (Figura N° 4.14m-p).



(a) Mapa de peligro bajo un análisis independiente del tiempo.

FIGURA N° 4.15: Mapas de peligro con un periodo de retorno de 475 años (i.e., profundidades de inundación con una probabilidad de 10 % de ser excedidas en 50 años) (continúa).



(b) Mapa de peligro bajo un análisis dependiente del tiempo.

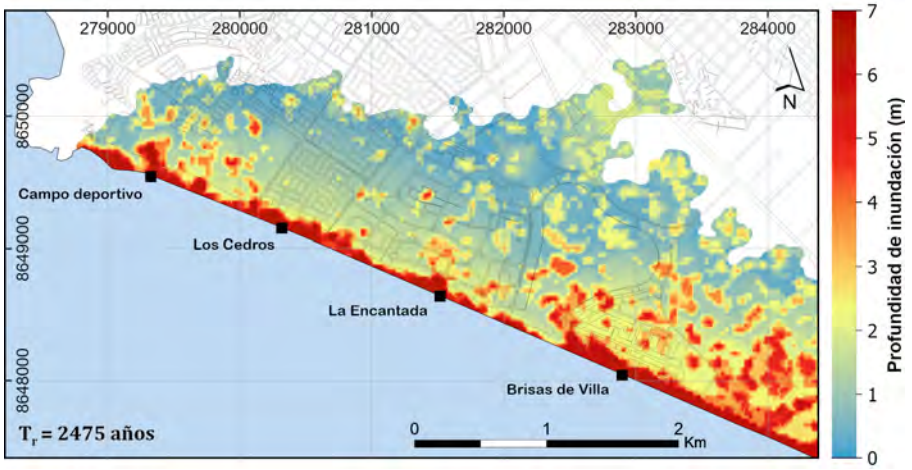
FIGURA N° 4.15: Mapas de peligro con un periodo de retorno de 475 años (i.e., profundidades de inundación con una probabilidad de 10 % de ser excedidas en 50 años).

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés, *American Society of Civil Engineers*) ha establecido los estándares para las cargas y efectos por tsunami en las edificaciones. En ese sentido, han considerado como el máximo escenario de tsunami a la inundación que es excedida con un 2 % de probabilidad en 50 años, que equivale a un periodo de retorno de 2475 años. A partir de este máximo escenario, se puede definir el límite de inundación, la amplitud del tsunami en la costa y en altamar, así como la zona de diseño de tsunami, donde las edificaciones son diseñadas para la inundación por el máximo escenario de tsunami (ASCE, 2022).

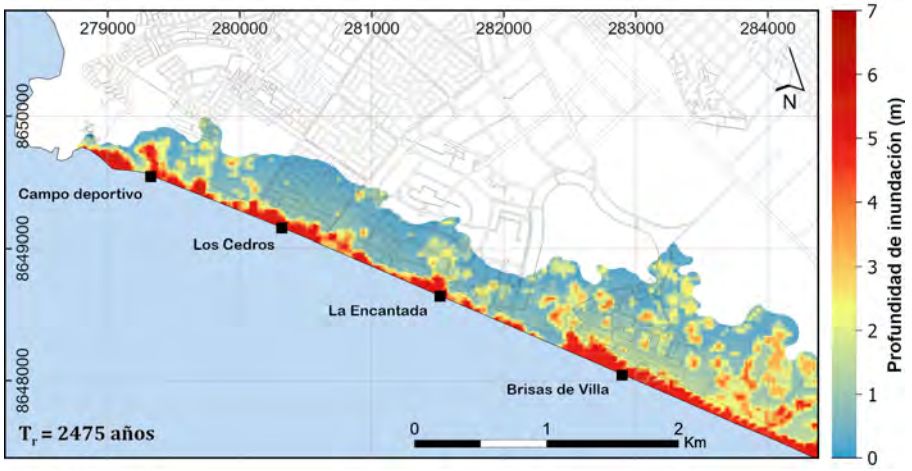
La Figura N° 4.16 muestra los resultados del máximo escenario de tsunami. Se puede observar que el peligro por tsunami en la zona de estudio es alto, ya que se alcanzan profundidades de inundación de 7 y 6 m para los análisis independiente y dependiente del tiempo, respectivamente. Además, nótese que la urbanización Las Brisas de Villa tiene un mayor peligro al tener las mayores profundidades de inundación, seguida de La Encantada . Esto fue una consecuencia de la alta exposición ante tsunami de estas regiones debido a su baja elevación (Figura N° 4.4) en comparación con las demás.

Finalmente, se realizó una comparación entre los mapas de inundación bajo periodos de retorno de 475 (Figura N° 4.15) y 2475 (Figura N° 4.16) años con el objetivo de estimar la variación en las profundidades de inundación. Para ello, se calculó el factor de amplificación, definido como la relación entre las profundidades de inundación bajo un periodo de retorno de 2475 años con respecto al periodo de 475 años. Los resultados muestran que las profundidades se amplifican por factores de 2.4 y 2 para los análisis independiente (Figuras N° 4.15a y 4.16a) y dependiente (Figuras N° 4.15b y 4.16b) del tiempo, respectivamente. Este proceso permite cuantificar el

incremento en las profundidades de inundación en función del periodo de retorno, evidenciando cómo los escenarios de menor frecuencia tienen un mayor impacto en las regiones costeras. De esta manera, se puede proponer medidas de mitigación para eventos de largo plazo (e.g., 2475 años). Por ejemplo, las edificaciones esenciales (e.g., hospitales) deben diseñarse bajo escenarios de mayor severidad a fin de que permanezcan operativas luego del sismo (Piscal y Lopez, 2019).



(a) Mapa de inundación independiente del tiempo.



(b) Mapa de inundación dependiente del tiempo.

FIGURA N° 4.16: Mapas de peligro con un periodo de retorno de 2475 años (i.e., profundidades de inundación con una probabilidad de 2% de ser excedidas en 50 años).

4.4 Discusión de resultados

En este capítulo se modelaron los tsunamis con los escenarios sísmicos generados en el capítulo III. Luego de acoplar los resultados con las probabilidades de ocurrencia de cada escenario, se determinaron las curvas de peligro y mapas uniformes de tsunami bajo un análisis independiente y dependiente del tiempo. En base a los resultados mostrados se puede afirmar lo siguiente:

- Al analizar las inundaciones según las magnitudes y ubicaciones de los escenarios en las direcciones de rumbo y buzamiento, se tuvo una mejor perspectiva del peligro por tsunami que tiene el área de estudio. Se observó que los sismos $\geq$ 8.8 M_w generaron un mayor impacto por tsunami (Figuras N° 4.7 y B.1), siendo los ubicados en la zona sur y centro (Figuras N° 4.8 y 4.9) del modelo de falla los más desfavorables.

- Las curvas de peligro independientes del tiempo (Figura N° 4.11) dependieron solamente del tamaño de la ventana de tiempo, siendo las probabilidades mayores en los periodos más largos. En cambio, las curvas de peligro dependientes del tiempo (Figura N° 4.12) lograron capturar la influencia del silencio sísmico en el peligro por tsunami.

- En periodos menores a 20 años, se notó que las curvas dependientes del tiempo produjeron mayores probabilidades de excedencia para profundidades de inundación menores a 4 m, principalmente en las profundidades de 0.3 y 2 m (Figura N° 4.14a-l). En el caso de periodos mayores a 50 años, el análisis independiente del tiempo produjo un mayor peligro para todas las profundidades de inundación, tendiendo a sobrestimar el peligro a medida que el periodo es más largo (Figura N° 4.14m-x).

- En los mapas uniformes de peligro por tsunami, (Figuras 4.15 y 4.16) se observó un mayor peligro en el análisis independiente del tiempo (Figuras N° 4.15a y 4.16a) con respecto al dependiente del tiempo (Figuras N° 4.15b y 4.16b) como consecuencia de la variación entre curvas de peligro (Figura N° 4.14m-p). La urbanización Las Brisas de Villa fue la de mayor peligro por tsunami al tener las mayores profundidades de inundación, seguida de la urbanización La Encantada.

- Las amplificaciones entre las profundidades de inundación bajo periodos de retorno de 475 (Figura N° 4.15) a 2475 (Figura N° 4.16) años fueron de 2.4 y 2 para los análisis independiente y dependiente del tiempo, respectivamente. Estos factores reflejan cómo los escenarios de menor frecuencia tienen un mayor impacto en las regiones costeras, permitiendo así la propuesta de medidas de mitigación para eventos de largo plazo (e.g., 2475 años).

Capítulo V: Riesgo por tsunami

5.1 Daños por tsunami

5.1.1 Clasificación de las edificaciones

Para la evaluación de daños por tsunami, se utilizó una base de datos a nivel de manzanas de la zona de estudio que fue obtenida por el CISMID (2024) como parte del Sistema Integrado de Evaluación de Daños (IESDAS, por sus siglas en inglés, *Integrated Expert System for Damage Assessment*). En esta base de datos, cada manzana contiene información del número de pisos, material de construcción, uso, sistema estructural y estado de conservación. En la Figura N° 5.1 se presenta la clasificación de las edificaciones a nivel de manzana según el material de construcción. Puede notarse que la mayor parte de las construcciones son de albañilería, seguido por las de concreto armado y madera. Según el CISMID (2010), el distrito de Chorrillos es principalmente un distrito residencial, en el cual aproximadamente el 90 % de las edificaciones son de albañilería.

Se optó por realizar la clasificación de las manzanas según el material de construcción, ya que se ha demostrado en eventos pasados que los daños por tsunami están asociados principalmente a la profundidad de inundación y material de construcción (Leelawat et al., 2014).

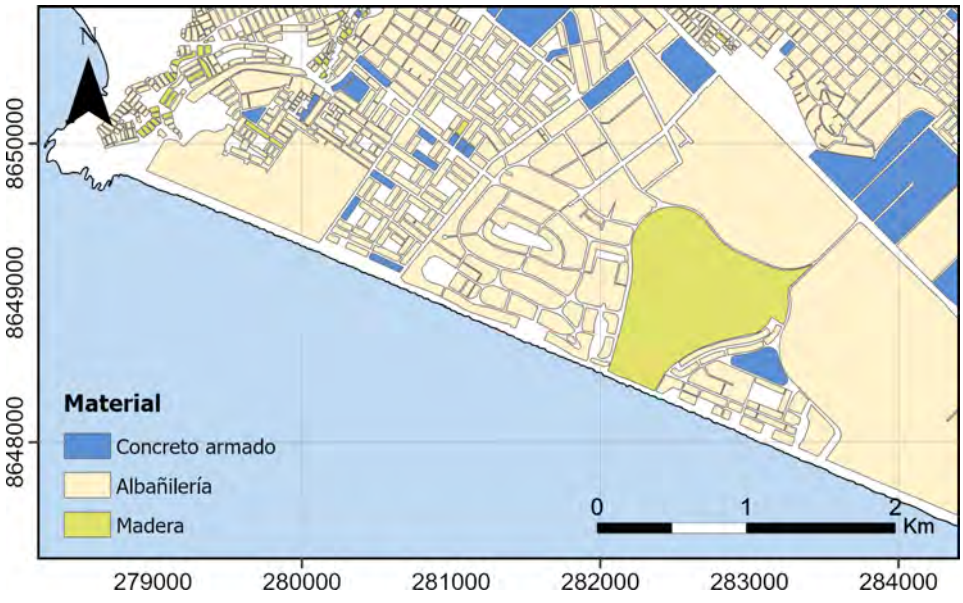


FIGURA N° 5.1: Clasificación según el material de construcción. Adaptado de CISMID (2024).

Además de analizar los daños por material de construcción, se optó por considerar las condiciones de las edificaciones en función a la estructura y calidad de construcción. Para ello, Omira et al. (2010) propuso una clasificación en la evaluación

de vulnerabilidad de edificaciones ante tsunami que considera principalmente la calidad de construcción en las edificaciones y su resistencia mecánica esperada frente a un tsunami. Se asignaron cuatro niveles, desde calidad muy buena, para viviendas bien diseñadas, hasta mala, para viviendas sin estructura resistente (Omira et al., 2010), como se muestra en la Tabla N° 5.1.

TABLA N° 5.1: Categorización de las edificaciones. Adaptado de (Omira et al., 2010).

Clase	Estructura y material utilizado	Calidad de construcción	Resistencia mecánica y daño esperado
A	Edificaciones nuevas bien diseñadas, con estructuras de concreto armado y muros estructurales.	Muy buena	Gran resistencia a cargas laterales. Se espera daño leve en caso de tsunami.
B	Viviendas con estructuras de concreto armado y albañilería.	Buena	Buena resistencia a cargas laterales. Riesgo de daño leve a moderado en caso de tsunami.
C	Edificaciones tradicionales de albañilería con muros no reforzados y delgadas estructuras de concreto armado.	Media	Resistencia débil a cargas laterales. Se espera daño grave en caso de tsunami.
D	Viviendas de un solo nivel sin estructura y construcciones de madera con ladrillos no reforzados.	Mala	Resistencia muy débil a cargas laterales. Riesgo de colapso total en caso de tsunami.

Dado que la clasificación de la Tabla N° 5.1 se propuso para la evaluación de vulnerabilidad por tsunami en las edificaciones de Casablanca-Marruecos (Omira et al., 2010), en esta tesis se modificó la clasificación para enfocarla en las edificaciones del distrito de Chorrillos, considerando las características locales de vulnerabilidad (Tabla N° 5.2). Para ello, se tomó como referencia el manual para la evaluación del riesgo por tsunamis del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2017), que fue aplicado por la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML, 2021) en la evaluación de riesgo de desastres (EVAR) por tsunami en el distrito de Chorrillos.

La clasificación se basó principalmente en los resultados de los trabajos de campo realizados por Dávila et al. (2024) en el distrito de Chorrillos, mediante levantamientos fotogramétricos con RPAS. En la Figura N° 5.2 se muestra la malla texturizada en 3D, también conocida como gemelo digital, que muestra las edificaciones correspondientes a cada una de las clases identificadas.

TABLA N° 5.2: Categorización de las edificaciones del distrito de Chorrillos.

Clase	Descripción
A	Edificaciones de albañilería confinada de uno o dos niveles, con diafragmas rígidos. También se observan viviendas construidas con pórticos de concreto armado y vanos rigidizados con mampostería. Se tiene un buen estado de conservación de las viviendas, con acabados en buenas condiciones. Además, las edificaciones incluyen muros perimetrales que mejoran su capacidad ante el impacto de tsunami. Las construcciones son recientes, cumpliendo con las normativas peruanas E.030, E.060 y E.070.
B	Construcciones de albañilería confinada de uno a tres niveles, con diafragmas rígidos. La mayoría de las viviendas se encuentra en buen estado de conservación, aunque algunas presentan un estado regular; sin embargo, no se observan señales de informalidad. Solo algunas viviendas cuentan con muros perimetrales, por lo que la gran mayoría se encuentra adyacente a las construcciones vecinas, que podría generar serias consecuencias debido a la colisión entre viviendas durante el sismo (Elwardany et al., 2021). Las edificaciones son recientes y cumplen con los códigos peruanos de construcción.
C	Es el tipo y estado de construcción predominante en el área de estudio. Las edificaciones son de albañilería confinada de hasta cuatro niveles, con diafragmas rígidos; sin embargo, se ha notado que algunas viviendas presentan diafragmas flexibles. En general, el estado de conservación de las edificaciones es regular. No obstante, algunas de las viviendas fueron construidas de manera informal, utilizando muros portantes de ladrillo pandereta y muros no confinados, lo que sugiere que no todas las edificaciones cumplieron con los reglamentos de construcción vigentes.
D	Viviendas de albañilería confinada de uno o dos niveles, con diafragmas rígidos y flexibles. Se observan también construcciones de madera de un solo nivel. Las edificaciones presentan un estado de conservación regular; mientras que algunos tienen un estado malo. Gran parte de las viviendas son informales con un amplio uso de ladrillo pandereta y muros no confinados. La gran mayoría de edificaciones no tuvieron una supervisión técnica y no cumplen con las normativas peruanas.

(a) Clase A.

(b) Clase B.

FIGURA N° 5.2: Malla texturizada en 3D (Dávila et al., 2024) (continúa).

(c) Clase C. (d) Clase D.

FIGURA N° 5.2: Malla texturizada en 3D (Dávila et al., 2024).

La Figura N° 5.3 presenta la delimitación de los sectores para cada categoría de edificación evaluando el modelo 3D de la Figura N° 5.2 y las imágenes disponibles en *Street View*. Las clases A (Figura N° 5.2a) y B (Figura N° 5.2b) corresponden principalmente a las urbanizaciones La Encantada y Las Brisas, respectivamente. La clase C (Figura N° 5.2c), incluye a las viviendas de clase media ubicadas en la urbanización Los Cedros, mientras que en la clase D (Figura N° 5.2d), las construcciones se ubican en la ladera y base del Morro Solar. Así pues, se puede notar la heterogeneidad de este distrito en cuanto a niveles socio económicos (Seoane, 2019), así como la calidad y estado de conservación de las construcciones.

FIGURA N° 5.3: Categorización de las edificaciones © Google (2024).

5.1.2 Funciones de fragilidad por tsunami

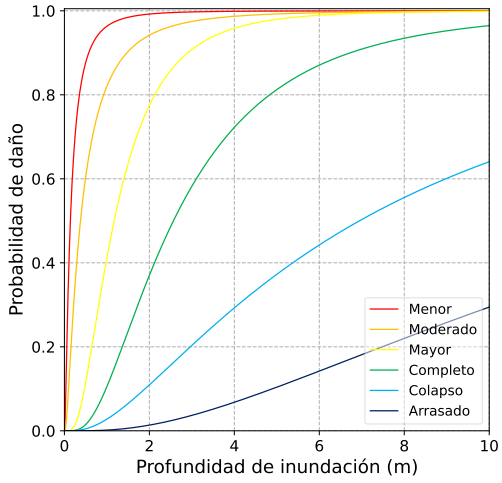
El Ministerio de Tierra, Infraestructura, Transporte y Turismo de Japón (MLIT, por sus siglas en inglés, *Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism*), ha clasificado los daños por tsunami de las edificaciones en seis niveles, cuyas descripciones y condiciones se detallan en la Tabla N° 5.3. Adicionalmente, el MLIT (2014) presentó los factores de daño para cada nivel, usados para representar el grado de daño o pérdida que tendría la edificación a causa del tsunami. Así pues, los factores de daño para los niveles menor, moderado, mayor, completo, colapso y arrasado son de 0.03-0.1, 0.1-0.3, 0.3-0.5, 0.5-1.0, 1.0 y 1.0, respectivamente.

Dado que los parámetros propuestos por el MLIT (2014) se basaron en los daños tras el tsunami de Tohoku (2011), se adaptaron los factores de daño al área de estudio de esta tesis. Para ello, se consideraron los trabajos de campo de Kuroiwa y Mas (2007) y Mas (2009) sobre los daños en edificaciones por los tsunamis de Pisco (2007) y Camaná (2001), respectivamente. Los resultados evidenciaron las deficiencias constructivas en nuestro país, como la falta de conexiones dentadas en los muros de albañilería confinada (según la Norma E.070) que colapsaron a causa del sismo e impacto del tsunami. En consecuencia, se establecieron los factores de daño de la Tabla N° 5.3, considerando que, a partir de daño completo (con daños en columnas) se requiere de una reconstrucción de la vivienda (i.e., factor de 1.0).

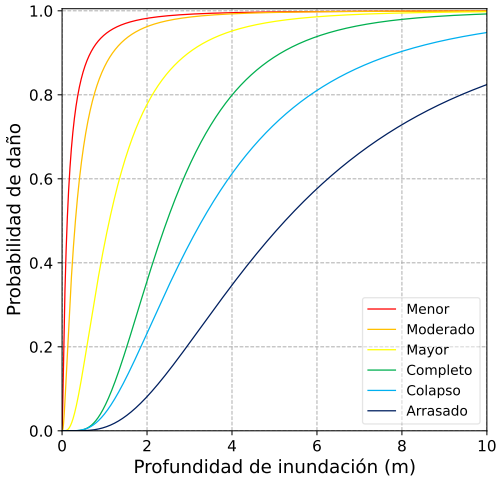
TABLA N° 5.3: Niveles de daño por tsunami. Adaptado de (Leelawat et al., 2014).

Daño	Descripción	Condición	Factor
Sin daño	No presenta daños.	Se puede utilizar inmediatamente.	0.0
Menor	No hay daños estructurales o no estructurales significativos.	Se puede utilizar después de una limpieza menor de suelos y paredes.	0.1
Moderado	Hay daños leves en componentes no estructurales.	Se puede utilizar tras una reparación moderada.	0.2
Mayor	Hay daños importantes en algunas paredes, pero no en columnas.	Se puede utilizar luego de reparaciones importantes.	0.4
Completo	Hay daños importantes en paredes y columnas.	Requiere de una reparación completa.	1.0
Colapso	Hay daños destructivos en las paredes y columnas.	No es reparable o tiene un gran costo de reparación.	1.0
Arrasado	La edificación fue arrasada por la inundación, solo quedan los cimientos.	No es reparable, requiere reconstrucción total	1.0

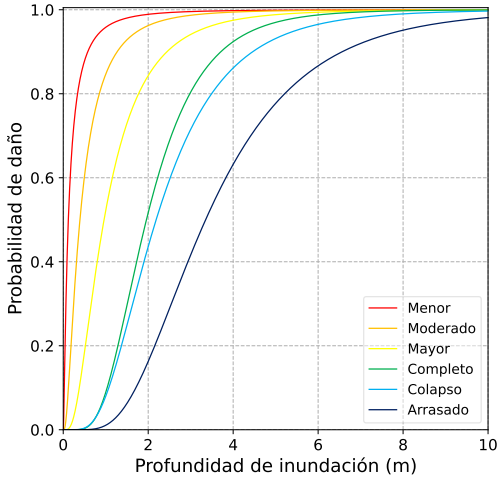
Con el objetivo de estimar los daños por tsunami que tendrían las manzanas de la zona de estudio, se consideraron las funciones de fragilidad propuestas por Suppasri et al. (2013), quienes evaluaron los daños en más de 250,000 edificaciones luego del tsunami de Japón el 2011. Estas funciones relacionan las probabilidades de daños en función de las profundidades de inundación para las edificaciones de concreto armado (Figura N° 5.4a), albañilería (Figura N° 5.4b) y madera (Figura N° 5.4c). Como puede notarse en la Figura N° 5.4, las edificaciones de concreto armado tienen un mejor desempeño ante tsunami, ya que las probabilidades de daño son menores que las de albañilería y madera (Suppasri et al., 2013).



(a) Concreto armado.



(b) Albañilería.



(c) Madera.

FIGURA N° 5.4: Funciones de fragilidad por tsunami. Adaptado de Suppasri et al. (2013).

Las funciones de fragilidad mostradas en la Figura N° 5.4 siguen la función log-normal estándar (ecuación 2.32b) bajo los parámetros estadísticos ν (media) y ξ (desviación estándar) presentados en la Tabla N° 5.4.

TABLA N° 5.4: Parámetros de las funciones de fragilidad (Suppasri et al., 2013).

	Concreto armado		**Albañilería**		**Madera**	
	ν	ξ	ν	ξ	ν	ξ
Menor	-1.9636	1.0966	-2.1130	1.3362	-2.1216	1.2261
Moderado	-0.9723	1.0600	-1.1573	1.0400	-0.9338	0.9144
Mayor	0.1577	0.7090	0.1059	0.7693	-0.0400	0.7276
Completo	0.9423	0.7522	0.9043	0.5746	0.6721	0.4985
Colapso	1.9381	1.0120	1.1918	0.6821	0.7825	0.5559
Arrasado	2.8232	0.9635	1.6583	0.6913	1.2094	0.5247

A fin de incorporar la categorización del área de estudio (Figura N° 5.3) en las funciones de fragilidad, se utilizaron factores de castigo en las probabilidades de daño, tal como se muestra en la Figura N° 5.5 para la función de fragilidad de tipo arrasado en viviendas de albañilería. Para ello, se asignaron los factores 1, 1.05, 1.15 y 1.25 a las clases A, B, C y D, respectivamente, dividiendo los valores de ν entre el factor correspondiente en la ecuación 2.32b.

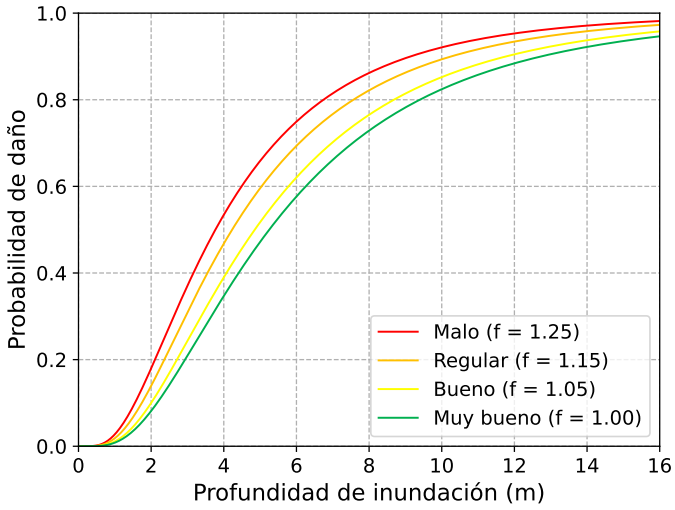


FIGURA N° 5.5: Factores de castigo a las funciones de fragilidad.

5.1.3 Aplicación de las funciones de fragilidad

La aplicación de las funciones de fragilidad mostradas en la Figura N° 5.4 fue llevada a cabo considerando las profundidades máximas de inundación en cada manzana y su material de construcción. De esta manera, se determinaron las probabilidades de daño en las manzanas para los 433 escenarios sísmicos y los seis niveles de daño analizados.

A modo de ejemplo, la Figura N° 5.6 presenta los mapas de probabilidades de daño para el nivel de daño arrasado considerando las inundaciones por tramo de magnitud presentadas en la Figura N° 4.7. Como se observa, las probabilidades de daño en las manzanas fueron considerablemente mayores para los escenarios $\geq$ 8.8 M_w. En estos casos, la mayoría de las manzanas presentó una probabilidad de ser arrasada mayor a 70 %, donde las ubicadas cerca de la línea de costa tuvieron las mayores probabilidades de daño. Además, nótese que generalmente las manzanas ubicadas al sureste (en las urbanizaciones La Encantada y Brisas de Villa) tuvieron las mayores probabilidades de daño como consecuencia de las altas profundidades de inundación (Figura N° 4.7).

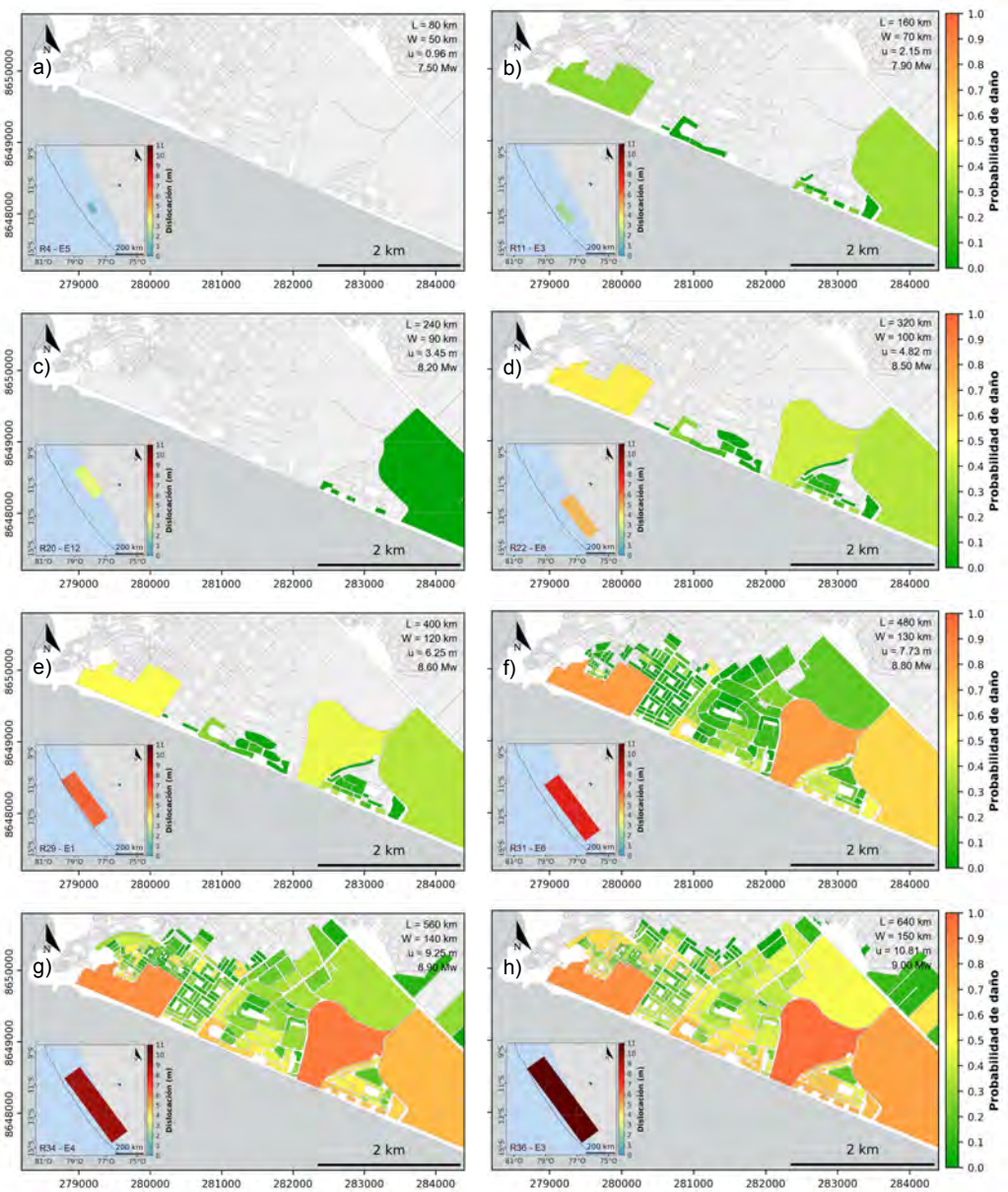
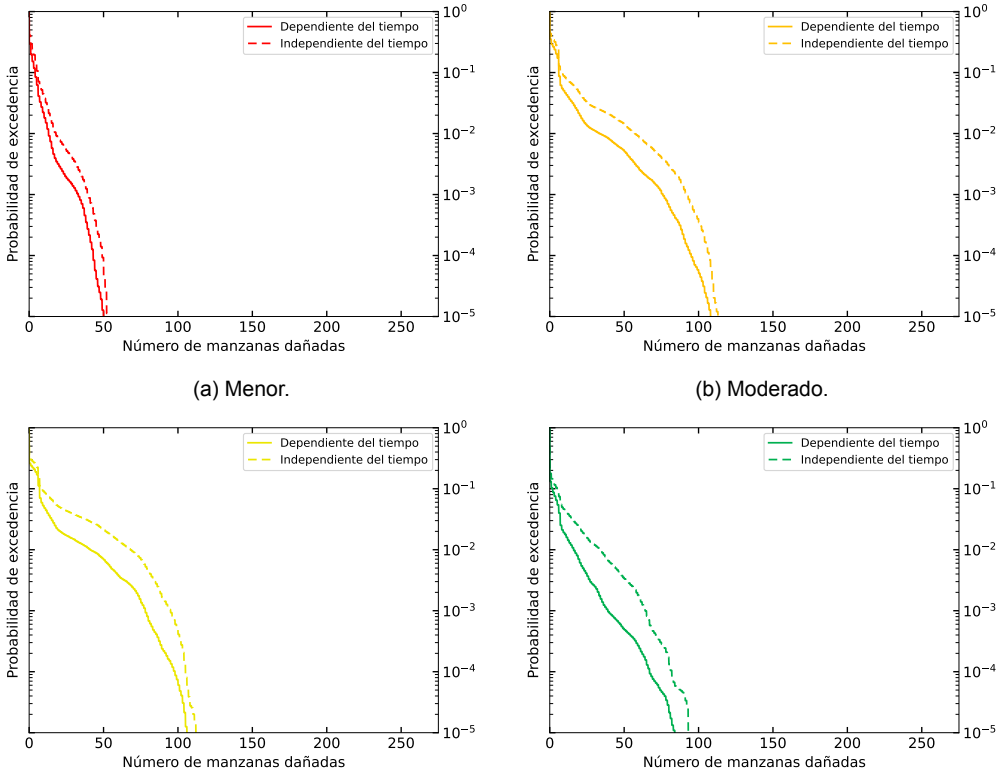


FIGURA N° 5.6: Probabilidades de daño por tramos de magnitud.

A partir de las probabilidades de daño obtenidas usando las funciones de fragilidad, se realizaron simulaciones de Monte Carlo para determinar el estado de daño en las manzanas siguiendo el proceso de muestreo descrito en la sección 2.4.2. De manera similar a lo realizado en la sección 3.2.2 con los catálogos simulados, primero se determinó el número de simulaciones n_{SMC} necesarias, ya que los estados de daño varían de una simulación a otra debido a la aleatoriedad de la variable uniforme n del muestreo. Los resultados mostraron que, a partir de 100,000 simulaciones, las frecuencias de los estados de daño en cada nivel fueron estables y consistentes con las probabilidades de daño obtenidas de las funciones de fragilidad.

Por consiguiente, se analizaron los estados de daño en cada manzana llevando a cabo 100,000 simulaciones para cada uno de los 433 escenarios sísmicos. Con los resultados obtenidos, se determinó el número total de manzanas que se encontraban dentro de cada nivel de daño y, mediante la ecuación 2.34, las probabilidades de exceder cierto número de manzanas dañadas. Luego de acoplar los resultados con las probabilidades de ocurrencia de los escenarios sísmicos, se determinaron las curvas de daño mostradas en la Figura N° 5.7 considerando los análisis independiente (ecuación 2.35) y dependiente (ecuación 2.36) del tiempo, para cada uno de los seis niveles de daño. Estas curvas representan las probabilidades con las que se excederían cierto número de manzanas dentro de un nivel de daño.



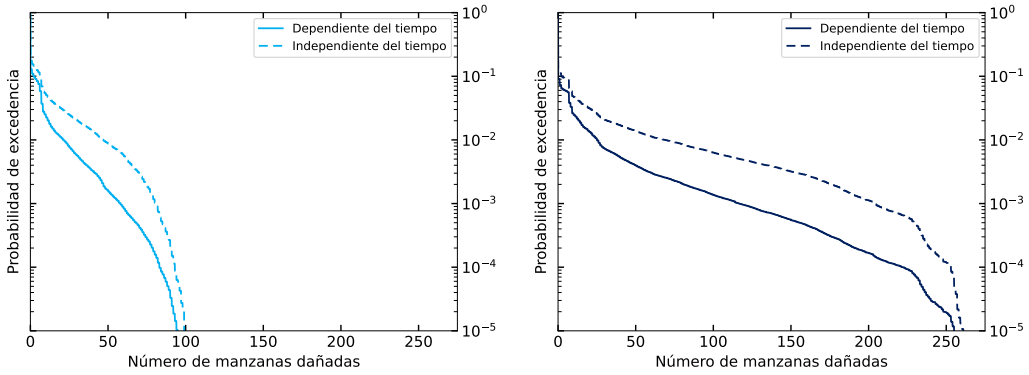
(a) Menor.

(b) Moderado.

(c) Mayor.

(d) Completo.

FIGURA N° 5.7: Curvas de daño por tsunami (continúa).



(e) Colapso. (f) Arrasado.

FIGURA N° 5.7: Curvas de daño por tsunami.

Como se observa en la Figura N° 5.7, las probabilidades de excedencia independientes del tiempo fueron mayores en todos los niveles de daño. Esto se debe a la diferencia en la ocurrencia de sismos $\geq$ 8.8 M_w (Tabla N° 3.7), los cuales generaron las mayores probabilidades de daño en las manzanas (Figura N° 5.6). Además, nótese que las curvas de los daños moderado y mayor tuvieron las probabilidades más altas en comparación con las demás, por lo que es más probable que un mayor número de manzanas se encuentren en estos niveles de daño.

Asimismo, se evaluó el número de manzanas dañadas que son excedidas con un 2% de probabilidad de excedencia (T_r de 2475 años). Como se muestra en la Figura N° 5.8, es más probable que las manzanas se encuentren en los niveles de daño moderado y mayor; sin embargo, nótese que al menos 27 y 13 manzanas se encontrarían en el nivel de daño arrasado para los análisis independiente y dependiente del tiempo, respectivamente, que demuestra el alto riesgo por tsunami del área de estudio.

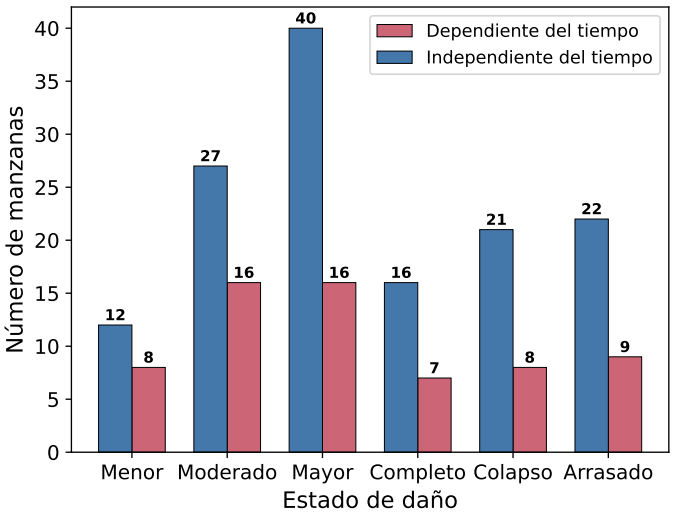


FIGURA N° 5.8: Número de manzanas dañadas para un T_r de 2475 años.

5.2 Pérdidas por tsunami

5.2.1 Funciones de factor de daño medio

Teniendo las funciones de fragilidad (Figura N° 5.4) y factores de daño (Tabla N° 5.3), se determinaron las funciones de factor de daño medio por cada material de construcción mediante la ecuación 2.37, como se muestra en la Figura N° 5.9. Estas funciones representan el daño por tsunami esperado en las edificaciones como función de la profundidad de inundación. Como se observa, los factores en las edificaciones de concreto armado fueron menores debido a las bajas probabilidades de daño (Figura N° 5.4a), en comparación con las de albañilería y madera. Además, nótese que, a partir de los tres metros de inundación, los factores de daño fueron mayores a 60 %. Según Morales (2019), para estos casos es mejor demoler y construir las edificaciones nuevamente debido al alto daño ocasionado.

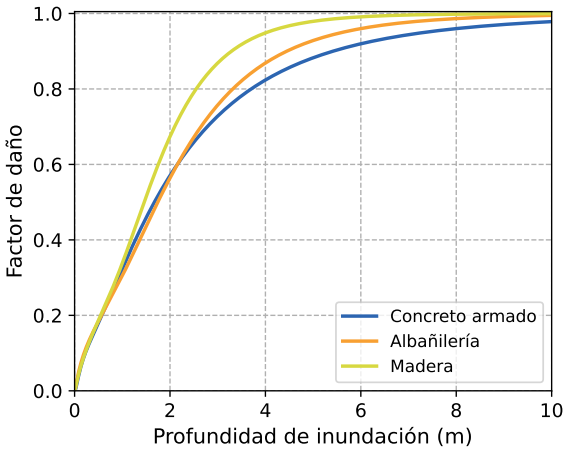


FIGURA N° 5.9: Funciones de factor de daño medio.

5.2.2 Estimación de factores de daño medio

Aplicando las funciones mostradas en la Figura N° 5.9, se determinaron los factores de daño en las manzanas de la zona de estudio considerando el material de construcción y profundidad de inundación máxima por manzana para los 433 escenarios analizados.

La Figura N° 5.10 presenta los factores de daño obtenidos considerando las inundaciones por tramo de magnitud presentadas en la Figura N° 4.7. A diferencia de la Figura N° 5.6, estos mapas ya no representan las probabilidades de daño sino los factores de daño esperados en cada una de ellas. Debido a que los escenarios $\geq$ 8.8 M_w fueron los de mayor impacto (Figura N° 4.7), se puede notar que los factores en gran parte de las manzanas fueron superiores al valor crítico de 60 % (véase la Figura C.1), por lo que las pérdidas en estos casos serían considerables. Además,

tal como se observó en los mapas de probabilidades de daño (Figura N° 5.6), los resultados muestran que las manzanas ubicadas en las urbanizaciones La Encantada y Brisas de Villa tuvieron los mayores factores de daño como consecuencia de las altas profundidades de inundación (Figura N° 4.7).

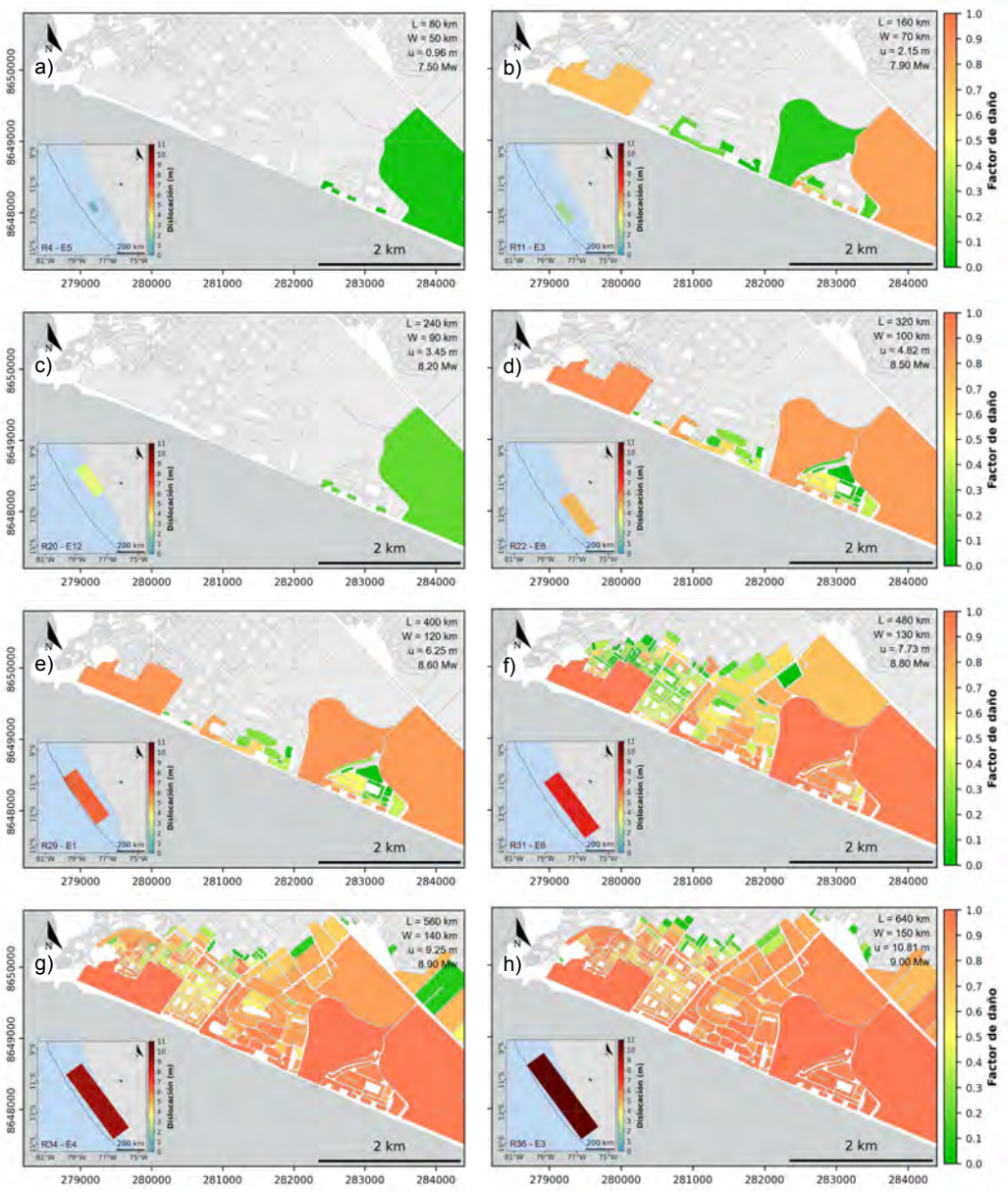


FIGURA N° 5.10: Factores de daño por tramos de magnitud.

5.2.3 Mapas uniformes de factores de daño

Siguiendo un procedimiento similar al desarrollo de los mapas uniformes de peligro en la sección 4.3.2, se determinaron los factores de daño por manzana correspondientes a los periodos de retorno de 475 (Figura N° 5.11) y 2475 (Figura N° 5.12)

años. Para ello, se obtuvieron las funciones de probabilidad de excedencia con los factores de daño considerando un análisis independiente (ecuación 2.38) y dependiente (ecuación 2.39) del tiempo en los siguientes 50 años, y luego, se calcularon los factores de daño excedidos con un 10 y 2 % de probabilidad de excedencia.

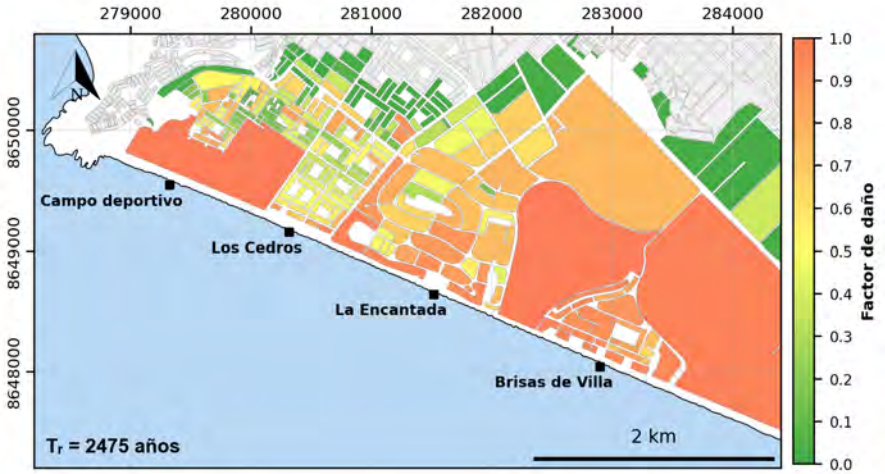
(a) Mapa de factores de daño bajo un análisis independiente del tiempo.

(b) Mapa de factores de daño bajo un análisis dependiente del tiempo.

FIGURA N° 5.11: Mapas de daño con un periodo de retorno de 475 años (i.e., factores de daño con una probabilidad de 10 % de ser excedidas en 50 años).

Los mapas mostrados en la Figura N° 5.11 representan los factores de daño que serían excedidos en promedio cada 475 años. Como se observa, se mantuvo la diferencia entre los resultados de los análisis independiente y dependiente del tiempo como consecuencia de la variación en las probabilidades de ocurrencia de los escenarios sísmicos (Tabla N° 3.7). Asimismo, los resultados muestran que gran parte de las manzanas serían afectadas en este periodo de estudio, donde se espera que algunas de ellas, principalmente las ubicadas cerca de la línea de costa, superen el valor crítico de 60 % de daño por tsunami.

Finalmente, considerando el máximo escenario de tsunami propuesto por la ASCE (2022), se determinaron los mapas de factores de daño correspondientes a un periodo de retorno de 2475 años, como se muestra en la Figura N° 5.12. Nótese que hubo un incremento notable en la cantidad de manzanas afectadas con un factor superior al 60 %, que evidencia el alto riesgo por tsunami que tiene la zona de estudio. Además, se puede observar que la urbanización Las Brisas de Villa presentó los factores más altos en comparación con las otras urbanizaciones tanto en el análisis independiente como dependiente del tiempo, seguida de la urbanización La Encantada. Como se explicó anteriormente, este resultado se debe a las altas profundidades de inundación que fueron originadas por la baja elevación de estas regiones en comparación con las demás.



(a) Mapa de factores de daño bajo un análisis independiente del tiempo.

(b) Mapa de factores de daño bajo un análisis dependiente del tiempo.

FIGURA N° 5.12: Mapas de daño con un periodo de retorno de 2475 años (i.e., factores de daño con una probabilidad de 2 % de ser excedidas en 50 años).

5.3 Discusión de resultados

En este capítulo se aplicaron funciones de fragilidad por tsunami para estimar las probabilidades y estado de daño en las manzanas de la zona de estudio. Además, se determinaron los mapas uniformes de factores de daño bajo un análisis independiente y dependiente del tiempo. En base a los resultados mostrados se puede afirmar lo siguiente:

- Los sismos $\geq$ 8.8 M_w generaron las mayores probabilidades de daño por tsunami en las manzanas (Figura N° 5.6), de las cuales gran parte presentó una probabilidad de ser arrasada mayor a 70 %.

- Las curvas de daño por tsunami (Figura N° 5.7) indicaron que es más probable que un mayor número de manzanas se encuentren en los niveles de daño moderado y mayor. Además, se obtuvo que, para un periodo de retorno de 2475 años, al menos 22 y 9 manzanas se encontrarían en el nivel de daño arrasado para los análisis independiente y dependiente del tiempo, respectivamente (Figura N° 5.8).

- Gran parte de las manzanas tuvieron un factor de daño superior al valor crítico de 60 % para los sismos $\geq$ 8.8 M_w (Figuras N° 5.10 y C.1). En los mapas uniformes de factor de daño (Figuras N° 5.11 y 5.12), se mantuvo la diferencia entre los resultados de los análisis independiente y dependiente del tiempo como consecuencia de la variación en las probabilidades de ocurrencia de los escenarios sísmicos. La urbanización Las Brisas de Villa presentó los factores más altos en comparación con las otras urbanizaciones, seguida de la urbanización La Encantada. Este resultado se debió a las altas profundidades de inundación que fueron originadas por la baja elevación de estas regiones en comparación con las demás.

CONCLUSIONES

En este estudio se ha evaluado el peligro y riesgo por tsunami en la zona costera del distrito de Chorrillos, considerando la incertidumbre y acoplamiento espaciotemporal en la ocurrencia sísmica mediante un planteamiento probabilístico. De acuerdo con los resultados, se concluye que la generación de múltiples escenarios sísmicos en diferentes periodos de estudio y la aplicación de un modelo dependiente del tiempo han proporcionado una representación más integral del peligro y riesgo por tsunami en el distrito de Chorrillos, logrando tener en cuenta el silencio sísmico presente en la región. Los mapas uniformes con periodos de retorno de 475 y 2475 años mostraron el alto peligro y riesgo por tsunami de la zona estudio, con regiones que superaron las profundidades de 0.3 y 2 m de inundación, y manzanas con factores de daño superiores a 60 %, respectivamente, siendo la urbanización Las Brisas de Villa la más afectada, seguida de La Encantada. A continuación, se presentan las conclusiones específicas:

El modelo de ocurrencia permitió la generación de múltiples escenarios sísmicos en seis ventanas de tiempo entre 1 y 450 años considerando la interacción en espacio y tiempo entre rupturas sísmicas. Las simulaciones obtenidas fueron consistentes con la distribución BPT y las observaciones históricas para un parámetro de correlación igual a 400 km.

La zona de estudio tiene un alto peligro sísmico debido al silencio sísmico presente en la zona central del Perú y su proximidad con las secciones 4 y 5 del modelo, que mostraron una mayor recurrencia de sismos en las simulaciones.

Las probabilidades de ocurrencia de los sismos $\geq$ 8.8 M_w con el modelo de ocurrencia fueron bajas (<2 %) en todos los periodos analizados y menores que el análisis independiente del tiempo; sin embargo, fueron aumentando a medida que el periodo era más largo.

Las inundaciones obtenidas al simular los tsunamis producidos por todos los escenarios sísmicos posibles brindaron una mejor perspectiva del peligro por tsunami que tiene el área de estudio. Los sismos ubicados en la zona central y sur del modelo fueron los más desfavorables, donde los sismos $\geq$ 8.8 M_w generaron las profundidades y áreas de inundación más significativas.

Las curvas de peligro obtenidas con el modelo de ocurrencia lograron capturar la influencia del silencio sísmico en el peligro por tsunami, de manera que, considerando un mayor tiempo de silencio sísmico, la amenaza por tsunami se incrementa. Por el contrario, las curvas de peligro independientes del tiempo solamente dependieron del tamaño de la ventana de tiempo y no de la ocurrencia de un sismo dentro de esa ventana de tiempo, por lo que estas curvas fueron constantes en el tiempo.

Para periodos cortos ($\leq$ 20 años), el análisis dependiente del tiempo produjo un mayor peligro por tsunami para profundidades de inundación menores a 4 m. En cambio, el análisis independiente del tiempo produjo un mayor peligro en los periodos largos ($\geq$ 50 años), tendiendo a sobrestimar el peligro a medida que el periodo es más largo.

Los mapas uniformes de peligro por tsunami para los periodos de retorno de 475 y 2475 años mostraron que el peligro por tsunami es alto en la zona de estudio, principalmente en la urbanización Las Brisas de Villa, seguida de La Encantada. Se determinó que las amplificaciones en las profundidades de inundación del periodo de retorno de 475 a 2475 años fueron de 2.4 y 2, para los análisis independiente y dependiente del tiempo, respectivamente.

Los sismos $\geq$ 8.8 M_w produjeron las mayores probabilidades de daño por tsunami en las manzanas del área de estudio, de las cuales gran parte presentó una probabilidad de ser arrasada mayor a 70 %. Las curvas de daño indicaron que es más probable que un mayor número de manzanas se encuentren en los niveles de daño moderado y mayor, donde el análisis independiente del tiempo tuvo las mayores probabilidades.

Gran parte de las manzanas tuvieron un factor de daño superior al valor crítico de 60 % para los sismos $\geq$ 8.8 M_w. De acuerdo con los mapas uniformes de factores de daño para los periodos de retorno de 475 y 2475 años, la urbanización Las Brisas de Villa presentó los factores más altos en comparación con las otras urbanizaciones, seguida de la urbanización La Encantada.

Según lo expuesto en las conclusiones, se observa que las hipótesis de esta investigación fueron validadas. En primer lugar, la implementación del modelo de ocurrencia permitió la generación y evaluación de múltiples escenarios sísmicos, cuyas probabilidades de ocurrencia fueron influidas por el silencio sísmico presente debido a los sismos históricos. Además, fue posible el desarrollo de la metodología probabilística para la evaluación de peligro por tsunami a partir de los resultados del modelo de ocurrencia y las formulaciones de ecuaciones superficiales para las simulaciones numéricas de tsunamis, con los cuales se obtuvieron curvas y mapas uniformes de peligro. Finalmente, los mapas uniformes de factores de daño por tsunami en las edificaciones mostraron que las edificaciones ubicadas en la urbanización Las Brisas de Villa están en un riesgo por tsunami más alto que las demás, seguida de la urbanización La Encantada.

RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan algunas sugerencias por parte del autor con el propósito de mejorar y difundir los resultados obtenidos en esta investigación:

Se aconseja a futuras investigaciones evaluar la ocurrencia de más escenarios sísmicos y caracterizar mejor las rupturas sísmicas. Sería conveniente la actualización de la topografía con el uso de RPA, para que los resultados de las simulaciones numéricas de tsunami sean más precisos. Asimismo, se recomienda el análisis de los daños que tendrían las edificaciones de la zona de estudio para el desarrollo de curvas de fragilidad que puedan ser usados en esta investigación y así mejorar las estimaciones de los daños. Por último, se sugiere la implementación de modelos de costos o fatalidades para el desarrollo de curvas de riesgo por tsunami.

Se recomienda a las instituciones encargadas de evaluar los tsunamis en el Perú implementar las evaluaciones probabilísticas en sus estudios de peligro por tsunami de manera que se obtenga una mejor perspectiva del peligro que tienen las zonas costeras de nuestro país. Asimismo, se propone el uso del modelo de ocurrencia presentado en esta tesis para garantizar la influencia de los silencios sísmicos presentes en las regiones norte, centro y sur del Perú en las evaluaciones de peligro por tsunami.

Se sugiere a las autoridades del distrito de Chorrillos considerar y difundir los mapas uniformes de peligro y riesgo por tsunami desarrollados en este trabajo a fin de tomar medidas de prevención y reducción de desastres. Al tratarse de una evaluación probabilística, es posible implementar medidas con base técnica tales como: transferencia de riesgo a empresas aseguradoras, mitigación del riesgo en edificaciones esenciales o evaluación de la viabilidad en las futuras inversiones ubicadas en la zona costera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adriano, B., Mas, E., Koshimura, S., Estrada, M., y Jimenez, C. (2014). Scenarios of earthquake and tsunami damage probability in Callao region, Peru using tsunami fragility functions. *Journal of Disaster Research*, *9*, 968-975.

Albano, M., Barba, S., Bignami, C., Carminati, E., Doglioni, C., y Stramondo, S. (2021). Numerical analysis of interseismic, coseismic and post-seismic phases for normal and reverse faulting earthquakes in Italy. *Geophysical Journal International*, *225*, 627-645.

American Society of Civil Engineers. (2022). *ASCE 7-22: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*.

Anagnos, T., y Kiremidjian, A. (1984). Stochastic time-predictable model for earthquake occurrences. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *74*, 2593-2611.

Arroyo, I., Bravo, L., Llinás, H., y Muñoz, F. (2014). Distribuciones poisson y gamma: Una discreta y continua relación. *Prospectiva*, *12*, 99.

Aránguiz, R., Catalán, P., Cienfuegos, R., Gonzáles, G., Gubler, A., y Zelaya, C. (2018). *Guía para la estimación de peligro de tsunami.*

Baba, T., Kamiya, M., Tanaka, N., Sumida, Y., Yamanaka, R., Watanabe, K., y Fujiwara, H. (2022). Probabilistic tsunami hazard assessment based on the Gutenberg–Richter law in eastern Shikoku, Nankai subduction zone, Japan. *Earth, Planets and Space*, *74*, 156.

Baker, J. (2015). *Introduction to probabilistic seismic hazard analysis*.

Baker, J., Bradley, B., y Stafford, P. (2021). *Seismic hazard and risk analysis*. Cambridge University Press.

Behrens, J., Løvholt, F., Jalayer, F., Lorito, S., Salgado, M., Volpe, M., y Vyhmeister, E. (2021). Probabilistic tsunami hazard and risk analysis: A review of research gaps. *Frontiers in Earth Science*, *9*.

Bilek, S. (2010). Invited review paper: Seismicity along the south american subduction zone: Review of large earthquakes, tsunamis, and subduction zone complexity. *Tectonophysics*, *495*, 2-14.

Ceferino, L., Galvez, P., Ampuero, J., Kiremidjian, A., Deierlein, G., y Villegas-Lanza, J. (2021). Bayesian parameter estimation for space and time interacting earthquake rupture model using historical and physics-based simulated earthquake catalogs. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *111*, 3356-3373.

Ceferino, L., Kiremidjian, A., y Deierlein, G. (2018). *Parameter estimation methods for modeling of time and space interactions of earthquake rupture.*

Ceferino, L., Kiremidjian, A., y Deierlein, G. (2020). Probabilistic space-and time-interaction modeling of mainshock earthquake rupture occurrence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *110*, 2498-2518.

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2017). *Manual para la evaluación del riesgo por tsunamis.*

Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. (2010). *Evaluación de la amenaza frente a tsunami para Lima y Callao.*

Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. (2024). *Integrated expert system for damage assessment.*

Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avouac, J., Remy, D., y Bonvalot, S. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, *116*, B12405.

De Risi, R., y Goda, K. (2017). Simulation-based probabilistic tsunami hazard analysis: Empirical and robust hazard predictions. *Pure and Applied Geophysics*, *174*, 3083-3106.

Dirección de Hidrografía y Navegación. (2011). *Cartas de inundación.*

Dirección de Hidrografía y Navegación. (2013). *Tsunamis en Perú.*

Dorbath, L., Cisternas, A., y Dorbath, C. (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *80*, 551-576.

Dávila, C., Estrada, M., y Morales, J. (2024). *Evaluación de daños por tsunami en las edificaciones de la zona costera del distrito de Chorrillos utilizando modelamiento numérico de alta resolución bajo diferentes escenarios sísmicos.*

Elwardany, H., Jankowski, R., y Seleemah, A. (2021). Mitigating the seismic pounding of multi-story buildings in series using linear and nonlinear fluid viscous dampers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *21*, 137.

Fukutani, Y., Moriguchi, S., Terada, K., y Otake, Y. (2021). Time-dependent probabilistic tsunami inundation assessment using mode decomposition to assess uncertainty for an earthquake scenario. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *126*.

Goda, K., y De Risi, R. (2018). Multi-hazard loss estimation for shaking and tsunami using stochastic rupture sources. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *28*, 539-554.

Goda, K., y Song, J. (2016). Uncertainty modeling and visualization for tsunami hazard and risk mapping: a case study for the 2011 Tohoku earthquake. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *30*, 2271-2285.

Goda, K., Yasuda, T., Mori, N., y Maruyama, T. (2016). New scaling relationships of earthquake source parameters for stochastic tsunami simulation. *Coastal Engineering Journal*, *58*, 1650010-1-1650010-40.

Gutenberg, B., y Richter, C. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *34*, 185-188.

Hwang, H., y Lin, Y. (2002). *Seismic loss assessment of memphis city school buildings*. Center for Earthquake Research and Information, the University of Memphis.

Imamura, F. (1996). Review of tsunami simulation with a finite difference method. *World Scientific*, 25-42.

Instituto Geofísico del Perú. (2022). *Mapas sísmicos.*

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Resultados definitivos de los censos nacionales 2017.*

Jimenez, C., Moggiano, N., Mas, E., Adriano, B., Koshimura, S., Fujii, Y., y Yanagisawa, H. (2013). Seismic source of 1746 Callao earthquake from tsunami numerical modeling. *Journal of Disaster Research*, *8*, 266-273.

Jin, R. (2015). Generating spatial correlated binary data through a copulas method. *Science Research*, *3*, 206.

Jolivet, R., Simons, M., Duputel, Z., Olive, J., Bhat, H., y Bletery, Q. (2020). Interseismic loading of subduction megathrust drives long term uplift in northern chile. *Geophysical Research Letters*, *47*.

Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, *82*, 2981-2987.

Koshimura, S. (2013). *TUNAMI-CODE Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Tsunami.*

Koshimura, S. (2019). Tsunami. Elsevier.

Koshimura, S., Namegaya, Y., y Yanagisawa, H. (2009). Tsunami fragility: A new measure to identify tsunami damage. *Journal of Disaster Research*, *4*, 479-488.

Kotani, M., Imamura, F., y Shuto, N. (1998). New method of tsunami run-up and estimation of damage using GIS. *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, *45*, 356-360.

Kuroiwa, J. (2002). *Viviendo en armonía con la naturaleza*.

Kuroiwa, J., y Mas, E. (2007). *Evaluación del tsunami de Lagunillas asociado con el terremoto de Pisco del 15 de agosto de 2007.*

Leelawat, N., Suppasri, A., Charvet, I., y Imamura, F. (2014). Building damage from the 2011 great east Japan tsunami: quantitative assessment of influential factors. *Natural Hazards*, *73*, 449-471.

Levin, B., y Nosov, M. (2016). *Physics of tsunamis*. Springer International Publishing.

Mas, E. (2009). *Estructuras de concreto armado tsunami-sismorresistentes basadas en experiencias de los tsunamis en el océano Índico (2004) y Camaná (2001).*

Mas, E., Adriano, B., Horiuchi, J. K., y Koshimura, S. (2015). Reconstruction process and social issues after the 1746 earthquake and tsunami in peru: Past and present challenges after tsunami events..

Mas, E., Adriano, B., Pulido, N., Jimenez, C., y Koshimura, S. (2014). Simulation of tsunami inundation in central Peru from future megathrust earthquake scenarios. *Journal of Disaster Research*, *9*.

Mas, E., Koshimura, S., Suppasri, A., Matsuoka, M., Yamazaki, F., y Imamura, F. (2012). Developing tsunami fragility curves using remote sensing and survey data of the 2010 chilean tsunami in Dichato. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *12*, 2689-2697.

Matthews, M. (2002). A brownian model for recurrent earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *92*, 2233-2250.

Ministry of Land Infrastructure and Transportation. (2014). *Survey of tsunami damage condition.*

Moggiano, N. (2013). Modelado numérico del maremoto de Pisco 2007.

Morales, J. (2019). Developing of a GIS tool to estimate the repair cost of buildings due to earthquake effects in Peru. *Tecnia*, *29*.

Muhammad, A., Goda, K., y Alexander, N. (2016). Tsunami hazard analysis of future megathrust sumatra earthquakes in Padang, Indonesia using stochastic tsunami simulation. *Frontiers in Built Environment*, *2*.

Muhammad, A., Goda, K., y Werner, M. (2022). Time-dependent probabilistic tsunami hazard analysis for western Sumatra, Indonesia, using space-time earthquake rupture modelling and stochastic source scenarios. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-39.

Muhari, A., Imamura, F., Koshimura, S., y Post, J. (2011). Examination of three practical run-up models for assessing tsunami impact on highly populated areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *11*, 3107-3123.

Municipalidad Metropolitana de Lima. (2021). *Informe de evaluación del riesgo por tsunami, zona de reglamentación especial de los pantanos de Villa, distrito de Chorrillos, San Juan de Miraflores, Santiago de Surco y Villa El Salvador, provincia de Lima, departamento de Lima.*

Mzid, N., Pignatti, S., Huang, W., y Casa, R. (2021). An analysis of bare soil occurrence in arable croplands for remote sensing topsoil applications. *Remote Sensing*, *13*, 474.

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). *Dataset overview national centers for environmental information (NCEI).*

Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *75*, 1135-1154.

Okal, E., Borrero, J., y Synolakis, C. (2006). Evaluation of tsunami risk from regional earthquakes at pisco, peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *96*, 1634-1648.

Omira, R., Baptista, M., Miranda, J., Toto, E., Catita, C., y Catalão, J. (2010). Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools. *Natural Hazards*, *54*, 75-95.

Papazachos, B., Scordilis, E., Panagiotopoulos, D., Papazachos, C., y Karakaisis, G. (2004). Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, *36*, 1482.

Piscal, C., y Lopez, F. (2019). Aplicabilidad del código ASCE 7-16 para el diseño de edificaciones con aislamiento sísmico en Colombia. En *Congreso chileno de sismología e ingeniería sísmica.*

Reid, H. (1911). The elastic-rebound theory of earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *2*, 98-100.

Seoane, C. (2019). Desigualdad social desde la perspectiva de proximidad a equipamientos prioritarios en el distrito de Chorrillos. *Investiga Territorios*(9), 35-43.

Silgado, E. (1978). *Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 - 1974)*. Instituto de Geología y Minería.

Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres. (2010). *Investigación sobre el peligro de tsunami en el Área Metropolitana de Lima.*

Steketee, J. (1958). On volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium. *Canadian Journal of Physics*, *36*, 192-205.

Suppasri, A., Mas, E., Charvet, I., Gunasekera, R., Abe, Y., y Imamura, F. (2013). Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Natural Hazards*, *66*, 319-341.

Tanner, D., y Brandes, C. (2020). *Understanding faults*. Elsevier.

Tarazona, J., Aguilar, Z., Pulido, N., Gonzales, C., Lazares, F., y Miyake, H. (2023). Seismicity based maximum magnitude estimation of subduction earthquakes in Peru. *Journal of Disaster Research*, *18*, 308-318.

Tarbotton, C., Dall'Osso, F., Dominey-Howes, D., y Goff, J. (2015). The use of empirical vulnerability functions to assess the response of buildings to tsunami impact: Comparative review and summary of best practice. *Earth-Science Reviews*, *142*, 120-134.

Tavera, H., y Bernal, I. (2005). Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde oeste del Perú. *Alberto Giesecke Matto*, *6*, 89-102.

Tweedie, M. (1957). Statistical properties of inverse gaussian distributions. *The Annals of Mathematical Statistics*, *28*, 362-377.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Deterministic and probablistic risk.*

United States Geological Survey. (2001). *Sobreviviendo a un tsunami: lecciones de Chile, Hawai y Japón.*

Vescovo, R., Adriano, B., Mas, E., y Koshimura, S. (2023). Beyond tsunami fragility functions: experimental assessment for building damage estimation. *Scientific Reports*, *13*, 14337.

Villegas, J. (2020). *Deformación cortical y potencial sísmico en la zona de subducción del Perú.*

Villegas, J., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire, J., y Nocquet, J. (2016). Active tectonics of peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *121*, 7371-7394.

Walker, C. (2018). *Colonialismo en ruinas* (Segunda ed.). Instituto de Estudios Peruanos.

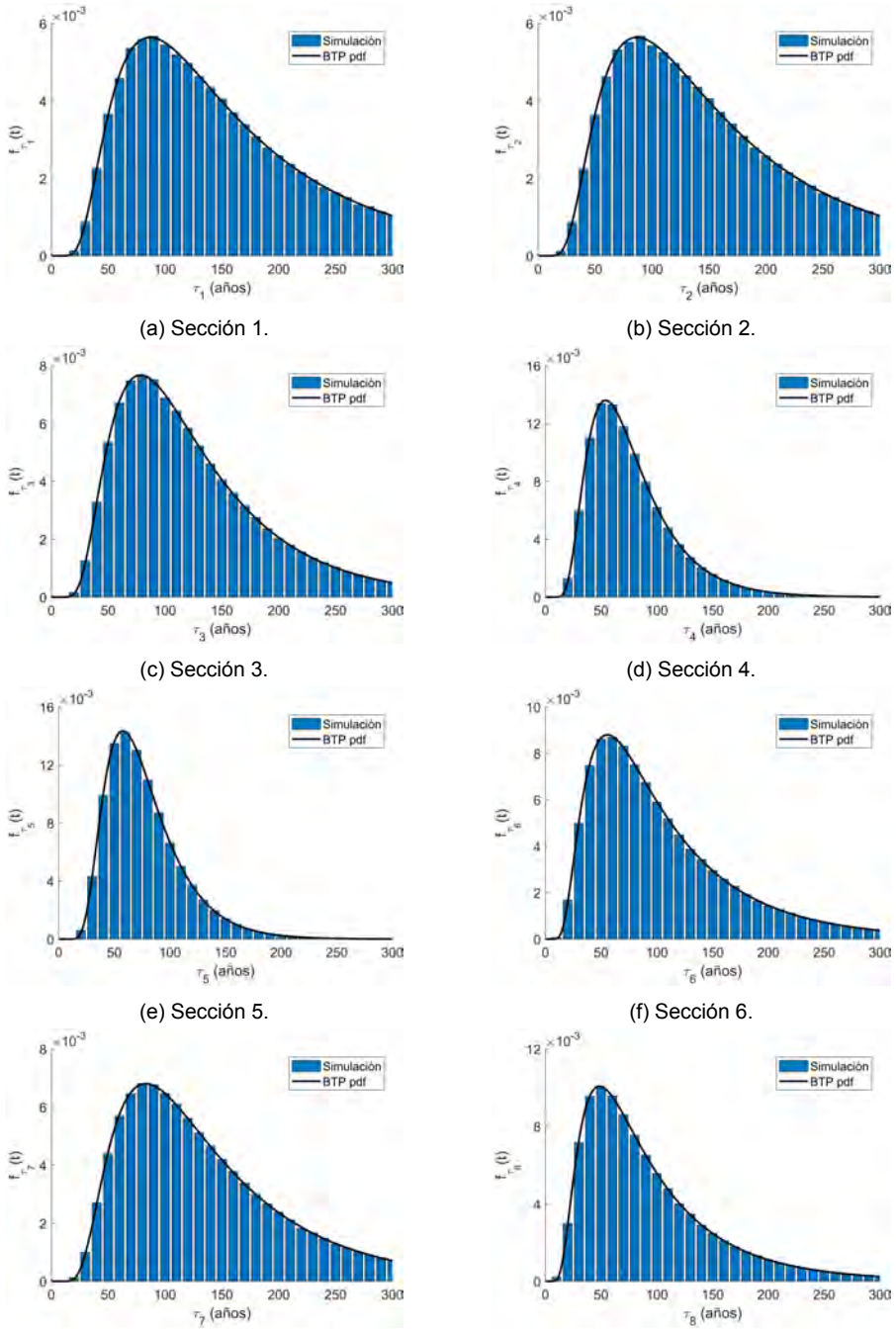
Woessner, J., Hardebeck, J., y Haukkson, E. (2010). *What is an instrumental seismicity catalog.*

Anexos

Anexo A: Consistencia del modelo de ocurrencia 107
Anexo B: Mapas de inundación por tsunami 109
Anexo C: Mapas de factores de daño 112

ANEXO A: CONSISTENCIA DEL MODELO DE OCURRENCIA

La Figura A.1 muestra la consistencia del modelo de ocurrencia para las funciones de densidad BPT, obtenida a partir de la distribución de los tiempos entre rupturas de las simulaciones.



(a) Sección 1. (b) Sección 2.

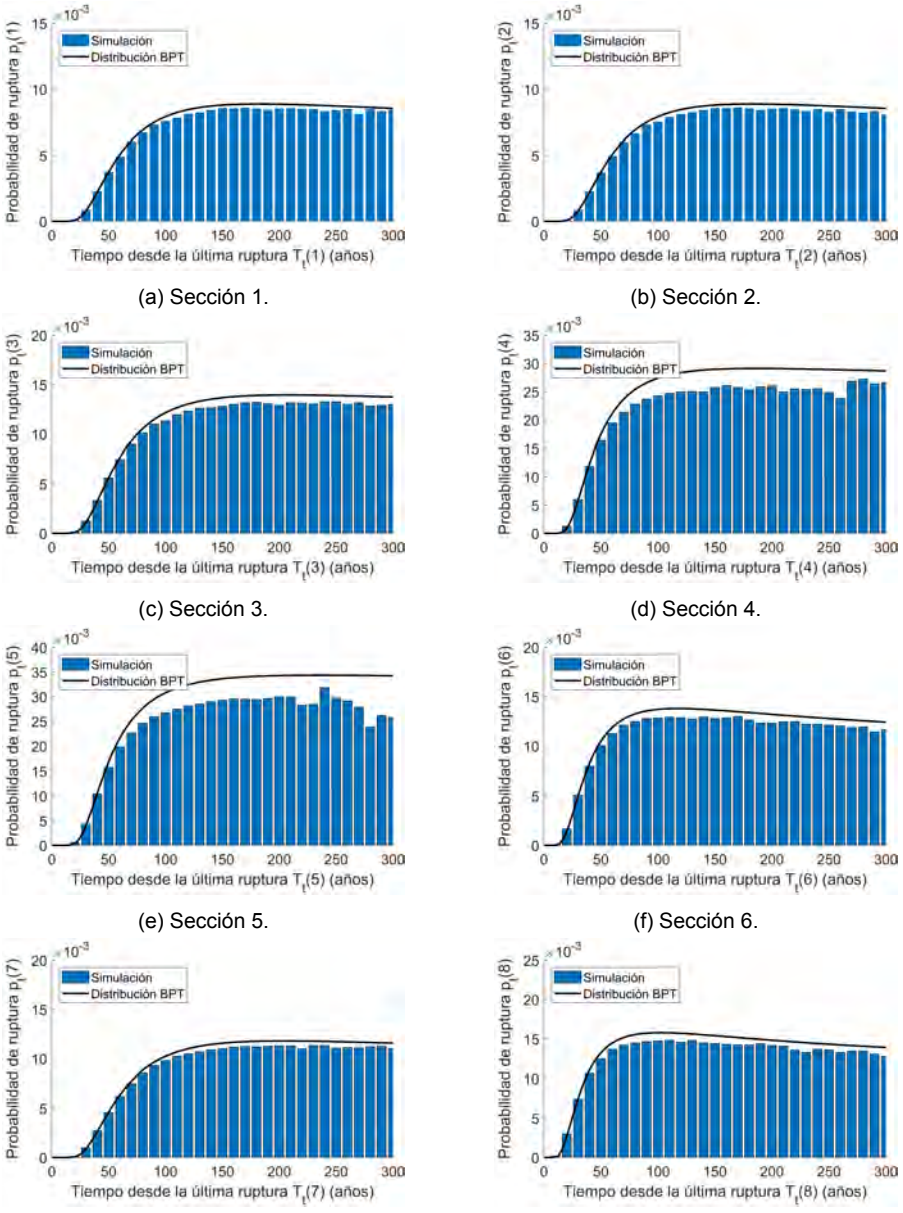
(c) Sección 3. (d) Sección 4.

(e) Sección 5. (f) Sección 6.

(g) Sección 7. (h) Sección 8.

FIGURA A.1: Consistencia en la función de densidad BPT.

Por otro lado, la Figura A.2 presenta la consistencia del modelo de ocurrencia para las probabilidades de ruptura en cada sección. Como se observa, las simulaciones fueron consistentes con las formulaciones luego de implementar la interacción espacial de las rupturas mediante el parámetro γ.



(a) Sección 1. (b) Sección 2.

(c) Sección 3. (d) Sección 4.

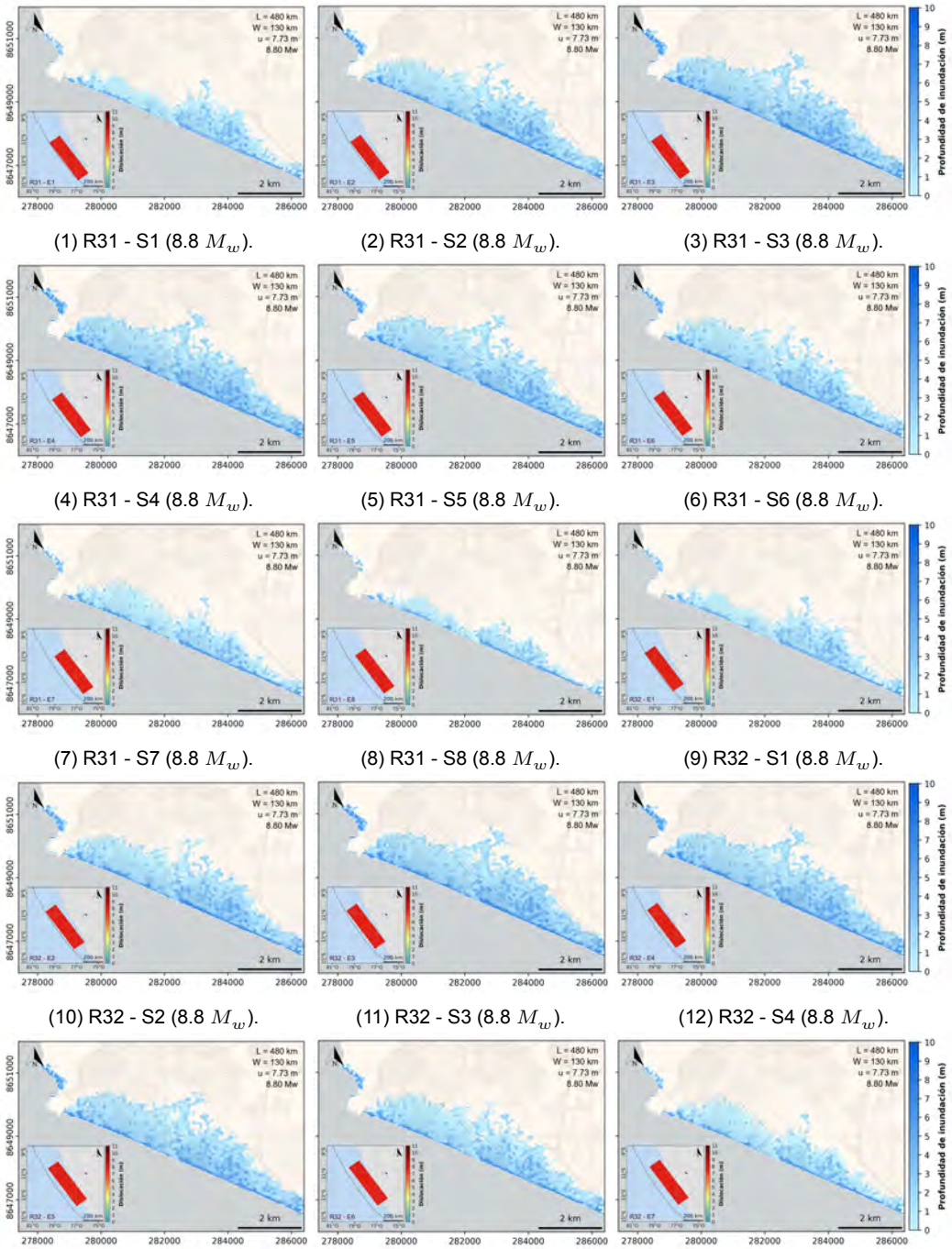
(e) Sección 5. (f) Sección 6.

(g) Sección 7. (h) Sección 8.

FIGURA A.2: Consistencia en la probabilidad de ruptura.

ANEXO B: MAPAS DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI

En la Figura B.1 se muestran los mapas de inundaciones máximas por tsunami para los sismos $\geq$ 8.8 M_w en el distrito de Chorrillos, se indica también el escenario analizado y su magnitud.



(1) R31 - S1 (8.8 M_w). (2) R31 - S2 (8.8 M_w). (3) R31 - S3 (8.8 M_w).

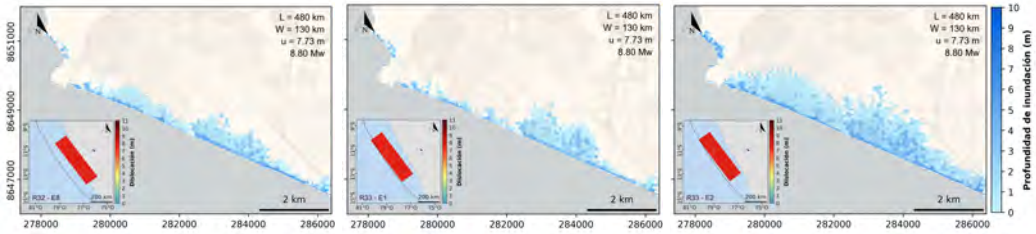
(4) R31 - S4 (8.8 M_w). (5) R31 - S5 (8.8 M_w). (6) R31 - S6 (8.8 M_w).

(7) R31 - S7 (8.8 M_w). (8) R31 - S8 (8.8 M_w). (9) R32 - S1 (8.8 M_w).

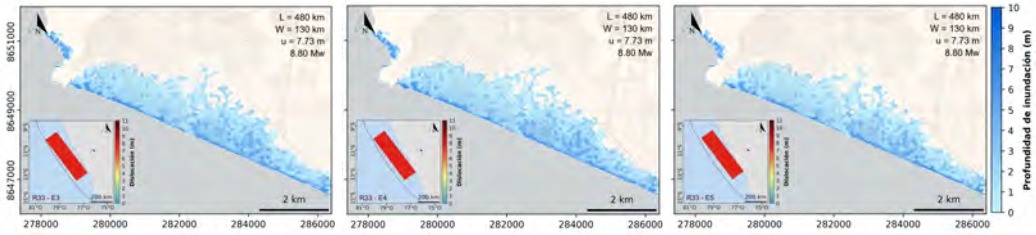
(10) R32 - S2 (8.8 M_w). (11) R32 - S3 (8.8 M_w). (12) R32 - S4 (8.8 M_w).

(13) R32 - S5 (8.8 M_w). (14) R32 - S6 (8.8 M_w). (15) R32 - S7 (8.8 M_w).

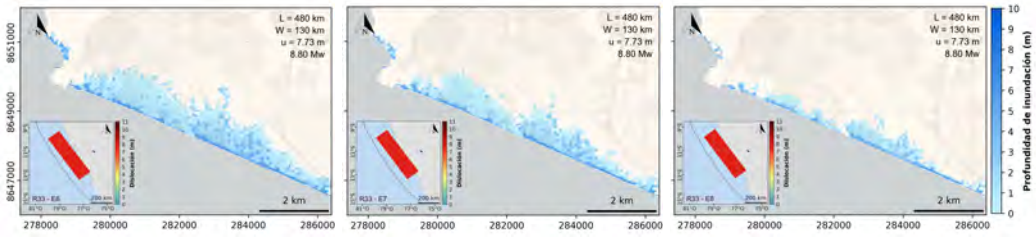
FIGURA B.1: Inundaciones generadas por sismos $\geq$ 8.8 M_w (continúa).



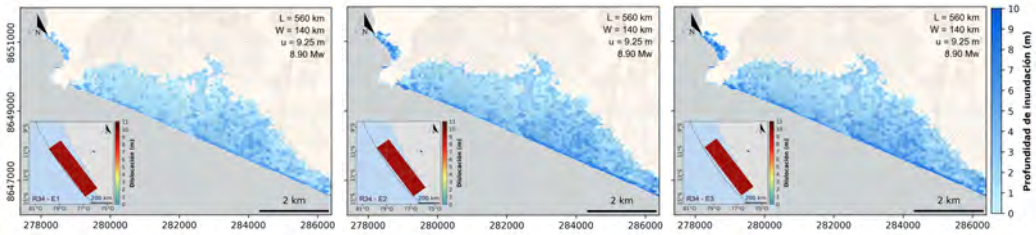
(16) R32 - S8 (8.8 M_w). (17) R33 - S1 (8.8 M_w). (18) R33 - S2 (8.8 M_w).



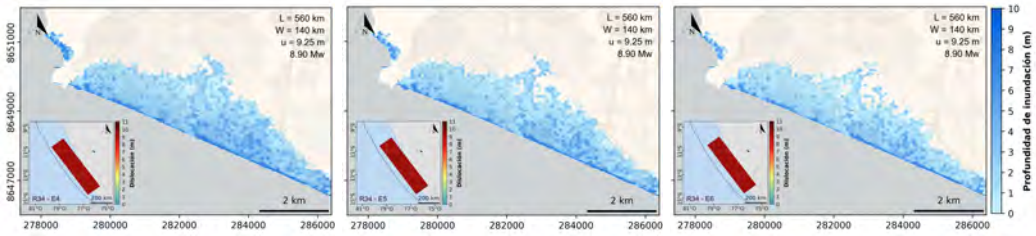
(19) R33 - S3 (8.8 M_w). (20) R33 - S4 (8.8 M_w). (21) R33 - S5 (8.8 M_w).



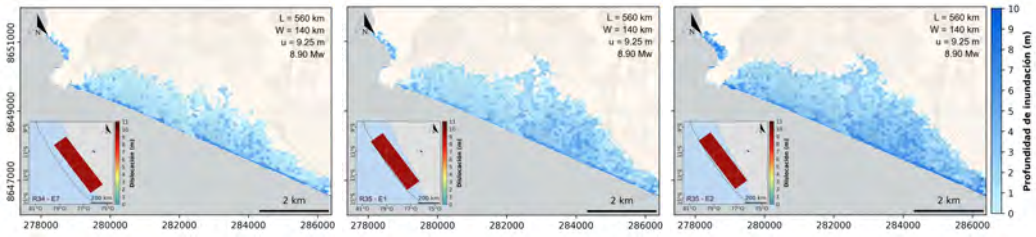
(22) R33 - S6 (8.8 M_w). (23) R33 - S7 (8.8 M_w). (24) R33 - S8 (8.8 M_w).



(25) R34 - S1 (8.9 M_w). (26) R34 - S2 (8.9 M_w). (27) R34 - S3 (8.9 M_w).

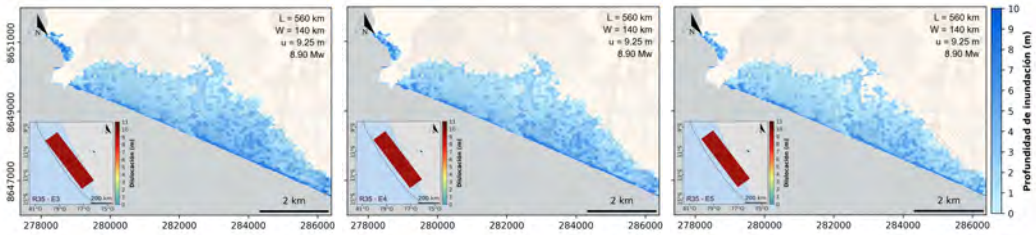


(28) R34 - S4 (8.9 M_w). (29) R34 - S5 (8.9 M_w). (30) R34 - S6 (8.9 M_w).

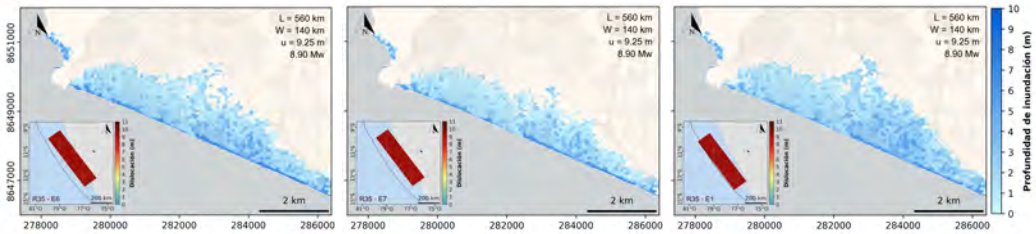


(31) R34 - S7 (8.9 M_w). (32) R35 - S1 (8.9 M_w). (33) R35 - S2 (8.9 M_w).

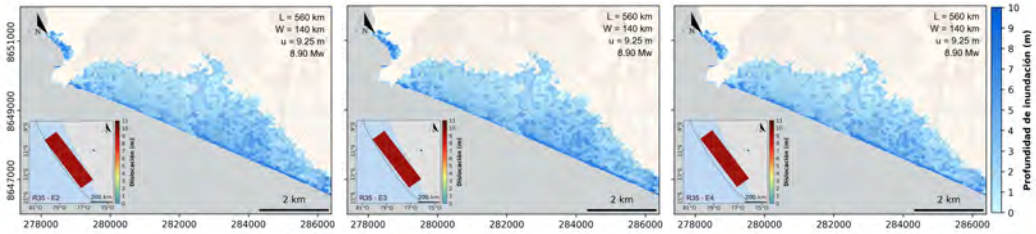
FIGURA B.1: Inundaciones generadas por sismos $\geq$ 8.8 M_w (continúa).



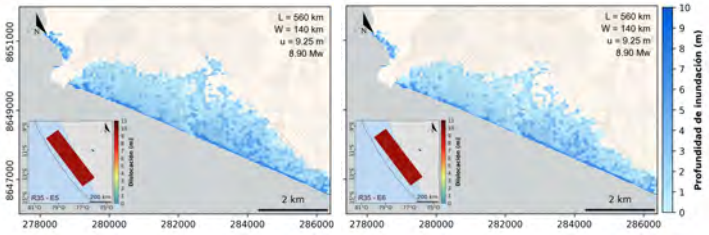
(34) R35 - S3 (8.9 M_w). (35) R35 - S4 (8.9 M_w). (36) R35 - S5 (8.9 M_w).



(37) R35 - S6 (8.9 M_w). (38) R35 - S7 (8.9 M_w). (39) R36 - S1 (9.0 M_w).



(40) R36 - S2 (9.0 M_w). (41) R36 - S3 (9.0 M_w). (42) R36 - S4 (9.0 M_w).



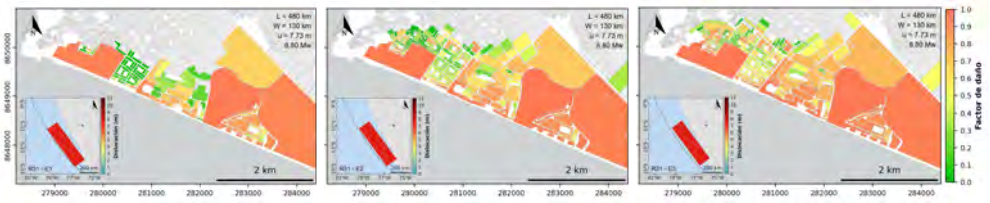
(43) R36 - S5 (9.0 M_w). (44) R36 - S6 (9.0 M_w).

FIGURA B.1: Inundaciones generadas por sismos $\geq$ 8.8 M_w.

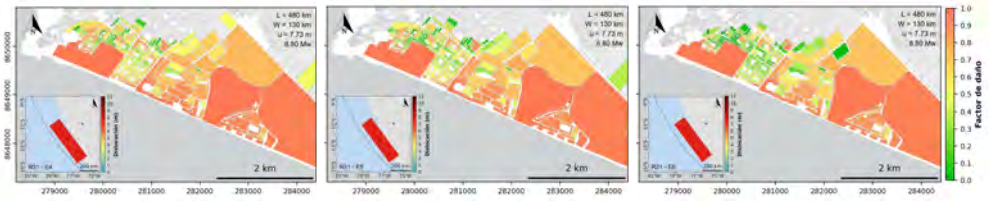
Para una mejor ilustración de las inundaciones en cada escenario, se invita al lector a consultar el siguiente enlace (disponible únicamente en formato digital).

ANEXO C: MAPAS DE FACTORES DE DAÑO

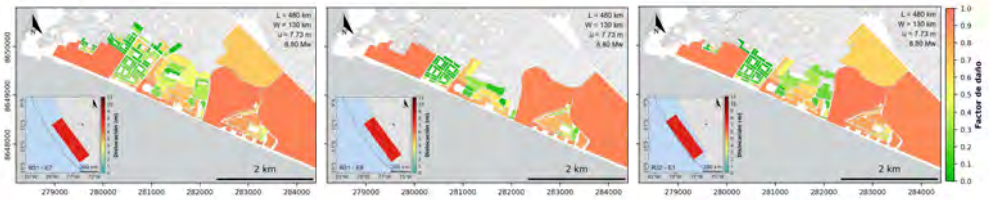
Dado que los sismos $\geq$ 8.8 M_w fueron los de mayor impacto por tsunami en el área de estudio (Figura B.1), la Figura C.1 presenta los mapas de factores de daño producidos por estos escenarios. Como se describió anteriormente, la diferencia de los factores de daño entre los sectores de estudio se debe no solamente al peligro por tsunami (profundidades de inundación), sino también a los factores de castigo de acuerdo a la calidad y estado de conservación de las viviendas.



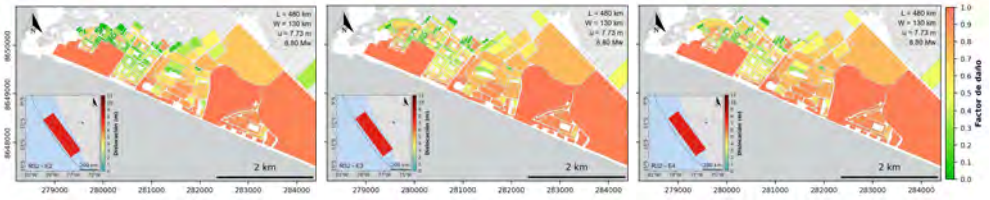
(1) R31 - S1 (8.8 M_w). (2) R31 - S2 (8.8 M_w). (3) R31 - S3 (8.8 M_w).



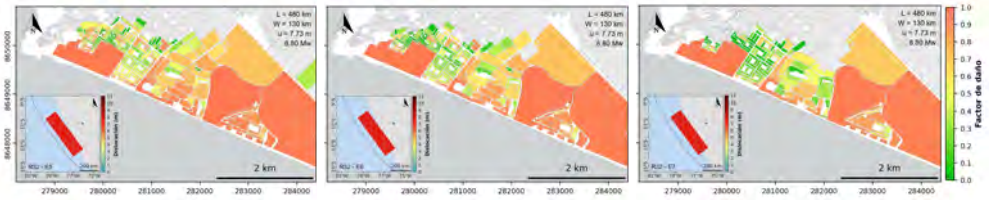
(4) R31 - S4 (8.8 M_w). (5) R31 - S5 (8.8 M_w). (6) R31 - S6 (8.8 M_w).



(7) R31 - S7 (8.8 M_w). (8) R31 - S8 (8.8 M_w). (9) R32 - S1 (8.8 M_w).

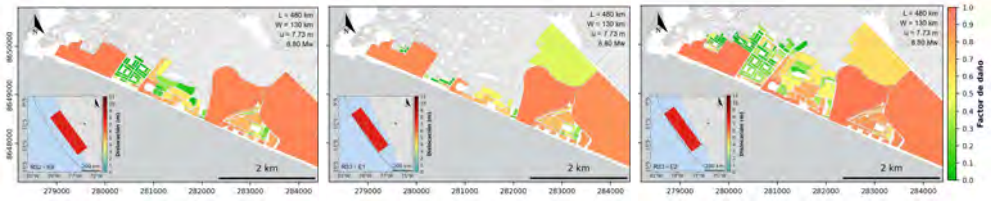


(10) R32 - S2 (8.8 M_w). (11) R32 - S3 (8.8 M_w). (12) R32 - S4 (8.8 M_w).

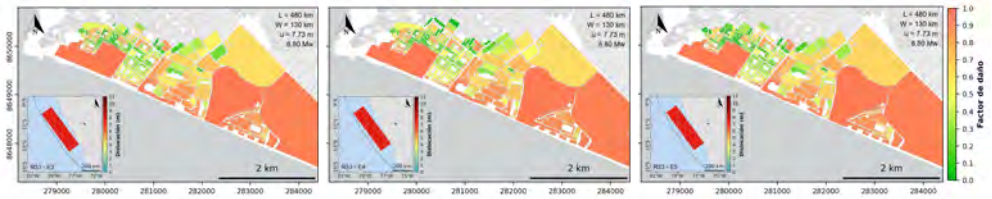


(13) R32 - S5 (8.8 M_w). (14) R32 - S6 (8.8 M_w). (15) R32 - S7 (8.8 M_w).

FIGURA C.1: Factores de daño de sismos $\geq$ 8.8 M_w (continúa).

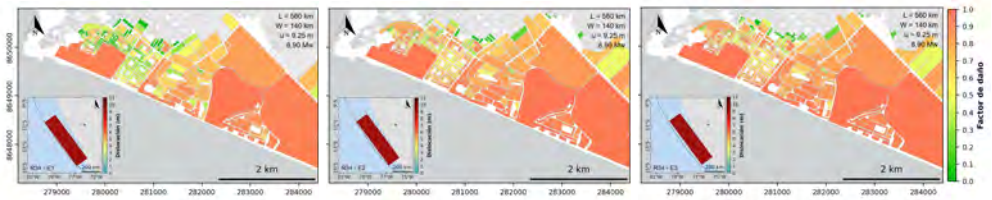


(16) R32 - S8 (8.8 M_w). (17) R33 - S1 (8.8 M_w). (18) R33 - S2 (8.8 M_w).

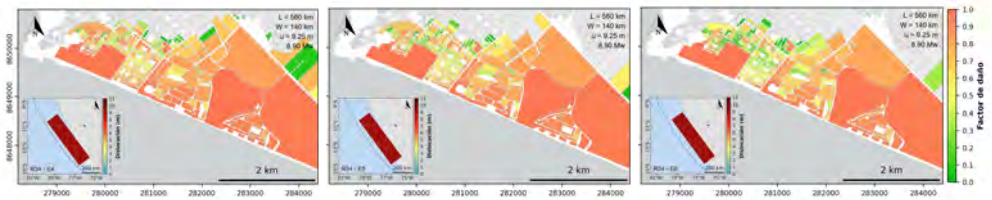


(19) R33 - S3 (8.8 M_w). (20) R33 - S4 (8.8 M_w). (21) R33 - S5 (8.8 M_w).

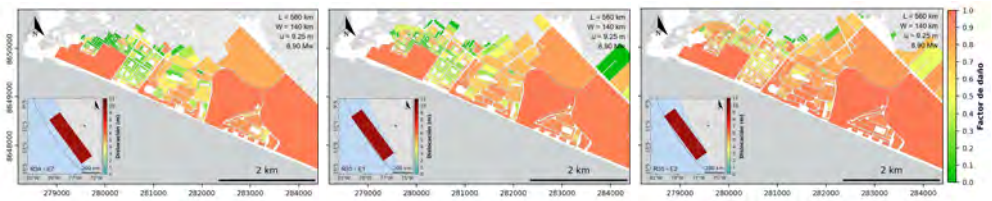
(22) R33 - S6 (8.8 M_w). (23) R33 - S7 (8.8 M_w). (24) R33 - S8 (8.8 M_w).



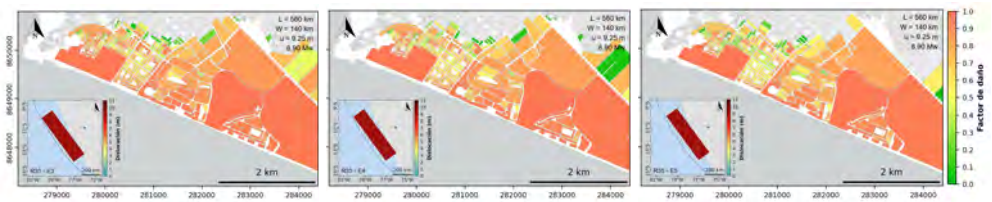
(25) R34 - S1 (8.9 M_w). (26) R34 - S2 (8.9 M_w). (27) R34 - S3 (8.9 M_w).



(28) R34 - S4 (8.9 M_w). (29) R34 - S5 (8.9 M_w). (30) R34 - S6 (8.9 M_w).

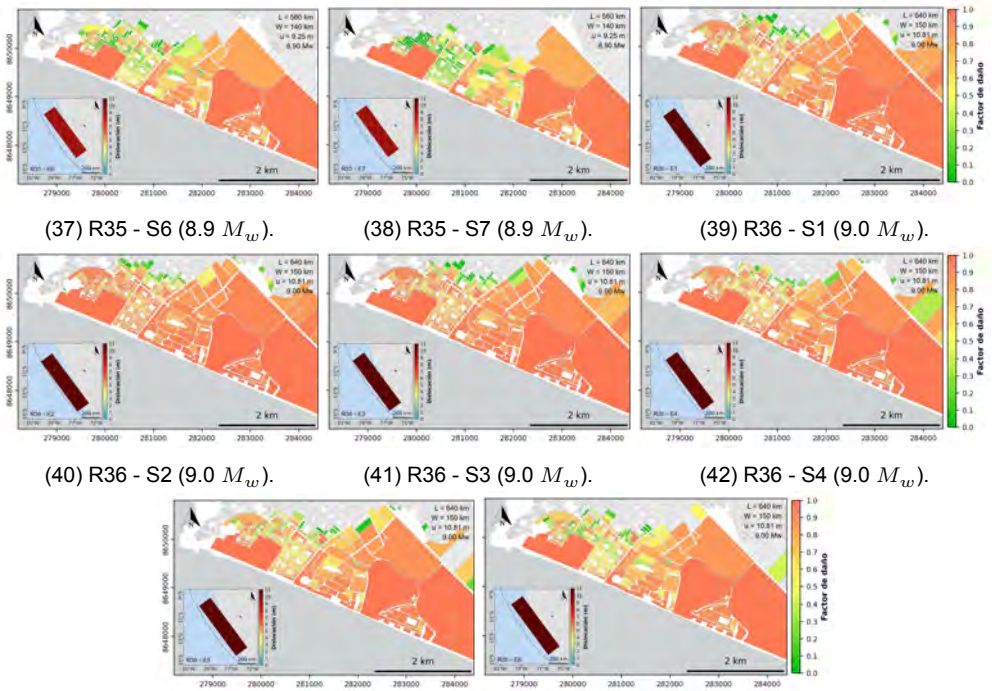


(31) R34 - S7 (8.9 M_w). (32) R35 - S1 (8.9 M_w). (33) R35 - S2 (8.9 M_w).



(34) R35 - S3 (8.9 M_w). (35) R35 - S4 (8.9 M_w). (36) R35 - S5 (8.9 M_w).

FIGURA C.1: Factores de daño de sismos $\geq$ 8.8 M_w (continúa).



(37) R35 - S6 (8.9 M_w). (38) R35 - S7 (8.9 M_w). (39) R36 - S1 (9.0 M_w).

(40) R36 - S2 (9.0 M_w). (41) R36 - S3 (9.0 M_w). (42) R36 - S4 (9.0 M_w).

(43) R36 - S5 (9.0 M_w). (44) R36 - S6 (9.0 M_w).

FIGURA C.1: Factores de daño de sismos $\geq$ 8.8 M_w.