

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**ESTIMACIÓN DE DAÑOS POR TSUNAMI USANDO  
MODELO NUMÉRICO Y DATOS POST-TSUNAMI**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

**BRUNO ADRIANO ORTEGA**

**Lima- Perú**

**2011**

Digitalizado por:

Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse

## **DEDICATORIA**

Mi esposa Elsie porque es la luz que enciende mi vida y porque su constante apoyo hizo realidad este trabajo. A mis padres y hermanas porque son ejemplo de perseverancia, de fe y de sacrificio. Y a mi asesor quien como un amigo me guió en este trabajo.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES</b>	<b>12</b>
1.1. ANTECEDENTES	12
1.2. OBJETIVO	16
1.3. ESCENARIO DE APLICACIÓN	16
1.4. ALCANCES	17
<b>CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEÓRICOS Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE TSUNAMIS</b>	<b>18</b>
2.1. TSUNAMIS	18
2.1.1. Definición	18
2.1.2. Tipos de Tsunamis	18
2.1.3. Generación de Tsunamis por sismos	21
2.2. TEORÍA DE PROPAGACIÓN DE TSUNAMIS	23
2.2.1. Teoría de aguas poco profundas	23
2.2.2. Expresiones de la Teoría de Aguas poco Profundas	23
2.2.3. Integración de las Ecuaciones Gobernantes	25
2.3. MODELACIÓN NUMÉRICA DE TSUNAMIS	30
2.3.1. Método de Diferencias Finitas	30
2.3.2. Discretización de la Ecuaciones	32
2.3.3. Esquema Numérico para los Términos No-lineales	35
2.4. CONDICIONES DE FRONTERA	37
2.4.1. Condiciones de Borde Abierto en Mar adentro	37
2.4.2. Traslado de Condiciones de Borde Frente a la Costa	37
2.5. PARÁMETROS DE FUENTE SÍSMICA	38
<b>CAPÍTULO 3: MODELACIÓN NUMÉRICA DEL TSUNAMI DEL 15 AGOSTO DE 2007</b>	<b>42</b>
3.1. TSUNAMI DEL 15 DE AGOSTO DE 2007	42
3.2. MODELO DE LA FUENTE DEL TSUNAMI	46

3.2.1. Modelo de Desplazamiento Uniforme	46
3.2.2. Modelo de Desplazamiento Heterogéneo	48
3.3. DEFORMACIÓN DEL FONDO MARINO	51
3.4. FORMAS DE ONDAS DEL TSUNAMI	53
3.5. ÁREA Y DISTANCIA DE INUNDACIÓN	57
<b>CAPÍTULO 4: DATOS POST-TSUNAMI Y ANÁLISIS GEOESPACIAL</b>	<b>61</b>
4.1. DATOS DE RECONOCIMIENTO POST-TSUNAMI EN LA ZONA DE APLICACIÓN	61
4.2. ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS GEOESPACIAL	63
4.3. COMPARACIÓN MULTITEMPORAL EN LA ZONA DE APLICACIÓN	67
4.4. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS TEÓRICOS POR INUNDACIÓN	69
<b>CAPÍTULO 5: ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE FRAGILIDAD POR TSUNAMI</b>	<b>72</b>
5.1. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN	72
5.2. ANÁLISIS EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	74
5.2.1. Correlación de Datos	74
5.2.2. Análisis Estadístico	76
5.3. ELABORACIÓN DE CURVA DE FRAGILIDAD PARA DAÑOS ESTRUCTURALES POR TSUNAMI	78
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>80</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>83</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>86</b>

## RESUMEN

La estimación de los daños producidos por inundación debido al ataque de un tsunami es llevada a cabo mediante el uso de un modelo numérico, el cual simula las fases de generación, propagación e inundación las cuales definen el fenómeno tsunami, adicionalmente a esto se usan datos de campo post-tsunami para comparación de los resultado teóricos obtenidos mediante la simulación numérica frente a observaciones del daño real. Finalmente se elaborara una curva o función la cual relaciones las alturas de inundación producto del tsunami y la probabilidad de daños producidos. Este estudio tiene como escenario de aplicación el tsunami ocurrido en el distrito de Tambo de Mora, región Ica, el cual fue consecuencia del terremoto que ocurrió el 15 de Agosto de 2007 a las 6:41pm hora peruana, con magnitud  $M_w$  8.0, cuyo epicentro se localizó en las coordenadas  $13.4^{\circ}S$   $76^{\circ}O$ , con una profundidad de 39 km según la United State Geological Survey (USGS).

En el modelamiento numérico del tsunami, para la fase de generación, la deformación inicial de la superficie del océano o condición inicial del tsunami es determinado con las ecuaciones propuestas por Okada (1985) asumiendo dos fuentes sísmicas de mecanismo focal, modelo de dislocamiento uniforme y modelo de dislocamiento heterogéneo. El primer modelo está basado en la solución sísmica propuesta por CMT Harvard Solution y el segundo modelo basado en los parámetros sísmicos propuestos en Herbert H. (2009) y Fritz H. (2008). El análisis de las señales mareográficas calculadas con ambos modelos muestra que el modelo de dislocamiento heterogéneo presenta mejor consistencia con el mareograma registrado en la estación mareográfica del Callao. Por lo tanto este modelo es usado en las siguientes fases del modelamiento del tsunami.

La Fase de propagación es llevada a cabo basado en la teoría de aguas poco profundas con el código fuente TUNAMI\_N2 (Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Near-field tsunamis, version 2) desarrollado en la Universidad de Tohoku, Japón, el cual fue previamente adaptado para las condiciones de Perú. Los resultados muestran que la ola del tsunami alcanzó las costas del distrito de Tambo de Mora aproximadamente 17

minutos después de ocurrido el sismo y aproximadamente 50 minutos después a la estación mareográfica ubicada en la Punta-Callao.

La fase de inundación es calculada con el mismo modelo numérico y usando una batimetría basada en sondajes hechos por la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) y una topografía tomada de la imagen satelital del sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) ambos con una resolución espacial de 30m. Los resultados teóricos muestran que la altura de inundación máxima es aproximadamente 3.47m y la distancia de inundación máxima es aproximadamente 540m. Los cuales comparados con las mediciones hechas por DHN para el distrito de Tambo de Mora, donde la altura máxima de inundación y la distancia máxima de inundación son de 2.91m y 483.60m respectivamente, presentan una consistencia razonable, considerando los valores asumidos en los cálculos numéricos, la resolución espacial de la topografía y la complejidad del modelo de fuente sísmica.

Finalmente, se estima una función de fragilidad o curva de fragilidad mediante un análisis de correlación estadística de los resultados numéricos de inundación y una base de datos geoespacial, la cual fue elaborada mediante la integración de los datos de campo post-tsunami, recopilados por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) y una comparación multitemporal de imágenes satelitales pre y post evento en el distrito de Tambo de Mora. El resultado de este análisis muestra que la probabilidad de daños por tsunami con alturas de inundación menores a 1.5m es de alrededor 15%, con alturas de inundación entre 1.5m y 2.5m la probabilidad de daño aumenta de 15% a 60%, finalmente con alturas de inundación mayores a 2.5m la probabilidad de daño crece considerablemente. Sin embargo es muy importante señalar que esta curva de fragilidad no solo representa los daños producidos por la inundación por el tsunami, sino también por los efectos del propio terremoto. Siendo esta la razón fundamental por la cual esta curva de fragilidad representa un resultado preliminar para establecer una relación cuantitativa entre las alturas de inundación por tsunami y los daños producidos por este. Adicionalmente, esta curva de fragilidad solo representa las características estructurales locales presentes en las edificaciones, tales como el material de edificación, albañilería y adobe, así como la altura de edificación que es de dos pisos.

## LISTA DE CUADROS

Tabla 1.1.	Tsunamis históricos que han afectado las cotas del Perú de acuerdo a NGDC tsunami database.	14
Tabla 2.1.	Tsunamis locales o regionales que causaron muertes desde 1975.	20
Tabla 2.2.	Tsunamis que causaron muertes cuya distancia de la fuente es mayor a 1000 Km.	21
Tabla 2.3.	Valores para el coeficiente de Manning.	30
Tabla 3.1.	Mediciones realizadas por DHN en la ciudad de Tambo de Mora.	44
Tabla 3.2.	Parámetros de fuente sísmica para el modelo de dislocamiento basados CMT y Papazacho 2004.	47
Tabla 3.3.	Parámetros de fuente sísmica para los cuatros sub-planos de falla que definen el modelo de dislocamiento heterogéneo, basados en los trabajos de Herbert H. (2009) y Fritz H.et al. (2008).	51
Tabla 3.4.	Limites para cada sub-dominio de cómputo y resoluciones espaciales.	53
Tabla 4.1.	Criterio para estimar el daño por tsunami en las edificaciones de distrito de Tambo de Mora.	68
Tabla 4.2.	Resultado del análisis visual de las estructuras dañadas por el tsunami en el distrito de Tambo de Mora.	68
Tabla 5.1.	Resultado del análisis GIS. Tamaño de la muestra (N = 658).	76
Tabla 5.2.	Parámetros para la función de fragilidad obtenidos a través del análisis de regresión. R2 es determinado en el análisis de regresión por mínimos cuadrados.	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Sismos ocurridos en el Perú desde el año 1973 al año 2010 con magnitudes mayores que Mw 5.	13
Figura 1.2.	Ubicación de los terremotos que produjeron cuatro de los tsunamis más grandes que han afectado al Perú y que fueron registrados en otros países según NGDC tsunami database.	14
Figura 1.3.	La erosión producto del tsunami de 23 de Junio de 2001 en la playa la Punta-Camaná, la altura máxima en esta zona fue hasta un máximo de 7.5m (Izquierda). Un bote pesquero arrastrado 1.3km en la zona de inundación, la cual llego a 2km de distancia, producto del tsunami de 15 de Agosto de 2007 (Derecha).	15
Figura 1.4.	Caleta de Tambo de Mora	17
Figura 2.1.	Esquema del mecanismo de generación del la mayoría de tsunamis en zonas sísmicas de subducción.	22
Figura 2.2.	Sistema de coordenadas en la aproximación por aguas poco profundas.	25
Figura 2.3.	Definición se los tensores de esfuerzo.	27
Figura 2.4.	Geometría espacial del sistema escalonado de salto de rana.	33
Figura 2.5.	Esquema escalonado del salto de rana en los dominios de x e y.	34
Figura 2.6.	Geometría para el esquema contra el viento	37
Figura 2.7.	Condición de frontera la el frente de agua en terreno.	38
Figura 2.8.	Parámetros de fuente sísmica para la generación de la condición inicial del tsunami.	39
Figura 2.9.	Mapa índice de los epicentros de los terremotos usados por Papazacho et al. 2004.	40
Figura 3.1.	Ubicación de epicentro (Estrella azul) y distribución espacial de las réplicas de acuerdo a la USGS (Puntos rojos).	42
Figura 3.2.	Mediciones post-tsunami realizadas por DHN (disponible en <a href="http://www.dhn.mil.pe/">http://www.dhn.mil.pe/</a> ) en la distrito de Tambo de Mora.	43
Figura 3.3.	Alturas de inundación y run-up del tsunami del 15 de Agosto de 2007 a lo largo de la costa sur del Perú.	44
Figura 3.4.	Registro mareográfico del tsunami del 15 de Agosto de 2007 registrado en la estación Callao.	45
Figura 3.5.	Señal del tsunami del 15 de Agosto de 2007 registrado en la estación mareográfica del Callao.	46
Figura 3.6.	Modelo de dislocamiento uniforme basado en la solución sísmica	48

	de CMT para el terremoto del 15 de Agosto de 2007.	
Figura 3.7.	Distribución del dislocamiento del plano de falla obtenido de la inversión de ondas sísmicas de cuerpo.	49
Figura 3.8.	Distribución del dislocamiento del plano de falla basados en los trabajos de Herbert (2009) y Fritz et al. (2008).	50
Figura 3.9.	Deformación de la superficie del océano basados en la solución sísmica propuesta por Global CMT y Papazacho et al. (2004).	52
Figura 3.10.	Deformación de la superficie del océano basados en los trabajos de Herbert (2009) y Fritz et al (2008).	52
Figura 3.11	Esquema de la anidación de los 4 sub-dominios para el cálculo de la propagación del tsunami.	54
Figura 3.12.	Tomas instantáneas, para los tiempos 0, 15, 30 y 45 minutos, de la propagación del tsunami a partir de la condición inicial calculada usando el modelo de fuente sísmica de dislocamiento uniforme.	55
Figura 3.13.	Tomas instantáneas, para los tiempos 0, 15, 30 y 45 minutos, de la propagación del tsunami a partir de la condición inicial calculada con el modelo de fuente sísmica de dislocamiento heterogéneo.	56
Figura 3.14.	Comparación del la forma de onda registrada en la estación mareográfica del tsunami del 15 de Agosto de 2007.	57
Figura 3.15	Sub-dominio para el modelo numérico de inundación por tsunami construido a partir de los datos batimétricos proporcionados de DHN y el modelo digital de elevación tomado de ASTER.	58
Figura 3.16.	Diagrama de flujo para la modelación numérica del tsunami del 17 de Agosto de 2007.	59
Figura 3.17.	Mapa de inundación para el distrito de Tambo de Mora, provincia de Ica.	60
Figura 4.1.	Ficha de campo usada en los trabajos de levantamiento de datos de daños post-terremoto.	62
Figura 4.2.	a) Muestra una pobladora señalando la altura de inundación producto del tsunami. b) La facha de una vivienda con rastros remanentes de la inundación por el tsunami.	63
Figura 4.3.	Base de datos geoespacial post-evento recopilado y elaborado en el CISMID.	64
Figura 4.4.	Distribución del número de pisos de las viviendas en el distrito de Tambo de Mora.	64
Figura 4.5.	Distribución del tipo de material de construcción de las viviendas	65

	en el distrito de Tambo de Mora.	
Figura 4.6.	Distribución del tipo de uso urbano de las viviendas en el distrito de Tambo de Mora.	66
Figura 4.7.	Distribución de los niveles de daño observados en las viviendas en el distrito de Tambo de Mora.	67
Figura 4.8.	Distribución de los niveles de daño por tsunami resultado del análisis visual multitemporal en el distrito de Tambo de Mora.	69
Figura 4.9.	Comparación de los resultados teóricos del modelo numérico en términos de distancia de inundación con las medidas presentadas en el reporte de DHN para el distrito de Tambo de Mora.	70
Figura 4.10.	Comparación lineal entre los resultados teóricos del modelo numérico y las mediciones presentadas por DHN en términos de distancia de inundación.	71
Figura 5.1	Proceso del desarrollo de la curva de fragilidad para daños por tsunami Koshimura et al. 2009.	73
Figura 5.2	Distribución espacial de la interpretación de los daños por tsunami a nivel de lote.	74
Figura 5.3	Histograma del número de lotes con daño grave y daño severo clasificado por rangos de alturas de inundación.	75
Figura 5.4	Gráfica de alturas de inundación y el porcentaje de viviendas dañadas por el tsunami.	77
Figura 5.5	Gráfica de los valores de altura de inundación versus los valores de $\Phi^{-1}$ calculados de la Tabla 5.1.	77
Figura 5.6	Función de Fragilidad (curva de fragilidad) para daños de edificación, en términos de la altura de inundación obtenida del modelo numérico.	79

## LISTA DE SÍMBOLOS

$g$	=	Aceleración de la gravedad.
$t$	=	Variable para el tiempo.
$(x, y)$	=	Coordenadas en la dirección horizontal.
$z$	=	Coordenada en la dirección vertical.
$p$	=	Presión de agua.
$\rho$	=	Densidad del agua.
$u$	=	Vector velocidad en la dirección x.
$w$	=	Vector velocidad en la dirección y.
$F_x$	=	Fuerza externa en la dirección x.
$F_z$	=	Fuerza externa en la dirección vertical.
$\eta$	=	Altura del agua sobre el nivel del océano.
$h$	=	Profundidad del océano.
$M$	=	Flujo de descarga del agua en la dirección x.
$N$	=	Flujo de descarga del agua en la dirección y.
$\bar{u}$	=	Velocidad promedio del agua en la dirección x.
$\bar{v}$	=	Velocidad promedio del agua en la dirección y.
$\beta$	=	Factor de corrección por momento.
$\tau$	=	Tensor de esfuerzo.
$D$	=	Altura total del agua.
$n$	=	Coefficiente de rugosidad de Manning.
$\Delta t$	=	Resolución temporal para el modelo numérico.
$\Delta x$	=	Resolución espacial para el modelo numérico.
$P(x)$	=	Probabilidad de ocurrencia de daño por tsunami
$\Phi$	=	Función de distribución estándar.
$\mu$	=	Media de la muestra.
$\sigma$	=	Desviación estándar de la muestra.

## INTRODUCCIÓN

El Perú está permanentemente expuesto a los efectos de los fenómenos de origen tecnológico y natural. El Círculo de Fuego del Pacífico, la región tropical y subtropical de América del Sur y la Cordillera de los Andes, influyen en gran medida en la sismicidad y los cambios climáticos en nuestro territorio. Es por esto que el Perú se ve constantemente afectado por terremotos, deslizamientos de tierra, aluviones, inundaciones, sequías, cambios ecológicos en el mar, tsunamis, etc. Estos afectan, en mayor o menor grado, la estabilidad social y económica de nuestras ciudades.

La principal fuente generadora de eventos sísmicos que afectan esta región es la zona de subducción, definida por la interacción de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Esta fuente puede generar eventos de gran magnitud, los que, según la historia sísmica, en la zona de la costa central pueden alcanzar los 8.2 grados en la escala de Richter. Así mismo, la relativa proximidad de la fuente sismogénica hace que la intensidad del movimiento sísmico sea bastante considerable en la zona urbana.

El Perú ha experimentado algunos de los más grandes tsunamis que han ocurrido en el mundo, el tsunami histórico más grande que ha sucedido en el Perú es del 28 de Octubre de 1746 donde, según Silgado 1978, se relata que el mar avanzó como una legua, aproximadamente 5.27 km, tierra adentro y de 4000 habitantes del que se componía la población del Callao en ese entonces solo pudieron salvarse unos 200, este fatal histórico evento y los dos últimos terremotos acompañados con tsunamis que han ocurrido en el Perú, el del 23 de Junio de 2001 y el del 15 de Agosto de 2007, dejan claro que el peligro por ataque de tsunami en el Perú es elevado viéndose en la necesidad de estudiar este fenómeno y desarrollar técnicas que ayuden a la reducción del riesgo por tsunami.

En este estudio se estima los daños por tsunami mediante un modelamiento numérico y datos de daños post-tsunami proponiendo una relación teórica entre la probabilidad de daño y las alturas de inundación. En el capítulo 1 se presenta una descripción general de la sismicidad histórica y los

últimos tsunamis históricos que han ocurrido en el Perú para luego definir los alcances y el área de estudio en este trabajo. En el capítulo 2 se presentan los aspectos teóricos de los tsunamis y el modelamiento numérico de estos. En el capítulo 3 se presenta la metodología empleada para el modelamiento numérico del tsunami del 15 de Agosto de 2007, así como también los resultados del modelo numérico en las tres fases de un tsunami, generación, propagación e inundación. En el capítulo 4 se presenta un análisis estadístico de la base de datos de daños recolectada en el área de estudio por el CISMID, también se definen los criterios para la elaboración de la base de datos geoespacial post-tsunami basado en la inspección visual multitemporal y además se presentan los resultados de este análisis. Finalmente en el capítulo 5 se describe el análisis estadístico empleado para la estimación de la curva de fragilidad para daños por tsunami en el área de estudio la cual relacionaría la probabilidad de daño y las alturas de inundación.

## CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES

El Perú está ubicado en una zona altamente sísmica, donde la principal fuente de la alta sísmica es la interacción de la Placa de Nazca y la Placa Suramericana. Como resultado de esta interacción el Perú ha experimentado numerosos terremotos a lo largo de su historia, la Figura 1.1 muestra los sismos históricos alrededor del Perú con magnitudes mayores que 5, desde 1973 a 2010 según la base de datos de United States Geological Survey (USGS), esta figura muestra que la zona sísmicamente más activa en el Perú es la que corresponde a la zona sur entre Lima y Tacna, también se observa que una gran cantidad de los sismos tiene una profundidad focal que varía entre 0 km a 50 km, de acuerdo a su profundidad estos sismos están definidos como sismos superficiales.

De la Figura 1.1 también se puede observar que la zona norte del país, desde Lima hasta Tumbes, la actividad sísmica es mucho menor comparado con la zona sur, sin embargo se sabe que toda la zona occidental de América del Sur es una zona altamente sísmica, lo que se conoce como zona del Circulo del Fuego. Por otro lado, la zona correspondiente a Lima-Callao, estaría experimentando el fenómeno llamado Silencio Sísmico, que es la falta de eventos sísmicos de considerable magnitud en una zona sísmicamente activa, lo que significa que la energía que se libera en un sismo cuando este ocurre se está acumulando. Entonces, de acuerdo a este concepto, la probabilidad de que ocurra un sismo de gran magnitud en el área correspondiente a Lima-Callao es muy alta.

Por las referencias históricas de Silgado (1978) y las evaluadas instrumentalmente, la ciudad de Lima ha sido sometida a una serie de sismos de gran intensidad y mucho de estos acompañados con tsunamis, durante los cuales en múltiples oportunidades se han registrado cuantiosos daños materiales y pérdidas de vidas humanas principalmente a lo largo de las zonas costeras del Perú debido a que la mayoría de las urbes modernas en el país se han concentrado en estas áreas, obedeciendo a la importancia de la pesca, el

comercio y la industria; y con ello ha aumentado el riesgo de la población ante fenómenos naturales como los tsunamis.

El Perú ha experimentado algunos de los más grandes tsunamis que han ocurrido en el mundo, de acuerdo con la base de tsunami tomada de la National Geographic Data Center (NGDC) tsunami database, son 4 los grandes tsunamis que han afectado las cosas peruanas y que han sido registrados también en otros países (Figura 1.2 y Tabla 1.1).

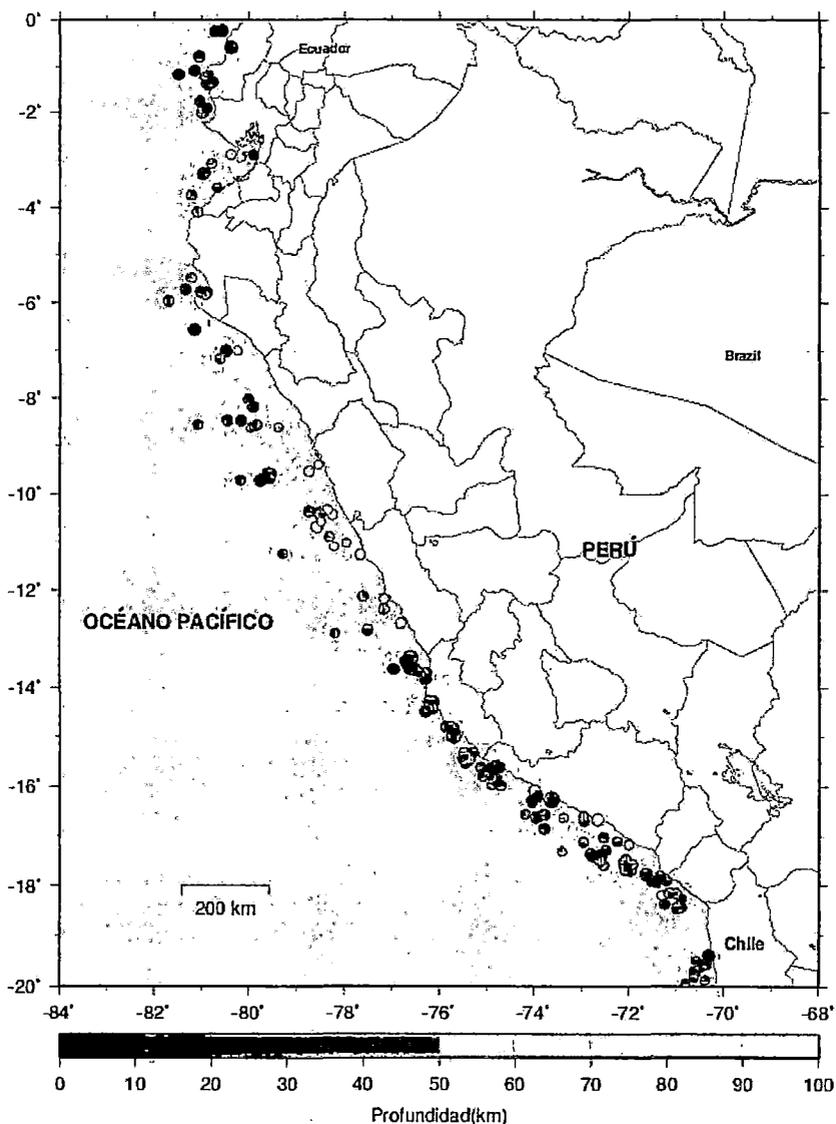


Figura 1.1. Sismos ocurridos en el Perú desde el año 1973 al año 2010 con magnitudes mayores que  $M_w$  5, ploteados de acuerdo a su profundidad (barra horizontal) y magnitud (tamaño de los puntos que representan los eventos). Eventos tomados de la base de datos de la (USGS).

Tabla 1.1. Tsunamis históricos que han afectado las costas del Perú de acuerdo a NGDC tsunami database

Fecha	Magnitud (Mw)	Área afectada
21/02/1996	7.5	Chimbote, Callao
12/11/1996	7.7	Chincha alta, Arica, Nazca, Marcona
23/06/2001	8.4	Camaná, Moquegua, Tacna,
15/08/2007	8.0	Nazca, Pisco, Lima

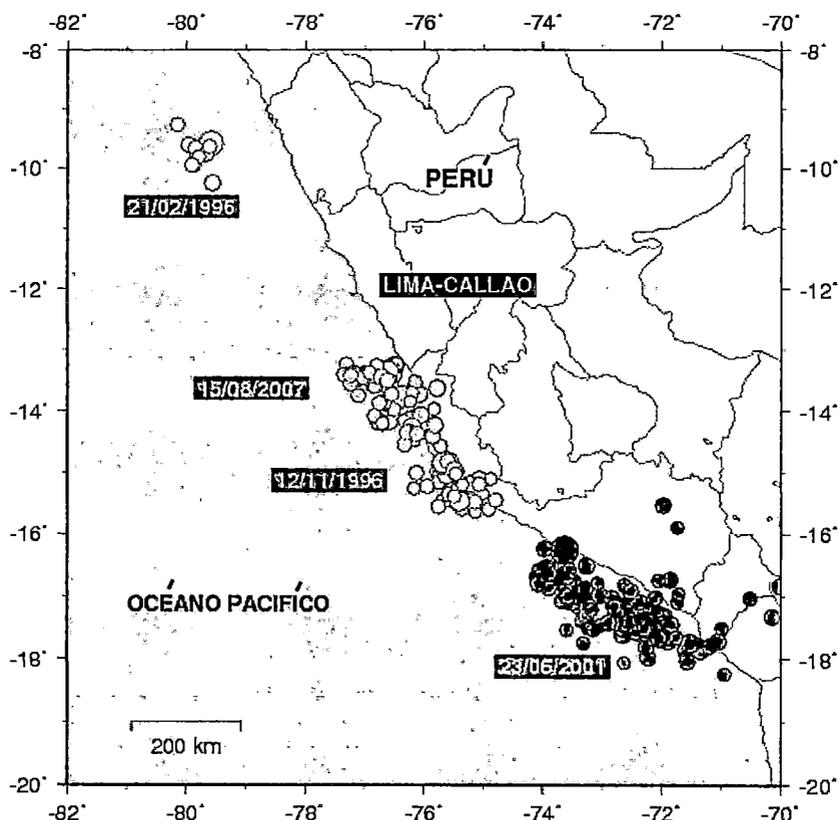


Figura 1.2. Ubicación de los terremotos que produjeron cuatro de los tsunamis más grandes que han afectado al Perú y que fueron registrados en otros países según NGDC tsunami database.

Por ejemplo, el tsunami que ocurrió el 23 de Junio de 2001 en la zona sur del Perú fue generado por un sismo de magnitud  $M_w$  8.4 con epicentro  $16.26^\circ$  S  $73.64^\circ$  O, de acuerdo a USGS por lo menos 75 personas fallecieron, donde 26 a causa del tsunami ocurrido, 2687 personas heridas, 17510 viviendas fueron destruidas y 35549 viviendas fueron afectadas en las aéreas de Arequipa, Camaná y Tacna. Otro ejemplo más reciente en el Perú es el tsunami que ocurrió el 15 de Agosto de 2007, donde las aéreas costeras de Chincha y

Paracas fueron las más afectadas, en Pisco se entrevistó a los pobladores en las cercanías a las zonas costeras afectadas, quienes manifestaron que 20 minutos después de ocurrido el sismo, arribaron a la costa una serie de olas que inundaron sus viviendas. Según el reporte de Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN), las olas alcanzaron alturas máximas de inundación (run-up) de hasta 2.91m y para unas distancias de 102.7m. (Figura 1.3).

Por otro lado, según las crónicas históricas el Callao fue afectado por un tsunami el 28 de Octubre de 1746 que produjo la muerte de más del 96% de la población en ese entonces, de acuerdo a las crónicas este tsunami produjo una ola de más de 21m de alturas y la primera hora arribó a las costas treinta minutos después de ocurrido el terremoto.

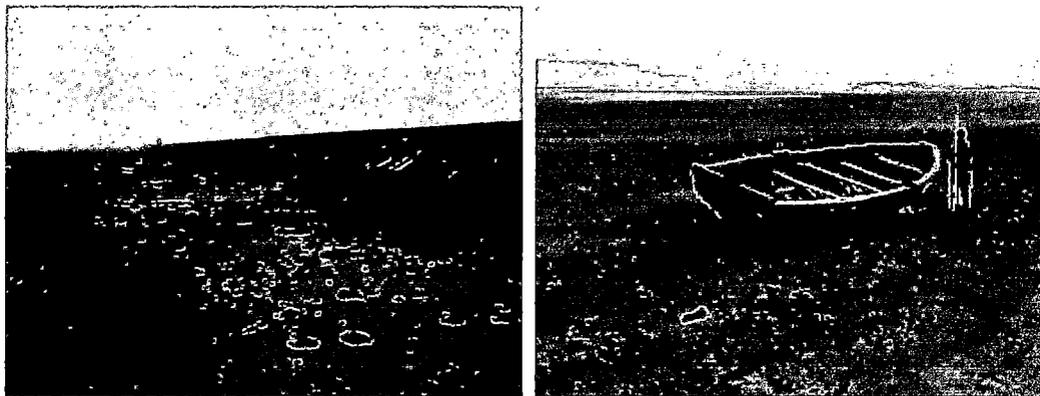


Figura 1.3. La erosión producto del tsunami de 23 de Junio de 2001 en la playa la Punta-Camaná, la altura máxima en esta zona fue hasta un máximo de 7.5m (Izquierda). Un bote pesquero arrastrado 1.3km en la zona de inundación, la cual llego a 2km de distancia, producto del tsunami de 15 de Agosto de 2007 (Derecha).

Hasta la fecha la peor catástrofe producida por un tsunami en la historia, ocurrió en el océano Indico el 26 de diciembre de 2004, cuando un terremoto de magnitud  $M_w$  9.3 con epicentro fuera de la costa noroeste de Sumatra, Indonesia, produjo un tsunami transoceánico que alcanzó a Tailandia y Malasia por el este, y Sri Lanka, India, las Maldivas y África por el oeste. Alrededor de 228000 personas perdieron la vida y más de un millón de personas fueron desplazadas, perdiendo sus casas, propiedades y bienes. La magnitud de la destrucción y muertes causó la inmediata respuesta de los líderes mundiales, lo que condujo el desarrollo de los sistemas de mitigación y alerta de tsunamis para el océano Índico en el año 2005. Este evento también aumentó la conciencia del

riesgo de tsunami globalmente, y se establecieron nuevos sistemas en el Caribe, el Mediterráneo y el Atlántico.

Por otro lado, en poco más de un año en el mundo han ocurrido dos tsunamis de gran magnitud que causaron enormes daños materiales y pérdidas de vidas humanas, el primero generado por un terremoto de magnitud  $M_w$  8.8 con epicentro frente a las costas sur de Chile que afecto las localidades de Pelluhue y Curanipe registrándose olas de hasta 5 m (USGS), el segundo y el más reciente es el ocurrido el 11 de Marzo de presente año, generado por un terremoto de  $M_w$  9.0 que afecto fuertemente a las localidades costeras de Sendai registrándose olas de hasta 10 m (USGS).

## 1.2. OBJETIVO

El objetivo general de esta investigación es modelar y analizar los daños producidos por ataque de tsunamis (área inundada y altura máxima de la ola).

Los objetivos específicos son: La elaboración de una base de datos de daños por tsunami usando sistemas de información geográfica y datos de campo post-tsunami. Comparar los resultados obtenidos, del modelo numérico, con los datos de campo post-tsunamis. Estimar una relación teórica entre los daños por tsunami y las alturas de inundación del tsunami.

## 1.3. ESCENARIO DE APLICACIÓN

El escenario de aplicación de esta investigación está localizado en el distrito de Tambo de Mora, región Ica, cuyos límites geográficos son aproximadamente en longitud entre  $71^{\circ}12'30''$  W -  $71^{\circ}10'30''$  W y en latitud entre  $13^{\circ}28'30''$  'S -  $13^{\circ}26'00''$  S (Figura 1.4).

El escenario de aplicación comprende superficies de zona costera marina y zona costera continental, teniendo como eje un litoral costero poco sinuoso en el extremo sur. Comprende un espacio continental alargado de 3.50 Km<sup>2</sup> aproximadamente, con un largo de 4.85Km, y anchos, entre 1.30Km y 0.8Km, la superficie topografía se eleva desde los 0.00 m.s.n.m. hasta 34.00 m.s.n.m. donde las cotas de mayor altura se ubican al Noreste; aproximadamente el 60% del área es plana por debajo de los 18 m.s.n.m. La zona costera marina presenta una batimetría de pendiente regular con profundidades máximas alrededor de 50km y 47km en la zona norte y en la zona sur respectivamente.

## 1.4. ALCANCES

Los alcances del estudio están comprendidos en la zona costera que va desde la latitud  $13^{\circ}26'00''\text{S}$  culminando en la latitud  $13^{\circ}28'30''\text{S}$  con una longitud de línea costera de aproximadamente 4.85 Km, además corresponde al tsunami ocurrido el 15 de Agosto de 2007 en el distritito de Tambo de Mora, se describen las características físicas de la zona inundable y la propuesta de una curva de fragilidad estimada usando datos pos-tsunami de daños.



Figura 1.4. Caleta de Tambo de Mora, Los rectángulos celestes representan los lotes en esta zona. La imagen de fondo fue construida con imágenes de Google Earth de fecha 19/02/2004.

## **CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEÓRICOS Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE TSUNAMIS**

### **2.1. TSUNAMIS**

#### **2.1.1. DEFINICIÓN**

La palabra “tsunami” es un término japonés que significa “ola” (nami) en el “puerto” (tsu). Una serie de ondas de longitud de onda y periodo muy largos, usualmente generados por perturbaciones asociados con terremotos ocurridos por de bajo y cercanos a la superficie del fondo del océano. Los tsunamis también son llamados “ondas sísmicas del mar”, e incorrectamente llamados “marejadas”. Erupciones Volcánicas en el fondo del mar, deslizamientos submarinos y desprendimiento de rocas en la costa también pueden generar tsunamis. Así como también el impacto de un meteorito de gran magnitud en el océano.

Estas ondas pueden llegar a alcanzar enormes dimensiones y pueden atravesar cuencas oceánicas enteras con poca pérdida de energía. Éstas avanzan como ondas gravitatorias ordinarias con un periodo típico entre 10 y 60 minutos. Los tsunamis se profundizan e incrementan en altura conforme se acercan a aguas poco profundas, inundando áreas en zonas bajas y donde la batimetría causa la amplificación de las ondas, éstas pueden romperse y causar enormes daños.

#### **2.1.2. TIPOS DE TSUNAMIS**

Básicamente, de acuerdo a la distancia que recorren los tsunamis desde su fuente generadora hasta la zona afectada, estos se dividen en dos tipos:

*Tsunami Local o Regional.* Mucho de los más destructivos y frecuentes tsunamis pueden ser clasificados con locales o regionales, es decir que sus efectos destructivos se limitan a las áreas costeras cercanas a la fuente y a 100 Km de distancia desde la fuente generadora. Este tipo de tsunamis es generado usualmente por sismos. Entre 1975 y 2009 han ocurrido 34 tsunamis locales o regionales, donde 23 ocurrieron en el Océano Pacífico y mares adyacentes y

resultaron en numerosas pérdidas de vidas humanas y daños materiales. Por ejemplo, de acuerdo con la International Tsunami Information Center (ITIC), en 1983 un sismo con epicentro en el mar de Japón causó daños severos en las áreas costeras de Japón y Corea, provocando más de US\$ 800 millones en daños y más de 100 fallecidos (Tabla 2.1).

Después de nueve años sin la presencia de eventos sísmicos, once destructivos tsunamis locales ocurrieron en un periodo de siete años desde 1992 a 1998, produjeron más de 5300 muertes y centenares de millones de dólares en daños a la propiedad. Los dos eventos más recientes son los ocurridos en Chile 2010 y en Japón 2011, el primero generado por un terremoto de magnitud  $M_w$  8.8 que afectó las localidades de Pelluhue y Curanipe registrándose olas de hasta 12 m (USGS), el segundo y el más reciente es el ocurrido el 17 de Marzo de presente año, generado por un terremoto de  $M_w$  9.0 que afectó fuertemente a las localidades costeras de Sendai registrándose olas de hasta 10 m (USGS).

*Teletsunamis o Tsunamis distantes.* Tsunami originado por una fuente distante, generalmente a distancias de más de 1,000 km y a más de 3 horas de tiempo de viaje de las ondas de tsunami desde su origen. Mucho menos frecuentes, pero con un potencial de amenaza más alto que los locales o regionales son los tsunamis distantes que afectan toda la cuenca del Pacífico. Normalmente empiezan como un tsunami local que causa destrucción extensa cerca de la fuente, estas ondas continúan viajando por toda la cuenca del océano con energía suficiente para causar víctimas adicionales y destrucción en las costas ubicadas a más de mil kilómetros de la fuente. En los últimos doscientos años, ha habido por lo menos 26 tsunamis destructivos de este tipo. El tsunami Transpacífico más destructivo de la historia reciente, de acuerdo a ITIC-2008 (Tabla 2.2), fue generado por un potente terremoto frente a la costa de Chile el 22 de mayo de 1960. Todos los pueblos costeros chilenos entre los paralelos 36° S y 44° S fueron destruidos o fuertemente dañados por la acción del tsunami y del sismo. El Tsunami y el terremoto causaron una pérdida de 2000 vidas humanas, 3000 heridos, 2000000 de damnificados y US\$ 550 millones de daños materiales. En el pueblo costero de Corral, Chile, las alturas de las ondas fueron estimadas en 20 metros. El tsunami causó 61 muertes en Hawái, 20 en Filipinas y 139 o más en Japón. Los daños estimados fueron de US\$ 50 millones en el Japón, US\$ 24 millones en Hawái y algunos millones más a lo largo de la costa Oeste de los Estados Unidos y Canadá.

Tabla 2.1. Tsunamis locales o regionales que causaron muertes desde 1975, (\*\*) El número de víctimas podría incluir víctimas por el terremoto, (\*) Tsunamis generados por deslizamientos. Fuente ITIC-2008.

<b>Fecha</b>	<b>Localización de la Fuente</b>	<b>Fallecidos o Desaparecidos estimados</b>
31/10/1975	Fosa de Filipinas	1
29/11/1975	Hawaii. USA	2
16/08/1976	Moro Bay. Filipinas	4456
19/08/1977	Sumbawa, Indonesia	189
18/07/1979	Lebata Island Indonesia**	539
12/09/1979	Irian Jaya, Indonesia	100
16/10/1979	Francesa Riveria**	6
12/12/1979	Nariño, Colombia	*600
01/09/1981	Islas Samoa	2
26/05/1983	Noshiro, Japón	100
22/04/1991	Limon, Cosia Rica	2
02/09/1992	Costas de Nicaragua	170
12/12/1992	Floras Sea. Indonesia	*2500
12/07/1993	Sea of Japón	330
15/02/1994	Sumatra, Indonesia	7
02/06/1994	Java. Indonesia	250
08/10/1994	Haimahera. Indonesia	1
04/11/1994	Skagway Alaska. US**	1
14/11/1994	Islas de Filipinas	*78
14/05/1995	Timor. Indonesia	11
09/10/1995	Manzanillo. México	1
01/01/1996	Sulawesi. Indonesia	9
17/02/1996	Irian Jaya, Indonesia	110
21/02/1996	Norte de Perú	12
17/07/1998	Papua New Guinea	2183
17/08/1999	Izmit Bay. Turquía	150
26/11/1999	Isla Vanuatu	5
23/06/2001	Sur de Perú	26
28/03/2005	Sumatra, Indonesia	10
14/03/2006	Isla Seram. Indonesia	4
17/07/2006	Java. Indonesia	664
01/04/2007	Islas Salomón	*52
21/04/2007	Sur de Chile	10

Tabla 2.2. Tsunamis que causaron muertes cuya distancia de la fuente es mayor a 1000 Km, (\*) El número de víctimas podría incluir víctimas por el terremoto. Fuente ITIC-2008.

Fecha	Fuente del tsunami	Fallecidos o desaparecidos estimados		Área distante donde se reportaron víctimas
		Local	Distante	
07/11/1837	Sur de Chile	—	16	USA (Hawaii)
13/08/1366	Norte de Chile	25000*	1	Nueva Selandia, Sur de Chile
10/ 05/1877	Norte de Chile	cientos	millones	Fiji. Japón, Perú, USA (Hawaii)
03/02/1923	Kamchatka Rusia	2	1	USA (Hawaii)
27/11/1946	Costa de Nakran, Pakistán	300*	algunos	India
01/04/1946	Isla Unimak, Alaska USA	5	160	USA (California. Hawaii)
22/05/1960	Chile	1000	283	Japón, Filipinas, USA (California Hawaii)
28/03/1964	Prince William Sound. Alaska. USA	106	18	USA (California, Orogon)
26/12/2004	Banda Aceh. Indonesia	176827*	52071	Bangladesh, India. Kenya, Maldives Myanmar, Seychelles, Somalia, Sur de África. Sri Lanka, Tanzania. Yemen

### 2.1.3.GENERACIÓN DE TSUNAMIS POR SISMOS

La generación de un tsunami por sismos puede estudiarse con métodos desarrollados por la teoría de la dinámica de elasticidad. La fuente que representa un foco de un sismo es una discontinuidad en la componente tangencial del desplazamiento de una porción de la corteza terrestre.

Un tsunami debido a un evento sísmico se genera, en primer lugar, por dislocaciones tectónicas bajo los océanos causados por terremotos de poca profundidad y considerable magnitud en zonas de subducción. Los bloques de la corteza terrestre movidos hacia abajo y arriba transfieren una energía potencial en la masa de agua sobre ellos, modificando radicalmente el nivel del mar de la región afectada a esta deformación se le llama condición inicial del tsunami.

La energía así transmitida a la masa de agua resulta en la generación del tsunami, lo que significa radiación de energía desde la zona de origen en forma de ondas de período largo, ver Figura 2.1. La mayoría de los tsunamis son generados por terremotos de considerable magnitud y de fallamiento inverso que ocurren en zonas de subducción entre placas tectónicas. Los terremotos leves pueden ocurrir a lo largo de centros de expansión o dorsales, pero no tienen la magnitud necesaria para causar un tsunami. Los sismos de gran magnitud también pueden ocurrir a lo largo de fallas transformantes o fallas de rumbo, pero existe un movimiento vertical menor durante el fallamiento, de manera que no existe generación de tsunami.

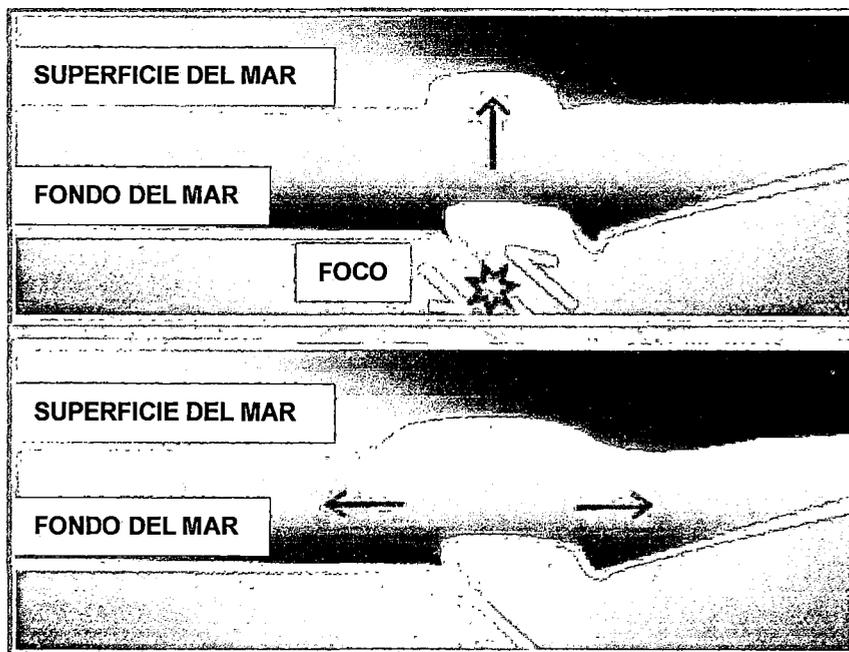


Figura 2.1. Esquema del mecanismo de generación de la mayoría de tsunamis en zonas sísmicas de subducción. Fuente ITIC-2008.

La teoría se puede explicar en base a la solución de dos problemas: el problema de origen del campo de desplazamiento generado por la fuente en un semiespacio elástico sólido con límite libre (superficie del fondo del océano) el cual es considerado prácticamente estático y el segundo problema es la propagación de la onda de gravedad, deducido del problema anterior, dentro de la capa de líquido pesado e incompresible generado por el movimiento del fondo sólido. Los parámetros de la onda de gravedad son teóricamente función de aquellos de la fuente (profundidad y orientación). En particular, se puede obtener

una estimación muy aproximada de la energía de la fuente transmitida a la onda de gravedad. Generalmente, una parte de ella corresponde a las estimaciones obtenidas con datos empíricos.

## 2.2. TEORÍA DE PROPAGACIÓN DE TSUNAMIS

### 2.2.1. TEORÍA DE AGUAS POCO PROFUNDAS

Para el modelamiento de la propagación de tsunamis e inundación por tsunami la teoría más usada es la “teoría de aguas poco profundas” también referida como teoría de ondas largas, esta teoría considera que la profundidad característica del mar es mucho menor que la longitud de onda de las olas del tsunami, esto es aplicable en las aéreas de las fuentes de la mayorías de los tsunamis. La aceleración vertical es despreciable y se asume que la velocidad horizontal es uniforme, en otras palabras, las partículas de agua, desde el fondo hasta la superficie del mar, se desplazan en forma uniforme. Teniendo en cuenta estas asunciones y considerando el agua de mar como un fluido incompresible, la ecuación de continuidad y las ecuaciones de cantidad de movimiento describen cómo la velocidad y la presión de un fluido en movimiento están relacionadas para el modelamiento de tsunamis.

### 2.2.2. EXPRESIONES DE LA TEORÍA DE AGUAS POCO PROFUNDAS

Considerando el agua de mar como un fluido incompresible la ecuación de continuidad y las ecuaciones de cantidad de movimiento en dos dimensiones describen como la velocidad, ecuación (2.1), y la presión de un líquido en movimiento, ecuaciones (2.2) y (2.3), están relacionadas. En estas ecuaciones la viscosidad del fluido es ignorada.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.3)$$

Existen dos variables diferentes en la ecuación de cantidad de momento, las coordenadas  $x$  y  $z$  en la dirección horizontal y vertical respectivamente, tres variables independientes, la presión  $p$ , dos vectores velocidad, la componente  $u$

en la dirección  $x$  y la componente  $w$  en la dirección  $z$ . Los valores de  $F_x$  y  $F_z$  representan la fuerza externa. En general, la fuerza dominante para la dinámica de las ondas oceánicas son: la fuerza gravitatoria la cual da lugar a gradientes de presión, la flotabilidad, las mareas, la fuerza de Coriolis la cual es resultado del movimiento de rotación de la tierra. Por simplicidad la acción de la fuerza gravitatoria se considera como  $F_z = -g$ .

Las ecuaciones previas deberían satisfacer las siguientes ecuaciones de frontera, primero la presión atmosférica en la superficie libre del agua es cero, segundo la partícula de agua, en la superficie libre o en la superficie inferior, en el tiempo ' $t$ ' deberían permanecer en cada superficie en el tiempo ' $t+\delta t$ '. Del punto de vista de la cinemática, estas condiciones de frontera son descritas como derivación lagrangiana de la partícula de agua sobre la superficie libre del agua ' $(z = \eta(x,t))$ ' y sobre la superficie inferior del agua ' $(z = h(x))$ ' deberían ser cero (ver Figura 2.2). Las expresiones matemáticas, ecuaciones (2.4), (2.5) y (2.6), para estas condiciones de frontera son mostradas a continuación.

Condición de frontera en la superficie libre del agua

(a) Condición para la frontera dinámica

$$p = 0 \quad (2.4)$$

(b) Condición para la frontera cinemática

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = w \quad (2.5)$$

Condición de frontera en el fondo o superficie inferior

(a) Condición para la frontera cinemática

$$\frac{w}{u} = -\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{dh}{dx} \quad (2.6)$$

Entonces, la aproximación en aguas poco profundas, se asume que la aceleración vertical de la partícula de agua es despreciable con la aceleración de la gravedad, finalmente la derivada lagrangiana de la velocidad vertical  $w$  resulta en la ecuación (2.7).

$$\left| \frac{Dw}{Dt} \right| = \left| \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right| \ll g \quad (2.7)$$

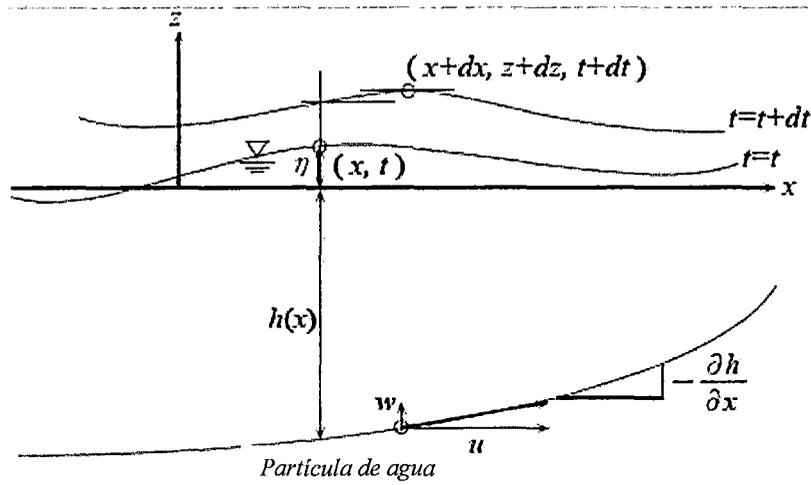


Figura 2.2. Sistema de coordenadas en la aproximación por aguas poco profundas.

La asunción previa reduce la ecuación (2.3) a una forma más simple.

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.8)$$

La integral de la ecuación (2.8) respecto de  $z$  con la condición de frontera en la superficie libre del agua describe la presión hidrodinámica la cual es mostrada en la ecuación (2.9).

$$p = \rho g(\eta - z) \quad (2.9)$$

Entonces, la ecuación (2.2) incluyendo el término  $\partial p/\partial x$  puede ser reescrita como la ecuación (2.10).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (2.10)$$

### 2.2.3. INTEGRACIÓN DE LAS ECUACIONES GOBERNANTES

Las ecuaciones (2.1) y (2.10) son las que gobiernan la teoría de aguas profundas en 2 dimensiones, estas son resueltas con las condiciones de frontera mostradas anteriormente. Si se asume que la velocidad horizontal es una función de la profundidad, se puede integrar las ecuaciones gobernantes sobre la profundidad del agua para obtener las ecuaciones de la teoría de aguas poco profundas.

La integración de la ecuación (2.1) sobre la profundidad  $z$  resulta en:

$$\int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial z} dz + w_{(x,\eta,t)} - w_{(x,-h,t)} = 0 \quad (2.11)$$

Considerando la condición de frontera cinemática sobre la superficie libre del agua y la superficie inferior del agua como condiciones de frontera, la integral de la ecuación de continuidad puede ser descrita como en la ecuación (2.12).

$$\int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial z} dz + \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \left( -u \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.12)$$

La regla de la Integral de Leibniz es usada para integrar el primer término de la parte derecha de la ecuación (2.12). En términos generales la regla de la integral de Leibniz es mostrada por la ecuación (2.13) y la ecuación (2.12) puede ser reescrita como la ecuación (2.14)

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} Q_{(x,y)} dy = \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} \frac{\partial}{\partial x} Q_{(x,y)} dy + Q_{(x,\beta(x))} \frac{\partial \beta(x)}{\partial x} - Q_{(x,\alpha(x))} \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - u_{(z=\eta)} \frac{\partial \eta}{\partial x} - u_{(z=-h)} \frac{\partial h}{\partial x} \\ &\quad + \left( \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \left( -u \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Definiendo como  $M$  el flujo de descarga del agua y  $\bar{u}$  como la velocidad promedio del agua en la ecuación (2.15), la expresión final es la ecuación (2.16).

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (2.16)$$

Finalmente para integrar la ecuación de continuidad (ecuación 2.17) desde el fondo hasta la superficie libre del agua. Se procede como se mostró previamente, usando la regla de la integral de Leibniz, entonces la ecuación (2.17) resulta en la ecuación (2.18).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.18)$$

Donde:

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h) \quad (2.19)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}(\eta + h) \quad (2.20)$$

Para integrar la ecuación de momento, se considera la ecuación de Navier-Stokes en tres dimensiones, ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.23).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.23)$$

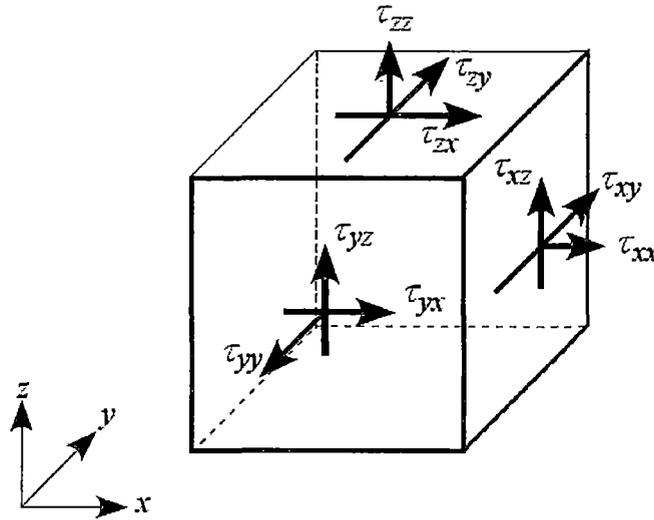


Figura 2.3. Definición de los tensores de esfuerzo.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} uv dz \\ & -u_{(x,y,\eta,t)} \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial t} + u_{(x,y,\eta,t)} \frac{\partial \eta}{\partial x} + v_{(x,y,\eta,t)} \frac{\partial \eta}{\partial y} - w_{(x,y,\eta,t)} \right\} \\ & -u_{(x,y,-h,t)} \left\{ u_{(x,y,-h,t)} \frac{\partial h}{\partial x} + v_{(x,y,-h,t)} \frac{\partial h}{\partial y} - w_{(x,y,-h,t)} \right\} \end{aligned}$$

$$= -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \quad (2.30)$$

También, la condición de frontera cinemática en la superficie libre y en el fondo marino puede ser aplicada como:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u_{(x,y,\eta,t)} \frac{\partial \eta}{\partial x} + v_{(x,y,\eta,t)} \frac{\partial \eta}{\partial y} = w_{(x,y,\eta,t)} \quad (2.31)$$

$$-u_{(x,y,-h,t)} \frac{\partial h}{\partial x} - v_{(x,-h,\eta,t)} \frac{\partial h}{\partial y} = w_{(x,y,-h,t)} \quad (2.32)$$

Aplicando las dos ecuaciones anteriores de frontera, la ecuación (2.30) se reescribe como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} uv dz \\ = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \end{aligned} \quad (2.33)$$

Adicionalmente, introduciendo los factores de corrección por momento,

$$\beta_{xx} = \frac{1}{u(\eta+h)} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz \quad (2.34)$$

$$\beta_{xy} = \frac{1}{uv(\eta+h)} \int_{-h}^{\eta} uv dz \quad (2.35)$$

La ecuación (2.33) puede reescribirse como

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}(h+\eta)}{\partial t} + \frac{\partial [\beta_{xx}(\eta+h)u^2]}{\partial x} + \frac{\partial [\beta_{xy}(\eta+h)uv]}{\partial y} \\ = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \end{aligned} \quad (2.36)$$

Note que, el factor de corrección de momento  $\beta$  es considerado igual a 1.0 en casos prácticos. Entonces la ecuación (2.36) se simplifica a:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}(h+\eta)}{\partial t} + \frac{\partial [(\eta+h)u^2]}{\partial x} + \frac{\partial [(\eta+h)uv]}{\partial y} \\ = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \end{aligned} \quad (2.37)$$

Usando las expresiones para el flujo de descarga:

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h) \quad (2.38)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}(\eta + h) \quad (2.39)$$

La ecuación (2.36) puede escribirse como, donde  $D=\eta+h$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}(h+\eta)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) \\ = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz \end{aligned} \quad (2.40)$$

Asumiendo que (i) que  $\tau_{xx}$  y  $\tau_{yx}$  no dependen de la profundidad  $z$  y son relativamente pequeños comparados con el esfuerzo de cortante en el fondo marino, y (ii) el esfuerzo en la superficie libre  $\tau_{(x,y,\eta,t)}$  es igual a cero. La parte derecha de la ecuación (2.40) se puede escribir como:

$$\frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz = \frac{\eta+h}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{zx(x,y,-h,t)}}{\rho} = -\frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (2.41)$$

$$\text{Donde: } \tau_{by} = \tau_{zy} \Big|_{z=-h}$$

Finalmente, la ecuación de momento en la dirección-x y en la dirección-y son:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (2.43)$$

$$\text{Donde: } \tau_{bx} = \tau_{zx} \Big|_{z=-h}$$

Finalmente, la forma integrada de la teoría de aguas poco profundas es:

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho}$$

Donde:

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h) \quad N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}(\eta + h)$$

La fricción en el fondo del océano, para fines prácticos en la numeración numérica, son generalmente expresados como:

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.44)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.44)$$

Donde  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual es escogido de acuerdo al material de la superficie en el fondo (ver Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Valores para el coeficiente de Manning. Imamura (1995)

Material	n
Neat cement, smooth metal	0.010
Rubble masonry	0.017
Smooth earth	0.018
Natural channels in good condition	0.025
Natural channels with stones and weeds	0.035
Very poor natural channels	0.060

## 2.3. MODELACIÓN NUMÉRICA DE TSUNAMIS

### 2.3.1. MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

Las diferencias finitas es una aproximación discreta de las ecuaciones diferenciales, Los métodos de elementos finitos son ampliamente utilizados para análisis numéricos, resolver ecuaciones diferenciales. Por ejemplo considerando la siguiente ecuación diferencia ordinaria,

$$f'_{(x)} = \frac{df_{(x)}}{dx} = f_{(x)+a} \quad (3.1)$$

Para resolver la ecuación (3.1) numéricamente, se necesita aproximar la ecuación diferencial con un operador diferencial,

$$\frac{df_{(x)}}{dx} = \frac{f_{(x+h)} - f_{(x)}}{h} \quad (3.2)$$

Entonces la ecuación (3.1) se reescribe como:

$$f_{(x+h)} \approx f_{(x)} + h(f'_{(x)} + a) \quad (3.3)$$

La ecuación (3.3) es llamada ecuación de diferencia finita, la solución de esta ecuación nos da una aproximación de la solución para la ecuación diferencial.

En los métodos de elementos finitos, tres formas son principalmente consideradas, estas son: diferencias finitas hacia adelante, diferencias finitas hacia atrás y diferencias finitas centrales.

La expresión para las diferencias finitas hacia adelante tiene la siguiente forma:

$$\frac{f_{(x+h)} - f_{(x)}}{h} \approx \frac{df_{(x)}}{dx} \quad (3.4)$$

La expresión para las diferencias finitas hacia atrás es cuando  $h$  es reemplazado por  $-h$  y tiene la siguiente forma:

$$\frac{f_{(x)} - f_{(x-h)}}{h} \approx \frac{df_{(x)}}{dx} \quad (3.5)$$

También la expresión para las diferencias finitas centrales tiene las formas siguientes:

$$\frac{f_{(x+h/2)} - f_{(x-h/2)}}{h} \approx \frac{df_{(x)}}{dx} \quad (3.6)$$

$$\frac{f_{(x+h)} - f_{(x-h)}}{2h} \approx \frac{df_{(x)}}{dx} \quad (3.7)$$

El error entre la solución aproximada y la solución real es determinado por el error que surge al reescribir una ecuación diferencial de un operador diferencial a una ecuación con una diferenciación del operador. Por ejemplo, considerando aproximadamente el siguiente operador diferencial:

$$\frac{\partial M_{(x,t)}}{\partial x} \quad (3.8)$$

El método de diferencias finitas basado en la expansión de series de Taylor de la ecuación (3.7) es:

$$M_{(x+\Delta x,t)} = M_{(x,t)} + \Delta x \frac{\partial M_{(x,t)}}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{\partial^2 M_{(x,t)}}{\partial x^2} + \dots \quad (3.9)$$

Donde  $\Delta x$  es el tamaño espacial de la grilla, de la ecuación (3.9), la expresión para la su diferencia finita hacia adelante es escrita como:

$$\frac{\partial M_{(x,t)}}{\partial x} = \frac{M_{(x+\Delta x,t)} - M_{(x,t)}}{\Delta x} - O_{(\Delta x)} \quad (3.10)$$

Aquí se define la diferencia entre la derivada parcial y su expresión en diferencias finitas representado como el error de truncación, de orden  $\Delta x$  o  $O(\Delta x)$ .

Por otra parte, si  $\Delta x$  es reemplazado por  $+\Delta x/2$  y  $-\Delta x/2$  la expresión de Taylor puede ser reescrita como las ecuaciones (3.10) y (3.11) para el paso (3.13), esta última ecuación es la diferencia central con un error de truncación de segundo orden.

$$M_{(x+\Delta x/2,t)} = M_{(x,t)} + \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial M_{(x,t)}}{\partial x} + \frac{\left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2}{2!} \frac{\partial^2 M_{(x,t)}}{\partial x^2} + \dots \quad (3.11)$$

$$M_{(x-\Delta x/2,t)} = M_{(x,t)} + \left(-\frac{\Delta x}{2}\right) \frac{\partial M_{(x,t)}}{\partial x} + \frac{\left(-\frac{\Delta x}{2}\right)^2}{2!} \frac{\partial^2 M_{(x,t)}}{\partial x^2} + \dots \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial M_{(x,t)}}{\partial x} = \frac{M_{(x+\Delta x/2,t)} - M_{(x-\Delta x/2,t)}}{\Delta x} - O_{(\Delta x^2)} \quad (3.13)$$

La ecuación en diferencias finitas (3.13) tiene un error de segundo orden, mientras que la ecuación (3.10) tiene un error de primer orden. Lo importante es que las expresiones de diferencias finitas (3.10) y (3.13) son similares, pero el orden de error son diferentes.

### 2.3.2. DISCRETIZACIÓN DE LA ECUACIONES

Para el modelado numérico de tsunami, se usa el sistema escalonado de salto de rana para discretizar las ecuaciones gobernantes del modelo. Este sistema escalonado es un sistema de grillas que define las variables en un dominio espacial. En general la variable escalar, como  $\eta$  o  $h$ , son definidas en el centro de la grilla, las variables vectoriales, como  $M$  o  $N$ , son definidas a los lados, esto último es mostrado en la Figura 2.4. Además, el sistema de salto de rana, es la diferencia central con un error de truncación de segundo orden.

Las ventajas y desventajas de este sistema, son: simple pero con un error de segundo orden, fácil de definir condiciones de frontera, estable y no tiene error de disipación y existe un error de dispersión.

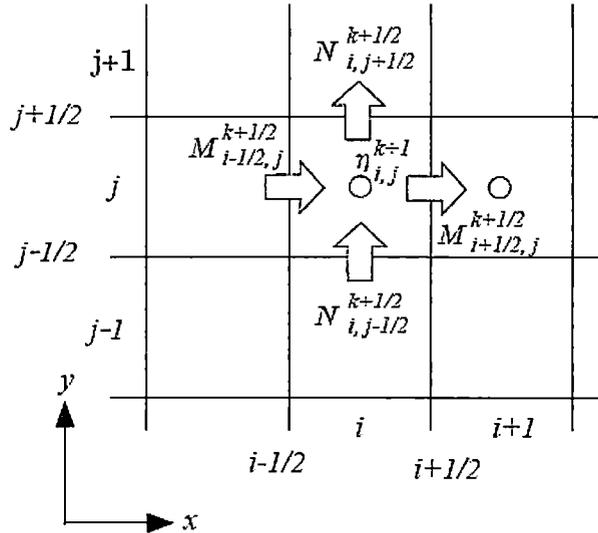


Figura 2.4. Geometría espacial del sistema escalonado de salto de rana.

Para el primer paso, se considera la descripción del esquema numérico para las ecuaciones lineales en aguas poco profundas (3.14) y (3.15) en una dimensión. La Figura 2.5 indica esquema escalonado de salto de rana para este problema.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (3.15)$$

Usando las diferencias centrales, el primer término de la ecuación (3.14) es discretizado como la ecuación (3.16) para obtener el nivel del agua en  $t = t + \Delta t$  usando el nivel del agua en  $t = t$ .

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (n_i^{k+1} - n_i^k) \quad (3.16)$$

Donde:

$$\eta(x, t) = \eta(i\Delta x, k\Delta t) = \eta_i^k \quad (3.17)$$

$$M(x, t) = M\left[\left(i + \frac{1}{2}\right)\Delta x, \left(k + \frac{1}{2}\right)\Delta t\right] = M_{i+1/2}^{k+1/2} \quad (3.18)$$

El sufijo  $i$  es la posición espacial ( $x=i\Delta x$ ), y  $k$  es la posición en la malla en el dominio del tiempo ( $t=k\Delta t$ ), donde  $\Delta x$  y  $\Delta t$  son las dimensiones espaciales y temporales respectivamente.

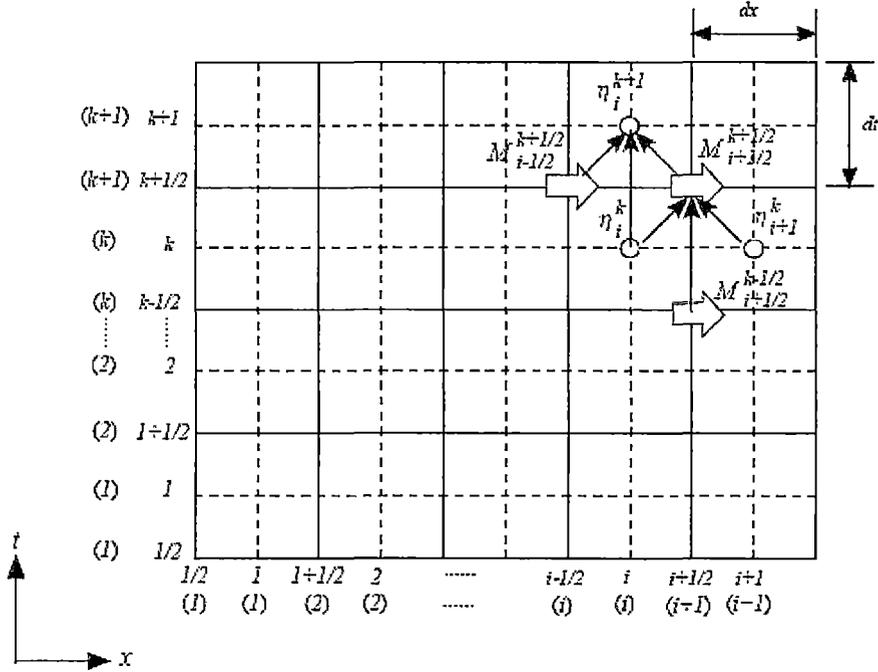


Figura 2.5. Esquema escalonado del salto de rana en los dominios de  $x$  e  $y$ .

También la diferencia central de la ecuación (3.14) puede escribirse como:

$$\frac{\partial M(x, t)}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left( M_{i+1/2}^{k+1/2} - M_{i-1/2}^{k+1/2} \right) \quad (3.19)$$

De la misma manera, la ecuación (3.15) puede discretizarse como:

$$\frac{1}{\Delta x} \left( M_{i+1/2}^{k+1/2} - M_{i+1/2}^{k-1/2} \right) + g \frac{D_{i+1}^k + D_i^k}{2} \frac{1}{\Delta x} \left( \eta_{i+1}^k - \eta_i^k \right) \quad (3.20)$$

Donde  $D_i^k = (\eta_i^k - h_i)$

Finalmente, la ecuación diferencial finita para resolver la ecuación (3.14) y ecuación (3.15) son discretizadas como:

$$\eta_i^{k+1} = \eta_i^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( M_{i+1/2}^{k+1/2} - M_{i-1/2}^{k+1/2} \right) \quad (3.21)$$

$$M_{i+1/2}^{k+1/2} = M_{i+1/2}^{k-1/2} - g \frac{(D_{i+1}^k + D_i^k)}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( \eta_{i+1}^k - \eta_i^k \right) \quad (3.22)$$

La expresión para el término lineal en 2 dimensiones es:

$$\text{Para } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2} \right) + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( M_{i,j+1/2}^{k+1/2} - M_{i,j-1/2}^{k+1/2} \right) \quad (3.23)$$

$$\text{Para } \frac{\partial M}{\partial t} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$M_{i+1/2,j}^{k+1/2} = M_{i+1/2,j}^{k-1/2} - g \frac{(D_{i+1,j}^k + D_{i,j}^k)}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k) \quad (3.24)$$

$$\text{Para } \frac{\partial N}{\partial t} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

$$N_{i,j+1/2}^{k+1/2} = N_{i,j+1/2}^{k-1/2} - g \frac{(D_{i+1,j}^k + D_{i,j}^k)}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k) \quad (3.25)$$

### 2.3.3. ESQUEMA NUMÉRICO PARA LOS TÉRMINOS NO-LINEALES

Como se describió anteriormente, el esquema numérico para los términos lineales son algo simples. Sin embargo, los términos no-lineales son un poco mas complicados de discretizar, Primeramente, se considera el esquema escalonado del salto de rana para el termino en convección en contra del viento (Figura 2.6). El esquema contra el viento usa  $f(x,t)$ ,  $f(x-\Delta x,t)$  y  $f(x+\Delta t)$  para calcular  $f(x,t+\Delta t)$  de acuerdo a lo siguiente:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right)}_{(1)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right)}_{(2)} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right)}_{(3)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right)}_{(4)} = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3.27)$$

$$(1) = \frac{1}{\Delta x} \left[ \lambda_{11} \frac{\left( M_{i+3/2,j}^{k-1/2} \right)^2}{D_{i+3/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{21} \frac{\left( M_{i+1/2,j}^{k-1/2} \right)^2}{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{31} \frac{\left( M_{i-1/2,j}^{k-1/2} \right)^2}{D_{i-1/2,j}^{k-1/2}} \right] \quad (3.28)$$

$$(2) = \frac{1}{\Delta y} \left[ v_{11} \frac{(MN)_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k-\frac{1}{2}}} + v_{21} \frac{(MN)_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} + v_{31} \frac{(MN)_{i+\frac{1}{2},j-1}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i+\frac{1}{2},j-1}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \quad (3.29)$$

$$(3) = \frac{1}{\Delta x} \left[ \lambda_{12} \frac{(MN)_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{22} \frac{(MN)_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{32} \frac{(MN)_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}}{D_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \quad (3.30)$$

$$(3) = \frac{1}{\Delta y} \left[ v_{12} \frac{\left( M_{i,j+\frac{3}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i,j+\frac{3}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + v_{22} \frac{\left( M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + v_{32} \frac{\left( M_{i,j-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i,j-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \quad (3.31)$$

Donde:

$$(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}) = \begin{cases} (0, 1, -1) & \text{if } M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0 \\ (1, -1, 0) & \text{if } M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \leq 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

$$(v_{11}, v_{21}, v_{31}) = \begin{cases} (0, 1, -1) & \text{if } N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0 \\ (1, -1, 0) & \text{if } N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \leq 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

$$(\lambda_{12}, \lambda_{22}, \lambda_{32}) = \begin{cases} (0, 1, -1) & \text{if } M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0 \\ (1, -1, 0) & \text{if } M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \leq 0 \end{cases} \quad (3.34)$$

$$(v_{12}, v_{22}, v_{32}) = \begin{cases} (0, 1, -1) & \text{if } N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0 \\ (1, -1, 0) & \text{if } N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \leq 0 \end{cases} \quad (3.35)$$

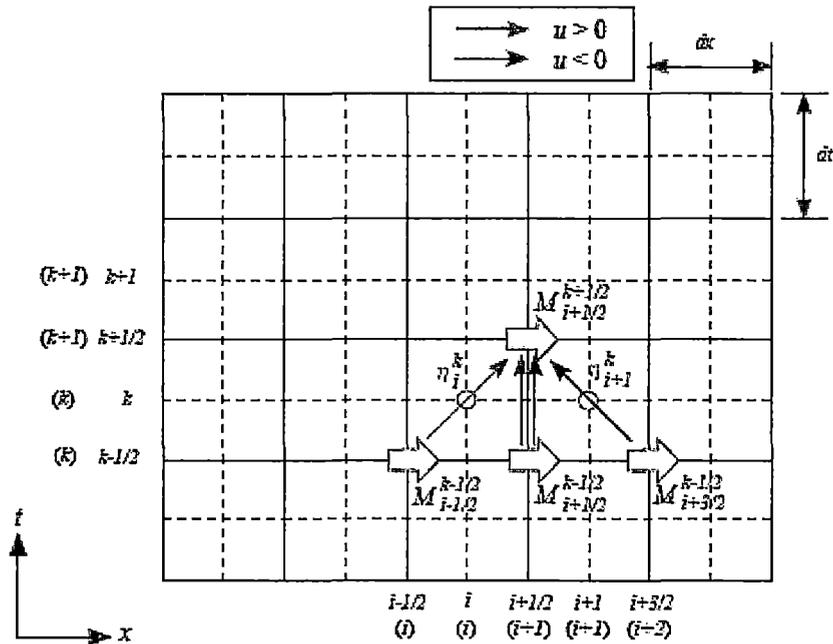


Figura 2.6. Geometría para el esquema contra el viento.

## 2.4. CONDICIONES DE FRONTERA

### 2.4.1. CONDICIONES DE BORDE ABIERTO EN MAR ADENTRO

En el esquema escalonado de salto de rana, la variable a lo largo de la frontera no puede ser calculada. Entonces se usa una aproximación para obtener los valores de  $\eta$  en la frontera asumiendo la relación entre la altura de la onda  $\eta$  y la velocidad de la corriente  $\mu$  en la progresiva onda en aguas poco profundas a una profundidad constante.

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \quad (4.1)$$

### 2.4.2. TRASLADO DE CONDICIONES DE BORDE FRENTE A LA COSTA

En el modelamiento del tsunami run-up sobre el suelo, para establecer si la grilla es seca, dentro de la superficie topográfica o sumergida debería emplearse la siguiente condición.

$$D = h + \eta > 0 : \text{Grilla sumergida}$$

$$\leq 0 : \text{Grilla seca}$$

El frente de agua debería localizarse entre la grilla seca y sumergida. Si la altura del terreno en la grilla seca es menor que la altura del agua en la grilla sumergida, la descarga de agua a través de la frontera de dos grillas es calculada. En el esquema escalonado de salto de rana, los puntos de la grilla son alternativamente ubicados para velocidad y en nivel del agua asumiendo que el nivel del agua está ya calculado como una celda computacional. Si el nivel del agua es alto que en el anterior, el agua podría fluir dentro de la celda hacia el terreno. La Figura 2.7 explica la manera para estimar la influencia de la velocidad y descarga del agua.

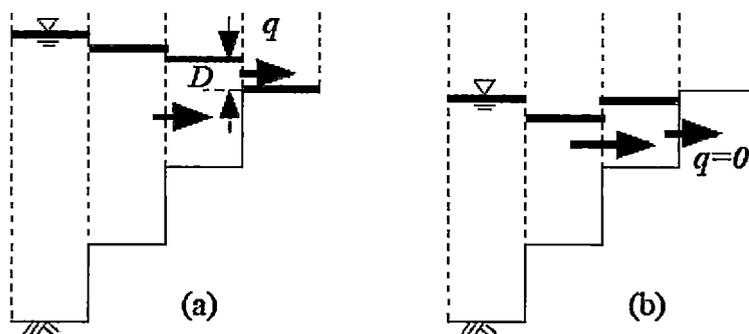


Figura 2.7 Condición de frontera del frente de agua en el terreno.

Lo importante es cómo la descarga del agua debería ser calculada, entonces se asume la metodología propuesta por Imamura (1995), donde evalúa la descarga del agua aplicando directamente la ecuación del movimiento para mantener la profundidad total de la grilla seca cero. En esta aproximación, la profundidad total  $D$  en el punto computacional de descarga es dada por la diferencia entre la altura del terreno en la primera grilla seca y la altura del agua en la grilla vecina.

## 2.5. PARÁMETROS DE FUENTE SÍSMICA

La fuente sísmica de los terremotos para la generación de la condición inicial del tsunami o la deformación inicial de la superficie del océano, puede describirse teóricamente usando nueve parámetros, los cuales son mostrados en la Figura 2.8.

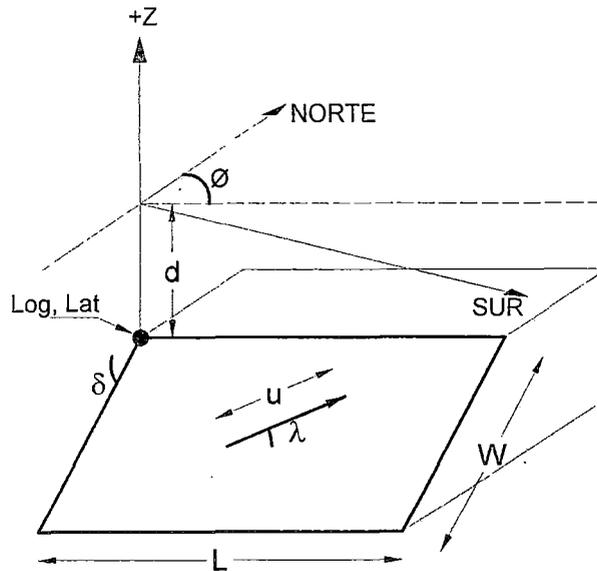


Figura 2.8. Parámetros de fuente sísmica para la generación de la condición inicial del tsunami.

Donde,

*Log, Lat* : Ubicación en el plano de la esquina superior izquierda del área de la falla,

*d* : Profundidad de la esquina superior izquierda del área de la falla,

*L* : Longitud del área de la falla,

*W* : Ancho del área de la falla,

$\Phi$  : Dirección (Azimut) de la falla,

$\lambda$  : Ángulo de dislocamiento,

$\delta$  : Ángulo de inmersión de la falla,

*u* : Dislocamiento,

De los nueve parámetros que definen el modelo de fuente sísmica, seis son determinados por medio de análisis sísmicos, los cuales usan las ondas sísmicas (ondas de cuerpo o ondas de superficie) para calcular la profundidad, dirección, ángulo de dislocamiento, ángulo de inmersión, y ubicación del área de la falla y adicionalmente la magnitud, a este tipo de análisis se le conoce como inversión de la fuente sísmica. Este análisis requiere una gran cantidad de registros sísmicos lo que significa estar conectados a una red sísmica global, la Global Centroid Moment Tensor Project (Global CMT) es una de las centros de investigación internacionales más importantes que se especializa en realizar este tipo de análisis y sus resultados son usados para estimar el resto de

parámetro sísmicos. Otra institución internacional que también desarrolla este análisis es la USGS la cual presenta sus primeros resultados aproximadamente 10 minutos después de la ocurrido el evento sísmico, los cuales son usados por la mayoría de países para estimar la amenaza por tsunami.

El área de la falla y el desplazamiento pueden ser calculados usando las relaciones propuestas por Papazacho et al. (2004), Ellos estudiaron la relación entre los parámetros de fuente sísmica y la magnitud del correspondiente evento sísmico.

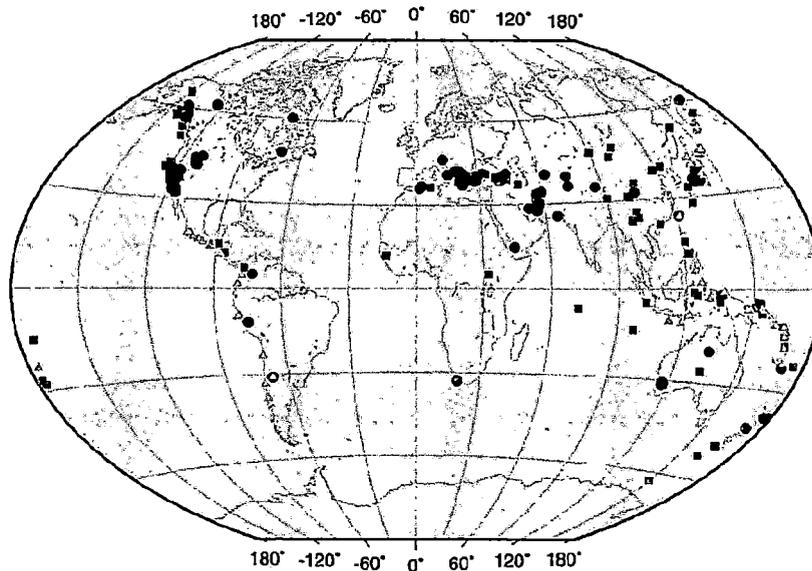


Figura 2.9. Mapa índice de los epicentros de los terremotos usados por Papazacho et al. 2004. Rectángulos, círculos y triángulos muestran los terremotos con fallamiento de rumbo, fallamiento en pendiente en áreas continentales y fallamiento en pendiente en zonas de subducción respectivamente.

Ellos analizaron los datos de parámetros sísmicos más confiables disponibles, producidos por otros investigadores en todo el mundo, y propusieron relaciones empíricas, ecuaciones (5.1), (5.2) y (5.3), para las fallas sísmicas de tipo pendiente en zonas de subducción. Estas relaciones pueden aplicar para los sismos que se generan frente a la costa peruano por ser producto del movimiento de subducción de la Placa de Nazca debajo la Placa sub-americana (Falla inversa tipo pendiente). La Figura 2.9 muestra la ubicación de los datos usados por Papazacho et al. (2004).

$$\log L = 0.55M - 2.19 \quad (6.7 \leq M \leq 9.3) \quad (5.1)$$

$$\log W = 0.31M - 0.63 \quad (6.7 \leq M \leq 9.3) \quad (5.2)$$

$$\log u = 0.64M - 2.78 \quad (6.7 \leq M \leq 9.3) \quad (5.3)$$

Donde:

- $L$  : Longitud de la falla en km,
- $W$  : Ancho de la falla en km,
- $u$  : Desplazamiento de la falla en cm,
- $M$  : Magnitud de momento del terremoto.

## **CAPÍTULO 3: MODELACIÓN NUMÉRICA DEL TSUNAMI DEL 15 DE AGOSTO DE 2007**

### **3.1. TSUNAMI DEL 15 DE AGOSTO DE 2007**

El 15 de Agosto de 2007 a las 6:41 PM, hora local, ocurrió un terremoto con magnitud  $M_w$  8.0 cuyo epicentro se localizó en las coordenadas  $13.4^\circ S$   $76^\circ O$ , con una profundidad de 39 km (USGS - NIEC). La Figura 3.1 muestra la ubicación del epicentro y la distribución de las réplicas (USGS).

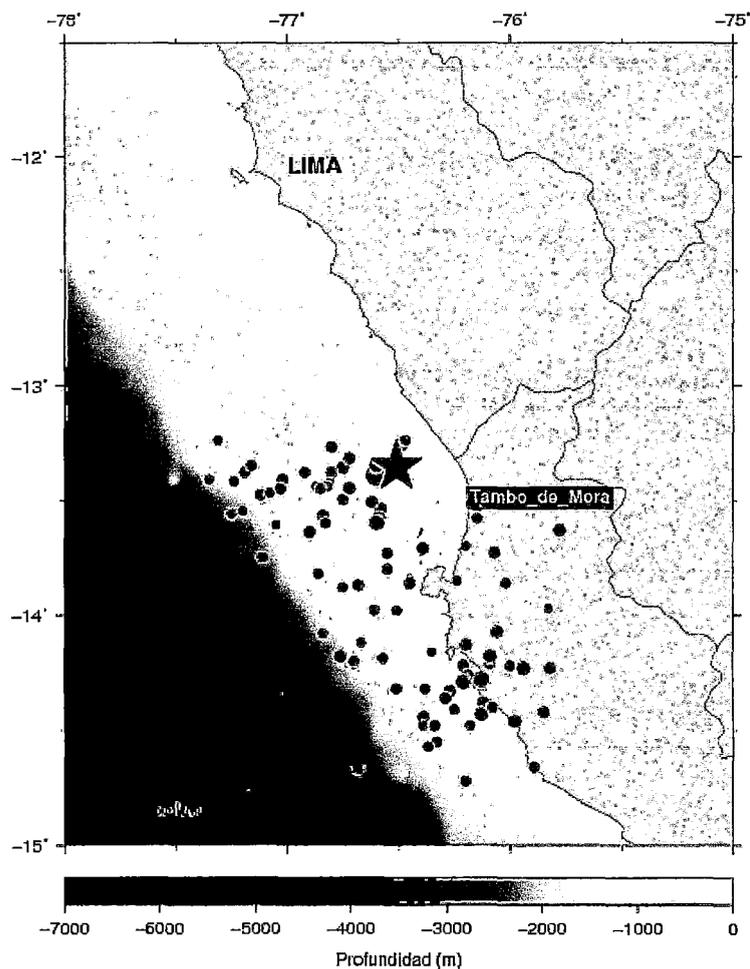


Figura 3.1. Ubicación de epicentro (Estrella azul) y distribución espacial de las réplicas de acuerdo a la USGS (Puntos rojos).

El desplazamiento del fondo marino asociado al terremoto, dada la magnitud del terremoto y la profundidad hipocentral, generó un tsunami cuya altura máxima de la ola reportada a lo largo de la costa fue de por lo menos 10m localmente y en promedio de 3m a 5m por lo menos en 100km a lo largo de la costa. (Fritz H. 2008). El tsunami arribó a cada una de las regiones costeras del Perú, con diferentes tiempos y alturas de ola. El mayor incremento del nivel del mar que se pudo documentar fue en la Playa Yumaque, al sureste de la Caleta Lagunillas, 25 km al sur de la ciudad de Pisco, donde alcanzó una altura máxima de inundación de 10m con respecto al nivel medio del mar, logrando una distancia de inundación de 70m. (DHN). De acuerdo al reporte post-tsunami presentado por DHN (Tabla 3.1), la ciudad de Tambo de Mora fue una de los lugares mayormente afectado por el tsunami. La distancia del ancho de la zona máxima de inundación, fue de 483.6m respecto al nivel medio del mar y la altura de la ola fue de 2.91m, tal como se presenta en la Figura 3.2.

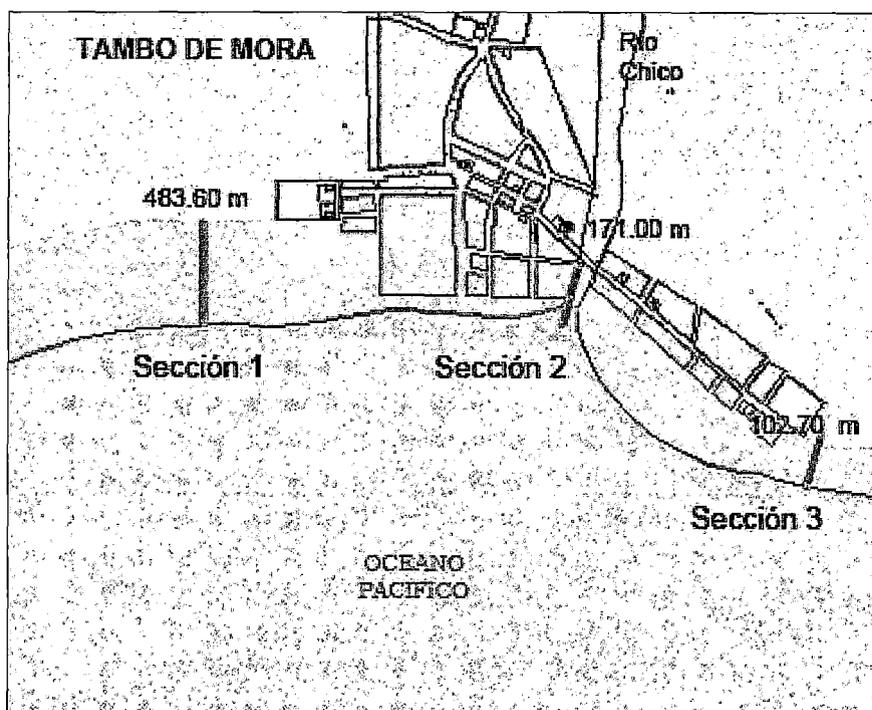


Figura 3.2. Mediciones post-tsunami realizadas por DHN (disponible en <http://www.dhn.mil.pe/>) en la distrito de Tambo de Mora.

De acuerdo a Fritz et al. 2008 los medios de comunicación al siguiente día del terremoto se concentraron mayormente en los daños producto de la sacudida y las bajas resultantes (519 personas fallecidas y

más de 1000 afectados). La mayor parte de los daños del terremoto y el número de víctimas se produjeron en las ciudades de Pisco, Chinca Alta e Ica, muchas de las viviendas destruidas fueron casas de adobe no reforzadas, sin embargo iglesias, hospitales, colegios y otros edificios públicos fueron dañados. Adicionalmente la carretera central y la Panamericana Sur fueron seriamente afectadas debido a los deslizamientos y licuación de los suelos.

Tabla 3.1. Mediciones realizadas por DHN en la ciudad de Tambo de Mora.

Sección	Latitud	Longitud	Altura de Ola (m)	Distancia Inundada (m)
1	13°26'53"	76°11'18"	1.73	483.60
2	13°27'40"	76°11'10"	2.63	171.00
3	13°28'09"	76°11'25"	2.91	102.70

Otro estudio que muestra las consecuencias debido al tsunami del 15 de Agosto de 2007 en términos de alturas máximas de inundación y run-up, es mostrado en Fritz et al. (2008). En la Figura 3.3 muestra los datos observados en campo y los resultados de un modelamiento numérico del tsunami.

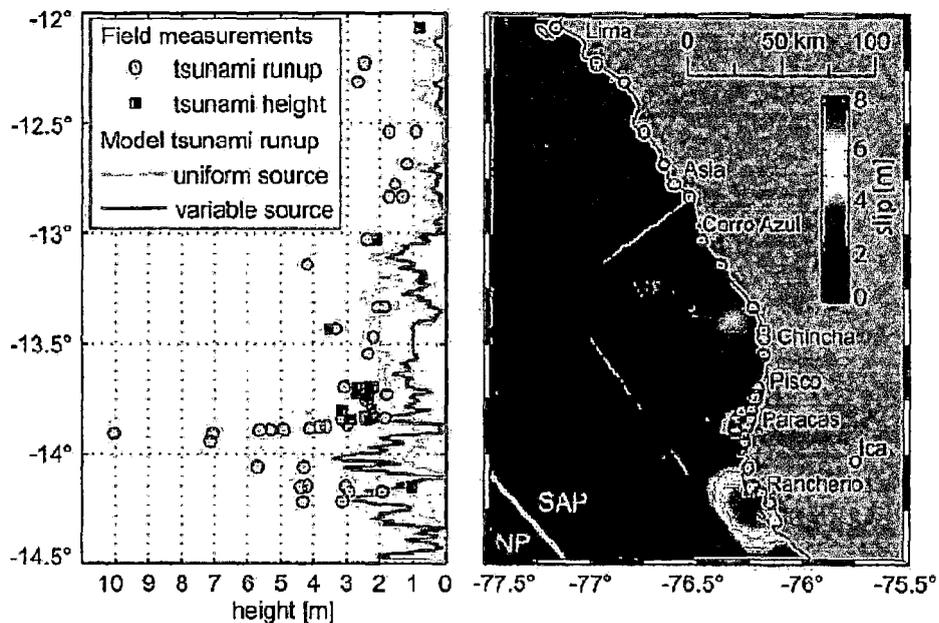


Figura 3.3. Alturas de inundación y run-up del tsunami del 15 de Agosto de 2007 a lo largo de la costa sur del Perú (izquierda). Distribución espacial de la dislocación asumida para la simulación numérica (derecha). Figura original de Fritz et al. (2008).

El tsunami del 15 de Agosto de 2007, fue registrado por algunas estaciones mareográficas en el Perú administrados por DHN. La Figura 3.4 muestra el registro mareográfico registrado en la estación Callao, la cual estaría localizada en el distrito de la Punta, provincia constitucional del Callao, en las coordenadas 12.05°S 77.15°W. Este registro contiene dos señales, la señal pura del tsunami y la señal astronómica o señal de mareas, esta última representada por la línea punteada azul. Adicionalmente, con la finalidad de obtener el tiempo en el cual la señal del tsunami comenzó a registrarse es necesario sustraer el tiempo de origen del evento sísmico, el cual según USGS fue 6:41 PM hora peruana, entonces en la señal mareográfica 0 minutos estaría indicando el instante en el que el evento sísmico ocurrió, lo que significa que el tsunami comenzó a registrarse aproximadamente 60 minutos después de ocurrido el evento en la estación mareográfica del Callao (Figura 3.4).

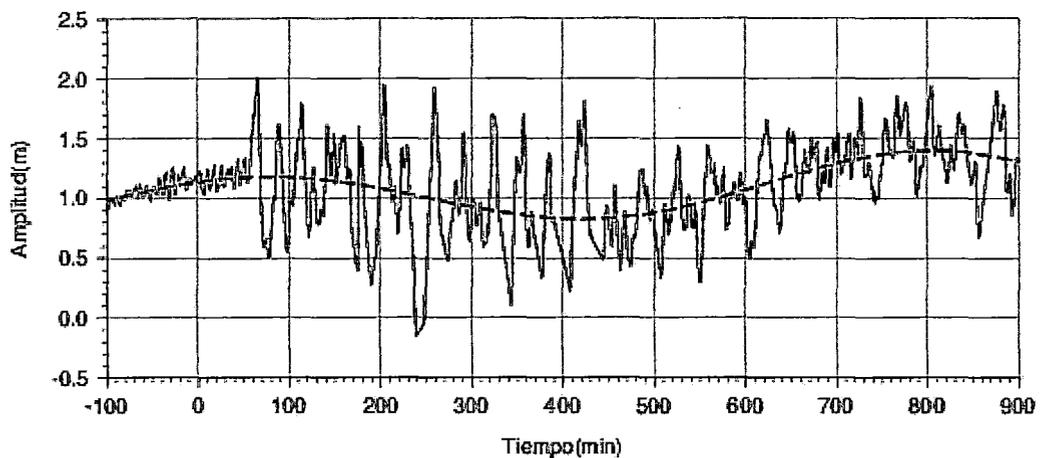


Figura 3.4. Registro mareográfico del tsunami del 15 de Agosto de 2007 registrado en la estación Callao (línea roja). La línea punteada azul representa la señal astronómica del mar o señal de la marea.

La señal pura del tsunami se obtiene de la sustracción de la señal astronómica del registro mareográfico, línea continua roja menos la línea punteada azul de la figura anterior. La Figura 3.5 muestra la señal del tsunami del 15 de Agosto de 2007. Con la señal pura del tsunami se puede leer dos datos importantes en el análisis de tsunamis, la altura de la primera ola y el tiempo que demora esta en registrarse, para la estación Callao estos son aproximadamente igual a 0.71 m y 59 minutos respectivamente.

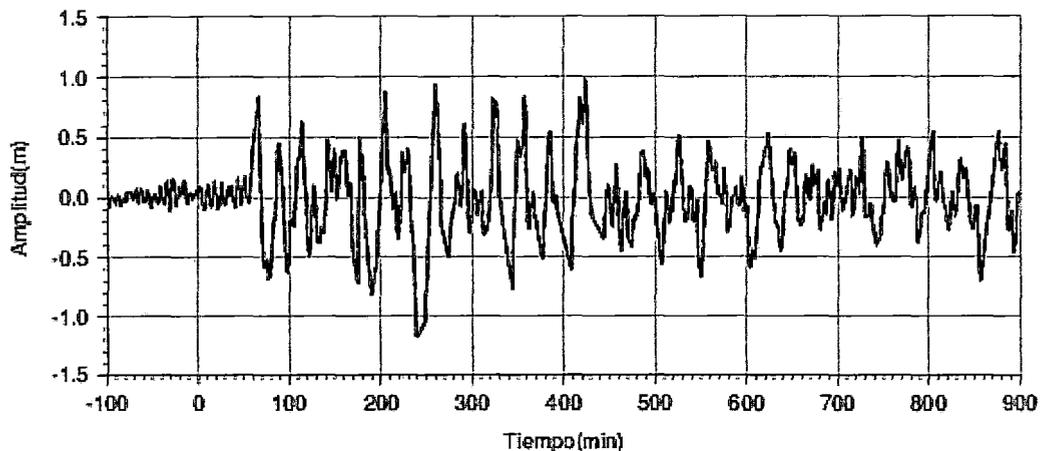


Figura 3.5. Señal del tsunami del 15 de Agosto de 2007 registrado en la estación mareográfica del Callao.

### 3.2. MODELO DE LA FUENTE DEL TSUNAMI

Los modelos de fuente sísmica son de dos tipos en el modelamiento de tsunamis, el modelo de dislocamiento uniforme y el modelo de dislocamiento heterogéneo. El primero es el modelo más simple y rápido de estimar, razones por las cuales este es usado para un análisis preliminar del peligro de tsunami después de la ocurrencia de un evento sísmico y a fin de lanzar una alarma frente a tsunamis, este es calculado usando los parámetros de fuente sísmica y la magnitud del evento, para un área de falla única con un único valor de dislocación. El segundo modelo, los modelos de dislocamiento heterogéneo, son calculados con análisis más complejos los cuales involucran un tiempo prolongado en obtener los resultados, este modelo usa sismogramas o mareogramas registrados en diferentes estaciones después de la ocurrencia de un evento sísmico; dividiendo el área de la falla en sub-áreas de falla para obtener un dislocamiento de diferente valor para cada sub-área, a este tipo de análisis se le conoce como inversión de la fuente sísmica.

#### 3.2.1. MODELO DE DISLOCAMIENTO UNIFORME

En este trabajo, el modelo de dislocamiento uniforme para el terremoto del 15 de Agosto de 2007, es calculado basado en la solución sísmica de CMT, disponible en <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> y las ecuaciones propuestas en Papazacho et al. (2004). La Tabla 3.2 muestra los parámetros para este modelo de fuente sísmica.

Tabla 3.2. Parámetros de fuente sísmica para el modelo de dislocamiento uniforme, basados CMT y Papazacho 2004.

Parámetros	Valores
Magnitud	$M_w$ 8.0
Longitud	77.04°W
Latitud	13.73°S
Dirección (Azimut)	321°
Ángulo de dislocamiento	28°
Angulo de inmersión	63°
Profundidad	33.8 km
Dislocación	2.2 m
Largo del área de falla	162 km
Ancho del área de falla	71 km

Con la finalidad que el área de ruptura o área de la falla cubra la zona donde el evento sísmico del 15 de Agosto de 2007 liberó la mayor cantidad de energía el área de la falla se ubica de manera que el epicentro y las replicas de mayor magnitud se encuentren dentro de esta, adicionalmente la dirección del plano de falla debe tener el mismo valor que la azimut de la fuente sísmica, mostrada en la Tabla 3.2. La Figura 3.6 muestra la ubicación del área de la falla para el modelo de dislocamiento uniforme, la cual representa el área de ruptura del evento sísmico, ésta se ubica en la parte sur del epicentro lo que indica que el proceso de ruptura fue de norte a sur siguiendo la dirección de la fosa de Nazca. Adicionalmente aproximadamente el 40% del área de ruptura se extiende sobre la zona costera continental que corresponde desde la península de Paracas hasta las playas de Nazca.

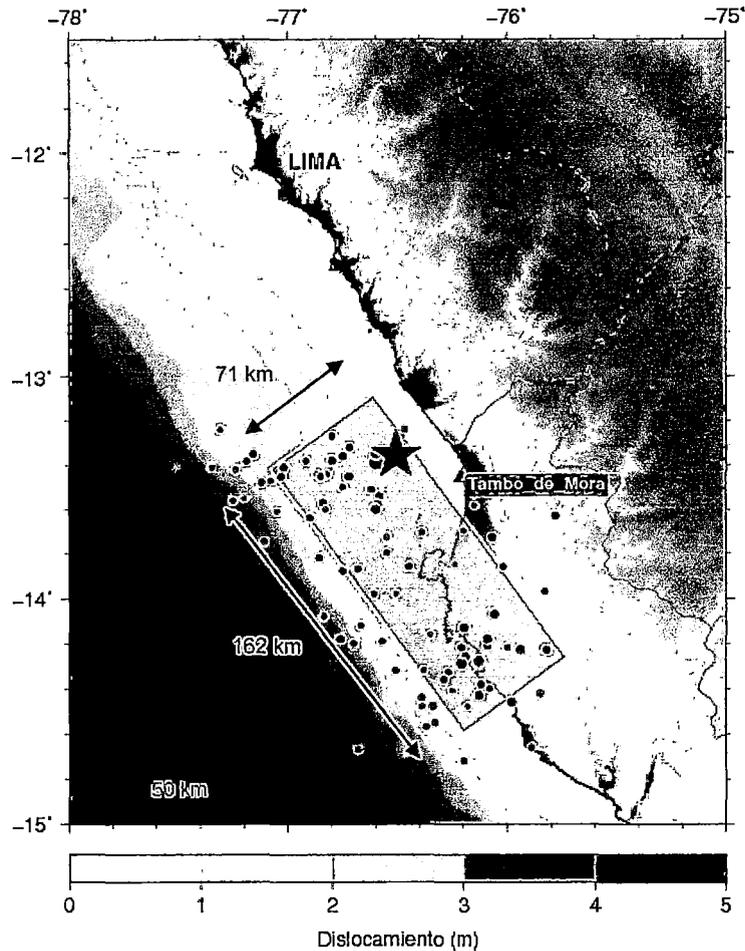


Figura 3.6. Modelo de dislocamiento uniforme basado en la solución sísmica de CMT para el terremoto del 15 de Agosto de 2007. La estrella azul muestra la ubicación del epicentro y los puntos rojos representan la distribución espacial de las réplicas.

### 3.2.2. MODELO DE DISLOCAMIENTO HETEROGÉNEO

El terremoto del 15 de Agosto de 2007 ha sido estudiado por diferentes investigadores en todo el mundo, resultado de esto son las diferentes publicaciones que proponen modelos de fuente sísmica calculados usando diferentes metodologías. Un ejemplo de esto último es el modelo publicado en Herbert (2009) donde ellos estudiaron las características de la fuente sísmica y las alturas del tsunami, del terremoto del 15/08/2007, desarrollando tres diferentes modelos, el primero usando ondas sísmicas superficiales para calcular la solución del tensor de esfuerzos, el segundo usando ondas sísmicas de cuerpo para calcular la distribución de los dislocamientos en el área de ruptura y el tercero usando registros mareográficos para calcular el patrón de dislocamiento en el área de ruptura, la Figura 3.7 muestra el resultado de la

inversión de la fuente sísmica usando ondas de cuerpo, donde se observa la presencia de dos principales zonas de ruptura al Norte y al Sur del la ciudad de Pisco.

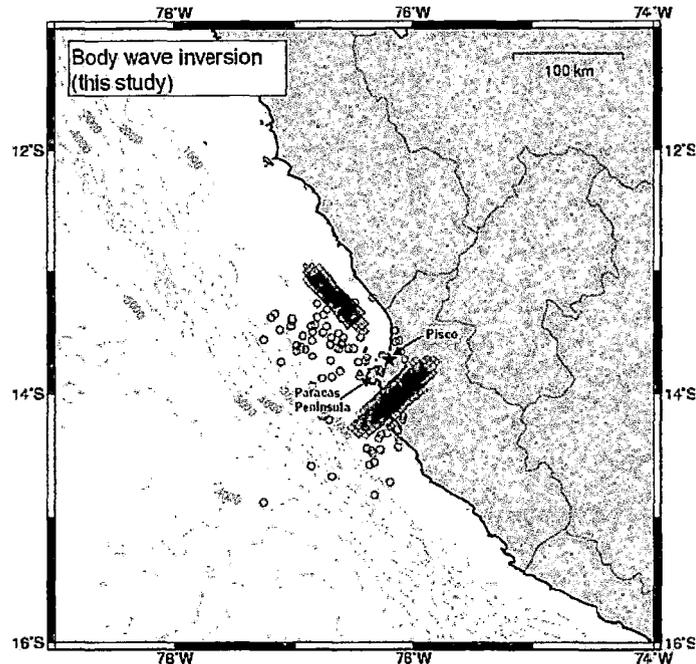


Figura 3.7. Distribución del desplazamiento del plano de falla obtenido de la inversión de ondas sísmicas de cuerpo. Los puntos blancos representan la distribución de las réplicas de un mes tomadas de la USGS.

Otro ejemplo del modelo de fuente sísmica de este evento está publicado en Fritz et al. (2008) donde se estudió la inundación por el tsunami mediante un modelo numérico y datos de campo post-tsunami. La parte derecha de la Figura 3.3 muestra la distribución del desplazamiento del área de ruptura, el cual fue calculado mediante la inversión de tele datos sísmicos. Este modelo consta de dos sub-planos de falla y divide ~80% del momento sísmico en el sub-plano sur.

En este estudio el modelo de desplazamiento heterogéneo es basado en los dos modelos sísmicos presentados anteriormente. La Figura 3.8 muestra el área de falla la cual está dividida en cuatro sub-planos de falla, la ubicación espacial de los sub-planos de falla están basado en los resultados de Fritz et al. (2008) cada uno de estos sub-planos tiene un valor de dislocación diferente representado de acuerdo a los colores en que estos están dibujados, también se observa que el sub-plano N°1, ubicado en la zona sur del área de ruptura, es el

presenta mayor valor de desplazamiento. La Tabla 3.3 muestra los parámetros de la fuente sísmica para los cuatro sub-planos, la distribución de los valores de desplazamiento están basadas en los resultados de Herbert (2009), siendo los valores de los sub-planos N°1 y N°4 originales en esta publicación y los sub-planos N°2 y N°3 son establecidos con la finalidad de definir el área de ruptura rectangular.

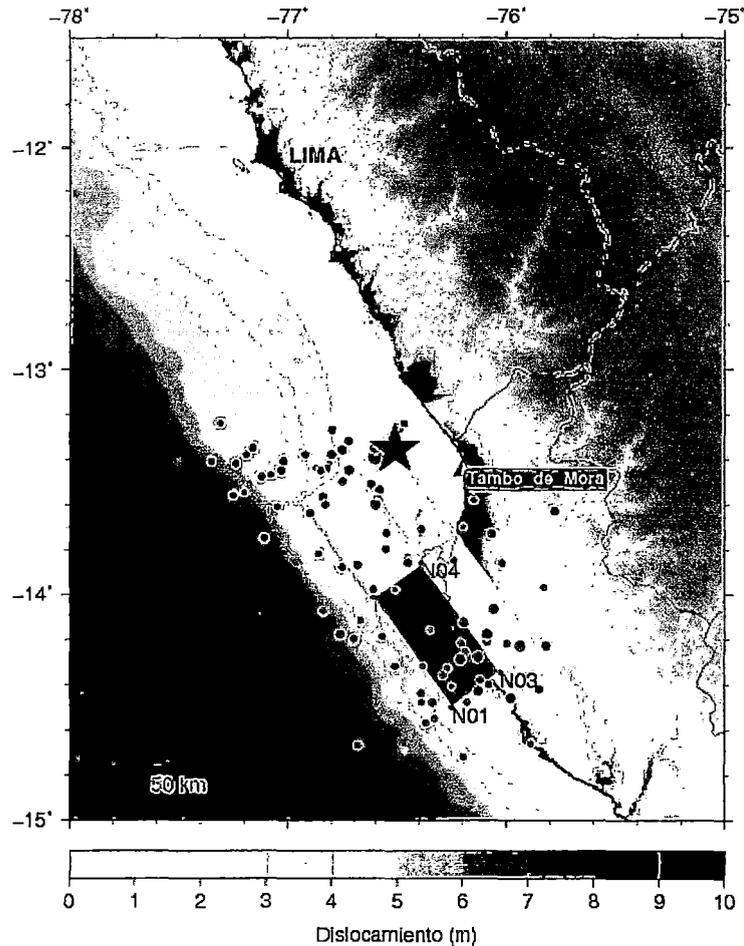


Figura 3.8. Distribución del desplazamiento del plano de falla basados en los trabajos de Herbert (2009) y Fritz et al. (2008). Puntos rojos representan la distribución de las réplicas de un mes tomadas de la USGS.

Tabla 3.3. Parámetros de fuente sísmica para los cuatros sub-planos de falla que definen el modelo de dislocamiento heterogéneo, basados en los trabajos de Herbert H. (2009) y Fritz H. et al. (2008).

Parámetros	Sub-Fallas			
	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4
Longitud	76.25°W	76.61°W	76.02°W	76.39°W
Latitud	14.50°S	14.02°S	14.34°S	13.86°S
Dirección (Azimut)	324°	324°	324°	324°
Ángulo de dislocamiento	27°	27°	27°	27°
Angulo de inmersión	64°	64°	64°	64°
Profundidad	10 km	10 km	10 km	10 km
Dislocación	8.5 m	0.5 m	0.5 m	3.7 m
Largo del área de falla	66 km	59 km	66 km	59 km
Ancho del área de falla	33 km	33 km	25 km	25 km

### 3.3. DEFORMACIÓN DEL FONDO MARINO

La deformación inicial de la superficie del océano o condición inicial del tsunami es determinado calculando la deformación de la estructura del fondo del océano basado en las ecuaciones propuestas en Okada Y. (1985). En este artículo se proponen ecuaciones para el cálculo del desplazamiento, esfuerzos e inclinación productos de la dislocación que sufre la estructura del fondo del océano durante un evento sísmico. Estas ecuaciones están basadas en estudios previos y un modelo realístico de la estructura de la tierra. Estos previos estudios revelan que el efecto de la curvatura de la tierra es depreciable para eventos a poca profundidad y a longitudes de ruptura menores a 20° de, pero las capas verticales pueden algunas veces causar considerables efectos en los campos de deformación.

En este estudio para el cálculo de las deformaciones iniciales de ambos modelos de fuente sísmica, se usa la rutina basada en las ecuaciones propuestas en Okada Y. (1985) la cual fue desarrollada en la Disaster Control Research Center, Tohoku University (DCRC, Tohoku University). Las figuras 3.9 y 3.10 muestran el resultado de la condición inicial del tsunami para el modelo de dislocamiento uniforme y el modelo de dislocamiento heterogéneo respectivamente, donde en la parte izquierda las curvas de nivel (líneas rojas

positivas y líneas azules negativas) muestran la deformación inicial y la parte derecha muestra una elevación en tres dimensiones de la deformación.

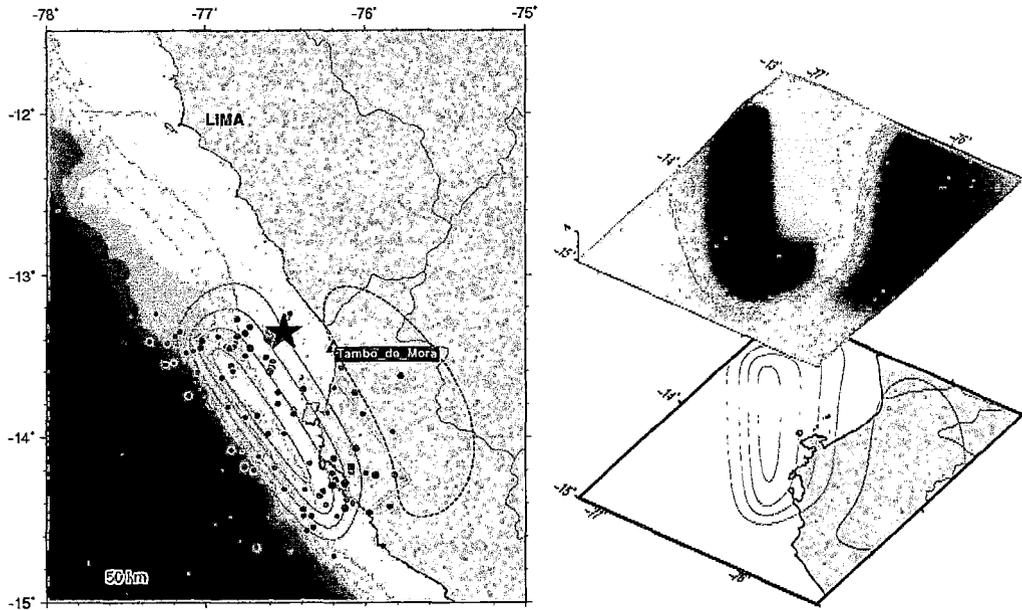


Figura 3.9. Deformación de la superficie del océano basados en la solución sísmica propuesta por Global CMT y Papazachó et al. (2004). Los puntos rojos representan la distribución de las réplicas de un mes tomadas de la USGS.

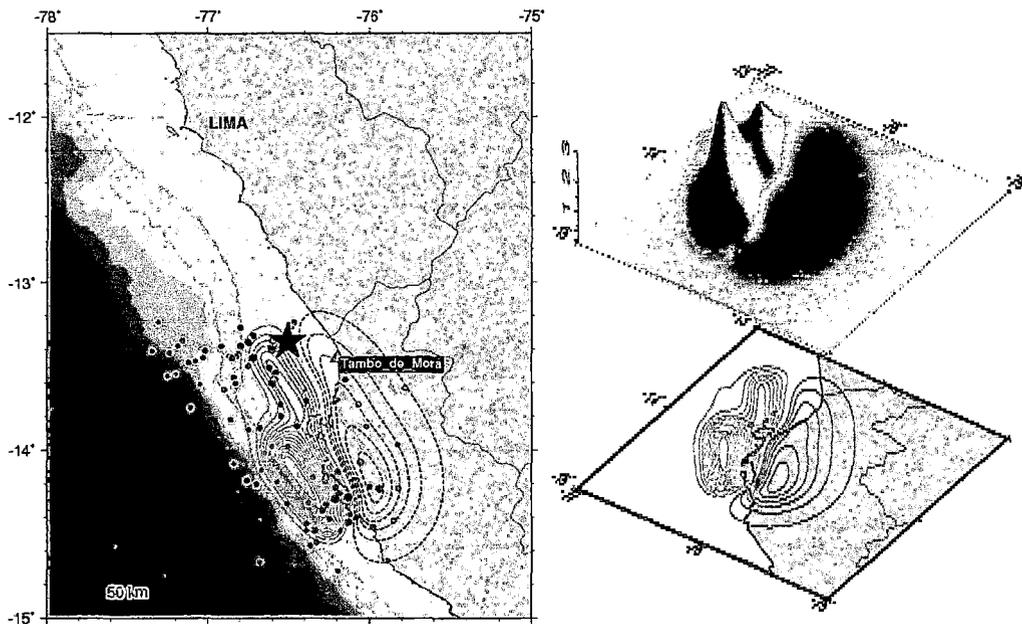


Figura 3.10. Deformación de la superficie del océano basados en los trabajos de Herbert (2009) y Fritz et al (2008). Los puntos rojos representan la distribución de las réplicas de un mes tomadas de la USGS.

En las figuras 3.9 y 3.10 los mapas del lado izquierdo muestran la distribución espacial de la deformación vertical de la superficie del océano mediante curvas de nivel, donde las deformaciones positivas y negativas son representadas por las curvas de nivel en color rojo y en color azul respectivamente las cuales esta dibujadas a cada 0.20 m. Las vistas en perspectiva de las condiciones iniciales del tsunami para ambos modelos de fuente sísmica son mostradas en el lado derecho de las figuras 3.9 y 3.10. La condición inicial calculada con el modelo de dislocamiento uniforme muestra una deformación positiva máxima aproximadamente de 0.90 m la cual es uniforme en toda el área de falla. Por otro lado, la condición inicial calculada a partir del modelo de dislocamiento heterogéneo muestra un pico positivo máximo aproximadamente de 3.20 m al sur del plano de falla y adicionalmente un segundo pico positivo de 1.10 m al norte del plano de falla, esto es debido la distribución espacial de los sub-planos de falla del modelo de dislocamiento heterogéneo (Figura 3.8) lo que estaría asegurando un mejor modelo para la condición inicial del tsunami producto del terremoto del el 15 de Agosto de 2007.

### 3.4. FORMAS DE ONDAS DEL TSUNAMI

De acuerdo a la teoría descrita en el Capítulo 2, el intervalo de tiempo para satisfacer la condición de estabilidad numérica es de 1 segundos, el coeficiente de rugosidad o coeficiente de Manning es igual a 0.025 para toda la superficie topográfica y con la finalidad de reducir el tiempo computacional el dominio de cómputo se divide en 4 sub-dominios anidados cuyas resoluciones espaciales varían desde 810 m a 30 m, los limites de cada sub-dominio y sus resoluciones espaciales respectivas son mostrados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Limites para cada sub-dominio de cómputo y resoluciones espaciales.

Sub-dominio	Límites				Resolución Espacial (m)
	Longitud		Latitud		
1	[-78.10°	-75.10°]	[-15.25°	-11.50°]	810.0
2	[-76.75°	-76.00°]	[-14.35°	-13.00°]	270.0
3	[-76.50°	-76.10°]	[-14.00°	-13.25°]	90.0
4	[-76.33°	-76.15°]	[-13.58°	-13.33°]	30.0

La Figura 3.11 muestra de forma esquemática la anidación de los 4 sub-dominios de cómputo, donde se observa que cada sub-dominio se encuentra dentro del sub-dominio anterior de mayor resolución espacial, la línea gris representa la línea costera.

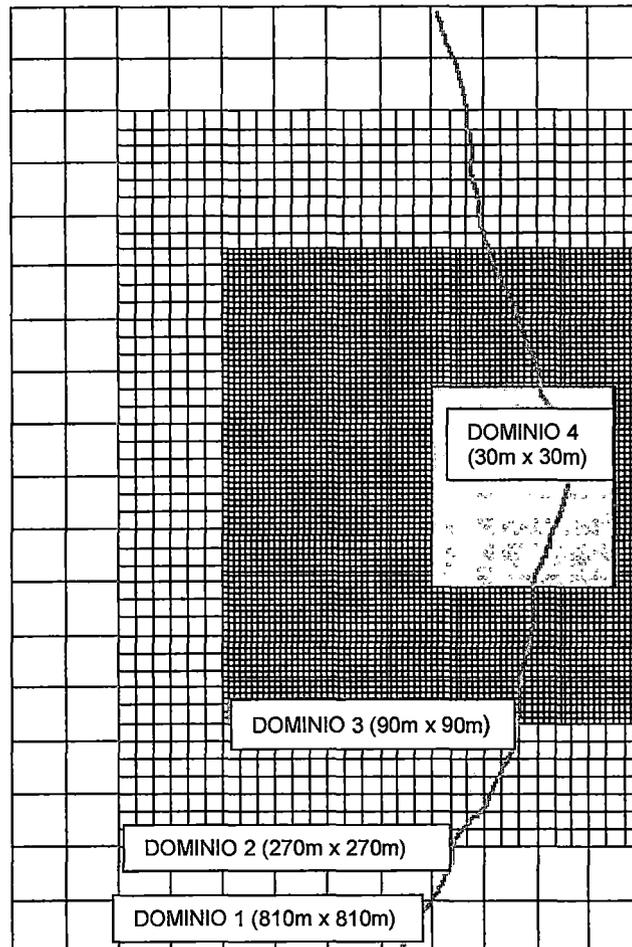


Figura 3.11. Esquema de la anidación de los 4 sub-dominios para el cálculo de la propagación del tsunami.

La propagación del tsunami es calculada para un tiempo de 3.5 horas a partir del inicio del evento sísmico. En las Figuras 3.12 y 3.13 se muestran las tomas instantáneas de la propagación del tsunami para los tiempos 0, 15, 30, 45 minutos calculados para ambos modelos de fuente sísmica.

Las formas de onda del tsunami o señal sintética del tsunami fueron obtenidas de la propagación numérica del tsunami para ambos modelos de fuente sísmica. La Figura 3.14 muestra la comparación entre la señal del tsunami registrado y las señales sintéticas correspondientes a ambos modelos, estas señales están calculadas en intervalos de 1 minuto.

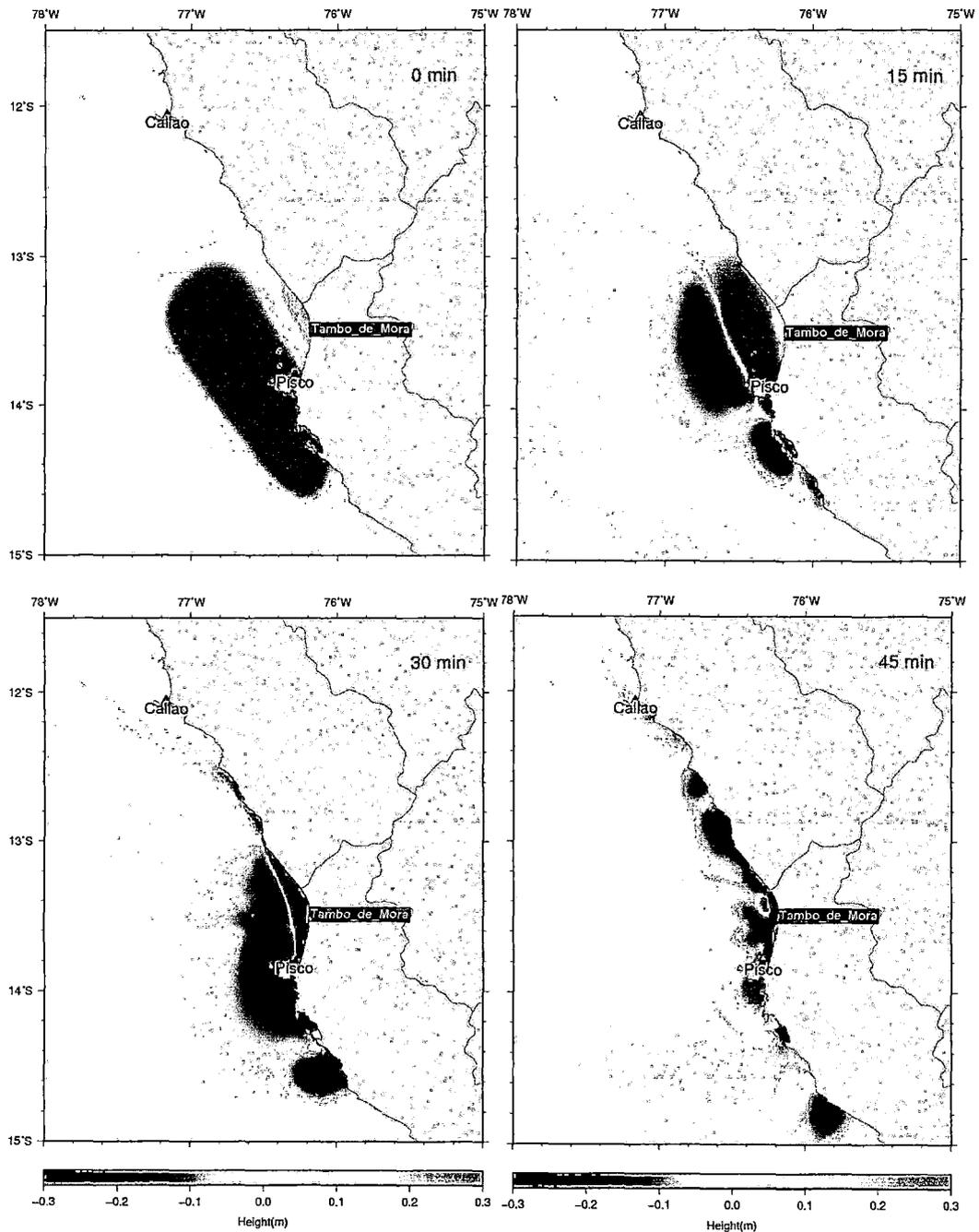


Figura 3.12. Tomas instantáneas, para los tiempos 0, 15, 30 y 45 minutos, de la propagación del tsunami a partir de la condición inicial calculada usando el modelo de fuente sísmica de dislocamiento uniforme. Las ondas positivas y negativas del tsunami son representados por los colores rojo y azul respectivamente los cuales están plateados con un máximo de 0.30 m como se muestra en la barra de escala.

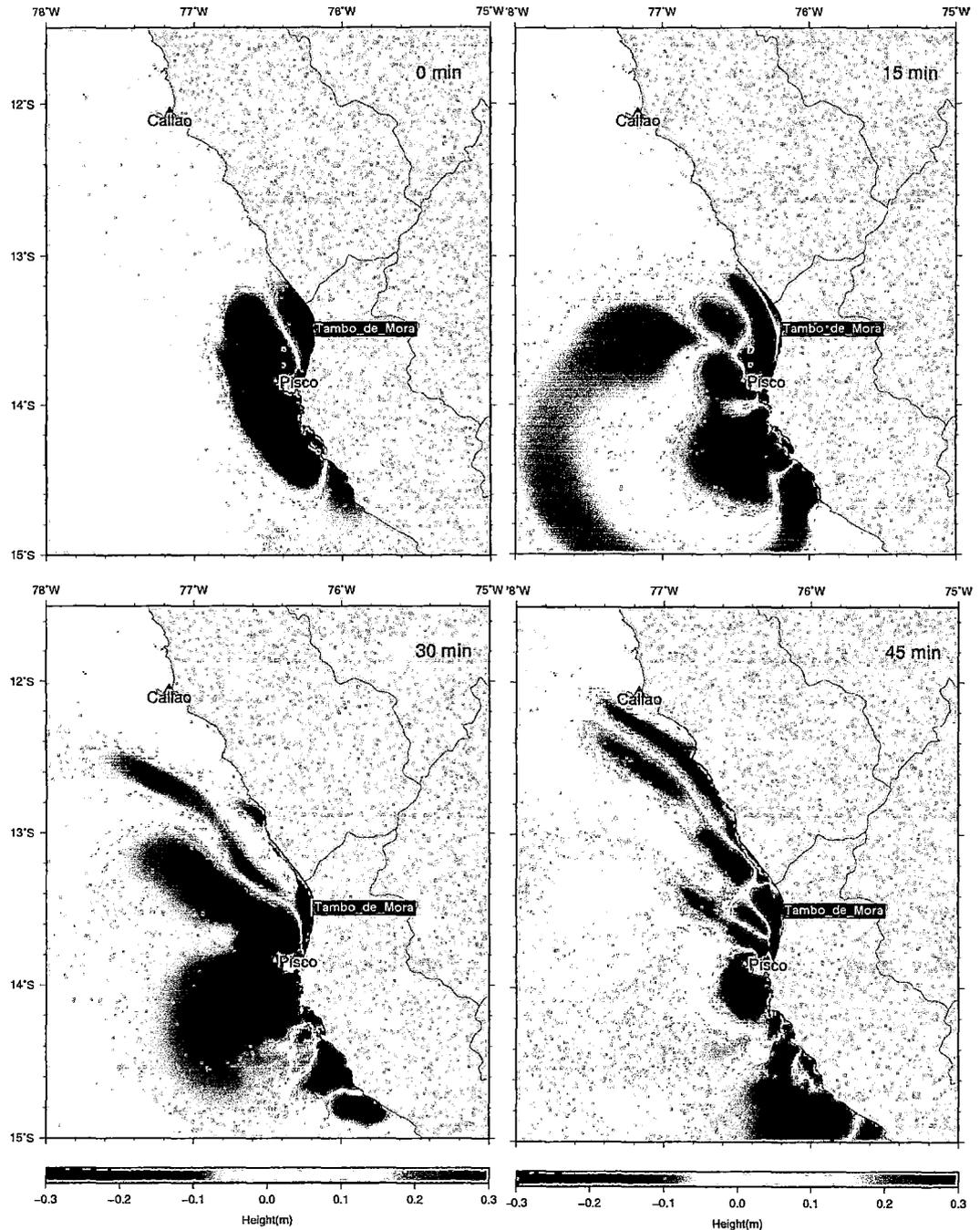


Figura 3.13. Tomas instantáneas, para los tiempos 0, 15, 30 y 45 minutos, de la propagación del tsunami a partir de la condición inicial calculada usando el modelo de fuente sísmica de dislocamiento heterogéneo. Las ondas positivas y negativas del tsunami son representados por los colores rojo y azul respectivamente los cuales están plateados con un máximo de 0.30 m como se muestra en la barra de escala.

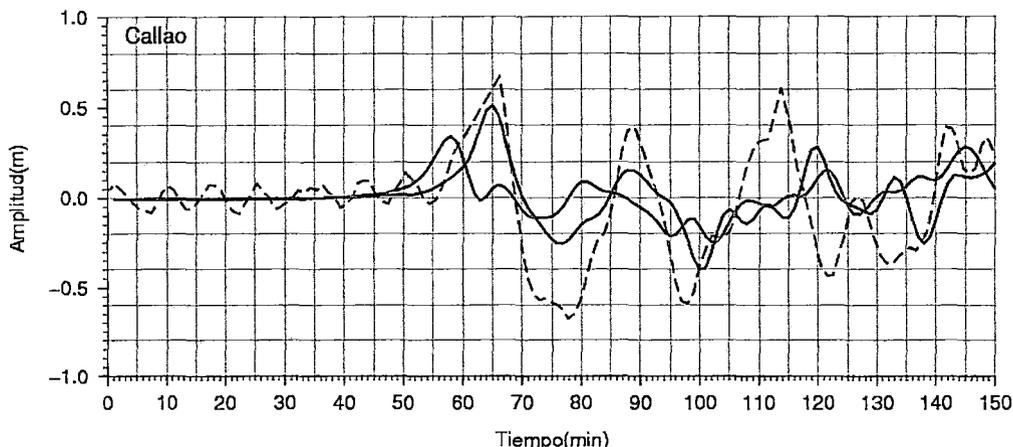


Figura 3.14. Comparación de la forma de onda registrada en la estación mareográfica del Callao (línea discontinua roja) y las formas de onda sintéticas correspondientes a dos modelos de fuentes sísmica diferente (línea azul corresponde al modelo de dislocamiento uniforme y la línea verde corresponde al modelo de dislocamiento heterogéneo).

De la figura anterior se observa que el modelo que menos se aproxima a la señal real del tsunami observado es el modelo de dislocamiento uniforme (línea continua verde) este modelo estima la altura de la primera ola en 0.38 m, menor al observado, y el tiempo de arribo de esta igual a 47 minutos, 10 minutos antes del tiempo real registrado. Sin embargo, la señal del modelo de dislocamiento heterogéneo (línea continua azul) se aproxima más a la señal real del tsunami registrado, este modelo estima la altura de la primera ola y su tiempo de arribo igual a 0.54 m y 55 minutos respectivamente comparados con 0.59 m y 59 minutos que corresponde al registro real observado, lo que significa que este modelo es el más apropiado para la simulación numérica del modelo de inundación del tsunami ocurrido el 15 de Agosto de 2007.

### 3.5. ÁREA Y DISTANCIA DE INUNDACIÓN

El modelo de inundación del tsunami es calculado usando la deformación inicial del tsunami calculado con el modelo de fuente sísmica de dislocación heterogéneo, esto debido a que la señal sintética del tsunami calculado con este modelo presenta mayor correlación con la señal real del tsunami observado (Figura 3.14). Para el modelo de inundación se usó un sub-dominio de resolución espacial igual a 30 m (sub-dominio en la Tabla 3.4). La batimetría del sub-dominio fue interpolada de los datos originales proporcionados por la DHN, los

cuales originalmente correspondían a puntos de sondaje a cada 50 m; la topografía es tomada de la imagen satelital del sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), disponible en <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>, el cual proporciona un modelo digital de elevaciones del terreno con una resolución espacial de 1 arc-segundo el cual es equivalente a 30 m aproximadamente; finalmente la batimetría y la topografía son unidas usando el software ArcGIS 10.0 obteniendo un sub-dominio de 660x900 puntos espaciados cada 30 en ambas direcciones. La Figura 3.15 muestra una imagen del sub-dominio 4 el cual es usado para el modelo numérico de inundación.

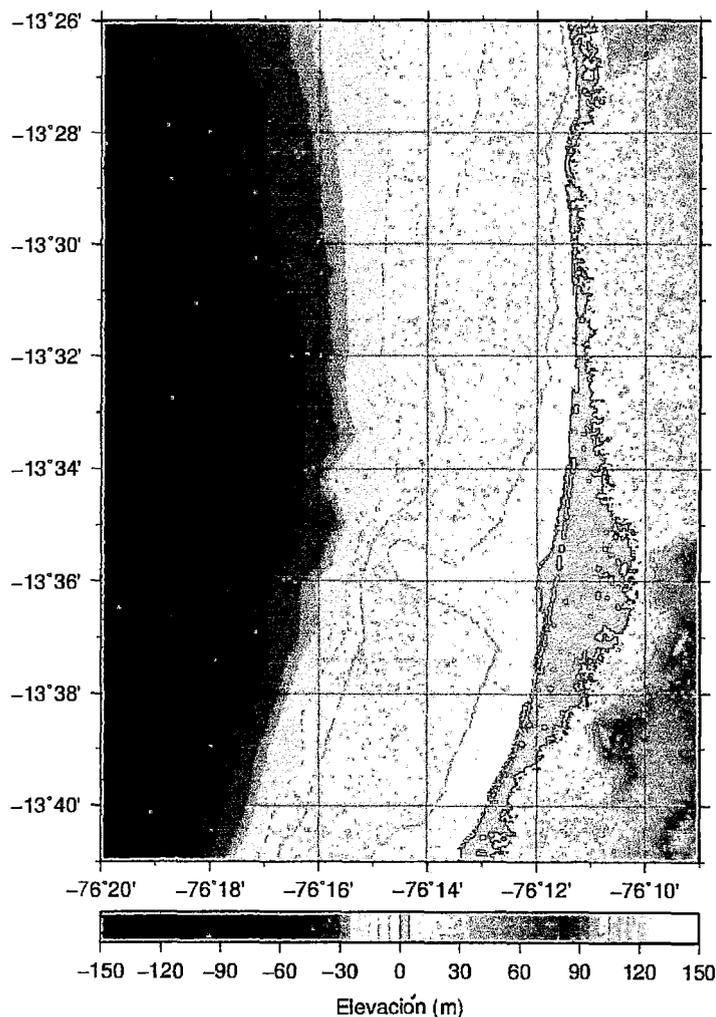


Figura 3.15. Sub-dominio para el modelo numérico de inundación por tsunami construida a partir de los datos batimétricos proporcionados de DHN y el modelo digital de elevación tomado de ASTER.

La Figura 3.16 muestra el diagrama de flujo adoptado para el modelamiento numérico del tsunami ocurrido el 15 de Agosto de 2007, el cual inicia con la selección de los parámetros de fuente sísmica para los modelos de dislocamiento sísmicos y finaliza con el cálculo del modelo numérico de inundación en la zona de estudio.

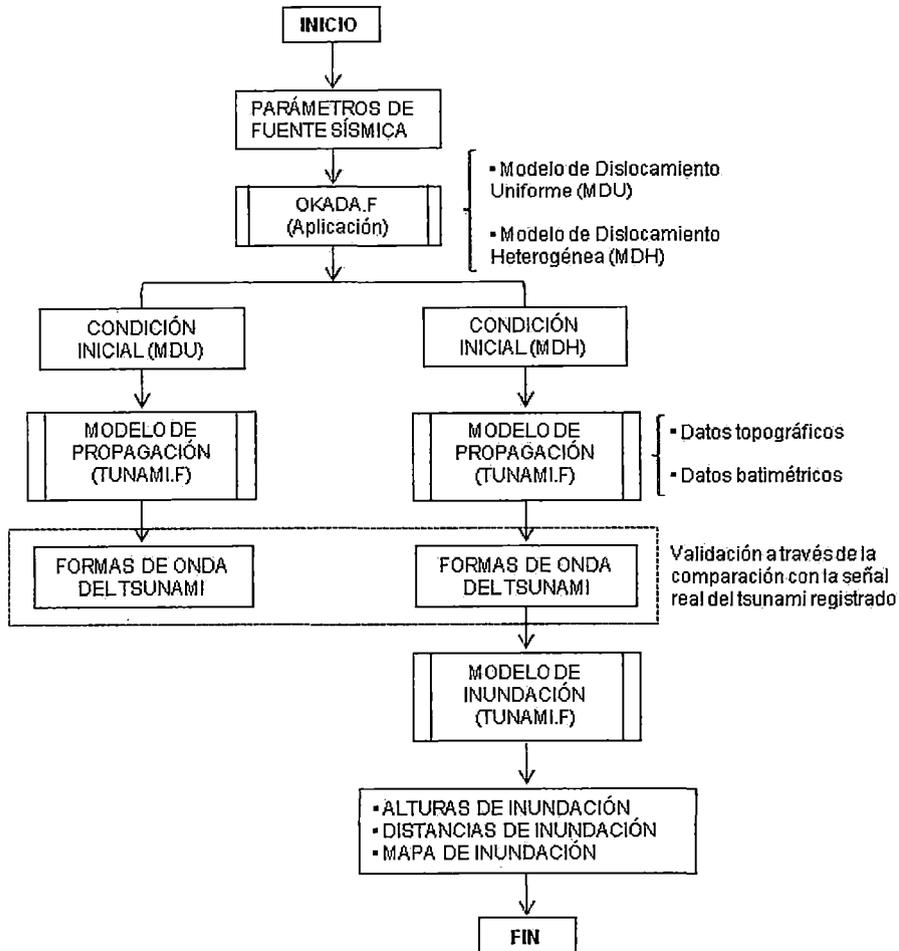


Figura 3.16. Diagrama de flujo para la modelación numérica del tsunami del 17 de Agosto de 2007.

El cálculo del modelo de inundación está enfocado en la zona correspondiente al distrito de Tambo de Mora, el resultado de este análisis es mostrado en la Figura 3.17 donde se observa que la altura de inundación alcanzaría una altura máxima de 3.5 m en zonas cercanas a la línea costera, la altura de inundación predominante tendría valores de hasta 0.0 m y 1.5 m, en la zona urbanas. Las distancias de inundación calculadas varían de 50 m hasta 482 m, siendo la parte norte de Tambo de Mora la zona que presenta mayor

inundación, alcanzando una inundación máxima de 482.41 m, sin embargo en la parte sur, donde se ubican una gran parte de las viviendas de Tambo de Mora, la distancia inundación llegó a 151.46 m cubriendo aproximadamente el 40% de las viviendas de esta zona.

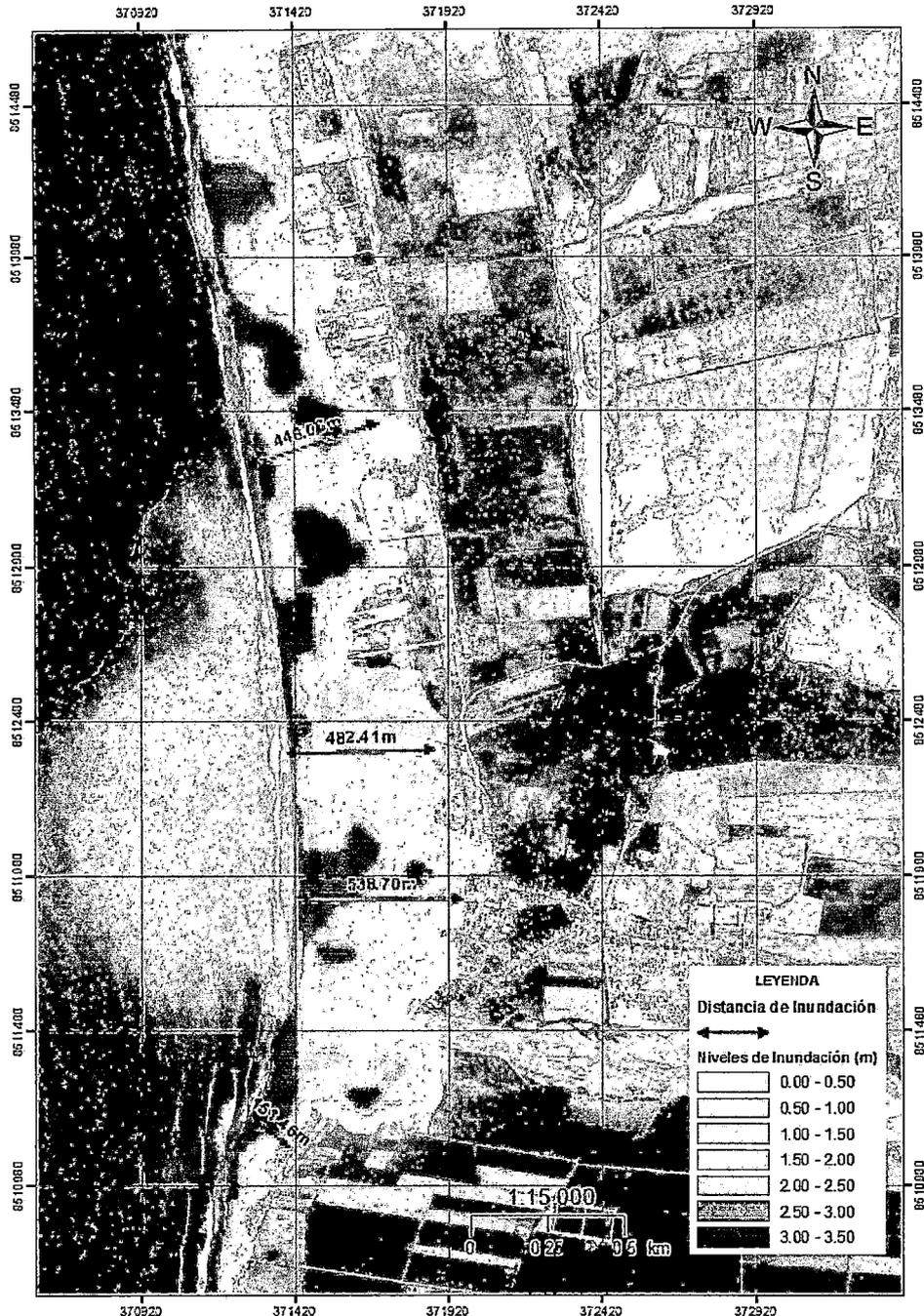


Figura 3.17. Mapa de inundación para el distrito de Tambo de Mora, provincia de Ica, este es calculado usando el modelo de fuente sísmica de dislocamiento heterogéneo. Imagen de fondo de Google Earth de fecha 19/02/2004.

## **CAPÍTULO 4: DATOS POST-TSUNAMI Y** **ANÁLISIS GEOESPACIAL**

### **4.1. DATOS DE RECONOCIMIENTO POST-TSUNAMI EN LA ZONA DE APLICACIÓN**

La recopilación de los datos post-tsunami fue realizada por un equipo técnico conformado por bachilleres en ingeniería civil e ingenieros civiles del Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID). Este trabajo de campo se realizó aproximadamente nueve meses después de ocurrido el terremoto, los trabajos de campo se concentraron en los distritos de Tambo de Mora y Chincha Baja del departamento de Ica y su financiamiento estuvo a cargo del Banco Mundial y la administración del FORSUR (Fondos de Reconstrucción del Sur).

Los datos recopilados en el trabajo de campo, fueron tomados a nivel de lotes, dividiéndose estos en 3 grupos principales: Ubicación, Descripción y Estado Estructural, estos se pueden observar en la Figura 4.1, la cual corresponde a la ficha de campo usada en el levantamiento de datos que fue elaborada en el CISMID. En el grupo de Ubicación, los datos de campo corresponden a la ubicación espacial de las viviendas, incluida una fotografía que muestra su estado actual de la edificación. En el grupo Descripción los datos describen el estado de la vivienda, con variables como del tipo de material de construcción, numero de pisos, el uso urbano y en algunos casos si la vivienda colapsó por el terremoto. En el grupo Estado Estructural, los datos de campo recopilados se enfocaron principalmente al daño estructural que las viviendas sufrieron debido al terremoto, como por ejemplo: fisuras en los muros, desplome de algunos muros, hundimiento de la cimentación, etc. que categorizan la vivienda o edificación en uno de los cuatro niveles de daño considerados en el análisis, los cuales son: Sin Daño, Daño Leve, Daño Moderado y Daño Severo.

En el distrito de Tambo de Mora, adicionalmente a los datos descritos en el párrafo anterior, se pudieron observar y recopilar algunas señales remanentes correspondientes a la inundación producto del tsunami ocurrido, estas señales

se encontraron en las viviendas ubicadas en las proximidades de la línea costera predominantemente en la zona centro y sur del distrito. Además, se entrevistó a algunos pobladores cuyas viviendas fueron afectadas por el inundación producto del tsunami, quienes manifestaron que después de ocurrido el terremoto, el mar embraveció y después de aproximadamente 20 minutos de ocurrido el sacudimiento del terreno arribaron a la costa una serie de olas que inundaron sus viviendas. La Figura 4.2 muestra dos fotografías de dos viviendas diferentes ubicadas en las cercanías de la línea costera; la primera tomada en la zona sur, muestra una pobladora señalando aproximadamente el nivel de inundación en el muro de su vivienda que habría alcanzado una altura de 1.2m de acuerdo al testimonio de esta persona, la segunda fotografía tomada en la zona central muestra la fachada de una vivienda en la cual aun se puede observar el nivel de inundación producido por el tsunami, la ubicación de esta vivienda es aproximadamente a 290m de la costa y el nivel de inundación indicado por la mancha de humedad en el muro de la fachada es de 1.10 m aproximadamente.

FICHA DE EVALUACION PARA EDIFICACIONES					
Proyecto de Microzonificación Sísmica de Tambo de Mora y Chincha Baja					
TAMBO DE MORA	CHINCHA BAJA				
1.0.UBICACION					
1.1.DIRECCION:					
1.2.ZONA Y MANZANA:					
1.3.LOTE					
1.4.NUMERO DE FOTO					
2.0.DESCRIPCION	Sin Daño (0.05-0.1 mm)      Daño Leve (0.20mm-1.0 mm)				
2.1.EDIFICACION COLAPSADA	SI	NO			
2.2.NUMERO DE PISOS :					
2.3.MATERIAL	A	M	C		
2.4.USO :	Vivienda	Salud	Educacion	Abandonado	Baldio
	Otro (especifique)				
3.0. ESTADO ESTRUCTURAL					
SIN DAÑO					
DAÑO LEVE - Fisuras $e \leq 1.0$ mm.					
DAÑO MODERADO - Fisuras $1.2 < e \leq 2.0$ mm.					
DAÑO SEVERO o COLAPSO - Fisuras $e > 3.0 \sim 5$ mm.	Daño Severo (3.0 mm)      Daño Muy Severo (5.0 mm. ~ 10.0 mm)				
4.0 OBSERVACIONES	NOTA: (Alternativas de Uso 2.4)				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Usos actuales del suelo/lote <ul style="list-style-type: none"> <li>o Vivienda, salud, educación.</li> </ul> </li> <li>o Actividad Comercial urbana <ul style="list-style-type: none"> <li>o Basar, Hotel/hostal, grifo, Bodega, Mercado, Venta ambulatória (marcar en el plano el área ocupada), Restaurantes, Venta de insumos agrícolas o pecuarios.</li> </ul> </li> <li>o Areas de recreación <ul style="list-style-type: none"> <li>o Parques, jardines urbanos, locales especiales.</li> </ul> </li> <li>o Usos especiales <ul style="list-style-type: none"> <li>o Granjas, Establos, depósitos de materiales de construcción, depósitos de insumos agrícolas o pecuarios.</li> </ul> </li> <li>o Usos institucionales <ul style="list-style-type: none"> <li>o Municipalidad, INDECI, ONGs (colocar nombre), Seguridad ciudadana, Iglesia (colocar credo), oficinas del Estado (colocar nombre del organismo); Comisaría; local del Ejército.</li> </ul> </li> </ul>				

Figura 4.1. Ficha de campo usada en los trabajos de levantamiento de datos de daños post-terremoto en las zonas de los distritos de Tambo de Mora y Chincha Baja del departamento de ICA. Ficha elaborada en el CISMID.

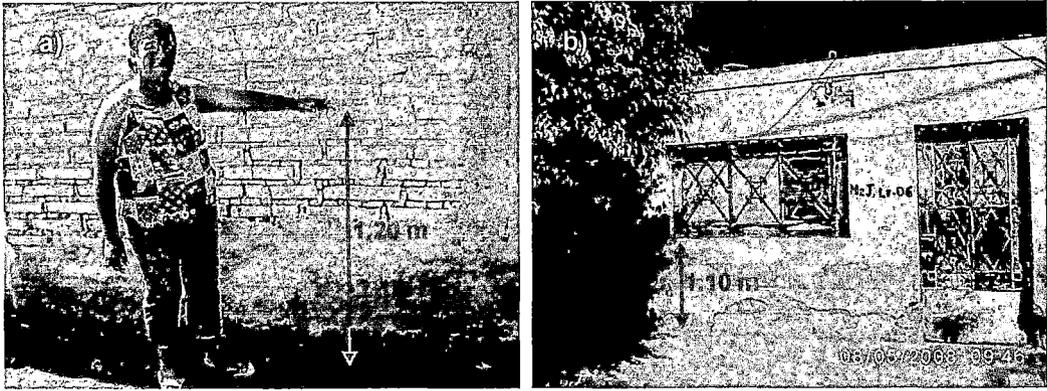


Figura 4.2. a) Muestra una pobladora señalando la altura de inundación producto del tsunami. b) La fachada de una vivienda con rastros remanentes de la inundación por el tsunami.

## 4.2. ELABORACIÓN DE BASE DE DATOS GEOESPACIAL

Las bases de datos geoespaciales están generalmente asociadas a los sistemas GIS (Geographic Information System). La información que estas contienen corresponde a referencias cartográficas, como longitud/latitud y referencias implícitas territoriales como el código de domicilio o el tipo de material. La información geográfica es a su vez el elemento diferenciador de un SIG frente a otro tipo de sistema de información. Es así que la naturaleza de las bases de datos geoespaciales presenta dos aspectos diferentes, por un lado está el aspecto espacial y por otro lado el aspecto temático de los datos, además la delimitación espacial de cada uno de los objetos geográficos.

Para el procesamiento de los datos de campo post-evento recopilado por el CISMID, se crea una base de datos donde cada dato de lote o vivienda corresponde a un campo de información tal como tipo de material, número de pisos, uso, etc. Esta base de datos es incorporada en una plataforma GIS estableciendo una base de datos geoespacial la cual permite una rápida evaluación de las condiciones encontradas de las viviendas desde el un punto de vista descriptivo y gráfico. La Figura 4.3 muestra en detalle los campos de información correspondiente a un lote y la información cartografía correspondiente de los bordes de las viviendas, adicionalmente se observa la integración de una imagen satelital a la base de datos geoespacial la cual fue construida de un mosaico de imágenes de GoogleEarth. De acuerdo a la normatividad estándar la base de datos está georeferenciada con el sistema de coordenadas proyectadas planas UTM (Universal Transverse Mercator), teniendo como base el DATUM WGS84 (World Geodetic System 84).

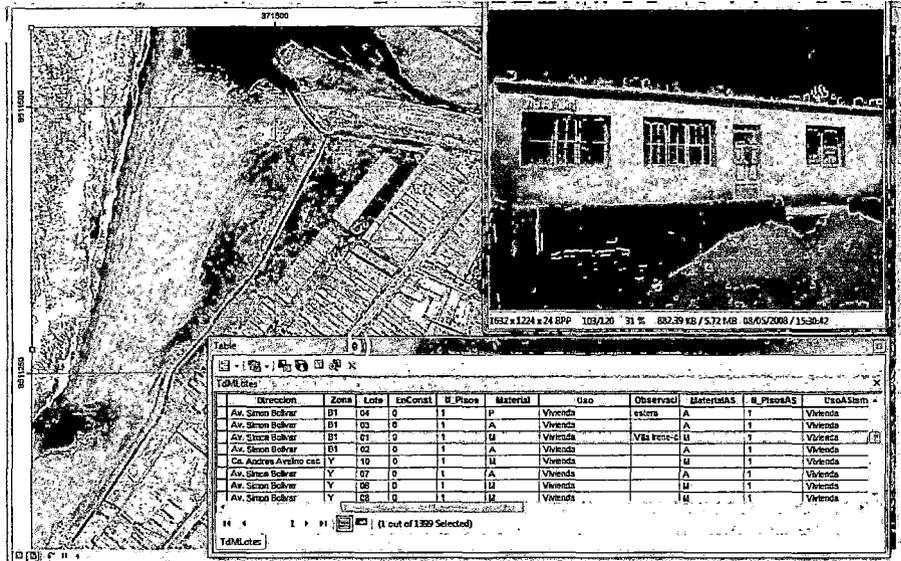


Figura 4.3. Base de datos geoespacial post-evento recopilado y elaborado en el CISMID para el distrito de Tambo de Mora. La Imagen de fondo corresponde a un mosaico de imágenes construido de GoogleEarth.

En los ANEXOS en el Mapa A-01 se presenta de forma tematizada el número de pisos de las viviendas, el resultado de un análisis estadístico es mostrado en la Figura 4.4 donde se observa que el 75% de las viviendas tiene un piso construido y un 20% no tiene ni un piso construido, esto último podría estar representado en mayor proporción por las de material precario como la estera y/o madera y teniendo en cuenta que muchas de las edificación de dos pisos fueron destruidas por el terremoto de acuerdo a las observación de campo.

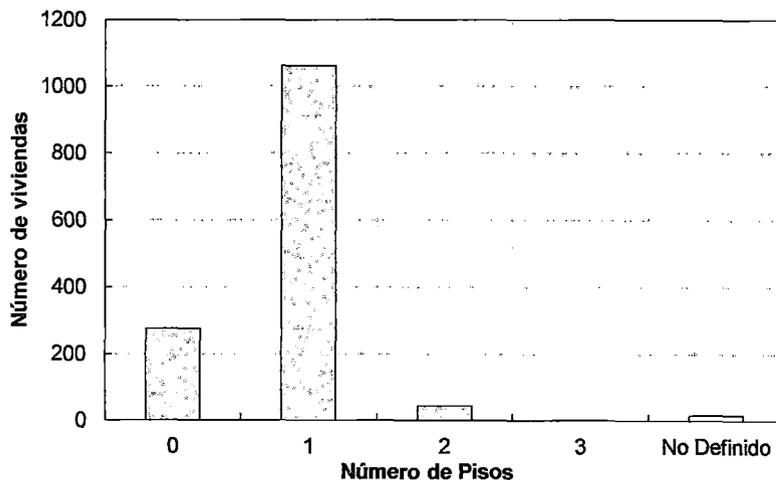


Figura 4.4. Distribución del número de pisos de las viviendas en el distrito de Tambo de Mora.

En los ANEXOS en el Mapa A-02 se presenta temáticamente el tipo de material de construcción, un análisis estadístico de la base de datos es mostrado en la Figura 4.5 la cual muestra que el material de construcción predominante de las viviendas es la mampostería (muros de albañilería confinada con columnas de concreto armado) que representa el 36% del total de viviendas, el segundo material predominante en el distrito de Tambo de Mora es el adobe con 23% del total, es importante resaltar que la presencia de estos dos tipos materiales predominantes se observa de forma distribuida en todo el distrito. La categoría No Definido representaría las edificaciones que fueron demolidas después del sismo siendo imposible el tipo de material con la que fueron construidas y finalmente la categoría Provisional representaría las viviendas construidas con esteras, maderas y/o carpas.

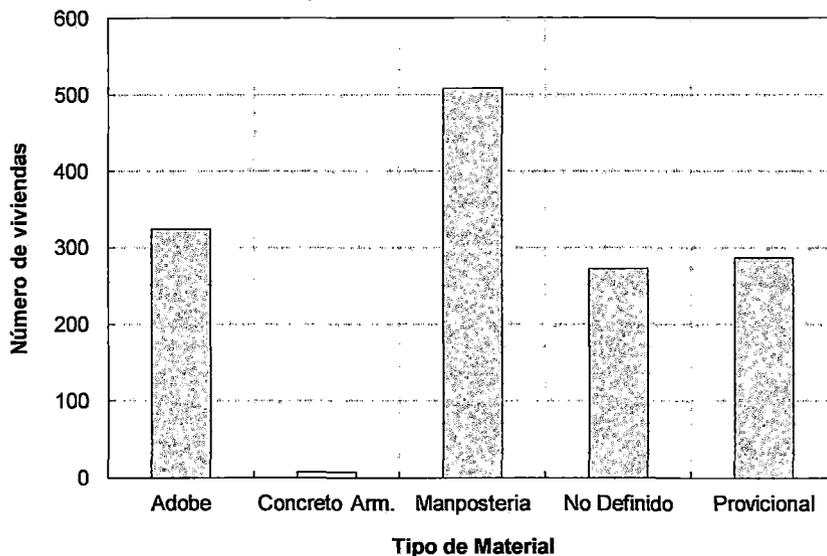


Figura 4.5. Distribución del tipo de material de construcción de las viviendas en el distrito de Tambo de Mora.

En los ANEXOS en el Mapa A-03 se presenta de forma tematizada el tipo de uso urbano de las viviendas, el análisis estadístico de la base de datos es mostrado en la Figura 4.6 el cual muestra que el uso urbano predominante es Vivienda con un 81% del total, lo cual muestra al distrito de Tambo de Mora como un distrito urbano residencial. Sin embargo en la zona norte del distrito se observa la presencia de una pequeña zona industrial que solo representa el 0.01% de total de edificaciones. Por otro lado, las edificaciones clasificadas como Sin Uso representan un 0.05% del total, este porcentaje representa a los

lotes donde solo se observó terrenos baldíos o terrenos con un cerco perímetro de muros de adobe.

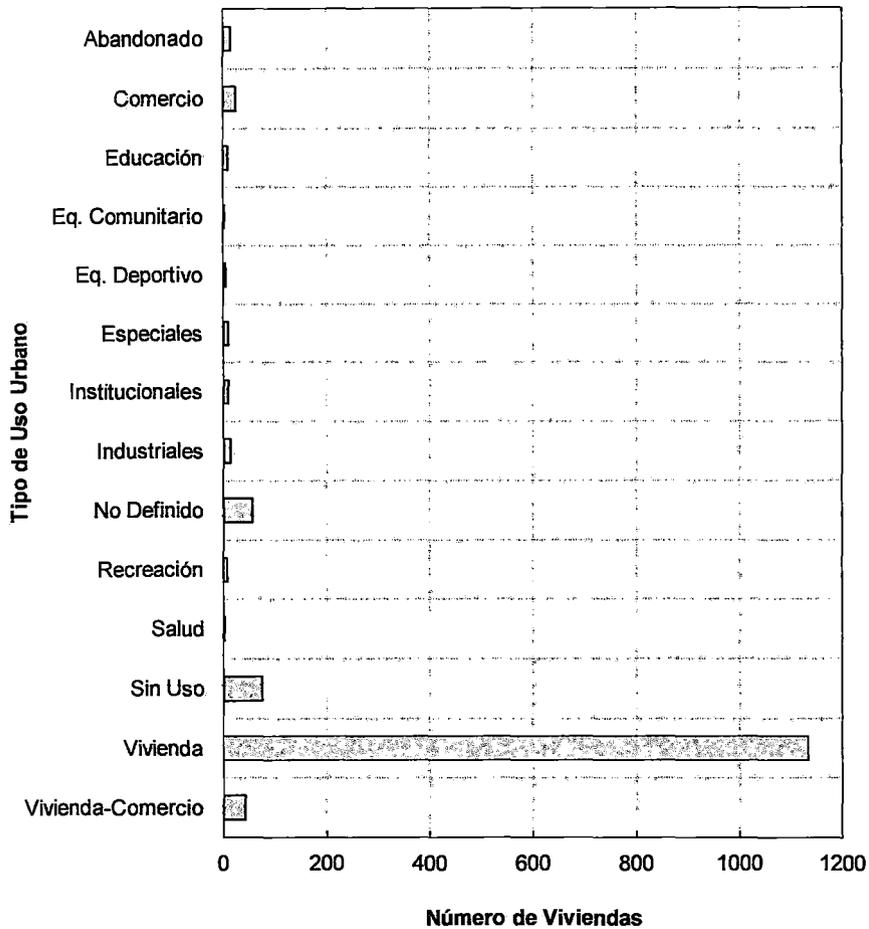


Figura 4.6. Distribución del tipo de uso urbano de las viviendas en el distrito de Tambo de Mora.

En los ANEXOS en el Mapa A-04 se presenta temáticamente el nivel de daño observado de las edificaciones, en el análisis estadístico de la base de datos mostrado en la Figura 4.7 se puede observar que el nivel de daño Colapso es el 45% del total de las edificaciones, de acuerdo al Mapa A-04 este porcentaje se puede encontrar homogéneamente distribuido en todo el distrito de Tambo de Mora. Los niveles de daños Leve, Moderado y Severo presentan valores cercanos de porcentajes los cuales son 13%, 12% y 12% respectivamente. Por otro lado, las edificaciones en las cuales no se observaron daños estructurales importantes representan el 17% del total, en este porcentaje se encuentran los lotes que antes al evento estaban baldías.

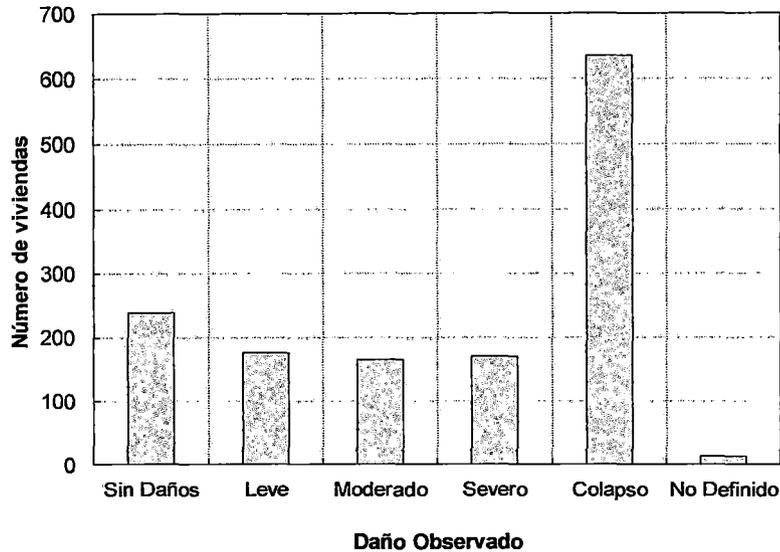
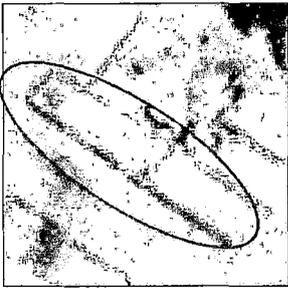
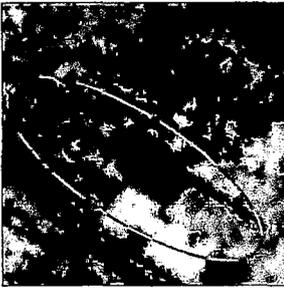


Figura 4.7. Distribución de los niveles de daño observados en las viviendas en el distrito de Tambo de Mora.

#### 4.3. COMPARACIÓN MULTITEMPORAL EN LA ZONA DE APLICACIÓN

Considerando que la base datos de daños post-evento recopilado por CISMID en el distrito de Tambo de Mora corresponde principalmente a un criterio de daño estructural de la edificación, es necesario delimitar en número de viviendas que fueron afectadas en mayor proporción por el tsunami en comparación con el movimiento sísmico. Para lograr estimar el número viviendas afectadas en mayor proporción por el tsunami se lleva a cabo un análisis de inspección visual multitemporal usando imágenes satelitales pre y post-evento adquiridas el 20 de Febrero de 2006 y el 28 de Agosto de 2007 (trece días después de ocurrido el evento) respectivamente las cuales fueron construidas de GoogleEarth. Desde que el distrito de Tambo de Mora fue afectado por el terremoto minutos antes al ataque del tsunami y a diferencia de los estudios de campo, no es posible distinguir completamente entre el daño por tsunami y el daño por el terremoto usando solo imágenes satelitales, por lo tanto, el análisis visual multitemporal se enfoca en los cambios en la forma y los techos de las edificaciones para categorizar el nivel de daño de las edificaciones por tsunami dentro del mapa de inundación presentado por DHN (Figure 3.2, disponible en <http://www.dhn.mil.pe/>) y al área inundada calculada en el modelo numérico de inundación (Figura 3.15). La Tabla 4.1 muestra el criterio del análisis visual usado para estimar el daño por tsunami en el área de inundación.

Tabla 4.1. Criterio para estimar el daño por tsunami en las edificaciones de distrito de Tambo de Mora.

Niveles de Daño	Imágenes antes y después construidas de Google Earth		Criterio de clasificación
Sin daño			No es posible encontrar el cambio de la forma de las viviendas.
Daño Severo			Se puede encontrar cambios en los techos de las viviendas de forma clara pero en menor escala.
Daño Grave			Se puede encontrar cambios en los techos de las viviendas de forma clara y a gran escala.

El número de viviendas y estructuras inspeccionadas fue de 659, en resumen el resultado del análisis estadístico de estos datos es mostrado en la Tabla 4.2 y la Figura 4.8. De acuerdo a la comparación visual multitemporal se puede observar que el 48% del total de las edificaciones inspeccionadas presenta daño de categoría Severo, además el 24% y 28% son categorizados como daño Grave y Sin Daño respectivamente. En los ANEXOS el Mapa B-1 se muestra el resultado del análisis visual multitemporal.

Tabla 4.2 Resultado del análisis visual de las estructuras dañadas por el tsunami en el distrito de Tambo de Mora.

Categoría del Daño	Número de edificaciones	Porcentaje (%)
Sin Daños	186	28
Daño grave	155	24
Daño Severo	318	48

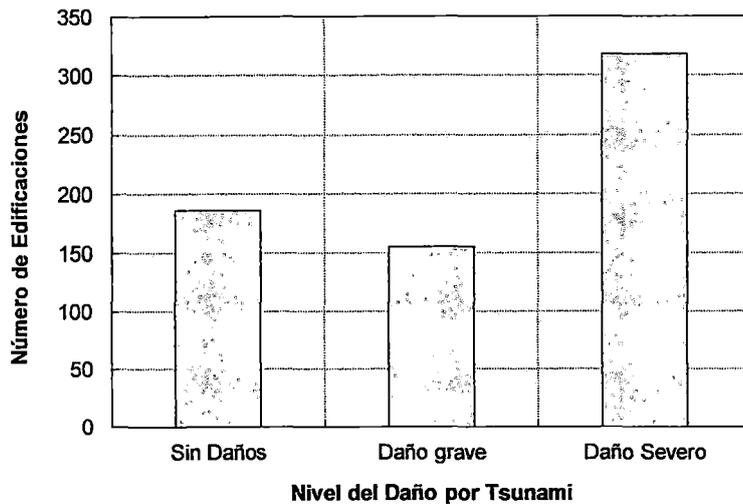


Figura 4.8. Distribución de los niveles de daño por tsunami resultado del análisis visual multitemporal en el distrito de Tambo de Mora.

#### 4.4. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS TEÓRICOS POR INUNDACIÓN

Los resultados de modelamiento numérico del tsunami ocurrido el 15 de Agosto de 2007 son validados a través de la comparación con datos observados en términos de la altura de inundación. La comparación de los resultados teóricos en un ámbito local se enfoca en el distrito de Tambo de Mora, esta realiza a través de la comparación con las mediciones presentadas en el reporte elaborado por la DHN (disponible en <http://www.dhn.mil.pe/>) en el cual se presenta el área de inundación y algunas mediciones de las distancias de inundación producidas por el tsunami del 15 de Agosto de 2007 en el distrito de Tambo de Mora.

La Figura 4.9 muestra la comparación entre las distancias de inundación teóricas y las presentadas por DHN, donde se observa en general que las líneas límites de las aéreas de inundación tienen tendencias similares con diferencias en las distancias de inundación alrededor de 50 m en la zona norte y 30 m en la zona sur del distrito de Tambo de Mora, los que representan una comparación razonable, exceptuando dos tramos resaltantes, el primero localizado alrededor de la latitud  $13.464^{\circ}$  S donde de acuerdo al modelo numérico el área de inundación teoría alcanzaría distancias aproximadamente de hasta 600 m que comparados con las distancias de inundación de 250 m presentadas por DHN indican una sobreestimación de la inundación en esa zona, el segundo tramo resaltante está localizado alrededor de la latitud  $13.45^{\circ}$  S donde la distancia de

inundación presenta valores cercanos a 200 m los cuales estarían subestimados comparados con las distancias alrededores de 500 m presentados por DHN, la principal razón de la presencia de esta dos zonas se debería a los datos topográficos de entrada en aquellas zonas, usados en el modelo numérico de inundación, no estarían representando la topografía existente en aquellas áreas.

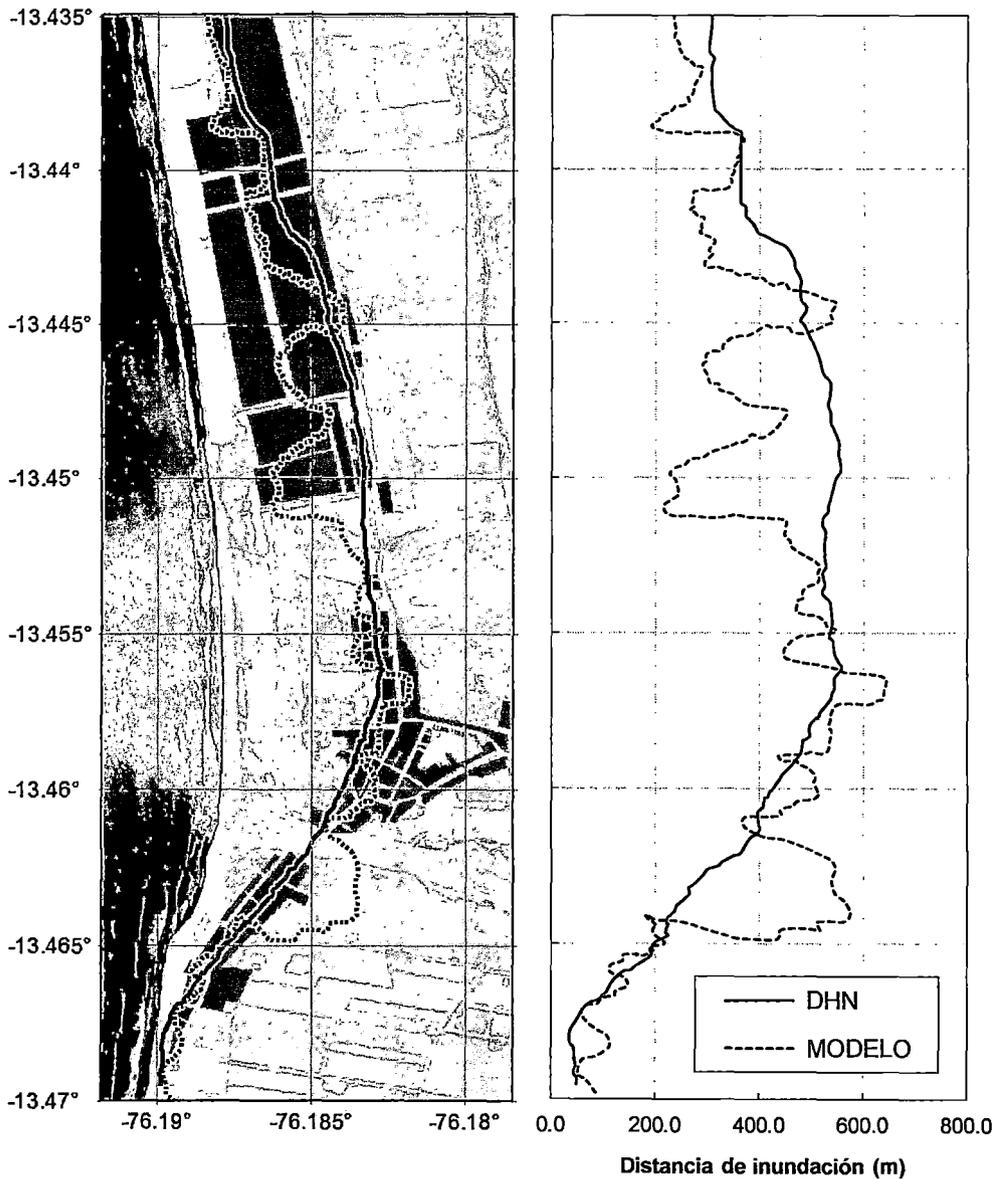


Figura 4.9. Comparación de los resultados teóricos del modelo numérico en términos de distancia de inundación con las medidas presentadas en el reporte de DHN para el distrito de Tambo de Mora.

Teniendo en cuenta que los datos topográficos de entrada para el cálculo del modelo numérico de inundación son de 30 m de resolución la cual podría no estar representando las condiciones topográficas en el dominio de cómputo y considerando además un coeficientes de rugosidad promedio asumido para toda la superficie costera del distrito de Tambo de Mora, los resultados teóricos presentan una consistencia razonable con las mediciones de DHN. El análisis estadístico de regresión lineal en mostrado en el Figura 4.10, donde se observa que los resultados teóricos y mediciones DHN se ajustan con un coeficiente de correlación  $R^2=0.8114$  lo que significaría que los resultado del modelamiento numérico pueden ser usados para la construcción de la curva de fragilidad por tsunami.

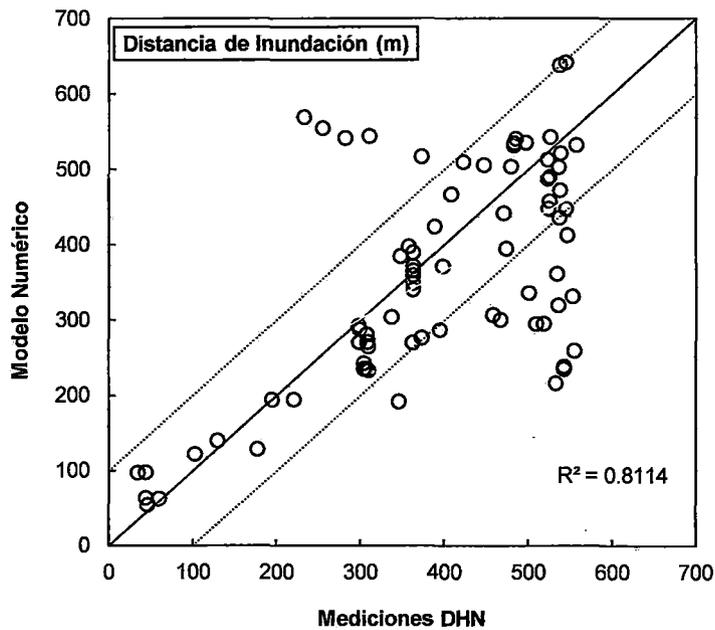


Figura 4.10. Comparación lineal entre los resultados teóricos del modelo numérico y las mediciones presentadas por DHN en términos de distancia de inundación.

## **CAPÍTULO 5: ESTIMACIÓN DE LA CURVA DE FRAGILIDAD POR TSUNAMI**

### **5.1. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN**

Tradicionalmente las Curvas de Fragilidad o Funciones de Fragilidad han sido desarrolladas para el análisis del riesgo sísmico de sistemas estructurales con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad de las estructuras frente a los terremotos, utilizando datos de daños post-terremoto asociados con eventos sísmicos históricos y un proceso de la simulación de la respuesta sísmica (Murao and Yamazaki 2000). Las curvas de fragilidad también han sido implementadas para la estimación del daño estructural frente al peligro sísmico los cuales son estimados con diversas variables de incertidumbre tales como el riesgo sísmico, características estructurales y otras variables que involucran la interacción suelo-estructura (Shinozuka et al. 2000).

El desarrollo de las curvas de fragilidad para viviendas o edificaciones consiste en la integración de tres análisis: análisis numérico o modelamiento numérico, análisis GIS y un análisis estadístico, como se muestra en la Figura 5.1. También las curvas de fragilidad pueden ser expresadas por la probabilidad de daño en las edificaciones como una función de las características hidrodinámicas de la inundación por el tsunami tales como la altura de inundación, nivel de inundación o fuerza hidrodinámica. En este trabajo para desarrollar la curva de fragilidad se tomará un enfoque estadístico combinando los resultados del modelamiento numérico y los datos post-tsunami siguiendo el procedimiento descrito por Koshimura et al. 2009, los cuales se describen a continuación:

- a. Recolección de datos post-tsunami: Obtención de los datos de daños a nivel de lotes y desarrollar un inventario de cada lote con un código de daño (destruidos y sobrevivientes)

- b. Correlación de datos entre el daño estructural y el peligro por tsunami: Correlación de los daños estructurales, interpretación visual de los daños y los niveles de inundación por tsunami a través de un análisis GIS.
- c. Determinación de la muestra: Clasificación de la muestra por el nivel de inundación por tsunami y nivel de daño.
- d. Cálculo de la probabilidad de los daños: Calcular la probabilidad de los daños contando el número de lotes destruidos y sobrevivientes para cada nivel de inundación por tsunami.
- e. Análisis de Regresión: Desarrollar la curva de fragilidad por medio de un análisis de regresión de la muestra discreta de los daños.

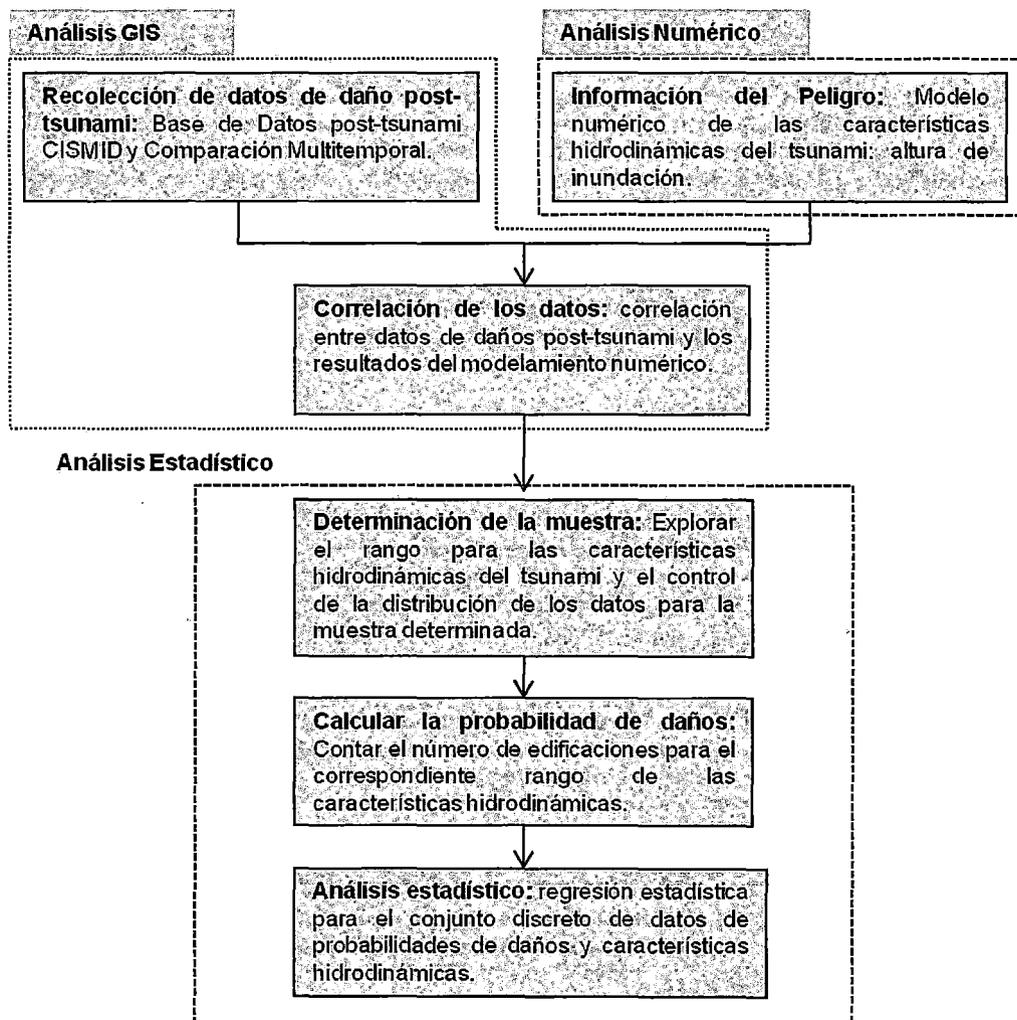


Figura 5.1. Proceso del desarrollo de la curva de fragilidad para daños por tsunami. Esquema original tomado de Koshimura et al. 2009.

## 5.2. ANÁLISIS EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

### 5.2.1. CORRELACIÓN DE DATOS

El análisis GIS integra la información del peligro por ataque de tsunami, el cual es representado por la altura de inundación calculada con el modelo numérico (ver Figura 3.17) y la interpretación visual de los daños por tsunami categorizados en dos niveles de daños, como se muestra en la Figura 5.2. El resultado del análisis GIS es mostrado en la Figura 5.3 el cual proviene del cálculo del número de lotes con daño leve o daño grave dentro de un rango de altura de inundación.

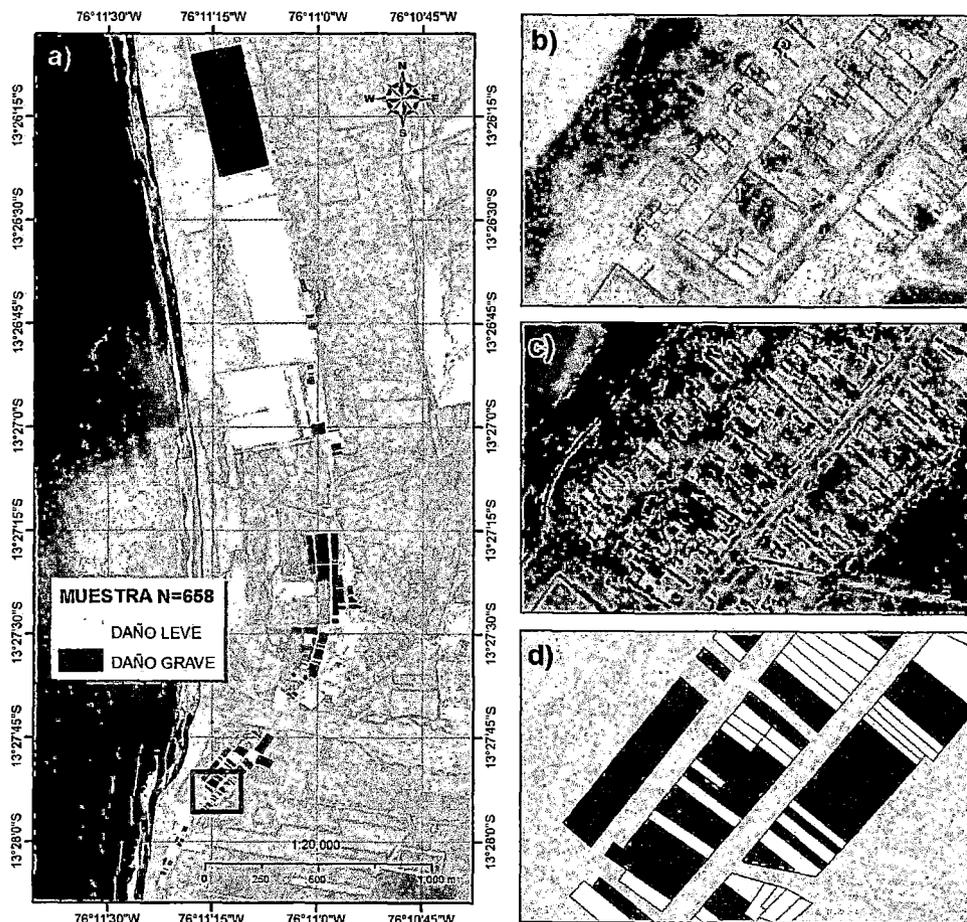


Figura 5.2. a) Distribución espacial de la interpretación de los daños por tsunami a nivel de lote. Los lotes en rojo representan las estructuras con daño grave y los lotes en amarillo representan las estructuras con daño leve. El rectángulo verde muestra la ubicación del área de los paneles de la derecha. b) Imagen Satelital pre-tsunami. c) Imagen Satelital post-tsunami. d) Interpretación del daño.

Los paneles del lado derecho en la Figura 5.2 muestran un ejemplo del análisis de inspección visual multitemporal, el panel a) muestra la imagen pre-evento donde se observa el estado de las edificaciones enfocándose en el condición inicial de los techos de estas, el panel b) muestra la imagen post-evento, aproximadamente dos semanas después del sismo, donde se puede observar los daños debido al sísmico enfocado en los cambios de los techos de las edificaciones, el panel c) muestra la interpretación visual del los niveles de daños por tsunami, sin embargo como se menciono anteriormente con la finalidad de evaluar el daño causado en mayor proporción por el tsunami y considerando las limitaciones del análisis visual multitemporal este análisis visual se enfoca principalmente en el área inundada registrada por la DHN,

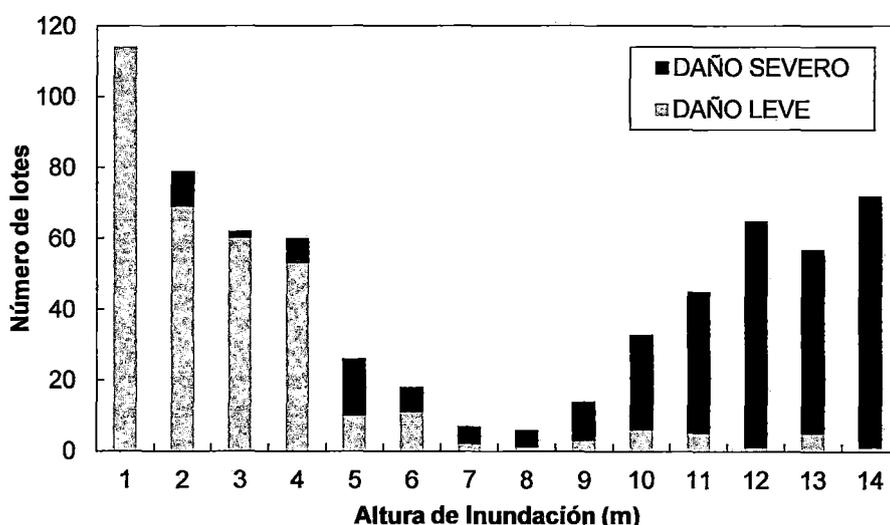


Figura 5.3. Histograma del número de lotes con daño grave y daño severo clasificado por rangos de alturas de inundación, la muestra total es de 658 lotes que incluye toda el área de inundada.

La Tabla 5.1 muestra en resumen el resultado del análisis GIS, donde se observa el número de lotes o estructuras distribuidos en dos categorías. La categoría Daño Leve corresponde a la suma de los lotes en el rango sin daño y daño grave del resultado de la comparación multitemporal en la base de datos geoespacial. La categoría Daño Severo corresponde a los lotes en el rango de daño severo de la base de datos geoespacial.

Tabla 5.1. Resultado del análisis GIS. Tamaño de la muestra (N = 658).

Altura de Inundación (m)	Daño Leve	Daño Severo
[ 0.0 - 0.2 ]	114	0
[ 0.2 - 0.4 ]	69	10
[ 0.4 - 0.6 ]	60	2
[ 0.6 - 0.8 ]	53	7
[ 0.8 - 1.0 ]	10	16
[ 1.0 - 1.2 ]	11	7
[ 1.2 - 1.4 ]	2	5
[ 1.4 - 1.6 ]	1	5
[ 1.6 - 1.8 ]	3	11
[ 1.8 - 2.0 ]	6	27
[ 2.0 - 2.4 ]	5	40
[ 2.4 - 2.8 ]	1	64
[ 2.8 - 3.2 ]	5	52
[ 3.2 - 3.6 ]	1	71
<b>Σ</b>	<b>341</b>	<b>317</b>

### 5.2.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La relación entre la altura de inundación y la probabilidad de daño por tsunami puede ser estudiada con una función de fragilidad, la cual puede ser estimada mediante un análisis de regresión. Basados en estudios análogos en ingeniería sísmica, Koshimura et al. 2009 propone que la probabilidad acumulativa  $P$  de ocurrencia de daño por tsunami es dado por la ecuación 5.1.

$$P(x) = \Phi \left[ \frac{x - \mu}{\sigma} \right] \quad (5.1)$$

Donde  $\Phi$  es la función de distribución estándar,  $x$  es la altura de inundación,  $\mu$  y  $\sigma$  son la media y desviación estándar respectivamente. La Figura 5.4 muestra los valores de probabilidad de daños, los cuales son calculados de los valores de la Tabla 5.1, versus los valores promedios de cada rango de altura de inundación.

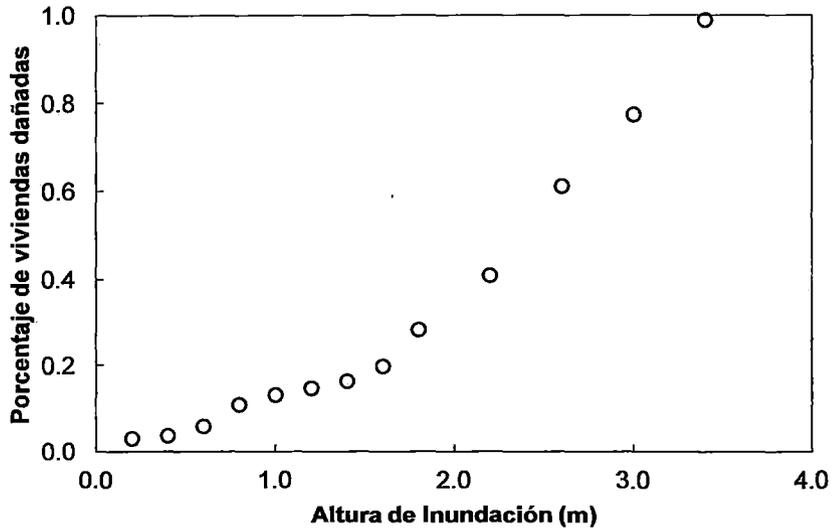


Figura 5.4. Gráfica de alturas de inundación y el porcentaje de viviendas dañadas por el tsunami, la cual fue calculada y ploteada con los datos mostrados en la Tabla 5.1.

Los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  pueden ser obtenidos ploteando los valores de las alturas de inundación y los valores de la función inversa de  $\Phi$  y calculando la regresión lineal de mínimos cuadrados la cual es representada por la ecuación 5.2, como se observa en la grafica mostrada en la Figura 5.5.

$$x = \sigma \Phi^{-1} + \mu \tag{5.2}$$

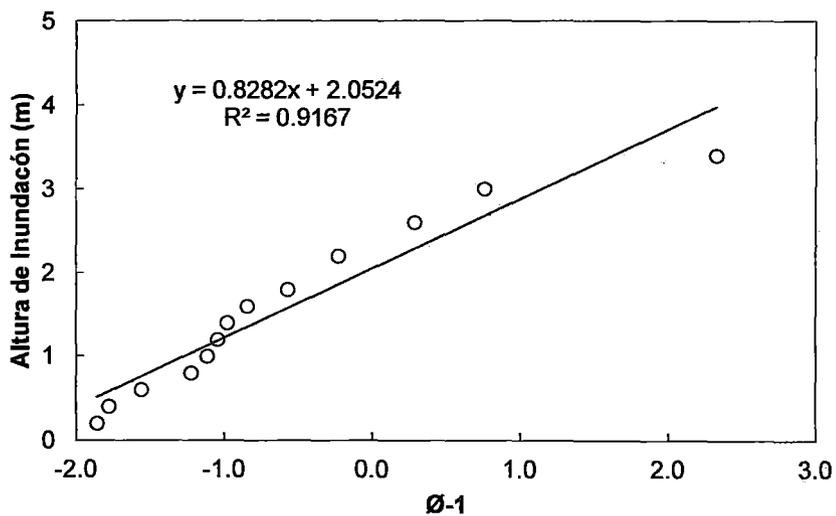


Figura 5.5. Gráfica de los valores de altura de inundación versus los valores de  $\Phi^{-1}$  calculados de la Tabla 5.1.

Los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  son obtenidos de la Figura 5.5 y el análisis de regresión por mínimos cuadrados, son mostrados en la Tabla 5.2. Estos parámetros completan la ecuación 5.1 la cual define la función de fragilidad, esta relaciona la probabilidad de daño por tsunami en términos de la altura de inundación.

Tabla 5.2. Parámetros para la función de fragilidad obtenidos a través del análisis de regresión.  $R^2$  es determinado en el análisis de regresión por mínimos cuadrados.

$x$ para la función de probabilidad $P(x)$	$\mu$	$\sigma$	$R^2$
Altura de Inundación (m)	2.05	0.83	0.92

Finalmente, reemplazando los valores de la Tabla 5.2 en la ecuación 5.1 resulta la función de fragilidad o curva de fragilidad que relaciona los daños por tsunami en función de las alturas de inundación (ecuación 5.3).

$$P(x) = \Phi \left[ \frac{x - 2.05}{0.83} \right] \quad (5.3)$$

### 5.3. ELABORACIÓN DE CURVA DE FRAGILIDAD PARA DAÑOS ESTRUCTURALES POR TSUNAMI

.El resultado del análisis estadístico descrito en el capítulo anterior es mostrado en la Figura 5.6. Esta curva estaría indicando la probabilidad de daño frente a la inundación por tsunami en el distrito de Tambo de Mora. Esta curva de fragilidad muestra que las edificaciones son significativamente vulnerables para alturas de inundación mayores a 1.5m. Sin embargo es importante señalar que el daño estructural en el distrito de Tambo de Mora podría consistir de ambos daños, daños por tsunami y por el sacudimiento del terreno. Adicionalmente, considerando el resultado del levantamiento de campo realizado por el CISMID in términos del daño estructural de las estructuras en la zona de estudio (Figura 4.7) esta curva de fragilidad o función de fragilidad presenta un resultado preliminar para relacionar cuantitativamente los daños por tsunami y las alturas de inundación.

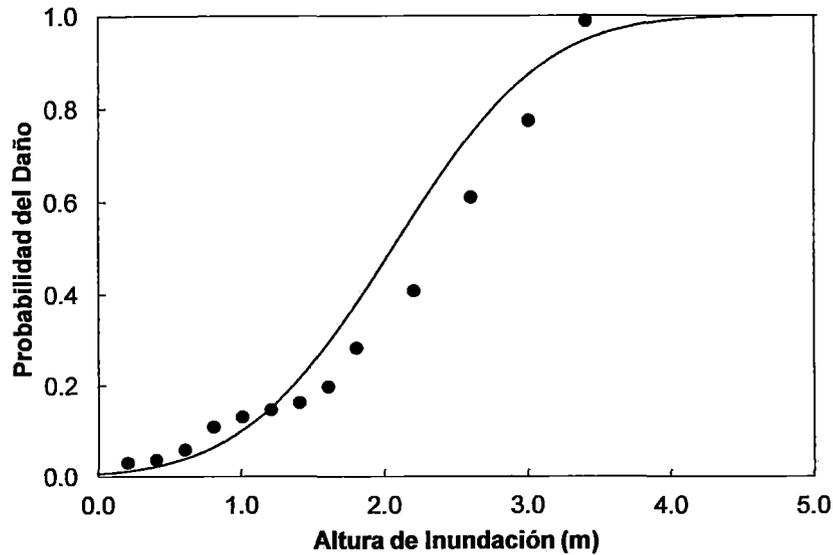


Figura 5.6. Función de Fragilidad (curva de fragilidad) para daños de edificación, en términos de la altura de inundación obtenidas del modelo numérico. Los puntos negros representan los valores de la muestra de análisis. La línea muestra el mejor ajuste de la distribución de la muestra construida con los valores de la Tabla 5.1

La curva de fragilidad propuesta en la figura anterior, en términos de la probabilidad de daño y de las alturas de inundación, está desarrollada considerando edificaciones de diferentes tipos de material de construcción presentes en el distrito de Tambo de Mora los cuales de acuerdo a la Figura 4.5 son en mayor proporción la mampostería 36% y el adobe 23%, razón por la cual esta curva solo representaría las condiciones presentes en el distrito. Esta curva muestra que la probabilidad de daño del 25% ocurre con alturas de inundación entre 1.2 m y 1.8 m, la probabilidad de daño del 50% con alturas de inundación entre 2.0 m y 2.5 m, la probabilidad de daño del 75% con alturas de inundación entre 2.5 m y 3.0 m y finalmente la probabilidad de daño del 100% con alturas de inundación mayores a 4 m. A los valores de probabilidad de daño descritos anteriormente deberían añadirse los daños que la sacudida del terreno debido al terremoto podría causar en las edificaciones antes del ataque del tsunami para tener una probabilidad global del daño en las edificaciones.

## **CONCLUSIONES**

Después del cálculo del área de inundación y las alturas de inundación para el área de estudio, mediante el modelo numérico, debido al terremoto del 15 de Agosto de 2007 y categorizar los daños producidos por el tsunami mediante la correlación con datos post-tsunami, se logró estimar una relación preliminar teórica entre la probabilidad de daño por tsunami y la altura de inundación. De los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones:

1. La deformación inicial de la superficie del océano calculado con el modelo de fuente sísmica de dislocamiento uniforme para el sísmico del 15 de Agosto de 2007, muestra una deformación vertical positiva máxima de 0.90 m la cual es uniforme a lo largo de toda el área de falla del evento sísmico, 162 x 71 Km<sup>2</sup> (ver Figura 3.9).
2. La deformación inicial de la superficie del océano calculado con el modelo de fuente sísmica de dislocamiento heterogéneo para el sísmico del 15 de Agosto de 2007, muestra un pico positivo máximo de 3.20 m y una segundo pico positivo de 1.10 m, ambos picos decrecen homogéneamente lo largo del área de falla del evento sísmico, 125 x 58 Km<sup>2</sup> (ver Figura 3.10).
3. El modelo de propagación del tsunami usando la deformación inicial del tsunami basado en el modelo de dislocamiento uniforme estima un tiempo de arribo de la primera ola igual a 45 minutos en la estación mareográfica del Callao, con una amplitud de aproximadamente 0.37 m (ver Figura 3.14).
4. El modelo de propagación del tsunami usando la deformación inicial del tsunami basado en el modelo de dislocamiento heterogéneo presenta un tiempo de arribo de la primera ola de 55 minutos en la estación mareográfica del Callao, siendo la amplitud de ola aproximadamente igual a 0.54 m (ver Figura 3.14).
5. De la comparación de las señales mareográficas obtenidas del modelo numérico de propagación del tsunami, el modelo de dislocamiento heterogéneo presenta una mejor correlación con las características del tsunami observado el 15 de Agosto de 2007, siendo este el más adecuado para el modelamiento de la fase de inundación.

6. En los resultados del modelo numérico de inundación para el área de estudio, basado en la deformación inicial del modelo de dislocamiento heterogéneo, las alturas de inundación presentan valores máximos de 3.50 m y las distancias de inundación presentan valores máximos de 538.70 m (ver Figura 3.17).
7. De la construcción de la base de datos geoespacial basada en los datos de campo hechos por el CISMID, el número de pisos predominante en las edificaciones del área de estudio es 1 piso con un 75% del total, los materiales de construcción predominantes son la mampostería con un 36% y el adobe con un 23% del total, el uso urbano predominante está destinado a viviendas con 81% del total, sin embargo es importante notar que un porcentaje de edificación fueron destruidas por el terremoto donde se encontraban algunas de las edificaciones de diferentes pisos, materiales y usos urbanos.
8. De la construcción de la base de datos geoespacial basada en los datos de campo hechos por el CISMID, un 45% del total presentaron daño estructural tipo colapso.
9. De la base de datos de daños por tsunami basado en la inspección visual multitemporal, se observa, basado en el criterio de inspección de daños mostrado en la Tabla 4.1, que el 48% del total de las edificaciones inspeccionadas presenta daño de categoría Severo, además el 24% y 28% son categorizados como daño Grave y Sin Daño respectivamente.
10. De la correlación lineal del resultado del modelo numérico de inundación en términos de las distancias de inundación y los datos presentados por la DHN, se llega a la conclusión que los resultado del modelamiento numérico tienen una consistencia del 81% lo que significa que estos valores teóricos pueden ser usados para estimar una relación teórica entre los daños por tsunami y las alturas de inundación.
11. La integración de los niveles de daños de la base de datos geoespacial de daños por tsunami en términos de probabilidad de daño (número de la nuestra  $N=658$ ) y los rangos de alturas de inundación resultados del modelo numérico para el área de estudio, pueden ser establecida mediante una curva de probabilidad o función de probabilidad (Ecuación 5.3).
12. La función de probabilidad conocida como función de fragilidad para daños por tsunami en términos de alturas de inundación estimada para el distrito de

Tambo de Mora muestra que la probabilidad de daño del 25% ocurre con alturas de inundación entre 1.2 m y 1.8 m, la probabilidad de daño del 50% con alturas de inundación entre 2.0 m y 2.5 m, la probabilidad de daño del 75% con alturas de inundación entre 2.5 m y 3.0 m.

13. Finalmente en la función de fragilidad la probabilidad de daño del 100% ocurre con alturas de inundación mayores a 4 m. A los valores de probabilidad de daño descritos anteriormente deberían añadirse los daños que la sacudida del terreno debido al terremoto podría causar (disminución de la capacidad estructural, licuación de los suelos, etc.) en las edificaciones antes del ataque del tsunami para tener una probabilidad global del daño en las edificaciones.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda difundir las técnicas para el modelamiento de tsunamis con la finalidad de elaborar una base de datos teórica de escenarios sísmicos que pudieran causar daños por tsunami de manera de tener un sistema de datos para evaluar el riesgo frente a ataques de tsunamis antes de su ocurrencia.
2. Se recomienda a las municipales de las localidades costeras actualizar o elaborar un inventario de las edificaciones desde el punto de vista estructural (material de construcción, número de pisos, estado de conservación, etc.) con la finalidad de tener una base de datos actualizada que pudiese usar para estudios similares a este.
3. Se recomienda a las autoridades correspondientes tomen como herramienta la curva de fragilidad propuesta en este estudio para elaborar un proyecto de reconstrucción o reforzamiento de las edificaciones en el distrito de Tambo de Mora. Así mismo la elaboración de curvas de fragilidad para todas las áreas costeras vulnerables al ataque de tsunamis con el fin de evaluar la probabilidad de daño y proponer medidas de prevención antes de la ocurrencia de un evento sísmico.
4. Se recomienda difundir el peligro y vulnerabilidad que existe frente a tsunami en nuestro país, en las universidades especialmente en las facultades de ingeniería, con la finalidad de desarrollar nuevas técnicas y metodologías para el estudio de este fenómeno natural y las medidas de mitigación frente a este.
5. Finalmente, se recomienda difundir, por parte de las universidades, a las autoridades concernientes el peligro y vulnerabilidad que existe frente a tsunami en nuestro país con la finalidad de que se puedan implementar nuevas políticas frente a estos fenómenos a través del financiamiento e implementación de estudios y/o investigaciones relacionados a la reducción del riesgo frente a tsunamis.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Dorbath L., Cisternas A., y Dorbath C, "Assessment of the Size of Large and Great Historical Earthquakes in Peru", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 80, No. 3, pp. 551-576, (1990).
- Fritz, H. M., Kalligeris, N., Borrero, J. C., Broncano, P., and Ortega, E., "The 15 August 2007 Peru Tsunami run-up Observations and Modeling", Geophysical Research Letters, vol. 35, L10604, doi: 10.1029/2008GL033494, (2008).
- Hebert, H., Reymond, D., Krien, Y., Vergoz, J., Shindele, F., Roger, J., and Loevenbruck, A., "The 15 August 2007 Peru Earthquake and Tsunami: Influence", Pure and Applied Geophysics, 211-232, (2009).
- of the Source Characteristics on the Tsunami Heights
- Imamura, F., "Review of the tsunami simulation with a finite difference method, Long Wave Run-up Models", Word Science, 25-42, (1995).
- Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H. and Imamura, F., 2009, "Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia" Coastal Engineering Journal, Vol. 51, No. 3, 243-273. (2009).
- ITST, 2001a, Report of the June 23, 2001 Peruvian Tsunami Field Survey of the International Tsunami Survey Team (ITST).
- Papazachos, B. C., Scordilis E. M., Panagiotopoulos D. G., and Karakaisis G. F., 2004, "Global Relation Between Seismic Fault Parameter and Moment Magnitude of Earthquake", Bulletin of the Geological Society of Greece Vol. XXXVI Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Congress, Thessaloniki, (2004).
- Satake K., "Linear and Nonlinear Computations of the 1992 Nicaragua Earthquake Tsunami", PAGEOPH, Vol. 144, Nos. ¾, (1995).
- Silgado F., E.. "Investigaciones de sismicidad histórica en la América del Sur en los siglos XVI, XVII, XVIII y XIX", Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Perú, (1978).

**Páginas web:**

- <http://iisee.kenken.go.jp/special/20070815peru.htm>
- <http://itic.ioc-unesco.org/>
- <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2007/us2007gbcv/>
- <http://nctr.pmel.noaa.gov/peru20070815.html>
- <http://www.dhn.mil.pe/>
- <http://www.iris.edu/software/sac/>
- <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>
- <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/E/index.html#>

## **ANEXOS**

Mapa N° A-01 : Número de Pisos.

Mapa N° A-02 : Tipo de Material.

Mapa N° A-03 : Uso Urbano.

Mapa N° A-04 : Daño Observado.

Mapa N° B-01 : Resultado de la Comparación Multitemporal.