

**IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO POR TSUNAMI PARA
EL LITORAL PACÍFICO COLOMBIANO A PARTIR DE LA SIMULACIÓN
DE EVENTOS TSUNAMIGÉNICOS, IMPLEMENTANDO EL SISTEMA DE
MODELACIÓN NUMÉRICA MOST (METHOD OF SPLITTING
TSUNAMI)**

JAIRO EMMANUEL GUTIÉRREZ FUENTES



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA
EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN**



**DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA
CENTRO CONTROL CONTAMINACIÓN DEL PACÍFICO
MANEJO INTEGRAL DE ZONA COSTERA
SAN ANDRÉS DE TUMACO**

2009

**IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO POR TSUNAMI PARA
EL LITORAL PACÍFICO COLOMBIANO A PARTIR DE LA SIMULACIÓN
DE EVENTOS TSUNAMIGÉNICOS, IMPLEMENTANDO EL SISTEMA DE
MODELACION NUMÉRICA MOST (METHOD OF SPLITTING
TSUNAMI)**

JAIRO EMMANUEL GUTIÉRREZ FUENTES

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Físico**

**DIRECTOR.
Ing. Mario Milver Patiño**

**CO-DIRECTOR.
Ing. Milton Gabriel Puentes Galindo**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA
EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2009**

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a Dios por la vida, a mis padres Jairo y Teresa por su apoyo incondicional y constante, por ser la guía en mi formación personal y por enseñarme a enfrentar los obstáculos presentes en la vida, a mi hermano Juan David por su apoyo y cariño que siempre me brindo, a Eliana por su compañía, paciencia, amor y consejo.

Al Programa de Ingeniería Física de la Universidad del Cauca por enseñarme e introducirme en el mundo de la Física y mostrarme la maravillosa combinación que hay al juntar la Física e Ingeniería. Así mismo al Ingeniero Mario Milver Patiño y al Grupo de Óptica y Láser por que con sus conocimientos y enseñanzas contribuyeron con mi formación personal y profesional.

Al Centro Control Contaminación del Pacífico de la Armada Nacional de Colombia por permitirme desarrollar este trabajo en el área de Manejo Integrado de Zona Costera, al Ingeniero Milton Gabriel Puentes Galindo por la orientación, apoyo y acompañamiento durante el desarrollo del trabajo, a los Ingenieros Físicos Martha Lucero Bastidas y Ronald Sánchez, por brindarme su amistad, consejo y ayuda durante la realización de este proyecto.

A mis compañeros de Universidad por compartir conmigo los momentos agradables y difíciles durante mi carrera, al personal 2009 del CCCP por su colaboración y amistad brindada durante mi estadía en Tumaco.

Jairo Emmanuel Gutiérrez Fuentes
Popayán, Diciembre de 2009

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. GENERALIDADES.....	14
1.1 TSUNAMI	14
1.2 ANTECEDENTES DE TSUNAMI	19
1.2.2 Eventos Históricos de Tsunami en el Litoral Pacífico Colombiano.....	21
1.3 SISMOS, PLACAS Y FALLAS TECTÓNICAS.....	24
1.3.1 Sismos	24
1.3.2 Placa tectónica.....	25
1.3.3 Fallas tectónicas.....	26
1.4 LITORAL PACÍFICO COLOMBIANO	29
2. MODELO NUMÉRICO MOST (METHOD OF SPLITTING TSUNAMI).....	32
2.1 GENERACIÓN	32
2.1.1 Relaciones entre el área desplazada del fondo oceánico y parámetros sismológicos	33
2.1.2 Relaciones entre las escalas de magnitud y los parámetros de falla	34
2.1.3 Generación de ondas en la superficie del mar debido al desplazamiento del fondo marino	36
2.1.4 Parámetros sísmicos en el MOST	37
2.1.4.1 Uso de rectángulos de deformación	39
2.2 PROPAGACIÓN E INUNDACIÓN.....	40
2.2.1 Conservación de masa	44
2.2.2 Estabilidad de la solución numérica.....	45
3. METODOLOGÍA	47
3.1 DEFINICIÓN DE LOS EPICENTROS DE ESTUDIO.....	47
3.2 IDENTIFICACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO	51
3.3 RECOLECCIÓN, PROCESAMIENTO DE LOS DATOS BATIMÉTRICOS Y TOPOGRÁFICOS.....	55

3.3.1 Recolección.....	55
3.3.2 Adecuación y Procesamiento	56
3.4 GENERACIÓN DE LAS MALLAS DE TRABAJO	59
3.5 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MOST	62
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	73
4.1 IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO POR TSUNAMI.....	73
4.2 BANCO DE ESCENARIOS.....	89
4.3 DISCUSIÓN	91
CONCLUSIONES.....	96
BIBLIOGRAFIA	98
ANEXO A.....	103

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Onda tsunami.....	14
Figura 2. Etapas de generación de un tsunami debido a un sismo producido en una zona de subducción.	15
Figura 3. Comportamiento de la ola a su arribo a la costa.....	15
Figura 4. Parámetros característicos de una onda u ola tsunami.....	18
Figura 5. Alcance y hora de llegada de la ola tsunami.	20
Figura 6. Alcance y hora de llegada de la ola tsunami.	21
Figura 7. Localización de Tsunamis en la franja sísmica Colombo-Ecuatoriana.....	22
Figura 8. Zona de subducción.	25
Figura 9. Placas Nazca, Suramericana y Caribe.....	26
Figura 10. Ángulos fundamentales que describen el tipo de falla.....	27
Figura 11. Tipos desplazamientos de la falla.	28
Figura 12. Litoral pacífico Colombiano.....	29
Figura 13. Principales poblaciones costeras en el LPC.	30
Figura 14. Relaciones entre el Área de ruptura y Mo.	35
Figura 15. Rectángulo de deformación.	38
Figura 16. Múltiples rectángulos de deformación.....	39
Figura 17. La geometría del dominio para las ecuaciones de aguas someras.	42
Figura 18. Superposición de las regiones sísmicas homogéneas dadas por Gutsher et al, la evolución tectónica de las placas Cocos y Nazca propuesta por Maschede y Barckhausen, y la clasificación de los mecanismos de la falla para 57 eventos sísmicos con Mb > 4.5 realizada por Gutsher et al.....	48
Figura 19. Epicentros de estudio de origen cercano.....	49
Figura 20. Epicentros de estudio de origen lejano.....	50
Figura 21. Mallas Tumaco, malla verde o A (malla de 36 arcseg.), malla amarilla o B (malla de 6 arcseg.), malla Roja o C (malla de 1 arcseg.).	52

Figura 22. Mallas Buenaventura, malla verde o A (malla de 36 arcseg.), malla amarilla o B (malla de 6 arcseg.), malla Roja o C (malla de 1 arcseg.).....	53
Figura 23. Mallas Málaga, malla verde o A (malla de 36 arcseg.), malla amarilla o B (malla de 6 arcseg.), malla Roja o C (malla de 1 arcseg.).....	54
Figura 24. Izq. archivo en coordenadas UTM, der. archivo en coordenadas geográficas.....	57
Figura 25. Superposición de los puntos de las mallas B y C.....	61
Figura 26. Archivo para el modelo que recibe el MOST.....	62
Figura 27. Relación entre magnitud y la profundidad del evento sísmico y su potencial como precursor de ondas de tsunami.....	63
Figura 28. Curva de probabilidad de no excedencia para la serie de registros de la estación Tumaco durante el periodo [1951-2001].	64
Figura 29. Mallas de menor resolución cubren LPC.	65
Figura 30. Mallas con nivel medio de marea.....	66
Figura 31. Mallas con nivel de marea alta.	66
Figura 32. Algunos epicentros ubicados en sus respectivos rectángulos de deformación o fallas.....	67
Figura 33. Mallas de Tumaco.....	69
Figura 34. Mallas de Buenaventura.	69
Figura 35. Mallas de Málaga.....	70
Figura 36. Parámetros de entrada para la ejecución del modelo.	72
Figura 37. Escenario 1 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	74
Figura 38. Escenario 2 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	75
Figura 39. Escenario 3 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	76
Figura 40. Escenario 4 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	77

Figura 41. Escenario 5 correspondiente al evento 4 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	78
Figura 42. Escenario 6 correspondiente al evento 5 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.	79
Figura 43. Escenario 7 correspondiente al evento 5 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.	80
Figura 44. Escenario 8 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.	81
Figura 45. Escenario 9 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.	82
Figura 46. Escenario 10 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.	83
Figura 47. Escenario 11 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.	84
Figura 48. Escenario 12 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	85
Figura 49. Escenario 13 correspondiente al evento 1 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.	86
Figura 50. Escenario 14 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.	87
Figura 51. Escenario 15 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	88
Figura 52. Diseño diseñado para el banco de modelaciones.	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Registro histórico de tsunamis en el litoral pacífico colombo-ecuatoriano durante los últimos 100 años.	22
Tabla 2. Ubicación fuentes sísmicas de origen cercano y lejano.	51
Tabla 3. Tamaño y ubicación de las mallas de Tumaco.	52
Tabla 4. Tamaño y ubicación de las mallas de Buenaventura	53
Tabla 5. Tamaño y ubicación de las mallas de Málaga.	54
Tabla 6. Fuentes sísmicas de origen cercano, ubicación geográfica y nombre en el modelo.	68
Tabla 7. Fuentes sísmicas de origen lejano, ubicación geográfica y nombre en el modelo.	68
Tabla 8. Características del escenario 1 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	74
Tabla 9. Características del escenario 2 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	75
Tabla 10. Características del escenario 3 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	76
Tabla 11. Características del escenario 4 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	77
Tabla 12. Características del escenario 5 correspondiente al evento 4 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	78
Tabla 13. Características del escenario 6 correspondiente al evento 5 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.	79
Tabla 14. Características del escenario 7 correspondiente al evento 5 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.	80
Tabla 15. Características del escenario 8 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.	81
Tabla 16. Características del escenario 9 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.	82

Tabla 17. Características del escenario 10 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.....	83
Tabla 18. Características del escenario 11 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.....	84
Tabla 19. Características del escenario 12 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	85
Tabla 20. Características del escenario 13 correspondiente al evento 1 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.	86
Tabla 21. Características del escenario 14 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.....	87
Tabla 22. Características del escenario 15 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	88
Tabla 23. Información de la simulación de tsunami.	89

INTRODUCCIÓN

Un tsunami es una serie de ondas oceánicas generadas por perturbaciones fuertes y abruptas de la superficie del océano. Este fenómeno puede llegar a ser devastador a su arribo a la costa por la altura y velocidad de la onda generada (Costa Pacífica Colombiana 1906, 1942, 1948, 1979 o Sumatra-Andamán 2007). En Colombia, debido a la convergencia de las placas de Nazca con la placa Sudamericana, se genera una zona de subducción ubicada paralela a la costa Pacífica. Al ocurrir un desplazamiento de la corteza oceánica bajo la placa continental, se puede producir un repentino desplazamiento vertical del piso oceánico, en consecuencia, se genera una serie de ondas que se propagan en todas las direcciones, a partir de la zona inicialmente deformada, dando origen a un Tsunami. Es por esta razón que se hace necesario realizar la modelación de este tipo de eventos de tal manera que sea posible realizar la predicción de su comportamiento.

Los fenómenos naturales como el que aquí se contempla de origen geológico y sus efectos conjuntos, representan un peligro latente que bien puede considerarse como una amenaza para el desarrollo social y económico de la región. Por las características propias del fenómeno este evento o suceso ocurre, en la mayoría de los casos, en forma repentina e inesperada, causando sobre los elementos expuestos alteraciones, representadas en la pérdida de vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de bienes y/o daños severos sobre el medio ambiente. La ocurrencia de él genera desorganización de los patrones normales de vida, adversidad, desamparo y sufrimiento en las personas y efectos sobre la estructura socioeconómica.

Debido a la naturaleza de esta falla, se prevé que durante el presente siglo (siglo XXI) ocurran sismos a lo largo de esta zona, por lo tanto existe la amenaza de que ocurra un evento tsunamigénico que afecte considerablemente esta región del país y que se repita una catástrofe de igual o mayor magnitud a las ocurridas anteriormente en esta región o a la producida por el terremoto de Sumatra-Andamán en 2007, el cual devastó las costas del sur de Asia y África Oriental, dejando a su paso aproximadamente unas 232.0000 pérdidas humanas y 2'000.000 de personas desplazadas [1].

En este estudio se realiza la modelación numérica de un tsunami (generación, propagación e inundación) para de esta manera representar conceptual o físicamente a escala el proceso, sistema o fenómeno, con el fin de analizar su naturaleza y permitir una mejor comprensión del fenómeno real. La modelación se realiza para las principales poblaciones ubicadas a lo largo del Litoral Pacífico Colombiano, en esta región se encuentran los principales puertos marítimos del sur del país, Tumaco y Buenaventura, que son de gran importancia para el comercio, la economía y el desarrollo del centro y sur de Colombia y además son regiones densamente pobladas. También se encuentra Bahía Málaga, lugar donde se ubican poblaciones costeras como Juanchaco o la Barra y la base militar de Málaga, la cual juega un papel importante en la seguridad nacional.

A partir de la información (arrojada por el modelo) de amplitud máxima de ola, tiempo de arribo a la costa, ubicación del epicentro precursor, velocidad de la ola, e imagen del área de inundación obtenida de las simulaciones realizadas se creará un banco de escenarios de riesgo por Tsunami, como apoyo al Centro Nacional de Alerta de Tsunami (CNAT). Esto se llevará a cabo a través simulaciones de eventos tsunamigénicos realizadas por medio del sistema de modelación numérica MOST (*Method of Splitting Tsunami*) desarrollado por el *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL) y la *National Oceanic and Atmospheric Administration*; este sistema utiliza como datos de entrada las batimetría y topografía de la región a estudiar, además de la magnitud del sismo precursor y de los datos de la falla (la orientación de la falla o ángulo *strike* θ , el ángulo dip δ , el ángulo *rake* λ , el promedio de buzamiento (*slip*) u_0 , y la profundidad de la fuente h , los cuales son descargados de internet).

1. GENERALIDADES

1.1 TSUNAMI

La palabra Tsunami es un término japonés que se deriva en dos palabras, “*tsu*” que significa puerto y “*nami*” que significa ola [2], su traducción al español sería ola en puertos. Tal como su nombre lo dice este es un fenómeno natural que se manifiesta y registra en las costas, consiste en una serie de ondas oceánicas extremadamente largas, generadas por perturbaciones a gran escala de la superficie libre o en el lecho del mar. Estas ondas se propagan en todas las direcciones desde el lugar de generación hasta su arribo a la costa.

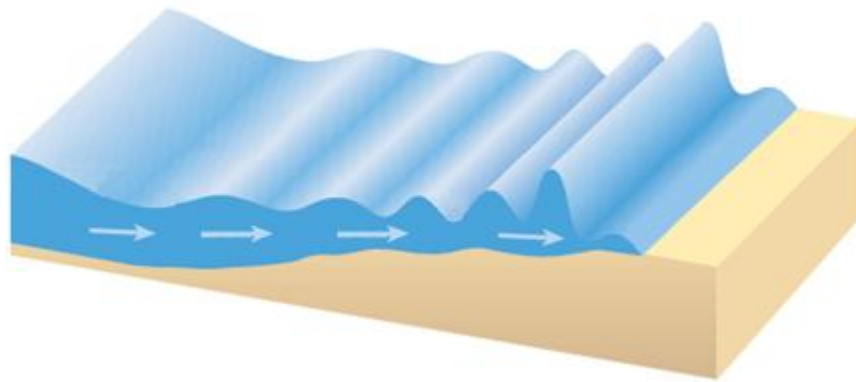


Figura 1. Onda tsunami.

Fuente: Bunting T., Chapman C., Christie P., Singh S., Sledzik J., 2005. La ciencia de los Tsunamis, Oilfield Review.

Las perturbaciones que producen ondas tsunami son asociadas principalmente a sismos que ocurren bajo o cerca del piso oceánico, menos comúnmente por derrumbes submarinos, desprendimiento de glaciares, erupciones volcánicas submarinas, flujos de corrientes de turbidez o de lava, caída de meteoritos y explosiones nucleares en el lecho marino, siendo los sismos los responsables del 90% de los tsunami reportados durante 1790-1990 [3]. Varios autores señalan que los grandes tsunami son generados por terremotos con hipocentros poco profundos y con un movimiento vertical del fondo tipo pistón, provocado por el desplazamiento de fallas normales e inversas.

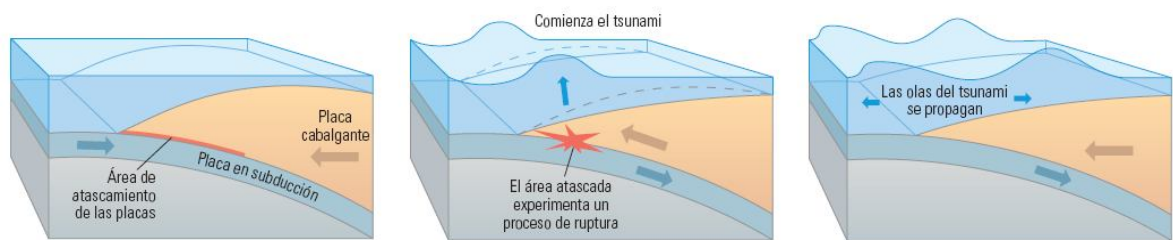


Figura 2. Etapas de generación de un tsunami debido a un sismo producido en una zona de subducción.

Fuente: Bunting T., Chapman C., Christie P., Singh S., Sledzik J., 2005. La ciencia de los Tsunamis, Oilfield Review.

Las olas tsunami se diferencian de las oceánicas comunes por la gran extensión existente entre las crestas de las ondas (longitud de onda), la que a menudo es superior a 100 Km. o más en el océano profundo, y por el tiempo que trascurre entre las crestas, que varía desde 10 minutos hasta una hora. La velocidad y características de la onda dependen de la profundidad del lugar por donde se traslada. Cuando la profundidad es de cientos de metros, la velocidad varía entre 500 y 1000 Km/h, con una longitud de onda entre 500 y 650 Km. y una amplitud menor a un metro en estas aguas [3], por esta razón en esta etapa las ondas tsunami son imperceptibles a simple vista. Cuando llegan a aguas poco profundas las ondas se frenan, llegando a una velocidad de tan solo la décima o centésima parte de la velocidad inicial, lo que produce un aumento en su amplitud formando una muralla de destrucción en la costa de hasta decenas de metros.



Figura 3. Comportamiento de la ola a su arribo a la costa.

Fuente: Bunting T., Chapman C., Christie P., Singh S., Sledzik J., 2005. La ciencia de los Tsunamis, Oilfield Review.

Las olas tsunami no solo se desplazan a altas velocidades, si no que mantienen su altura de marea, o amplitud, a lo largo de grandes distancias. La amplitud decae a medida que éstas se propagan por tres razones: las olas se expanden a lo largo de la superficie de agua, las olas se dispersan porque las componentes con longitudes de onda más grandes viajan más rápido y la energía es atenuada por el amortiguamiento viscoso del agua (Bunting *et al*, 2006).

Según la distancia entre la fuente y la zona afectada los tsunami se clasifican así:

Tsunami local o de origen cercano: Generado por una fuente, normalmente un sismo, ubicada a no más de 200 Km. de la costa afectada, y en algunas ocasiones generado por un derrumbamiento o flujos piroclásticos. El tiempo de arribo de las ondas de este tipo de tsunami es inferior a una hora (Cardona, 2004).

Tsunami regional: Tsunami capaz de ejercer destrucción en una región geográfica particular ubicada hasta a 100 Km. de su fuente, aunque también puede ocasionar algunos efectos menores a mayores distancias [4].

Teletsunami o Tsunami distante: Tsunami originado por una fuente distante, generalmente ubicada a más de 1000 Km. de la costa [4].

Tsunami Pacific-wide: Tsunami capaz de ocasionar una amplia destrucción, no solo en la región inmediata de su generación, sino también en todo el Océano Pacífico [4].

Las características de un tsunami al llegar a la costa dependen de tres factores principales que son: la condición inicial, la propagación y la morfología costera.

Condición Inicial

Las dimensiones de la zona origen de un tsunami definen su potencial destructivo al arribar las ondas a la costa. El potencial depende de la magnitud del tsunami; de la distancia de la zona de origen a la costa; de la batimetría y de la configuración de la línea de costa. Por lo general, solo la componente vertical del desplazamiento superficial de un área fracturada es eficaz en la generación de un tsunami [5].

Se reconocen tres condiciones básicas y simultáneas que deben verificarse para la generación de un tsunami de origen tectónico:

- El hipocentro del sismo o al menos una fracción mayoritaria del área de ruptura, debe estar bajo el lecho marino y a una profundidad menor de 60 Km. (sismo somero).
- Que la frontera de placas o falla tectónica sea de subducción, con componente vertical de movimiento, y no de desgarre con desplazamiento únicamente lateral.
- Que en un cierto lapso el sismo libere suficiente energía, y que ésta sea eficientemente transmitida.

Propagación

El perfil de ondas resultante de un tsunami generado en océano abierto depende de los parámetros de su fuente, de las características de la región de propagación y del tiempo o distancia transcurridos desde el inicio de esa propagación. Para el caso de ondas largas como son los tsunamis, su velocidad de propagación depende básicamente de la profundidad del agua por la cual atraviesa. Esto determina que durante su trayectoria, el tsunami se vea sujeto a fenómenos de refracción, directividad y dispersión de energía [5].

Actualmente se sabe bien que la gran longitud de onda que presentan los tsunamis, provoca que su propagación en océano abierto, donde existen grandes profundidades, se realice casi sin pérdida de energía por fricción de fondo y con una amplitud de onda de unos cuantos centímetros, por lo que resultan imperceptibles para las embarcaciones [5].

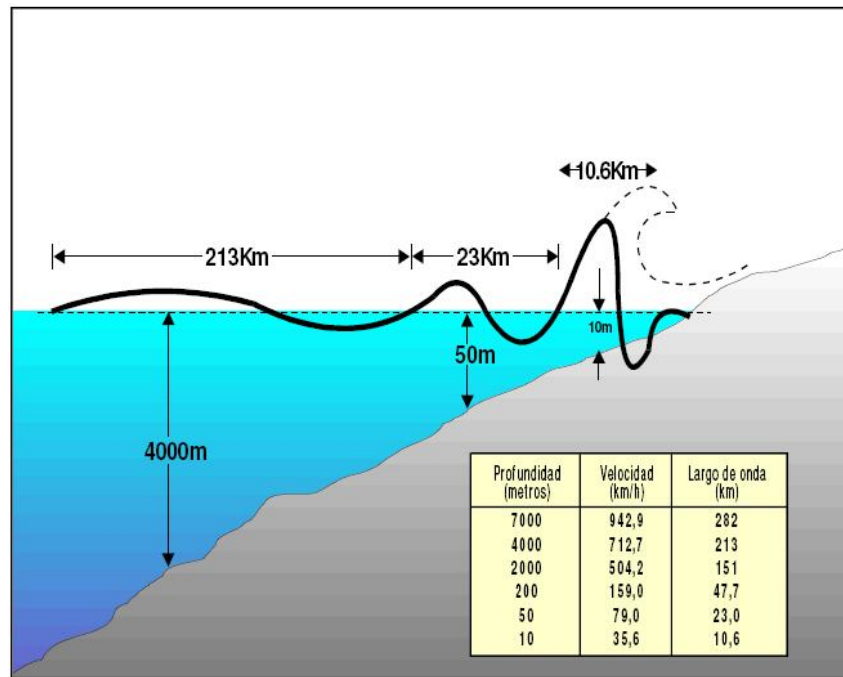


Figura 4. Parámetros característicos de una onda u ola tsunami.

En la costa, en cambio, la disminución de la profundidad y su configuración, genera la concentración de la energía cinética de las ondas; disminuye su longitud y crece su altura, alcanzando un gran poder destructivo con alturas que pueden llegar desde los 10 hasta los 20 o 30 metros. Las mayores alturas han sido observadas en bahías angostas o semicerradas (por amplificación resonante), en desembocaduras de ríos y en bahías con presencia de islas [5].

Impacto Costero

La altura alcanzada por un tsunami al arribar a la costa se debe a la interacción de varios factores físicos y morfológicos; éstos son: características de las ondas en mar abierto, batimetría, pendiente del fondo marino, configuración del contorno de la costa, difracción, refracción, reflexión, dispersión (scattering), atrapamiento de las ondas en las distintas formaciones costeras, entre otras [6]. Estos factores determinan que el arribo del tsunami a la línea costera sea un proceso complejo, lo cual genera diferencias notables de altura máxima (run-up), aún a cortas distancias a lo largo de ella.

Las causas directas del gran impacto de las ondas en la costa son atribuibles a la presión hidráulica generada por las fuerzas hidrodinámicas sobre las estructuras, causadas por la velocidad de las corrientes y contracorrientes inducidas por el arribo de las ondas. La altura y período de éstas, determinan la cantidad de inundación en términos de altura máxima (run-up), fuerzas de elevación y de flotabilidad (Dirección General Marítima DIMAR & Fundación Leonardo Torres Quevedo, 2003).

Esencialmente hay dos tipos de fuerzas hidrodinámicas que afectan a las estructuras: una proviene del impacto directo de las ondas al inundar el borde costero y la otra es debido a las fuerzas erosivas producidas durante el proceso de elevación y descenso del nivel del agua, originado por el flujo alrededor de las estructuras.

Los efectos secundarios sobre las estructuras son causados principalmente por las fuerzas erosivas del agua al interactuar ésta con el medio ambiente. Un ejemplo de esto, es la pérdida de soporte del suelo producto de la erosión del terreno. Otro ejemplo es cuando las fuerzas de elevación crean momentos de giro; en tal caso una estructura puede ser levantada de sus cimientos o una embarcación soltada de sus amarras. En esta situación, las estructuras son transportadas en la dirección de las corrientes y el daño es causado por los objetos o despojos flotantes de embarcaciones, autos, construcciones, etc., al impactar éstos sobre otras estructuras (Dirección General Marítima DIMAR & Fundación Leonardo Torres Quevedo, 2003).

1.2 ANTECEDENTES DE TSUNAMI

1.2.1 Tsunami en el mundo

Los tsunamis constituyen uno de los fenómenos naturales de mayor relevancia en el mundo por sus características desastrosas, afectando a la mayoría de los países costeros, especialmente en el Océano Pacífico. De acuerdo a estadísticas, de los aproximadamente 420 tsunamis acaecidos en el siglo XX, el 20 % causaron daños de consideración en las zonas costeras cercanas a su origen y el 15% de éstos también causaron daños en zonas costeras lejanas [6].

En los últimos años hemos sido testigos de dos grandes tsunamis originados en el océano pacífico, el primero de ellos es el tsunami ocurrido en el 2004 originado por el terremoto de Sumatra-Andamán de magnitud de 9.0 a 9.3 Mw. a una profundidad de 30 kilómetros, la ola originada llegó a la costa después de 15 minutos de originado el sismo con alturas desde 5 hasta 30 metros, lo que originó la devastación de las costas del sur de Asia y África Oriental, dejando a su paso aproximadamente unas 232.000 pérdidas humanas y 2'000.000 de personas desplazadas (Bunting *et al*, 2006). El número de víctimas en Indonesia fue el más grande con 160.000, seguida de Sri Lanka con 35.000, India con 16.000 y Tailandia con 8.300 [7].

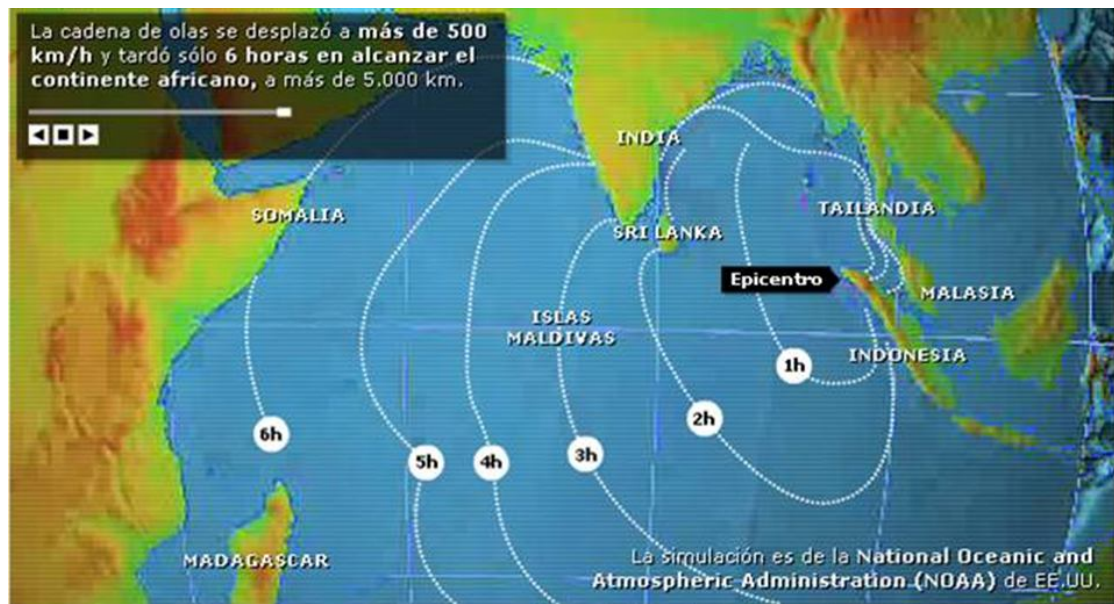


Figura 5. Alcance y hora de llegada de la ola tsunami.

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA.

El segundo tsunami fue causado por un sismo cuyo epicentro tuvo lugar a unos 204 kilómetros al suroeste de Samoa, con una magnitud de 8.3 Mw. y a 18 kilómetros de profundidad., el tsunami provocó olas de hasta seis metros de altura que invadieron cientos de metros de tierra destruyeron también varios complejos turísticos y arrastraron personas y vehículos mar adentro. En el estado independiente de Samoa o Samoa occidental se contabilizaron hasta ahora un centenar de muertos, según la oficina de gestión de catástrofes, citada por la agencia alemana DPA. En la vecina Samoa Estadounidense perdieron la vida otras

19 personas, en tanto que en Tonga, otra isla de la zona, murieron otras diez. La costa sur de la principal isla de Samoa, Upolu, quedó completamente devastada.

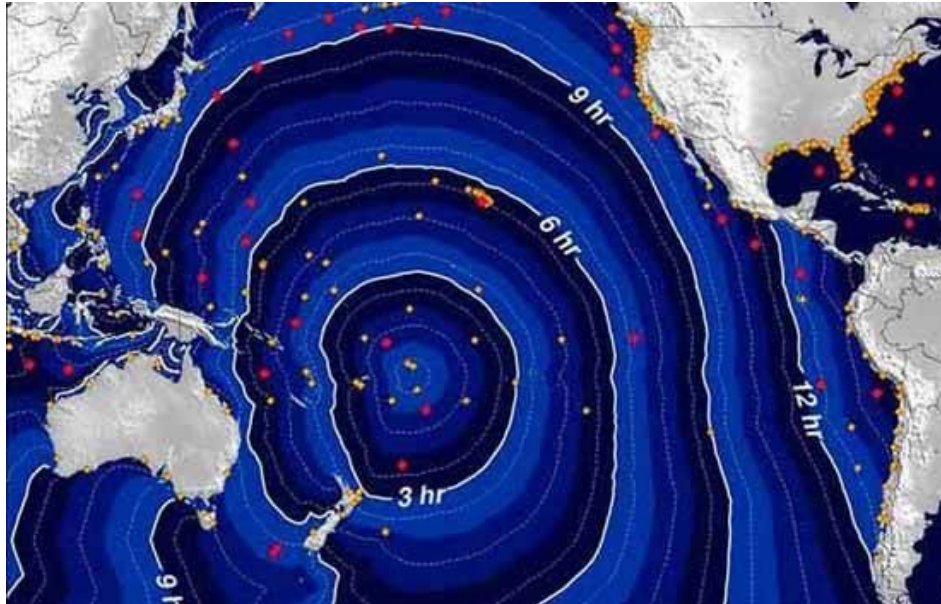


Figura 6. Alcance y hora de llegada de la ola tsunami.

Fuente: <http://www.vistaalmar.es/content/view/795/206/>

A lo largo del siglo pasado, el litoral pacífico colombiano sufrió el embate de cuatro tsunamis (1906, 1942, 1948, 1979) generados por cuatro sismos de origen cercano, los cuales afectaron significativamente a la población asentada principalmente en la costa sur de Colombia, dejando un saldo de miles de pérdidas humanas e innumerables daños materiales [8].

1.2.2 Eventos Históricos de Tsunami en el Litoral Pacífico Colombiano

El Bloque Norte de los Andes, es una región de intensa actividad sísmológica, en particular, la franja sísmica ubicada frente a litoral pacífico sur de Colombia y norte de Ecuador. En esta zona, durante el pasado siglo XX, se produjeron seis grandes terremotos con $M_w > 7.7$. El más grande, el 31 de enero de 1906 ($M_w > 8.7$), tuvo una longitud de ruptura estimada de 500 km, parcialmente reactivada en secuencia de sur a norte en los eventos del 14 de mayo de 1942 ($M_s > 7.9$), 19 de enero de 1958 ($M_s > 7.8$) y el 12 de diciembre de 1979 ($M_s > 7.7$) (Dirección General

Marítima DIMAR & Fundación Leonardo Torres Quevedo, 2003). A estos terremotos, estuvieron asociados la generación de tsunamis, que devastaron la región costera del litoral pacífico colombo-ecuatoriano, causando graves daños y pérdidas de vidas humanas, en particular el evento de 1979 que afectó a gran parte de los habitantes de la Bahía de Tumaco (Dirección General Marítima DIMAR & Fundación Leonardo Torres Quevedo, 2003)..

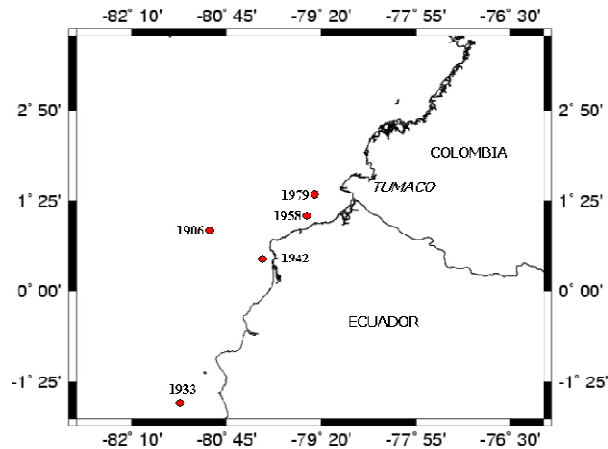


Figura 7. Localización de Tsunamis en la franja sísmica Colombo-Ecuatoriana.

Fuente: Asesoría en el diseño de propuestas de actuación que sirvan como elemento de protección ante el impacto de un tsunami sobre el casco urbano de Tumaco (regeneración de la isla del guano), convenio marco de colaboración científica, técnica y académica entre el ministerio de defensa nacional – dirección general marítima (colombia) y la fundación leonardo torres quevedo de la universidad de cantabria (españa).

Tabla 1. Registro histórico de tsunami en el litoral pacífico colombo-ecuatoriano durante los últimos 100 años.

N	FECHA	UBICACIÓN (LAT, LON)		MAGNITUD	RUN-UP (M)	OBSERVADO EN
1	31-01-1906	01°00'N	81°30'W	8.6 M_w	5.0	Japón, Colombia, Ecuador
2	02-10-1933	02°00' S	81°00'W	6.9 M_w	1.5	Colombia, Ecuador
3	14-05-1942	00°01' S	81°30'W	7.9 M_w	0.5	Colombia, Ecuador
4	19-01-1958	01°12'N	79°30'W	7.8 M_w	1.0	Colombia, Ecuador
5	12-12-1979	01°36'N	79°30'W	8.2 M_w	5.0	Japón, Colombia, Ecuador

Fuentes: Laboratorio de Tsunamis (2003), NOAA-NESDIS, National Geophysical Data Center (2003).

Previamente al evento de 1979, ya se había pronosticado la zona de su ocurrencia con base en las observaciones del desplazamiento hacia el norte de los epicentros superficiales de los terremotos de 1942 y 1958. La ruptura del terremoto de 1979 cubrió una brecha en la zona sísmica superficial del noroeste de Ecuador y sureste de Colombia en la región en que se había pronosticado que ocurriría. Recientes estudios, sugieren que aun esa brecha no está completamente cubierta, existiendo la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de similar magnitud siguiendo la dirección norte. (Adaptado de Quiceno, 2001).

Parte de la línea de costa de Colombia fue barrida por un tsunami que destruyó por completo San Juan, una población ubicada a 60 Km al norte de Tumaco. El tsunami arrasó la isla barrera sobre la cual estaba asentada esta población, arrastrando todas las construcciones y dejando un saldo de por lo menos 220 personas fallecidas, en su mayoría niños, el daño por tsunami en otros lugares fue menor. En Tumaco, las olas se llevaron algunos barcos varios centenares de metros adentro de los manglares. La línea de costa de la parte noroccidental de Tumaco se inundó localmente y la Isla barrera del Guano, ubicada al frente de las Islas de el Morro y la Viciosa, desapareció. Dado que el tsunami llegó a la costa con marea baja, los daños que éste causó no fueron mucho más desastrosos (Dirección General Marítima DIMAR & Fundación Leonardo Torres Quevedo, 2003).

Por la comparación entre el nivel de mareas anterior y posterior a este fenómeno, por los relatos de los habitantes y por las señales recogidas en el campo (árboles antes verdes, medio secos y sumergidos, entre otras) se comprobó la subsidencia o hundimiento a lo largo de por lo menos 200 Km de la costa del sur del Pacífico Colombiano y norte del Ecuador [8].

Los daños, tanto materiales como humanos, derivados como consecuencia de este terremoto a lo largo de la costa sur de Colombia - desde Tumaco (Nariño) hasta Guapi (Cauca) - fueron sumamente graves. En el departamento de Nariño, se registraron 452 muertos, 1011 heridos, 3081 viviendas destruidas y 2119 averiadas (Dirección General Marítima DIMAR & Fundación Leonardo Torres Quevedo, 2003).

Colombia, por su ubicación geotectónica en la cuenca del Pacífico, está expuesta al impacto directo de tsunamis de fuente cercana y/o lejana, y está incluida dentro de los países que con mayor frecuencia se pueden ver afectados por estos eventos. De allí que resulta relevante la estimación de este riesgo natural, considerando el estudio del fenómeno y el análisis del comportamiento hidrodinámico de las ondas, además de la determinación de los niveles máximos de inundación esperados para eventos extremos de campo cercano, información que es fundamental desde el punto de vista de la planificación urbana, manejo de las áreas potencialmente amenazadas y para la elaboración de los planes de emergencia en los principales centros portuarios y urbanos costeros del país.

1.3 SISMOS, PLACAS Y FALLAS TECTÓNICAS

1.3.1 Sismos

Los sismos son movimientos convulsivos de la corteza terrestre resultan de un rápido deslizamiento de la falla debido al movimiento de placas, se clasifican en microsismos, cuando son imperceptibles; macrosismos cuando son notados por el hombre y causan daños en enseres y casas, y megasismos, cuando son tan violentos que pueden producir la destrucción de edificios, ruina de ciudades y gran número de víctimas.

Los sismos pueden ser de origen tectónico, volcánico o local; los sismos tectónicos producen el 90% de los terremotos y dejan sentir sus efectos en zonas extensas, estos pueden ser interplaca (zona de contacto entre placas) o sismos intraplaca (zonas internas de estas). Los sismos interplaca son el 5% del total de los sismos ocurridos en el mundo, aparecen a una profundidad entre los 70 y 300 km. Estos son típicos de zonas de subducción [9], son los segundos en energía, ya que a esta profundidad la tierra no almacena tanta como en el caso de los sismos plutónicos, pero dado su carácter somero son destructivos, esta clase de sismos son los causantes de la generación de tsunamis.

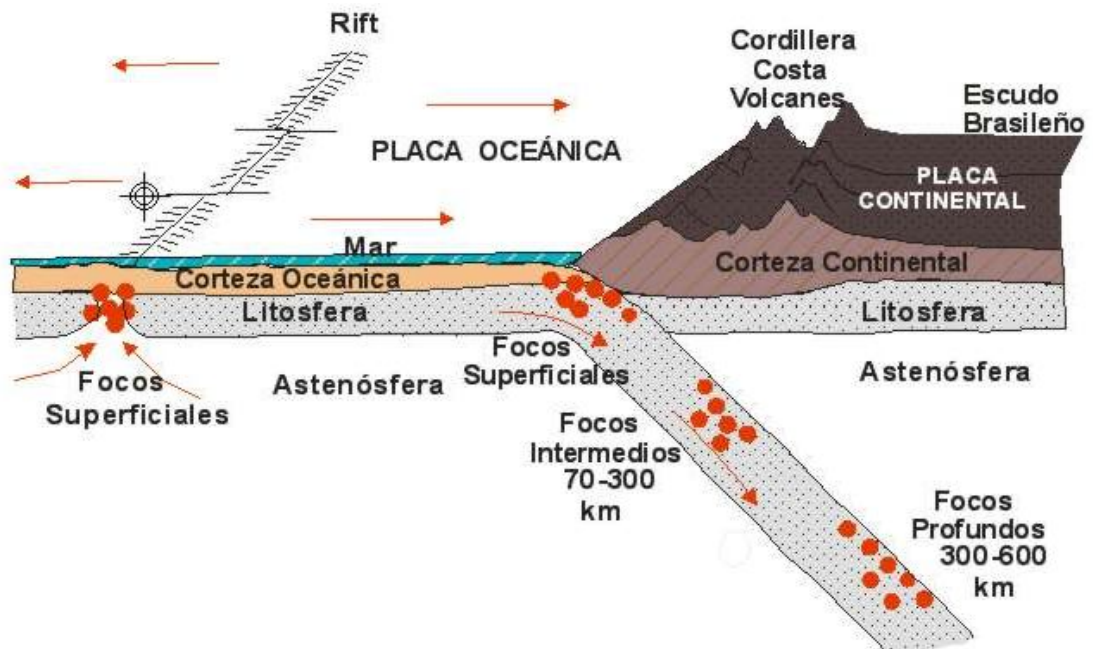


Figura 8. Zona de subducción.

http://defensaciviltungurahua.iespana.es/placa_tectonica.gif

1.3.2 Placa tectónica

El término placa tectónica hace referencia a las estructuras por la cual está conformado nuestro planeta, en términos geológicos, una placa es una plancha rígida de roca sólida que forma la superficie de la tierra (litósfera), flotando sobre roca ígnea y fundida que conforma el centro del planeta (astenósfera).

El territorio colombiano comprende un dominio continental deformado situado en el límite de tres placas tectónicas mayores; la placa Suramericana, la placa Nazca y la placa Caribe, en la actualidad estas tres placas se están acercando entre sí, dando origen a deformaciones en la corteza continental, actividad volcánica, y a una intensa actividad sísmica en el territorio colombiano, en este caso la placa Nazca converge hacia el este con respecto a la placa Suramericana, a una velocidad de aproximadamente 7 cm/año , la convergencia relativa entre estas dos placas se absorbe entre la zona de subducción del pacífico y a lo largo de los sistemas de fallas [9]. Esta fuente sísmica generó los dos terremotos más grandes que afectaron al país durante el siglo XX (1906 y 1979), con magnitudes de $M_w = 8.6$ y 8.1 respectivamente.

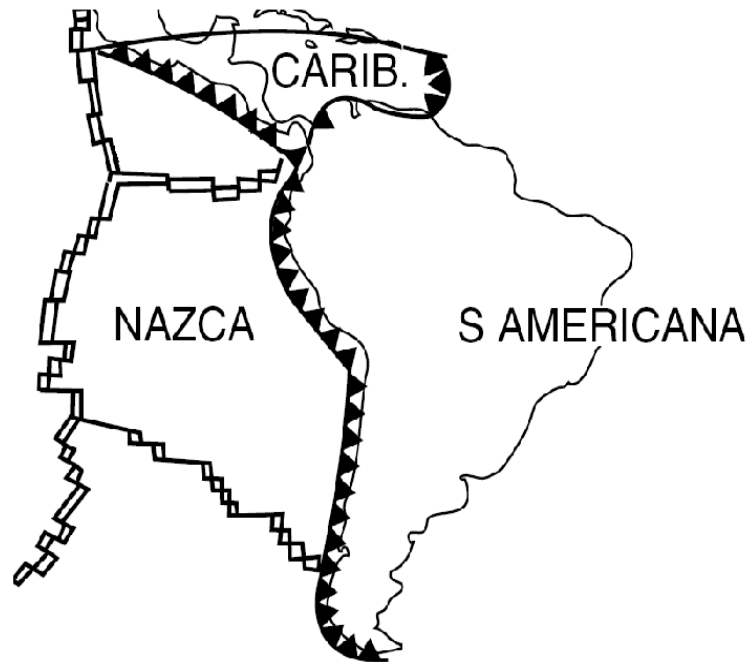


Figura 9. Placas Nazca, Suramericana y Caribe.

1.3.3 Fallas tectónicas

Una falla tectónica es el área donde confluyen dos ó más placas tectónicas que interactúan mutuamente o zonas de quiebres en la corteza terrestre. Las placas tectónicas al encontrarse en un continuo contacto, generan esfuerzos de compresión que acumulan energía de forma elástica. Al generarse una ruptura en las fallas, éstas liberan de forma repentina dicha energía acumulada. Si la ruptura o foco se presenta a poca profundidad de la corteza terrestre bajo el mar, ésta es capaz de generar desplazamientos importantes en dicho fondo marino, cuya área se encuentra relacionada con la energía liberada por el sismo.

Dentro del marco de la teoría elástica, los procesos de desplazamiento de fallas tectónicas y la radiación de ondas elásticas, pueden ser analizadas por medio de teorías de fuerzas equivalentes en cuerpos, para discontinuidades en tensión y desplazamientos a lo largo de la falla.

A continuación se nombran los elementos que describen un plano y tipo de falla particular; el plano de falla se puede describir a partir de tres ángulos fundamentales (Cardona, 2004):

Strike: Corresponde al rumbo del plano de falla, orientación de la falla sobre la superficie terrestre, se mide en dirección de las manecillas del reloj a partir del norte, tiene un valor de $0^\circ < 360^\circ$.

Dip (δ): Echado del plano de falla o buzamiento, describe la pendiente de la superficie de la falla, medida a partir de la superficie de la tierra, tiene un valor de $0^\circ < 90^\circ$.

Rake o Slip (ϕ): Desplazamiento de la falla y de una dimensión Slip, indica la dirección relativa del movimiento de la falla sobre la superficie terrestre, que corresponde a la dislocación de la falla y quien con tamaño del área de rotura dan correspondencia a una magnitud particular, se mide con respecto al rumbo de la falla y tiene un valor de $-180^\circ < 180^\circ$.

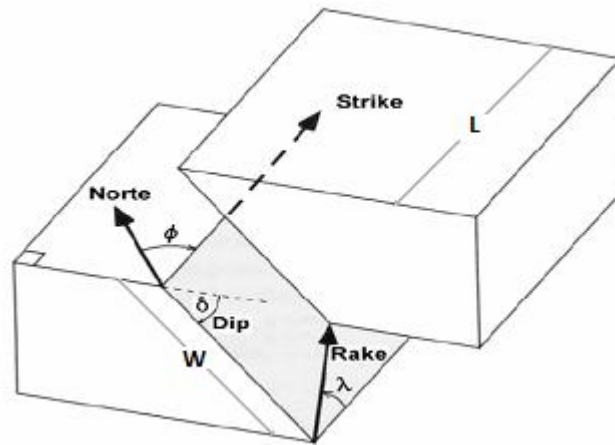


Figura 10. Ángulos fundamentales que describen el tipo de falla.

Fuente: Diseño sísmico de estructuras, La Fuente Sísmica. Juan Valenzuela, 2006.

Dependiendo de las características geológicas y mecánicas de las fallas tectónicas, éstas pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de desplazamiento, de la siguiente forma:

Falla normal (normal fault): Fractura geológica en la cual uno de los bloques se ha movido hacia abajo con respecto al otro bloque. Este tipo de falla debe su origen a la presencia de fuerzas extensivas que actúan perpendicular a la traza de la falla. $0^\circ < \delta < 90^\circ$, $\phi = -90^\circ$.

Falla dextral o sinistral (strike slip fault): Define al tipo de falla de movimiento paralelo al rumbo, si el desgarre lo hace el bloque ubicado a la derecha para un observador lejano es dextral $\delta = 90^\circ$ y $\phi = 180^\circ$ y si es el bloque izquierdo es sinistral $\delta = 90^\circ$ y $\phi = 0^\circ$.

Falla inversa (thrust fault): Fractura geológica en la cual uno de los bloques se ha movido hacia arriba con respecto al otro bloque. Este tipo de falla debe su origen a la presencia de fuerzas compresivas que actúan perpendiculares a la traza de falla. $0^\circ < \delta < 90^\circ$, $\phi = 90^\circ$.

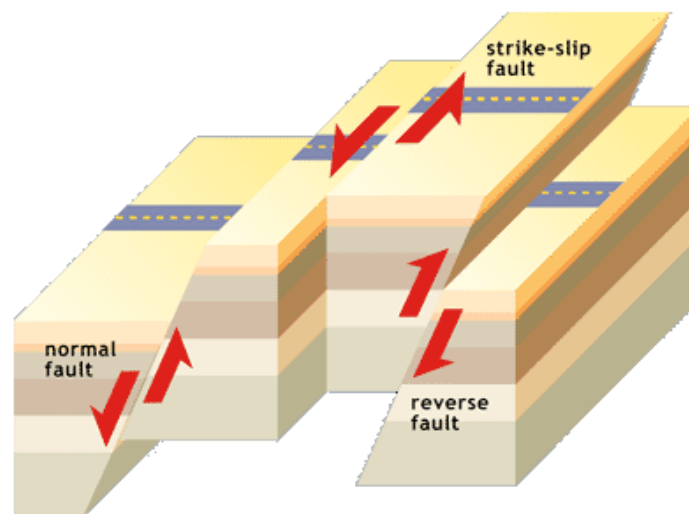


Figura 11. Tipos desplazamientos de la falla.

Fuente: http://www.rincondelvago.com/informacion/catastrofes_naturales/img/fault_types.gif

Tal como muestran [10], los grandes tsunamis son generados por terremotos con epicentros poco profundos y con un movimiento del fondo vertical "tipo pistón"; provocados por el desplazamiento de fallas normales e inversas. Los tsunamis que viajan grandes distancias a través del océano son causados por desplazamientos unipolares, esto es, cuando una de las placas se mantiene fija y la otra se desplaza verticalmente en el fondo marino, generándose un cambio neto de volumen [10].

1.4 LITORAL PACÍFICO COLOMBIANO

Situado en el extremo occidental del país, el litoral Pacífico Colombiano (LPC), está ubicado geográficamente entre los paralelos 1° 30' hasta los 7° 10' de latitud norte y entre los 77° 40' y 82° 00' de longitud oeste, como se muestra en la figura.

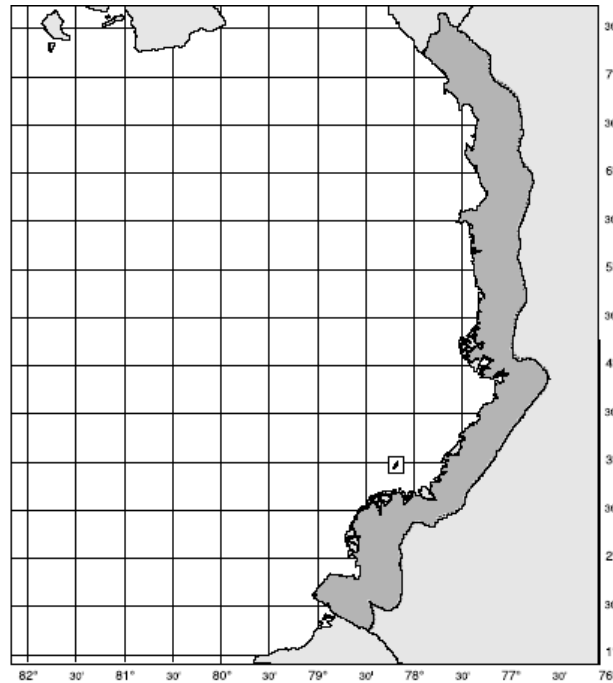


Figura 12. Litoral pacífico Colombiano.

La región costera del LPC tiene aproximadamente 80000 km² de superficie, siendo sus límites geográficos: la hoya del río Juradó, al norte (7° 28' N); el río Guaitará, al sur (0°14' N); el nacimiento del río San Juan, al este (75° 51' W), y la desembocadura del río Mira en Cabo Manglares, al oeste (79° 02' W). Esta delimitación de la zona costera se encuentra incluida dentro de la franja conocida como la ensenada de Panamá (*Panamá Bight*), la cual se extiende por las costas de Panamá, Colombia y Ecuador hasta la longitud 81°W.

El Litoral Pacífico colombiano es una de las regiones de gran importancia en el país, ya que es considerada como una de las zonas con la más alta concentración de flora y fauna en el mundo; además, es un área donde se encuentran importantes destinos turísticos, que a su vez contiene ecosistemas ricos, diversos y productivos, dotados para proveer bienes y servicios que sostienen actividades como la pesca, la

navegación, la industria, la explotación minera, entre otras, y donde se encuentran poblaciones ubicadas en cercanías a la costa de gran número de habitantes.

En esta región se encuentran dos de los principales puertos del país, Tumaco y Buenaventura además se localiza Málaga lugar donde se ubican varias poblaciones y la base militar de Málaga. El municipio de San Andrés de Tumaco está ubicado en el sur occidente, en el departamento de Nariño, la ciudad de buenaventura está ubicada al occidente, en el departamento del Valle del Cauca y Málaga está ubicada en el departamento del Valle del Cauca en límites con el Chocó.

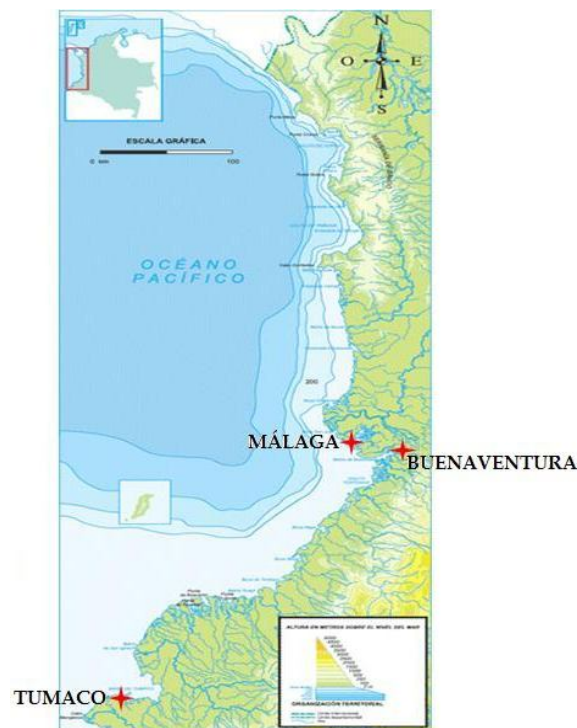


Figura 13. Principales poblaciones costeras en el LPC.

Esta zona del país es de las más propensas a que ocurran eventos ligados a sismos en la corteza oceánica subducida, debido a que esta actividad sismotectónica es superficial (profundidad < 60 km.) (Taboada et al, 1998) y teniendo en cuenta que en la zona Pacífica han ocurrido grandes sismos de subducción durante el siglo XX (el último de ellos afectó a 15 aldeas de pescadores ocasionando 450 víctimas mortales y centenares de heridos (Quiceno & Ortiz, 2001) un sismo cuyo epicentro

se ubique en el lecho marino y que presente una magnitud mayor a M_w 6.5 (grados) (Bunting *et al*, 2006) podría desencadenar la generación de un tsunami, lo que se traduce en una grave amenaza para esta zona cercana a la costa a lo largo de este litoral, puesto que la mayoría de poblaciones ubicadas cerca a la costa se levantan sobre palafitos o en lugares amenazados por inundaciones.

2. MODELO NUMÉRICO MOST (METHOD OF SPLITTING TSUNAMI)

En la actualidad hay una tendencia claramente creciente al uso de modelos numéricos predictivos de los procesos naturales, hidrodinámicos, morfodinámicos y de evolución costera, como soporte de decisiones en las actuaciones de prevención de desastres.

El sistema de modelación numérica MOST (*Method of Splitting Tsunami*) fue desarrollado por el *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL) y la *National Oceanic and Atmospheric Administration*; MOST ha sido desarrollado como parte de la detección temprana y pronóstico ante el embate de un tsunami.

Este sistema modela las tres fases o etapas de la evolución de ondas tsunami generadas por la ocurrencia de un sismo en zona de subducción, las cuales son generación, propagación e inundación, proporcionando una completa simulación del comportamiento de un tsunami desde su origen hasta la llegada a la costa. La simulación del proceso de generación en el modelo MOST está basado en la teoría de deformación elástica, descrita en [11] y el método del computo de la inundación es derivado del modelo VTCS [11].

Este sistema utiliza como datos de entrada la batimetría y topografía de la región a estudiar, además de la magnitud del sismo precursor y los datos o parámetros de la falla, la orientación de la falla o ángulo *strike* θ , el ángulo dip δ , el ángulo *rake* λ , el promedio de buzamiento (*slip*) u_0 , y la profundidad de la fuente h , estos datos son descargados por el modelo a través de internet.

2.1 GENERACIÓN

Durante el proceso de modelación, en la fase de generación del tsunami está inmersa la perturbación inicial de la superficie del océano, debido a la deformación del fondo (suelo o piso) oceánico producido por un sismo. El proceso de generación de tsunami está basado en el modelo de plano de falla para el origen del sismo [12], el cual asume una capa líquida incompresible subyacente al semiespacio elástico para caracterizar el océano y la corteza terrestre.

La implementación del modelo de plano de falla elástico [12] se usa para determinar la forma del desplazamiento vertical del terremoto, que asume la ruptura de un plano de falla rectangular. Los parámetros del terremoto requeridos por el modelo son: la longitud L y el ancho W de la falla, la ubicación del epicentro, la orientación de la falla o ángulo *strike* θ , el ángulo dip δ , el ángulo *rake* λ , el promedio de buzamiento (*slip*) u_0 , y la profundidad de la fuente h .

2.1.1 Relaciones entre el área desplazada del fondo oceánico y parámetros sismológicos

Existen relaciones entre la energía que libera un sismo con foco poco profundo y gran magnitud, con el área y el desplazamiento vertical del fondo marino. El concepto de momento sísmico M_0 , se define con base en la equivalencia entre desplazamientos elásticos y fuerzas dobles acopladas [13].

Una falla sísmica es modelada matemáticamente por el desplazamiento de corte vertical, a través de una superficie en un medio elástico (Okada, 1985). Dicho desplazamiento se debe a una distribución de esfuerzos sobre la superficie, cuyo momento total es,

$$M_0 = \mu SD \quad (1)$$

donde μ es la rigidez del medio con (2 o 3×10^{11} dina/cm²) para placas superficiales y (6 o 7×10^{11} dina/cm²) para placas muy profundas, S es el área desplazada (longitud L por ancho W) y D el desplazamiento medio vertical. El momento sísmico M_0 , se obtiene a partir de los espectros de energía de las ondas superficiales libres generadas por los terremotos. M_0 depende de la velocidad de la onda superficial, densidad del medio, distancia del foco y la amplitud máxima espectral.

Dado que los terremotos que generan tsunamis son aquellos que ocurren bajo el agua, con fallas de focos poco profundas y grandes magnitudes; son medidos no en magnitud de Richter (M_s), sino con el momento sísmico. Esto se debe a que M_s es determinado a partir de las amplitudes de ondas de superficie de período 20

segundos. Cuando ocurren terremotos de gran magnitud, donde el área de ruptura es del orden de magnitud de la longitud de onda de las ondas sísmicas superficiales, M_s no tiene en cuenta períodos mayores a 20 s, con lo cual, se satura la escala y la energía presenta grandes errores. A diferencia de M_s , M_0 se calcula teniendo en cuenta estas ondas superficiales de gran longitud de onda.

Kanamori y Anderson [14], determinaron relaciones empíricas del momento del sismo M_0 con la magnitud M_s y la energía E_s .

$$\log E_s = 1.5 M_s + 4.8 \quad (2)$$

$$\log M_0 = 1.5 M_s + 9.1 \quad (3)$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene,

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.07 \quad (4)$$

donde M_w es la magnitud de momento la cual, según [14], no es una escala saturada, sino mas bien la continuación natural de la escala M_s para grandes eventos.

2.1.2 Relaciones entre las escalas de magnitud y los parámetros de falla

Las relaciones de las escalas de magnitud, el momento sísmico y la energía con los parámetros de la falla se emplean de dos maneras:

- Para estimar los parámetros más relevantes de la falla, de forma aproximada, cuando M_s , M_0 o E_s del evento son conocidos a partir de la evaluación instrumental de los registros.
- Para obtener la magnitud, el momento sísmico y/o la energía estimada de eventos históricos, para los cuales no existen registros instrumentales pero que algunos de los parámetros de la falla tales como longitud de ruptura y/o superficie desplazada pueden aun estimarse a partir de evidencias físicas.

Es importante aclarar que estas relaciones globales solamente pueden proporcionar una orientación en los órdenes de magnitud, dado que la dispersión de los datos es considerable debido a la influencia de varios factores y a la variabilidad regional.

Para efectos de las simulaciones numéricas de generación de tsunamis, es importante conocer las dimensiones de la falla y su desplazamiento vertical o dislocación (D)

En la figura se presenta la relación entre el momento sísmico M_0 y el área de ruptura de la falla A_r , hallada por [14].

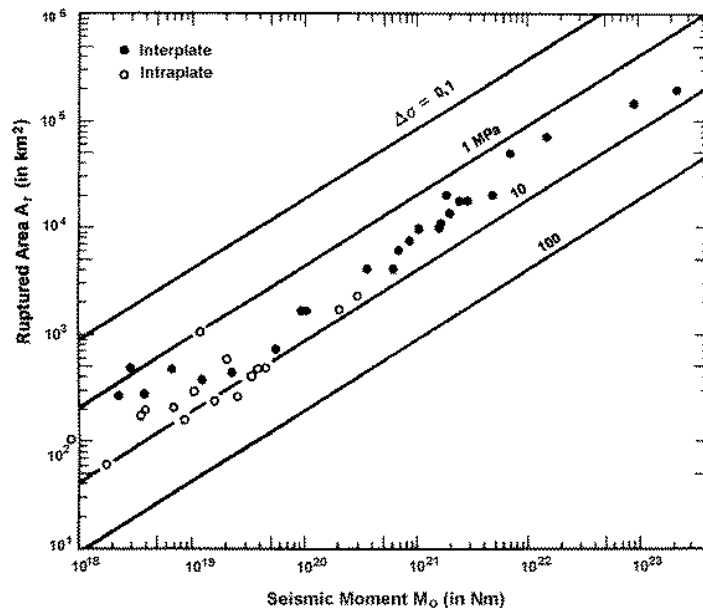


Figura 14. Relaciones entre el Área de ruptura y M_0 .

Fuente: Asesoría en el diseño de propuestas de actuación que sirvan como elemento de protección ante el impacto de un tsunami sobre el casco urbano de Tumaco (regeneración de la isla del guano), convenio marco de colaboración científica, técnica y académica entre el ministerio de defensa nacional – dirección general marítima (colombia) y la fundación leonardo torres quevedo de la universidad de cantabria (españa).

Esta relación es controlada por la liberación de esfuerzos ∇_{σ} de la falla, cuanto mayor es esta liberación, mayor es M_0 para un área de ruptura dada.

Wells y Coppersmith [15] proponen la siguiente relación entre la magnitud de momento M_w (Nm) y A_r (km²),

$$M_w = (0.98 \pm 0.03) \log A_r + (4.07 \pm 0.06) \quad (5)$$

Estas relaciones tuvieron un nivel de confianza del 95% para eventos de falla normales e inversas, con fuertes correlaciones (r entre 0.89 y 0.95) y dispersión mínima en los datos analizados.

Finalmente, el desplazamiento vertical D es el resultado de la liberación de esfuerzos ∇_σ de la falla, tal que la distribución de ∇_σ es el parámetro dinámico más importante con relación a la tectónica del medio. Se asume que la liberación media de esfuerzos ∇_σ es constante para una región dada (20 a 80 bar. para terremotos superficiales y 100 a 150 para terremotos profundos) y el desplazamiento medio se estima solo teniendo en cuenta las características de la falla, sin tener en cuenta cambios espaciales de la distribución de ∇_σ . Sin embargo también existen relaciones que permiten estimar este parámetro a partir de las magnitudes de escala.

(Wells & Coppersmith, 1994) proponen las relaciones entre la magnitud de momento M_w y el desplazamiento D (en m) con correlaciones entre 0.71 y 0.78,

$$M_w = (0.82 \pm 0.10) \log D + (6.693 \pm 0.05) \quad (6)$$

$$\log D = (0.69 \pm 0.08) M_w + (4.80 \pm 0.57) \quad (7)$$

2.1.3 Generación de ondas en la superficie del mar debido al desplazamiento del fondo marino

Las características del desplazamiento del lecho marino están determinadas por los parámetros geométricos de la falla nombrados en el capítulo anterior, de la profundidad (la distancia medida desde el fondo hasta la superficie del mar) y de las dimensiones de la misma, su longitud y su ancho (L , W), figura 10,

Por lo tanto, tradicionalmente la generación de tsunamis se ha realizado a partir de mecanismos tipo pistón, que toman en cuenta las soluciones del plano de falla y la

geometría de la misma, suponiendo que la deformación instantánea de la superficie del océano es igual a la deformación vertical del lecho marino.

Kajiura y Shuto [16], afirman que si se considera una fuente puntual de velocidad vertical en el fondo del océano, la perturbación horizontal en la superficie del agua es entre 3 y 4 veces la profundidad del océano donde se produce la perturbación.

Cuando la escala horizontal L de la perturbación del fondo es mucho más grande que la profundidad del agua, prácticamente se genera en la superficie del agua la misma forma de perturbación que en el fondo. Los terremotos muy grandes ($M_s > 7,5$) en zonas de subducción, en términos generales pueden generar tamaños de fallas desplazadas con $L = 100$ a 800 km, $W = 50$ a 300 km, $D = 2$ a 20 m.

Teniendo en cuenta lo anterior, es claro que el comportamiento de las ondas generadas es diferente en comparación con las ondas generadas por fuentes puntuales. Es decir, las componentes espectrales de muy baja frecuencia relacionadas al tamaño de la falla son dominantes, y las componentes de ondas de alta frecuencia que son importantes en la dispersión son usualmente muy pequeñas. Por tal, es muy buena la aproximación al asumir ondas largas lineales en la zona de generación.

2.1.4 Parámetros sísmicos en el MOST

Como se dijo anteriormente los cambios significativos en el fondo o piso oceánico a lo largo del plano de falla son caracterizados por sus ángulos, strike, dip, slip o rake; la magnitud del slip o el desplazamiento de la falla (dislocación) a lo largo de la línea que marca la intersección del plano de falla con el plano horizontal que representa la superficie local de la tierra; y el epicentro del evento sísmico responsable de la deformación del fondo oceánico.

La dislocación del fondo oceánico debido a la ruptura a lo largo de la falla es expresado en términos de una deformación de un área rectangular que es utilizada por el MOST en la fase de deformación para modelar la sección del fondo oceánico a lo largo de la ruptura de la falla que se ve perturbada por un evento sísmico, esta región rectangular del fondo del océano es dividida por la línea que

marca la intersección del plano de falla con el plano horizontal de la superficie de la tierra, con una orientación de terminada por el ángulo strike.

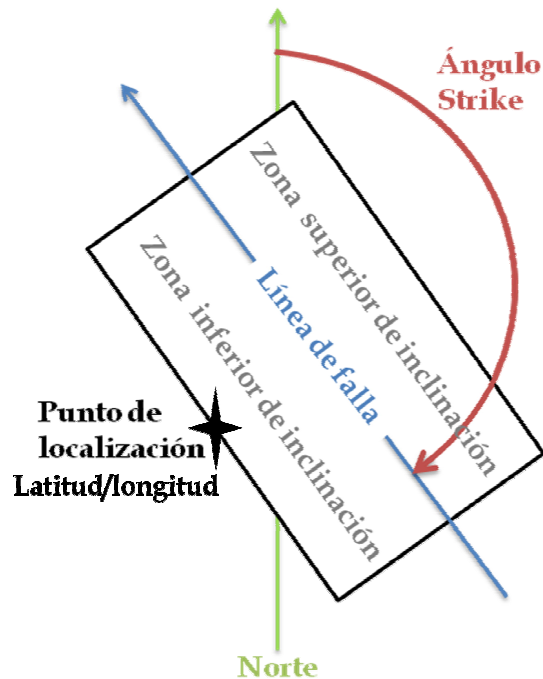


Figura 15. Rectángulo de deformación.

La línea de falla se proyecta a través del centro del rectángulo de deformación y divide el rectángulo en una región de empuje hacia arriba en la zona superior de inclinación o pared colgante y una zona de subsidencia en el lado de la zona de inclinación interior o pared pie al lado de la falla. El centro del lado paralelo a la pared pie (el lado de subsidencia del rectángulo) del rectángulo de deformación es el punto de localización o la localización referencia, es la ubicación geográfica latitud-longitud del rectángulo.

2.1.4.1 Uso de rectángulos de deformación

Un determinado rectángulo de deformación debe ajustarse estrechamente a una alteración ocurrida en el piso del océano. Para modelar una falla sísmica real, es necesario descomponer el rectángulo en múltiples rectángulos de deformación que son continuos y no sobrepuestos en lo posible. Estos rectángulos tienen una dimensión específica e igual para todos de 100 kilómetros de largo por 50 kilómetros de ancho.

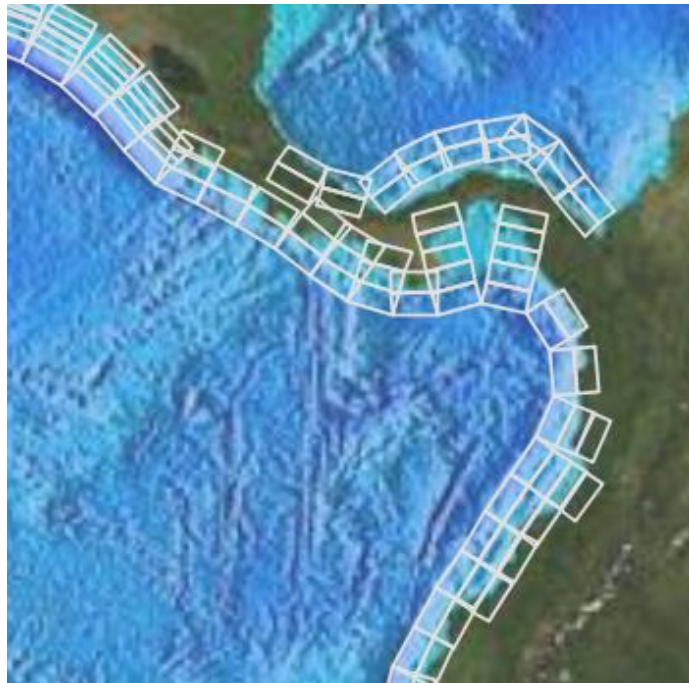


Figura 16. Múltiples rectángulos de deformación.

La PMEL *Pacific Marine Environmental Laboratory* y la NOAA *National Oceanic and Atmospheric Administration*, proporciona los sitios web donde se encuentra la información de los parámetros de la falla tales como los ángulos rake, slip, dip, strike y la información del epicentro de una serie de histórica de fallas, las cuales son cargadas en la interface del modelo *Community Model Interface for Tsunami* (ComMIT), los valores de los parámetros de falla estas definidos por un estudio realizado por la NOAA *National Oceanic and Atmospheric Administration*, en este estudio llegan a la conclusión que los factores que tienen mayor influencia en la

generación de un tsunami son la magnitud del sismo fuente, que es la directa responsable del valor de desplazamiento slip, la ubicación de este y el nivel de marea que se encuentre en el momento de la llegada de la ola tsunami [17].

2.2 PROPAGACIÓN E INUNDACIÓN

La particularidad de este fenómeno natural es su propagación desde su punto o epicentro de origen hasta grandes distancias (cientos o miles de kilómetros). Para obtener gran exactitud en la modelación de la propagación de un tsunami en grandes distancias, se debe tener en cuenta la curvatura de la tierra, además de la fuerza Coriolis y la dispersión [18].

El efecto Coriolis, es el efecto que se observa desde todo sistema de referencia en rotación (y por tanto no inercial) sobre cualquier objeto que varíe su distancia respecto al eje de rotación de dicho sistema. Este efecto consiste en una aceleración relativa del objeto visto desde el sistema en rotación, cuando aquel se acerca o aleja de su eje. Esta aceleración es siempre perpendicular al eje de giro del sistema y a la velocidad del cuerpo.

Los tsunamis son ondas mecánicas que como tales tienen dos fundamentos: excitación y fuerza restitutiva. La excitación es producida por el desplazamiento del agua debido al sismo submarino, la fuerza restitutiva debe ser homogénea y externa, en este caso se trata de la fuerza de gravedad y no de la fuerza elástica del medio; además, las ondas en este fenómeno natural pertenecen a la clase de ondas largas, la teoría de ondas largas, en su forma aproximada, se puede aplicar a las olas de profundidades relativamente someras (longitud de la onda mucho mayor que la profundidad del agua), para la cual la curva de la trayectoria de las partículas de agua es suficientemente pequeña y la aceleración vertical de las partículas es insignificante, comparada con la aceleración gravitacional. Consecuentemente, el movimiento vertical de las partículas de agua no tiene efecto en la distribución de presión. Bajo las anteriores consideraciones, es una aproximación adecuada decir que la presión es hidrostática; y adicionalmente, que la velocidad de las partículas de agua es verticalmente uniforme [18].

La teoría de agua someras puede expresar de manera aproximada la realidad del movimiento de ondas largas con base en las siguientes ecuaciones de conservación,

$$h_t + (uh)_x + (vh)_y = 0 \quad (8)$$

$$u_t + uu_x + vu_y + gh_x = gd_x \quad (9)$$

$$v_t + uv_x + vv_y + gh_y = gd_y \quad (10)$$

dónde $h = \eta(x, y, t) + d(x, y, t)$. $\eta(x, y, t)$ es el desplazamiento vertical de la superficie de agua sobre su nivel en reposo, x y y son coordenadas horizontales, t el tiempo, $u(x, y, t)$ y $v(x, y, t)$ las velocidades promedio en las direcciones x y y , y g la aceleración gravitacional [18].

Para resolver el problema de la generación de tsunami generado por un desplazamiento del fondo marino, las siguientes condiciones iniciales se especifican,

$$\begin{aligned} d(x, y, t) &= d_0(x, y, t), t \leq t_0 \\ d(x, y, t) &= d_0(x, y, t_0), t > t_0 \end{aligned} \quad (11)$$

donde $d_0(x, y, t)$, es la función que describe el movimiento del fondo durante el periodo de tiempo $0 \leq t \leq t_0$. Usualmente, t_0 es asumido como pequeño, de este modo en movimiento en el fondo es considerado como un desplazamiento vertical instantáneo. La determinación de la deformación estática del fondo $d_0(x, y)$ se logra usando lo que se conoce como modelos de desplazamiento. Para producir que la onda entre en el área de cálculo a través de la frontera las condiciones siguientes se especifican en la frontera [18],

$$v(x, y_b, t) = v_0(x, y_b, t) \quad (12)$$

$$h(x, y_b, t) = h_0(x, y_b, t) \quad (13)$$

donde $v_0(x, y_b, t)$ y $h_0(x, y_b, t)$ son funciones que describen las variaciones de la velocidad y la amplitud en la onda entrante en la frontera.

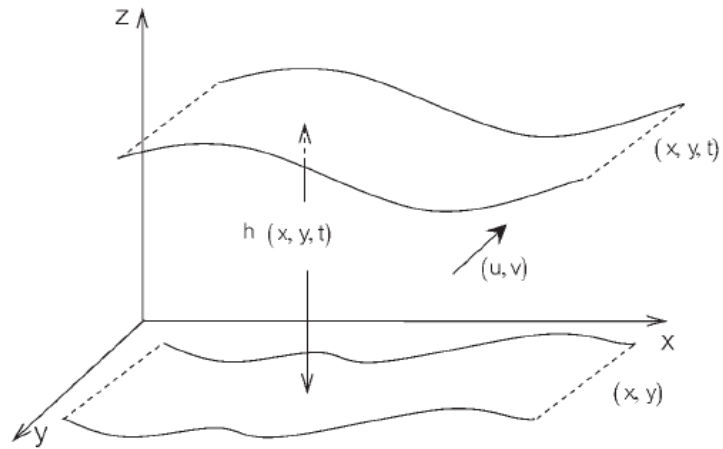


Figura 17. La geometría del dominio para las ecuaciones de aguas someras.

Fuente: Yuri n. Skiba, Denis m. filatov, Esquemas conservativos basados en el método de separación, para la simulación numérica de vórtices en la atmósfera, Inteciencia, vol 31 N° 1., Enero 2006.

Para la solución de estas ecuaciones el sistema de modelación numérica MOST utiliza la técnica de splitting (método de pasos pequeños), o el método Yanenko en una topografía arbitraria y el desplazamiento del fondo marino, el sistema de ecuaciones 8, 9 y 10 puede ser resuelto numéricamente. Considerando las diferencias finitas algoritmo basado en el método splitting, o también conocido como el método de pasos fraccionados, este método reduce la solución numérica del problema bidimensional (2D) original a la solución de dos problemas unidimensionales (1D). Esto es posible dividiendo el sistema en un par de sistemas, cada uno conteniendo solamente una variable en el espacio como se muestra [18],

$$h_t + (uh)_x = 0 \quad (14)$$

$$u_t + uu_x + gh_x = gd_x \quad (15)$$

$$v_t + uv_x = 0 \quad (16)$$

$$h_t + (vh)_y = 0 \quad (17)$$

$$v_y + vv_y + gh_y = gd_y \quad (18)$$

$$u_t + vu_y = 0 \quad (19)$$

Cada uno de los sistemas anteriores es un sistema hiperbólico cuasi-lineal con todos los reales y eigenvalores distintos. Pueden ser escritos en forma característica así [18],

$$p_1 + \lambda_1 p_x = g d_x \quad (20)$$

$$q_1 + \lambda_2 q_x = g d_x \quad (21)$$

$$v' + \lambda_3 v' = 0 \quad (22)$$

Acá las invariantes Riemman del sistema son,

$$p = u + \sqrt{gh} \quad (23)$$

$$q = u - \sqrt{gh} \quad (24)$$

$$v' = v \quad (25)$$

y los tres distintos eigenvalores son,

$$\lambda_1 = u + \sqrt{gh} \quad (26)$$

$$\lambda_2 = u - \sqrt{gh} \quad (27)$$

$$\lambda_3 = u \quad (28)$$

Las ecuaciones 20 y 21 constituyen un problema de ecuaciones de aguas someras en una dimensión, en todo paso de tiempo el problema de la propagación de la onda larga se soluciona a lo largo de la misma coordenada, definida en una ecuación de aguas someras de una dimensión y una ecuación mas describe el momentum en dirección normal a la misma coordenada. El método desarrollado para ondas largas y *run-up* es aplicado para la solución del sistema de ecuaciones 20 a 22 [18].

Cada uno de estos tres problemas continuos separados conserva la masa y la energía total. Los problemas discretos, derivados de éstos, también conservan exactamente la masa y la energía total.

Es conocido que las ecuaciones de aguas someras, como un sistema físico cerrado, poseen varias leyes de conservación. En particular, ellas conservan importantes características integrales como son la masa, la energía total, etc.

Es muy importante conservar las leyes también en la forma discreta, ya que dichas leyes no sólo garantizan la estabilidad de los algoritmos numéricos aplicados, sino también la correcta distribución de energía de la solución entre diferentes frecuencias y, por lo tanto, los resultados fieles de la simulación [19].

2.2.1 Conservación de masa

La ecuación de conservación de la masa es parte de las ecuaciones de movimiento que se resuelven en cualquier procedimiento numérico, y es importante que se cumpla la conservación de masa para garantizar la estabilidad de los algoritmos numéricos aplicados, pero acumulativas aproximaciones numéricas a veces pueden producir resultados que violan conservación de la masa. Este es particularmente el caso cuando se utilizan los factores de fricción, o de suavizado para estabilizar los cálculos de inundación para romper olas (llegada a la costa de las olas) [20].

La conservación de la masa se puede comprobar mediante el cálculo del volumen de agua al principio y al final de la computación. Esto debe hacerse mediante la integración de la profundidad del agua afectada $n(x, y, t)$ durante el dominio de todo el flujo, es decir, si el dominio de flujo se extiende desde la máxima penetración durante la inundación $x = X_{\max}$ en la ubicación exterior de la región de origen X_s , $y = Y_{\max}$ a Y_s , entonces el volumen total de desplazado $V(t)$ es [20],

$$V(t) = \int_{X_{\max}}^{X_s} \int_{Y_{\max}}^{Y_s} n(x, y, t) dx dy \quad (29)$$

La integral de $n(x, y, t)$ debe usarse en lugar de la integral de la profundidad entera del flujo $h = \eta(x, y, t) + d(x, y, t)$ donde $d(x, y, t)$ es la profundidad del agua inalterada, este último es apropiado para ocultar errores en el cálculo. Por lo general $n \gg d$, en alta mar sólo producirá la integración de todo el volumen del dominio de flujo y los errores de máscara. Tenga en cuenta que las pruebas de la conservación de la masa consisten en colocar un dominio cerrado dentro de los límites de reflexión [20].

Los modelos numéricos usan las fronteras para permitir a la ola irradiar hacia el exterior. Mientras que en algunos la pérdida de masa en teoría puede ocurrir debido a la diferenciación en la frontera, poniendo los límites de cálculo lo suficientemente lejos de la fuente se asegura que esta pérdida es mínima. Así el flujo neto se debe agregar o restar al volumen total de desplazado. Los cálculos de conservación de la masa deben ser tal que el volumen total inicial desplazado $V(t = 0)$ debe estar dentro del 5% del volumen total desplazado al final de la modelación $V(t = T)$, donde T representa el tiempo final de cálculo. Se supone que el final de la computación es cuando la primera ola se refleja plenamente y en el mar [20].

2.2.2 Estabilidad de la solución numérica

La relación que debe existir entre el paso temporal y los pasos espaciales se determina a partir de la condición de estabilidad de Courant-Friedrichs-Lewy o la condición (CFL), la estabilidad de la solución numérica se garantiza si cada una de las mallas cumple con la condición [21],

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{max}}$$

(30)

donde Δt es el paso del tiempo durante el cálculo, Δx es la resolución espacial de la malla h_{max} es la profundidad máxima presente en la malla, esta condición se debe cumplir en los cuatro dominios de cálculo, básicamente esta condición establece que la velocidad de onda numérica tiene que ser menor a la velocidad de onda real, ya que de esta manera el dominio de dependencia numérico contiene al dominio de dependencia real [22], de esta forma se garantiza la correcta percepción de la onda reproducida dentro del modelo.

Para garantizar el cumplimiento de esta condición, el modelo internamente realiza el cálculo de la ecuación anterior con los datos obtenidos de las mallas de trabajo, y a través de la interface muestra si se cumple o no, además calcula y muestra los valores mínimos de Δt y Δx que se pueden usar para la correcta modelación. Si el modelo detecta que no se cumplen las condiciones CFL no permite que la modelación se lleve a cabo.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo del trabajo involucró diferentes etapas, cada una de ellas encierra las actividades realizadas para llegar a la identificación de los escenarios de riesgo por tsunami y a la elaboración de un banco de datos o simulaciones con los resultados obtenidos. Cada una de estas fases se presentan y describen a continuación

3.1 DEFINICIÓN DE LOS EPICENTROS DE ESTUDIO

Para la definición de los epicentros de estudios se tuvo en cuenta que existen dos tipos de tsunami, los tsunami de origen cercano que son producidos por fuentes ubicadas a no más de 200 Km. y los de origen lejano los cuales son producidos por fuentes ubicadas a mas de 200 Km.. Así para la escogencia de las fuentes generadoras de origen cercano se apoyo en un estudio realizado en el CCCP en el año 2005 y por registros históricos de la actividad sísmica de la región.

En este estudio se superponen las regiones homogéneas dadas por Gutscher, la evolución de las placas de Cocos y de nazca, donde se resaltan las zonas activas dadas por Meschede y la clasificación de los principales eventos sísmicos registrados en el periodo 1976-1999 en la zona de interés (tipo A círculos rojos, tipo B círculos blancos, tipo C círculos amarillos y tipo D círculos azul celeste). Esta información es la base para la selección de la ubicación de los sismos a considerar dentro de las modelaciones de tsunami (Cardona, 2004). Se consideró además de lo hasta este punto expuesto, el ángulo de incidencia de las ondas de tsunami con respecto a la ubicación geográfica del litoral.

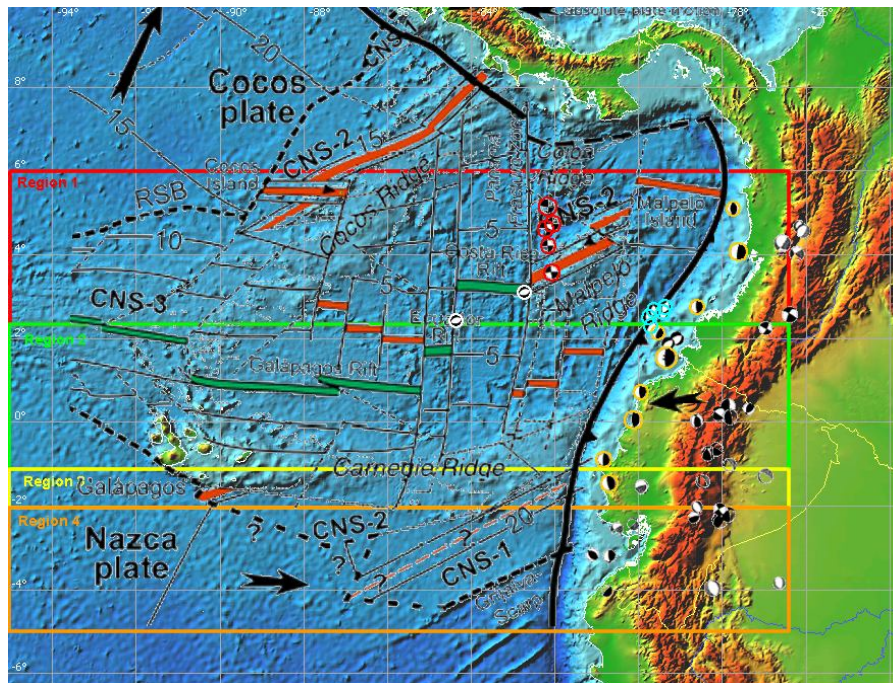


Figura 18. Superposición de las regiones sísmicas homogéneas dadas por Gutsher et al, la evolución tectónica de las placas Cocos y Nazca propuesta por Maschede y Barckhausen, y la clasificación de los mecanismos de la falla para 57 eventos sísmicos con $M_b > 4.5$ realizada por Gutsher et al.

De acuerdo a este estudio se seleccionaron 7 fuentes de estudio sobre la zona de subducción, esto basado en la información histórica disponible y la anteriormente expuesta.

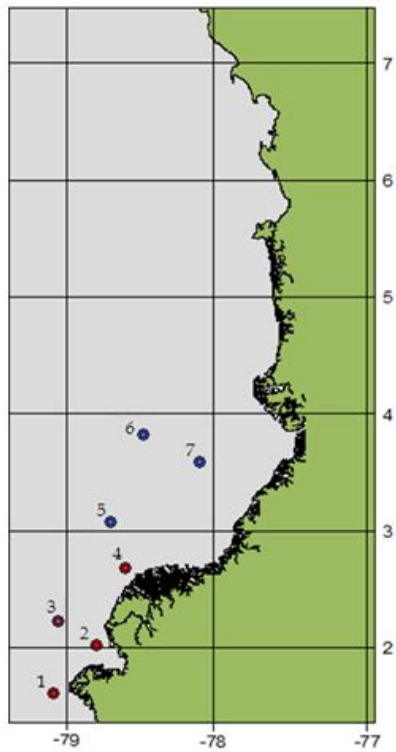


Figura 19. Epicentros de estudio de origen cercano.

Para el caso de los epicentros de estudio de origen lejano se seleccionaron 7 puntos ubicados a lo largo del cinturón de fuego del Pacífico, ubicado en el océano Pacífico, donde se concentran algunas zonas de subducción más importantes en el mundo, lo cual genera gran actividad sísmica en esta zona.

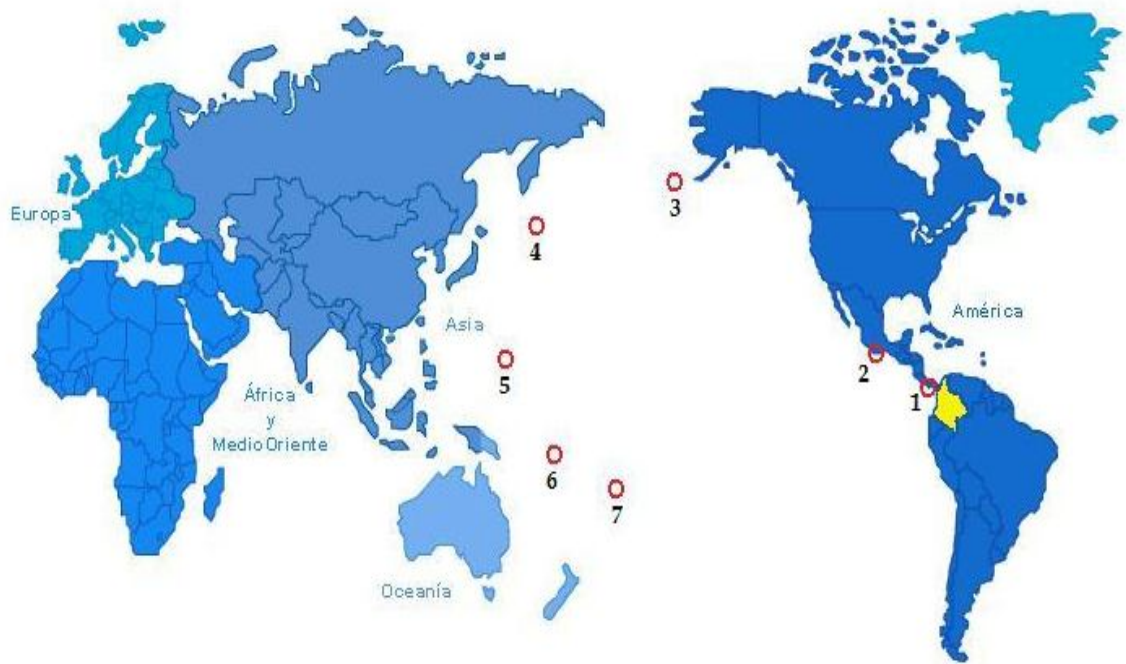


Figura 20. Epicentros de estudio de origen lejano.

Estos epicentros se eligieron teniendo en cuenta su ubicación geográfica (ubicación respecto al LPC de manera que los puntos elegidos estuvieran situados a una distancia equitativa y también el ángulo de incidencia de las ondas de tsunami con respecto al LPC) y por registros históricos obtenidos de fuentes como USGS *Geological U.S. Survey Earthquake Hazards Program*, Harvard CMT *Earthquake Catalog*, NGDC *National Geophysical Data Center*, entre otras, los cuales indican la permanente actividad sísmica en estos lugares seleccionados. La ubicación geográfica de los epicentros generadores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Ubicación fuentes sísmicas de origen cercano y lejano.

SISMO	UBICACIÓN ORIGEN CERCANO (Longitud-Latitud)	UBICACIÓN ORIGEN LEJANO (Longitud-Latitud)
1	-79.2703 O, 1.1593 N	-80.6777 O, 7.1320 N
2	-78.7734 O, 1.9444 N	-96.4099 O, 15.7024 N
3	-79.1407 O, 2.1675 N	-168.804 O, 52.2220 N
4	-78.3110 O, 2.6611 N	-154.4701 E, 47.2320 N
5	-78.6664 O, 2.9030 N	-147.3683 E, 16.8869 N
6	-78.1573 O, 3.6344 N	-166.0261 E, 11.1069 S
7	-77.8060 O, 3.3863 N	-172.8104 O, 15.6384 S

3.2 IDENTIFICACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

Debido a la gran extensión del litoral, a la información con que se cuenta en la actualidad (Información topográfica y batimétrica) y a que el modelo numérico MOST requiere que la información le sea suministrada en forma de malla de cálculo para su funcionamiento se elaboraron 9 mallas de trabajo, distribuidas de la siguiente manera, 3 mallas anidadas (A, B, C) para cada una de las tres regiones establecidas, Tumaco, Buenaventura y Málaga.

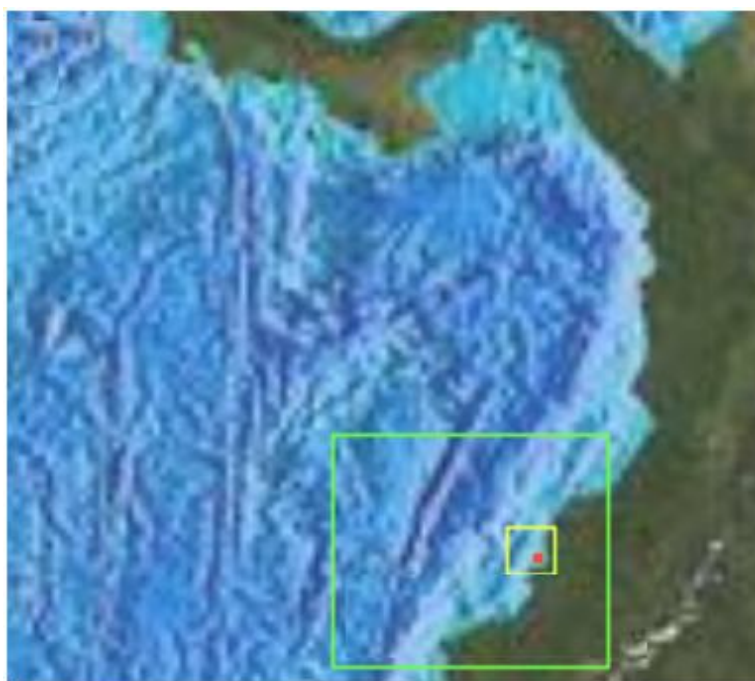


Figura 21. Mallas Tumaco, malla verde o A (malla de 36 arcseg.), malla amarilla o B (malla de 6 arcseg.), malla Roja o C (malla de 1 arcseg.).

Tabla 3. Tamaño y ubicación de las mallas de Tumaco.

MALLA	LÍMITE INF. IZQ.	LÍMITE SUP. DER.	TAMAÑO
A	(-81.39194445°W, 0.40805555°N)	(-78.71000000°W, 1.84000000°N)	355 x 310
B	(-79.15027778°W, 1.60972222°N)	(-78.51027778°W, 2.18972222°N)	385 x 361
C	(-78.82000000°W, 1.77000000°N)	(-77.85194445°W, 3.49805555°N)	397 x 325

Para la selección de estas tres regiones se tuvo en cuenta que Tumaco y Buenaventura son los principales puertos marítimos del sur del país, los cuales son de gran importancia para el comercio, la economía y el desarrollo del centro y sur de Colombia, además Bahía Málaga es un lugar donde se ubican poblaciones costeras como Juanchaco o la Barra y la base militar de Málaga la cual juega un papel importante en la seguridad nacional, además estas localidades están densamente pobladas, tienen la mayoría de sus construcciones cercanas a la costa y gran parte de estas se levantan sobre palafitos y en lugares amenazados por inundaciones.

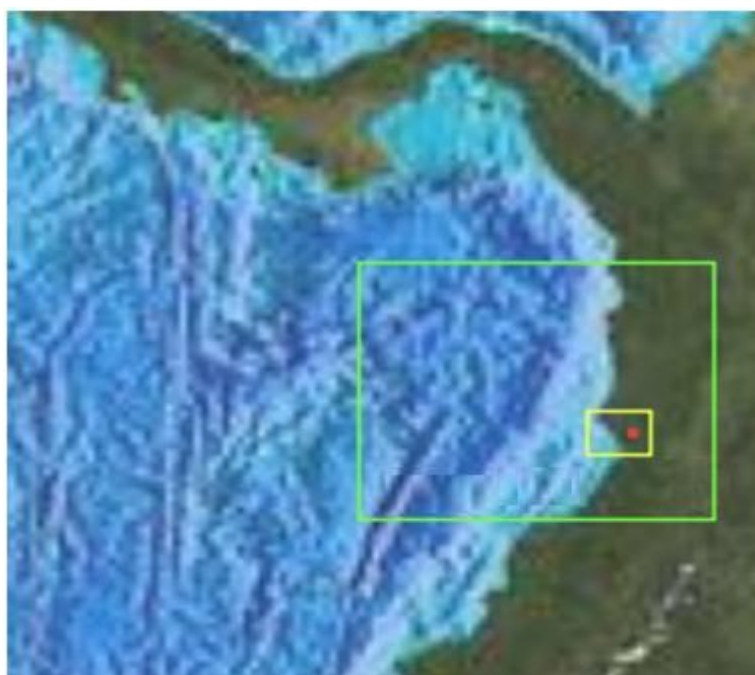


Figura 22. Mallas Buenaventura, malla verde o A (malla de 36 arcseg.), malla amarilla o B (malla de 6 arcseg.), malla Roja o C (malla de 1 arcseg.).

Tabla 4. Tamaño y ubicación de las mallas de Buenaventura

MALLA	LÍMITE INF. IZQ.	LÍMITE SUP. DER.	TAMAÑO
A	(-80.49194445°W, 2.70805555°N)	(-76.05194445°W, 6.21805555°N)	361 x 361
B	(-77.63027778°W, 3.54972222°N)	(-76.90027778°W, 4.14972222°N)	439 x 361
C	(-77.10000000°W, 3.84000000°N)	(-77.00000000°W, 3.94000000°N)	445 x 352

Estas mallas son un conjunto jerarquizado de datos de batimetría y topografía de diferente resolución, los datos de la malla interna (malla C) son los de más alta resolución, tienen la menor cobertura pero define el objeto o área de principal interés en el estudio de la inundación. La malla externa (malla A) cubre la mayor superficie utilizada en el cálculo de la fase de inundación y define el límite de la fase de propagación, los datos intermedios son los datos de la malla mediana (malla B), esta proporciona una región de transición para mejorar la exactitud de los cálculos de inundación del modelo.

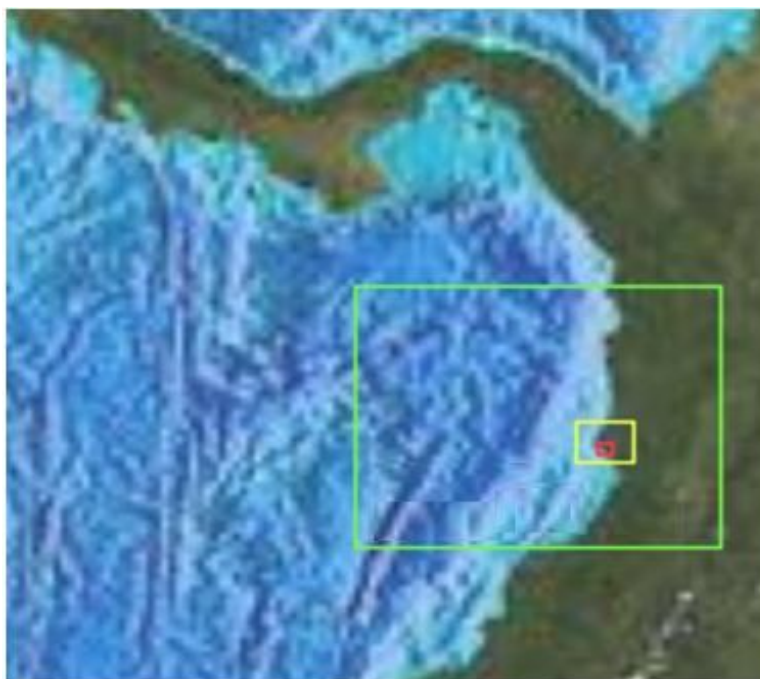


Figura 23. Mallas Málaga, malla verde o A (malla de 36 arcseg.), malla amarilla o B (malla de 6 arcseg.), malla Roja o C (malla de 1 arcseg.).

Tabla 5. Tamaño y ubicación de las mallas de Málaga.

MALLA	LÍMITE INF. IZQ.	LÍMITE SUP. DER.	TAMAÑO
A	(-80.49194445°W, 2.70805555°N)	(-76.02194445°W, 6.18805555°N)	448 x 349
B	(-77.76027778°W, 3.77972222°N)	(-77.00027778°W, 4.35972222°N)	457 x 349
C	(-77.46000000°W, 3.89000000°N)	(-77.29000000°W, 4.05000000°N)	613 x 577

3.3 RECOLECCIÓN, PROCESAMIENTO DE LOS DATOS BATIMÉTRICOS Y TOPOGRÁFICOS

3.3.1 Recolección

En este caso se recolectaron datos batimétricos, topográficos y de línea de costa obtenidos de estudios efectuados con anterioridad por los centros de investigación de la DIMAR (CCCP y CIOH) y de otras fuentes de información, estos datos se extrajeron de batimetrías, curvas IGAC y datos LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

La batimetría es la técnica asociada a la obtención de valores de la profundidad de agua, esta puede ser de tipo marina, lacustre o fluvial, provee mapas base o cubiertas base en el caso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para una amplia variedad de propósitos incluyendo las investigaciones científicas, modelado del relieve marino, exploración, explotación, conservación y administración de recursos naturales, desarrollo de políticas medioambientales, educación, entre otros. En este caso se utilizaron batimetrías de las bases de datos de la DIMAR (CCCP y CIOH) y la GEPCO *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEPCO *Digital Atlas*) estos son datos de posición (x,y) y de profundidad (z), las resoluciones de estas batimetrías van desde los 25 m la de mayor resolución hasta los 900 m la de menor resolución.

La topografía es la representación correcta de un terreno o es el trabajo asociado a la adquisición de los valores sobre la superficie de la tierra, esta representación puede ser gráfica o numérica, contiene todos los detalles naturales como los creados por el hombre. Para este estudio se eligieron dos fuentes de donde se extrajo toda la información, la primera fuente son las curvas IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) escala 1:25000, estas describen la elevación de la superficie a través de curvas de nivel o isolíneas, en las cuales las coordenadas a lo largo de ellas especifican un valor de elevación sobre el nivel del mar [23], la resolución de estas curvas es de 25 m. La segunda fuente son los datos LIDAR, estos datos son distancias tomadas desde un emisor de luz a una superficie utilizando un haz laser pulsado, el LIDAR registra datos de posición (x,y) y de elevación (z) en intervalos predefinidos, los datos resultantes dan lugar a una red

de puntos muy densa típicamente a intervalos de 30 cm a 3 m, estos datos fueron tomados de un estudio realizado en la DIMAR-CCCP y tienen una resolución de 30 cm, todos estos archivos están organizados en un archivo tipo texto de n filas (el número de filas depende del archivo) por 3 columnas, donde la primera columna es la longitud, la segunda es la latitud y la tercera es el valor de profundidad valor de altura.

3.3.2 Adecuación y Procesamiento

Para modelar correctamente un tsunami no solamente se requiere cumplir que la resolución de las mallas sean la indicada, sino que los datos con que se van a generar estas deben ser expresados siguiendo una auto-consistencia y un sistema de referencia geográfica, definidas en términos de un datum horizontal y vertical adecuados, generalmente estos datos se obtienen a partir de una serie de una serie de fuentes, muchas de las cuales no utilizan el mismo marco de referencia.

Los datos batimétricos recolectados están referidos al plano de las bajamares vivas de sicigias (las más bajas), y a un sistema de coordenadas UTM *Universal Transverse Mercator* el cual divide la tierra en 60 zonas de 6° de longitud, la zona de proyección se define entre los paralelos 80° S y 84° N, cada zona se enumera de 1 a 60 empezando entre las longitudes 180° y 174° W y centrado en el meridiano 177° W [24]. Este sistema de coordenadas no es compatible con el modelo MOST, puesto que este solo admite los datos en coordenadas geográficas en grados decimales las cuales están representadas por grados y minutos decimales, por esta razón todos los archivos batimétricos fueron convertidos a este tipo de coordenadas utilizando el software de conversión GeoCal.

UTM X	UTM Y	UTM Z	Geographic X	Geographic Y	Geographic Z
751423.6709	199110.5561	2.84	-78.74	1.80	2.84
751423.6709	199110.5561	2.79	-78.74	1.80	2.79
751423.6709	199110.5561	2.76	-78.74	1.80	2.76
751423.6709	199110.5561	2.71	-78.74	1.80	2.71
751423.6709	199110.5561	2.74	-78.74	1.80	2.74
751423.6709	199110.5561	2.68	-78.74	1.80	2.68
751423.6709	199110.5561	2.65	-78.74	1.80	2.65
751423.6709	199110.5561	2.63	-78.74	1.80	2.63
751423.6709	199110.5561	2.67	-78.74	1.80	2.67
751423.6709	199110.5561	2.68	-78.74	1.80	2.68
751423.6709	199110.5561	2.69	-78.74	1.80	2.69
751423.6709	199110.5561	2.79	-78.74	1.80	2.79
751423.6709	199110.5561	2.88	-78.74	1.80	2.88
751423.6709	199110.5561	2.92	-78.74	1.80	2.92
751423.6709	199110.5561	3.01	-78.74	1.80	3.01
751423.6709	199110.5561	3.17	-78.74	1.80	3.17
751423.6709	199110.5561	3.32	-78.74	1.80	3.32
751423.6709	199110.5561	3.45	-78.74	1.80	3.45
751423.6709	199110.5561	3.6	-78.74	1.80	3.60
751423.6709	199110.5561	3.77	-78.74	1.80	3.77
751423.6709	199110.5561	3.95	-78.74	1.80	3.95
751423.6709	199110.5561	4.07	-78.74	1.80	4.07
751423.6709	199110.5561	4.23	-78.74	1.80	4.23
751423.6709	199110.5561	4.34	-78.74	1.80	4.34
751423.6709	199110.5561	4.49	-78.74	1.80	4.49
751423.6709	199110.5561	4.61	-78.74	1.80	4.61
751423.6709	199110.5561	4.72	-78.74	1.80	4.72
751423.6709	199110.5561	4.81	-78.74	1.80	4.81
751423.6709	199110.5561	4.9	-78.74	1.80	4.90

Figura 24. Izq. archivo en coordenadas UTM, der. archivo en coordenadas geográficas.

La información topografía tomada de las curvas IGAC es almacenadas en forma de archivos tipo DLG (*Digital Line Garphs*), por esta razón estos archivos fueron cargados y editados en el programa AutoCad, estas eran visualizadas y reclasificadas de tal modo que las líneas estuvieran en tierra y no fueran puntos de agua (ubicados después de la línea de costa), una vez terminada la reclasificación estas líneas se exportaban a un archivo de puntos con la ayuda de una aplicación hecha en AutoCad, al igual que los datos batimétricos estos archivos no estaban referenciados a coordenadas geográficas en grados decimales por lo que se les realizó el mismo tratamiento.

A la información LIDAR en primer lugar se le realizó una reclasificación manual para eliminar los puntos que se encontraban fuera de la línea de costa o puntos de la clase "agua" por medio del uso del software MARS Explorer *Merrick Advanced Remote Sensing* de MERRICK, el cual me permite visualizar y eliminar los puntos LIDAR que estaban fuera de rango.

Estos puntos están referenciados al sistema de coordenadas MAGNA el cual es un sistema de referencia oficial del país que garantiza la compatibilidad de las coordenadas colombianas con las técnicas espaciales de posicionamiento, por ejemplo los sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), con conjuntos internacionales de datos georeferenciados y es compatible con el esferoide WGS84 y el sistema GRS80 [25], al igual que los datos batimétricos, estos fueron convertidos a coordenadas geográficas en grados decimales por medio de GeoCal.

Teniendo en cuenta que los valores LIDAR están referidos al elipsoide WGS84, mientras los datos batimétricos están referidos al plano de las bajamares vivas de sicigias (las más bajas), a todos los datos LIDAR se les realizó una corrección restándoles 13.99 y 15.3710 metros para datos de Tumaco y Buenaventura respectivamente de esta manera todos los puntos quedaron referidos al mismo nivel cero.

Para encontrar el valor que se debe restar hay dos métodos uno en campo y otro en oficina, en el primer método se toman los datos en campo de la zona de estudio con un GPS de precisión y referenciados a un punto certificado del IGAC que tiene nivel de referencia a las bajamares de sicigia, luego estos se grafican o proyectan en un software GIS, se comparan la altura de los datos en campo y de los LIDAR en puntos geográficos iguales el valor de diferencia en diferentes puntos debe ser el mismo y este valor se suma o resta de los datos LIDAR para hacer que coincidan con los datos en campo. En el segundo método primero se toman datos de la zona de estudio referenciados a un punto certificado del IGAC que tiene nivel de referencia a las bajamares de sicigia, luego se toman datos LIDAR de la misma zona, después se calcula la correlación de los datos LIDAR e IGAC, para saber si corresponden a la misma zona y si están bien tomados, se utiliza un programa SIG para representar los puntos, posteriormente se toman alturas de puntos LIDAR e IGAC cercanos (se recomienda una distancia no mayor de 10m), a continuación se debe tomar un serie representativa al menos 100 alturas, se calculan las diferencias de alturas de los puntos LIDAR e IGAC y se calcula un dato promedio con las diferencias el cual va hacer el valor que se debe sumar o restar a los datos LIDAR, con ayuda de un método estadístico.

Debido a que el modelo MOST diferencia los datos batimétricos como valores positivos y los topográficos como valores negativos, a los archivos se les colocó el signo correspondiente. Una vez terminada esta fase se crearon tres archivos

generales los cuales contienen la información batimétrica, topográfica y de línea de costa para cada una de las regiones elegidas, estos archivos fueron creados con ayuda de una función hecha en Matlab, cada archivo está organizado en un archivo tipo texto (.dat) de n filas por 3 columnas, la primera columna es la longitud, la segunda es la latitud y la tercera es el valor altura o profundidad.

3.4 GENERACIÓN DE LAS MALLAS DE TRABAJO

Una vez delimitada el área de trabajo y con los datos recolectados debidamente seleccionados, editados y procesados se procede a la construcción de las mallas de trabajo, esto se logra con la interpolación de los archivos tipo texto (.dat) finales anteriormente nombrados, para la interpolación de los datos y posterior elaboración de las mallas se utilizó el software Surfer, el cual cuenta con la herramienta Grid, la cual me permite interpolar gran cantidad de datos utilizando el método Kriging, método estadístico de interpolación que provee, a partir de una muestra de puntos, ya sean regular o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con una varianza mínima conocida [26].

El objetivo de kriging es estimar el valor de una función desconocida de valor real f , en un punto x^* , teniendo en cuenta los valores de la función en alguno otros puntos x_1, \dots, x_n . Un estimador de kriging se dice que es lineal, ya que el valor predicho $\hat{f}(x^*)$ es una combinación lineal que puede ser escrito como [26] [21]

$$\hat{f}(x^*) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x^*) f(x_i) \tag{31}$$

Los pesos λ_i son soluciones de un sistema de ecuaciones lineales que se obtiene suponiendo que f es una muestra-trayectoria de un proceso aleatorio $F(x)$, y que el error de predicción [26],

$$\varepsilon(x) = F(x) - \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) F(x_i) \tag{32}$$

debe ser minimizada en algún sentido. Por ejemplo, la llamada hipótesis de kriging simple es que la media y la covarianza de $F(x)$ es conocida y, a continuación, el predictor kriging es la que minimiza la varianza del error de predicción.

Para la interpolación con esta técnica es necesario conocer previamente cuatro aspectos básicos acerca de los datos a interpolar, el semivariograma, el efecto nugget, la anisotropía y la presencia o no de un componente estructural o "*drift*" [26].

SURFER cuenta con una versión muy completa de la aplicación de la técnica Kriging, en la cual es posible definir los parámetros de interpolación de estos cuatro elementos básicos, determinados mediante la construcción de un semivariograma experimental. Con dicho semivariograma experimental es posible indicar en el módulo Kriging de SURFER, el modelo que ajusta la variación de la semivarianza, la semivarianza máxima entre pares de puntos conocida como *sill*, el *rango* del semivariograma, y el tipo de variación (isotrópica o anisotrópica). Mediante el ajuste de un semivariograma experimental, también es posible determinar si existe un efecto nugget en los datos [26].

Para una variable continua como la elevación, el efecto nugget se puede presentar como producto de errores de medición y variaciones sobre distancias mucho más pequeñas que los intervalos de muestreo utilizados (Burgess y Webster, 1980). Al respecto, la experiencia acumulada en el ajuste de varios semivariogramas experimentales ha mostrado la inexistencia de un efecto nugget en los datos de elevación levantados con la precisión de los instrumentos. Por otra parte, con el semivariograma experimental es posible determinar la presencia de un componente estructural o tendencia de variación conocida como "*drift*". En datos de elevación la presencia de un "*drift*" responde a si el terreno presenta una pendiente general, lo que sucedería si la unidad de manejo se encuentra en la ladera de una montaña; si por el contrario la unidad se ubica en una zona plana se diría entonces que no existe un *drift* en los datos [27].

Además hay que asegurar que exista una superposición de la región donde los nodos de cada cuadrícula tienen la misma latitud y longitud. Esta superposición permite un control de coherencia en los datos a través de las mallas de diferentes resoluciones y a través de las fronteras mediante la comprobación de que existe poca o ninguna diferencia ($\leq 1\%$) entre la profundidad del océano y los datos de

elevación para encontrar el mismo punto en dos mallas de diferente resolución, con el fin de garantizar la continuidad del modelo.

Esto se garantiza reubicando los límites de las mallas por medio de una aplicación en Matlab, esta aplicación organiza la mallas de tal forma que haya superposición entre ellas, de esta manera la malla C tiene seis veces la resolución de la cuadrícula B, (por ejemplo, 6 segundos de arco en lugar de 1 segundo de arco), entonces se garantiza que la coordenadas x,y de cada seis puntos de la cuadrícula C coincidan con las coordenadas x,y de la cuadrícula B, y luego que con los valores de z (profundidad o altura) coincidan. Del mismo modo, se aseguró la superposición de la malla más grande (malla A) o de menor resolución con las demás (mallas B y C).

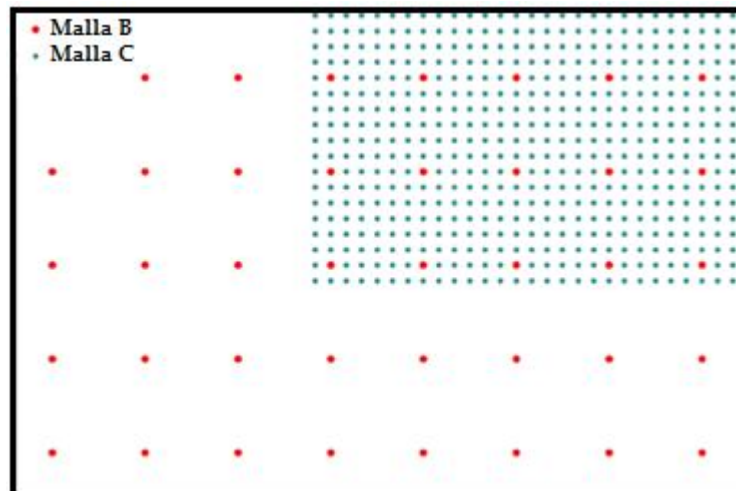


Figura 25. Superposición de los puntos de las mallas B y C.

Por lo tanto se obtuvieron 9 mallas de trabajo 3 para Tumaco, 3 para Buenaventura y 3 para Málaga, estas mallas tienen una distribución espacial de 1 arcseg (30 metros), 6 arcseg (180 metros) y 36 arcseg (1080 metros), valores recomendados por los creadores del modelo para garantizar la diferencia finita de las mallas.

Estas mallas fueron exportadas a un archivo de texto tipo XYZ (.dat) el cual entrega los datos organizados en tres columnas, la primera columna es la longitud, la segunda es la latitud y la tercera es el valor altura o profundidad. Debido a que el modelo MOST no recibe los datos organizados de esta forma se creó una rutina

en Matlab que reorganiza los datos de la siguiente manera, en la primera fila del archivo van la información de las dimensiones de la malla, de la segunda fila en adelante se ubican los datos de las longitudes organizadas de menor a mayor, en coordenadas geográficas en grados decimales (desde 0° hasta 360°), seguido de los datos de las latitudes organizadas de mayor a menor, en coordenadas geográficas en grados decimales y por último se encuentran los datos de batimetría, topografía y línea de costa organizados en una matriz de las dimensiones de la malla, la rutina entrega los datos en un archivo tipo archivo y listos para ser reconocidos por el modelo.

```

10
282.90000000 "LONGITUDES"
282.90027778
282.90055556
282.90083333
282.90111111
282.90138889
282.90166667
282.90194444
282.90222222
282.90250000
3.94000000 "LATITUDES"
3.93972222
3.93944444
3.93916667
3.93888889
3.93861111
3.93833333
3.93805556
3.93777778
3.93750000
-13.4 -19.8 -27.8 -18.0 -10.2 -11.3 -18.4 -25.2 -29.4 -34.6 "DATOS VERTICALES"
-14.7 -27.4 -20.5 -12.5 -2.5 -11.2 -21.7 -26.3 -26.7 -30.0
-14.0 -19.0 -13.1 -4.5 -8.0 -17.3 -25.0 -24.6 -23.3 -25.3
3.4 2.9 5.4 3.4 2.4 2.3 2.7 2.5 2.4 2.4
2.6 3.0 2.7 3.1 2.5 2.5 3.5 3.4 3.4 2.5
-18.8 -15.9 -13.8 -10.8 -16.9 -18.9 -11.7 0.4 2.5 2.4
-25.6 -9.8 -25.5 -22.5 -17.0 -13.4 -5.4 2.6 2.6 2.7
-26.6 -29.1 -25.3 -23.0 -27.2 -33.5 -37.2 -34.0 -34.1 -36.2
7.6 6.7 5.7 5.6 5.5 5.4 5.4 5.5 5.5 5.5
0.0 -0.1 -0.6 1.2 -0.4 -0.7 -0.6 0.5 1.4 0.0

```

Figura 26. Archivo para el modelo que recibe el MOST.

3.5 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MOST

Con los archivos finales obtenidos de los procedimientos anteriores, se procedió a realizar las simulaciones para cada uno de los epicentros seleccionados, para tener una previa idea de la magnitud de sismo a considerar, se empleo la relación mostrada en la donde se considera la magnitud y la profundidad del sismo.

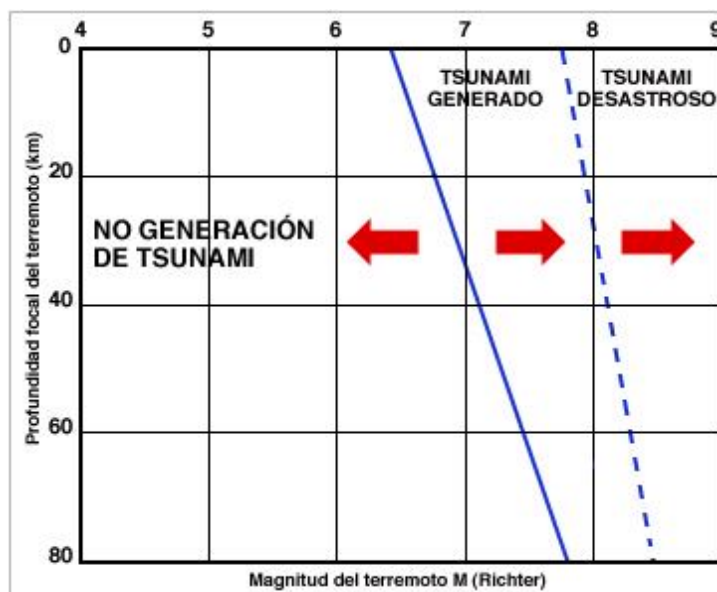


Figura 27. Relación entre magnitud y la profundidad del evento sísmico y su potencial como precursor de ondas de tsunamis.

Para los epicentros de origen cercano se trabajó con seis magnitudes de sismo diferentes partiendo desde 6.3 hasta 8.0 Mw. (6.3, 6.5, 7.0, 7.8, 8.0), las magnitudes 6.3 y 6.5 se utilizan con el fin de comprobar experimentalmente que las ondas tsunami se generan con sismos de magnitudes mayores a 6.5 Mw., como ñp muestra la figura anterior.

Para los epicentros de origen lejano se trabajó con cinco diferentes magnitudes empezando desde 7.5 hasta los 8.5 Mw. (7.5, 7.8, 8.0, 8.2, 8.5), estas magnitudes son mayores a las de origen cercano debido a que para que la onda tsunami se propague a través de cientos o miles de kilómetros (origen lejano), el sismo generados debe ser un se gran magnitud, este enunciado se comprobó con las simulaciones correspondientes.

El nivel de la marea regente durante un evento de tsunami en el Pacífico colombiano es una variable que determina en una gran medida la magnitud de la inundación provocada por el arribo de las ondas de tsunami, para terrenos donde el cambio en el nivel del mar en pocos centímetros ocasiona inundaciones en amplias zonas, es recomendable la adopción de un nivel de marea a asociar durante la ocurrencia de un tsunami y como los datos batimétricos están reportados para condiciones de marea baja, se hace necesario ajustar la

información de las mallas de trabajo a otros niveles de marea (a dos mallas de trabajo), esto se hace sumando aritméticamente a cada nodo o punto de la malla interior el nivel de marea correspondiente esto se hace por medio de una rutina creada en Matlab la cual le suma el valor correspondiente a cada uno de los archivos finales de las mallas interiores o de mayor resolución (mallas C). Para extraer los niveles máximos y medios, se reviso el cálculo de la curva de probabilidad de no excedencia a la serie registrada en el periodo [1951-2000] (adquiridos del sitio <http://uhslc.soest.hawaii.edu/uhs/c/data/>) (Cardona, 2004), los valores que hay que sumarle a la malla interna son 2,5 m para el nivel medio y 3.6 m para el nivel alto de marea en el caso de Tumaco y Málaga, para buenaventura se debe sumar el valor de 2.5 m para el nivel medio y 4.5m para el nivel alto de marea..

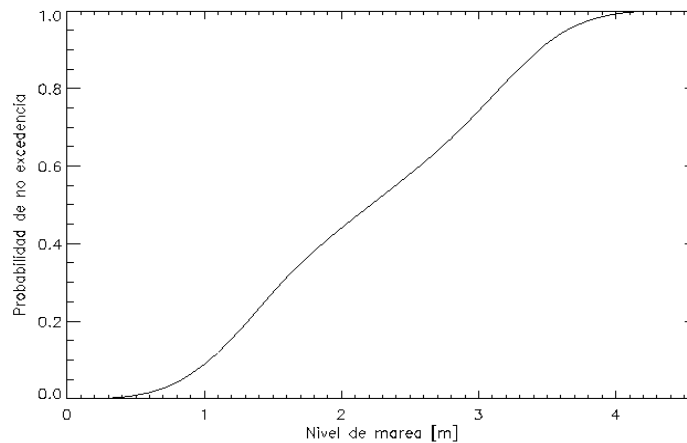


Figura 28. Curva de probabilidad de no excedencia para la serie de registros de la estación Tumaco durante el periodo [1951-2001].

Teniendo en cuenta lo anterior se realizaron para origen cercano un total de 48 simulaciones 24 nivel medio de marea y 24 nivel alto de marea, para origen lejano un total de 70 simulaciones 35 nivel medio de marea y 35 nivel alto de marea, esto para los tres principales escenarios Tumaco, Buenaventura y Málaga, por lo tanto se generaron un total de 354 simulaciones de tsunami generado por sismos en zona de subducción.

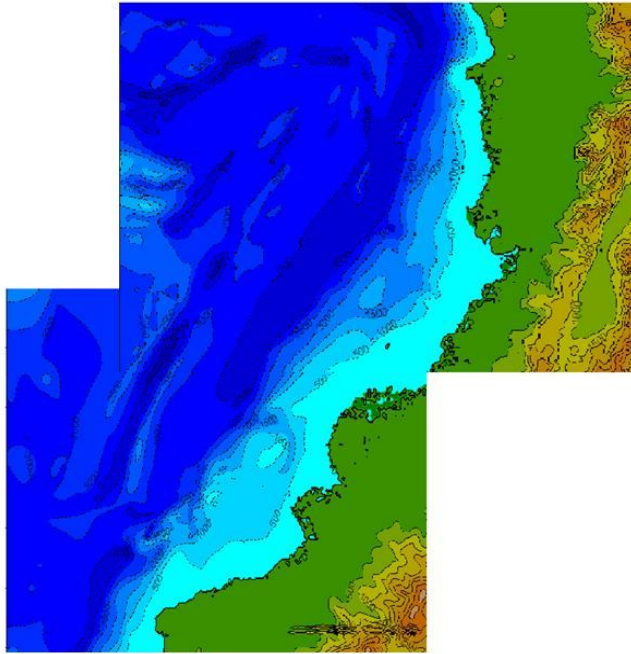


Figura 29. Mallas de menor resolución cubren LPC.

Para las simulaciones de origen cercano la simulación se realizó con una duración de 5 horas después de ocurrir el sismo y para las simulaciones de origen lejano la simulación se realizó con una duración de 10 horas después de la ocurrencia del sismo tiempos tomados de experiencias anteriores.

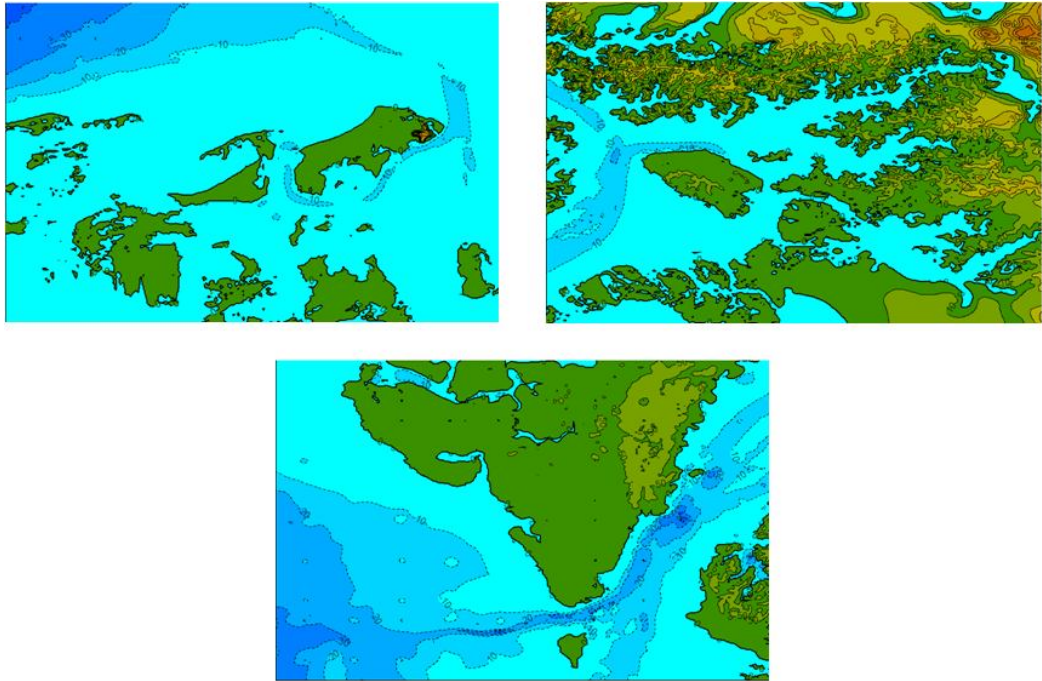


Figura 30. Mallas con nivel medio de marea.

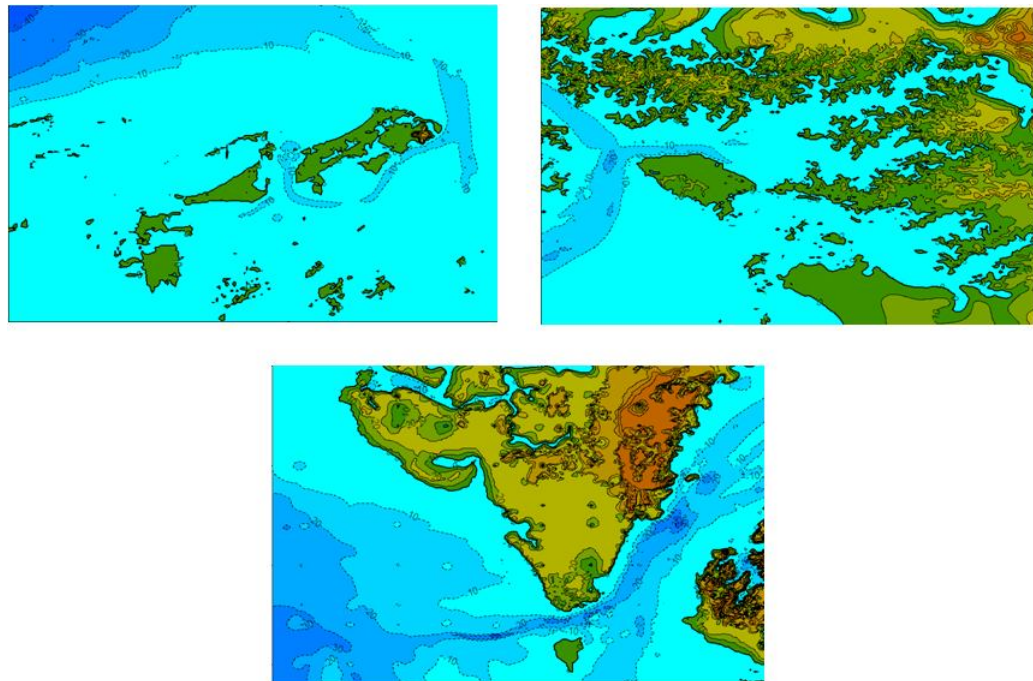


Figura 31. Mallas con nivel de marea alta.

Como se dijo en el capítulo anterior el sistema modela la falla (generada por el sismo) como un rectángulo de deformación, por esta razón cada uno de los epicentros seleccionados fueron ubicados en el rectángulo correspondiente relacionado con sus coordenadas geográficas. Cada rectángulo tiene la información de los parámetros del sismo, magnitud, profundidad h y ubicación de la fuente; así como los parámetros de la falla, la longitud L y el ancho w de la falla, la ubicación del rectángulo, la orientación de la falla o ángulo *strike* θ , el ángulo *dip* δ , el ángulo *rake* λ , el promedio de buzamiento o *slip* u_0 .

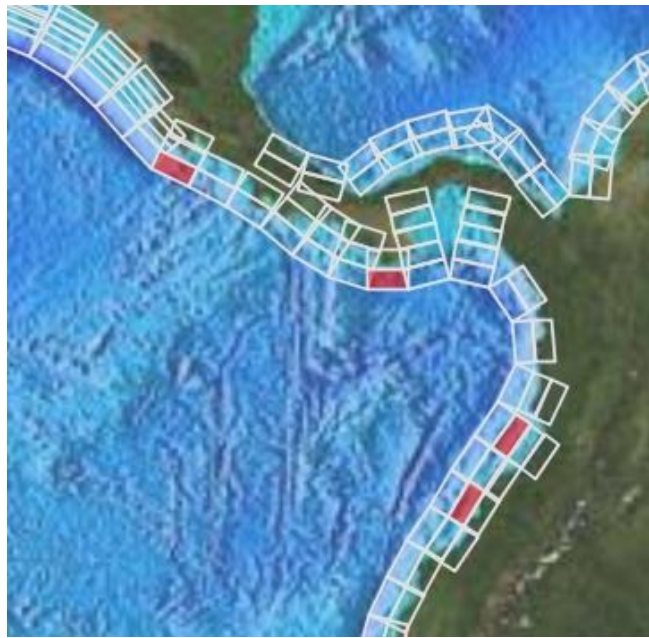


Figura 32. Algunos epicentros ubicados en sus respectivos rectángulos de deformación o fallas.

Tabla 6. Fuentes sísmicas de origen cercano, ubicación geográfica y nombre en el modelo.

SISMO	UBICACIÓN	NOMBRE EN MOST
1	-79.2703 O, 1.1593 N	CSSZA43
2	-78.7734 O, 1.9444 N	CSSZA42
3	-79.1407 O, 2.1675 N	CSSZB42
4	-78.3110 O, 2.6611 N	CSSZA41
5	-78.6664 O, 2.9030 N	CSSZB41
6	-78.1573 O, 3.6344 N	CSSZB40
7	-77.8060 O, 3.3863 N	CSSZA40

Tabla 7. Fuentes sísmicas de origen lejano, ubicación geográfica y nombre en el modelo.

SISMO	UBICACIÓN	NOMBRE EN MOST
1	-80.6777 O, 7.1320 N	CSSZB34
2	-96.4099 O, 15.7024 N	CSSZA14
3	-168.804 O, 52.2220 N	ACSZB21
4	-154.4701 E, 47.2320 N	KISZB12
5	-147.3683 E, 16.8869 N	KISZB52
6	-166.0261 E, 11.1069 S	NVSZA22
7	-172.8104 O, 15.6384 S	NTSZB35

Luego de obtener los archivos finales estos son montados en el modelo, se cargaron las 9 mallas de cálculo, estas mallas son visualizadas posteriormente en la interface de usuario con que cuenta el modelo, en esta interface contiene una zona interactiva para la elección de las condiciones iniciales y parámetros para la ejecución del modelo, otra zona donde se gráfica la ubicación geográfica de las mallas de trabajo y la fuente generadora y el panel donde se introducen los parámetros del modelo. Además se muestra el progreso de la modelación y una representación gráfica de la entrada y los resultados del modelo. Las mallas que se generaron son las siguientes.

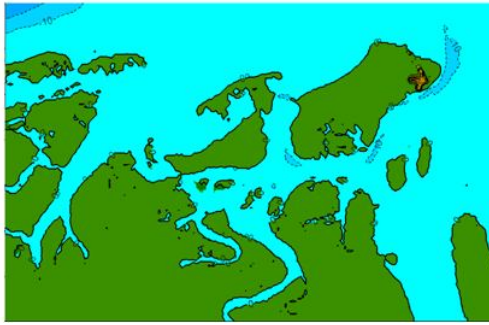
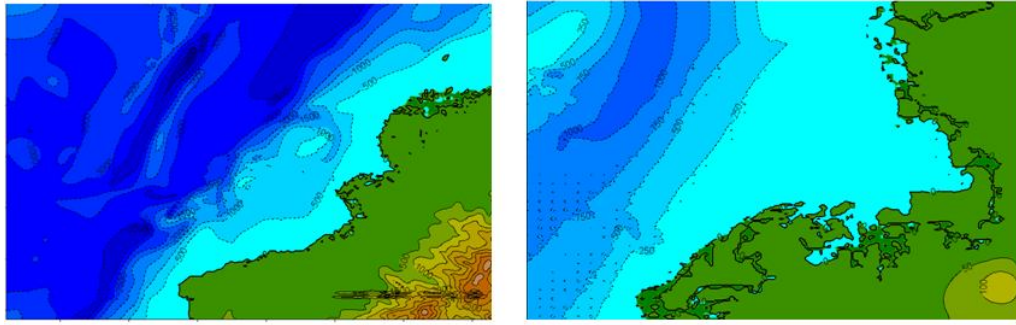


Figura 33. Mallas de Tumaco.

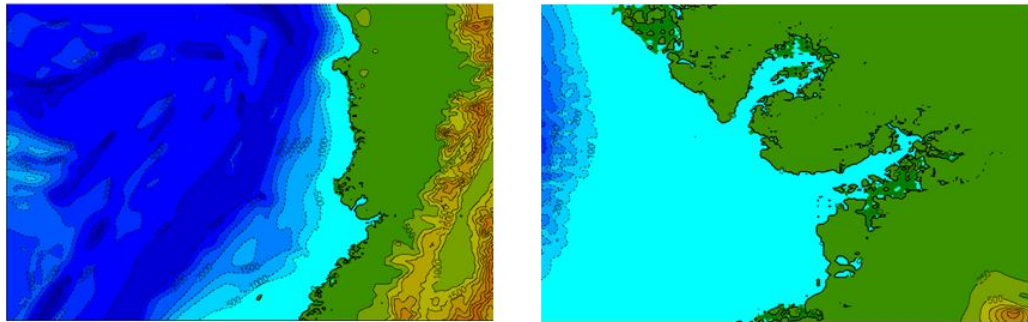


Figura 34. Mallas de Buenaventura.

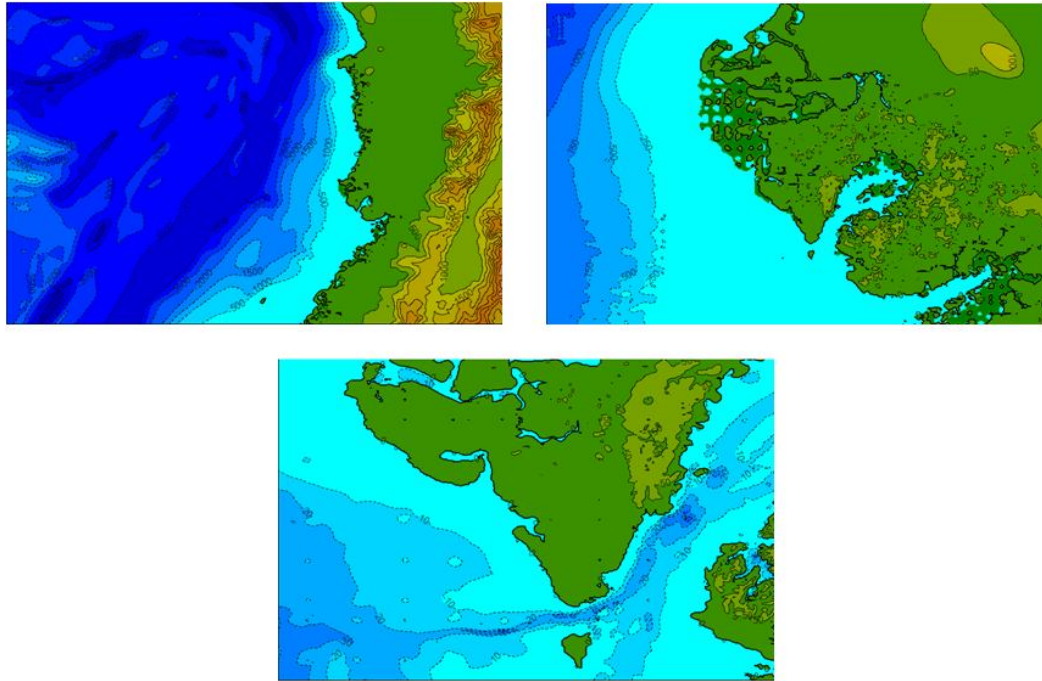


Figura 35. Mallas de Málaga.

Para la ejecución de modelo, se establecen algunos parámetros que son indispensables, estos se introducen en el modelo de forma manual y directamente en la interface de usuario, a continuación de se describen estos parámetros y sus valores recomendados:

Minimum amp. Of input offshore wave (m), es la mínima amplitud de la ola generada a partir de la cual empieza a correr la simulación, un valor menor a este es ignorado y la simulación no inicia. El valor recomendado es 0.0010 m [28].

Minimum depth offshore (m), es la mínima profundidad a partir de la cual se genera reflexión para las mallas A y B, estas condición afecta las ondas que llegan a la costa después de la primera, valor sugerido de 5 a 10 m [28].

Dry land depth of inundation (m), es el mínimo valor de profundidad donde el modelo ejecuta los cálculos, si el nivel de agua es menor a este valor, se considera que de ahí en adelante se encuentra tierra (seca), en este punto no hay computo de propagación, sino que empieza la fase de inundación, esto fija un umbral o condiciones de frontera, valor sugerido de 0.1 a 0.3 m [28].

*Friction coefficient (n^{**2})*, es el coeficiente de fricción de Manning (n^2), se toma un valor general para los casos en donde no se cuente con este valor para el lugar de estudio, el valor sugerido es 0.0009 [28].

Max eta before blow-up (m), es el valor límite de la ola originada, si la modelación supera este valor esta se detiene, esto con el fin de limitar la modelación a valores reales previniendo así que esta se ejecute si hay algún pico debido a un error en los datos, valor sugerido 30 a 100 m [28].

Time step (sec), especifica el paso de tiempo para la malla de cómputo C, se toma el valor sugerido por el modelo tomado de las condiciones CFL [28].

Total number of time steps in run, es el número total de pasos en el tiempo de toda la corrida depende del número de horas que se quiere correr el modelo una vez llega la ola a la malla A, este número se multiplica por 3600 para que quede en segundos y se divide entre el tiempo que se demora en recorrer la malla C [28].

Time steps between A-grid computations, es el número de pasos en el tiempo de la malla A, se toma el número que arroja las condiciones CFL para la malla A y se divide entre el valor de pasos de la malla C [28].

Time steps between B-grid computations, es el número de pasos en el tiempo para la malla B, se toma el número que arroja las condiciones CFL para la malla B y se divide entre el valor de pasos de la malla C [28].

Time steps between output saves, se conoce como cada cuantos pasos se quiere guardar la salida, depende de cada cuantos minutos se quiere guardar la información de salida, se multiplica este valor por 60 para dejarlo en segundos y se divide entre el tiempo total de pasos de la malla C [28].

Time steps before starting to save output, después de que paso en el tiempo se quiere guardar la salida, esto con el fin de no guardar información con amplitudes cero [28].

Save output every n -th grid point, cada cuantos nodos se quiere guardar la información, se sugiere que la información se guarde para cada nodo de las respectivas mallas [28].

<input type="text" value="0.0010"/>	Minimum amp. of input offshore wave (m)
<input type="text" value="5.0"/>	Minimum depth of offshore (m)
<input type="text" value="0.1"/>	Dry land depth of inundation (m)
<input type="text" value="0.0009"/>	Friction coefficient (n^{**2})
<input checked="" type="checkbox"/>	Let A-Grid and B-Grid run up
<input type="text" value="30.0"/>	Max eta before blow-up (m)
<input type="text" value="2.54"/>	Time step (sec)
<input type="text" value="6000"/>	Total number of time steps in run
<input type="text" value="1"/>	Time steps between A-Grid computations
<input type="text" value="1"/>	Time steps between B-Grid computations
<input type="text" value="30"/>	Time steps between output saves
<input type="text" value="0"/>	Time steps before starting to save output
<input type="text" value="1"/>	Save output every n -th grid point

Figura 36. Parámetros de entrada para la ejecución del modelo.

Con los parámetros anteriores ingresados y con los archivos de las mallas subidos en el modelo, se procede a elegir la magnitud del sismo a modelar, para así de esta manera iniciar con la modelación, cabe recalcar que los parámetros de la falla como los ángulos *strike* θ , *dip* δ , *rake* λ , están en una base de datos de la que se extraen estos valores por medio de la web, el promedio de buzamiento o *slip* es calculado por el modelo y mostrado en la interface de usuario, este valor depende directamente del valor de la magnitud del sismo generador.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los modelos desarrollados en este trabajo fue posible la identificación de escenarios de riesgo por tsunami para regiones del litoral pacífico colombiano y la creación de un banco de modelaciones como apoyo al Centro Nacional de Alerta de Tsunami (CNAT), para eventos de origen cercano y lejano con diferentes ubicaciones y magnitudes del sismo precursor. Es de gran importancia decir que se tomaron 4 epicentros para cada uno de los escenarios nombrados anteriormente: los epicentros 1,2,3,4, para el área de Tumaco; y los epicentros 3,5,6,7, para el área de Buenaventura y Málaga. A continuación se describen algunos de ellos.

4.1 IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO POR TSUNAMI

En este apartado se muestran los escenarios en los que se presenta inundación por tsunami para las regiones de estudio, empezando con los escenarios de origen cercano desde el evento sísmico 1 hasta el evento sísmico 7 y continuando con los de origen lejano desde el evento sísmico 1 hasta el evento sísmico 2 (los demás eventos de origen cercano se muestran en el anexo A), teniendo en cuenta los dos niveles de marea, además se mostrara en una tabla los valores o datos característicos de la onda u ola tsunami como lo son la altura máxima alcanzada y su tiempo de llegada a la costa; y los datos de magnitud de sismo generador y nivel de marea.

Para una mejor identificación se llamará de ahora en adelante escenario 1, escenario 2,..., etc. a cada uno de los escenarios de riesgo, y a cada evento sísmico; se le denotará como evento 1, evento 2,...,etc. A continuación se presentan los escenarios más significativos para cada uno de los eventos sísmicos seleccionados, para origen cercano (Figura 19) y origen lejano (Figura 20). Otros de los posibles escenarios se presentan en el anexo A.

EVENTO 1 - ORIGEN CERCANO

Tabla 8. Características del escenario 1 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Escenario 1	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	20 min
Máxima altura de ola (m)	1.729
Nivel de marea	Alta

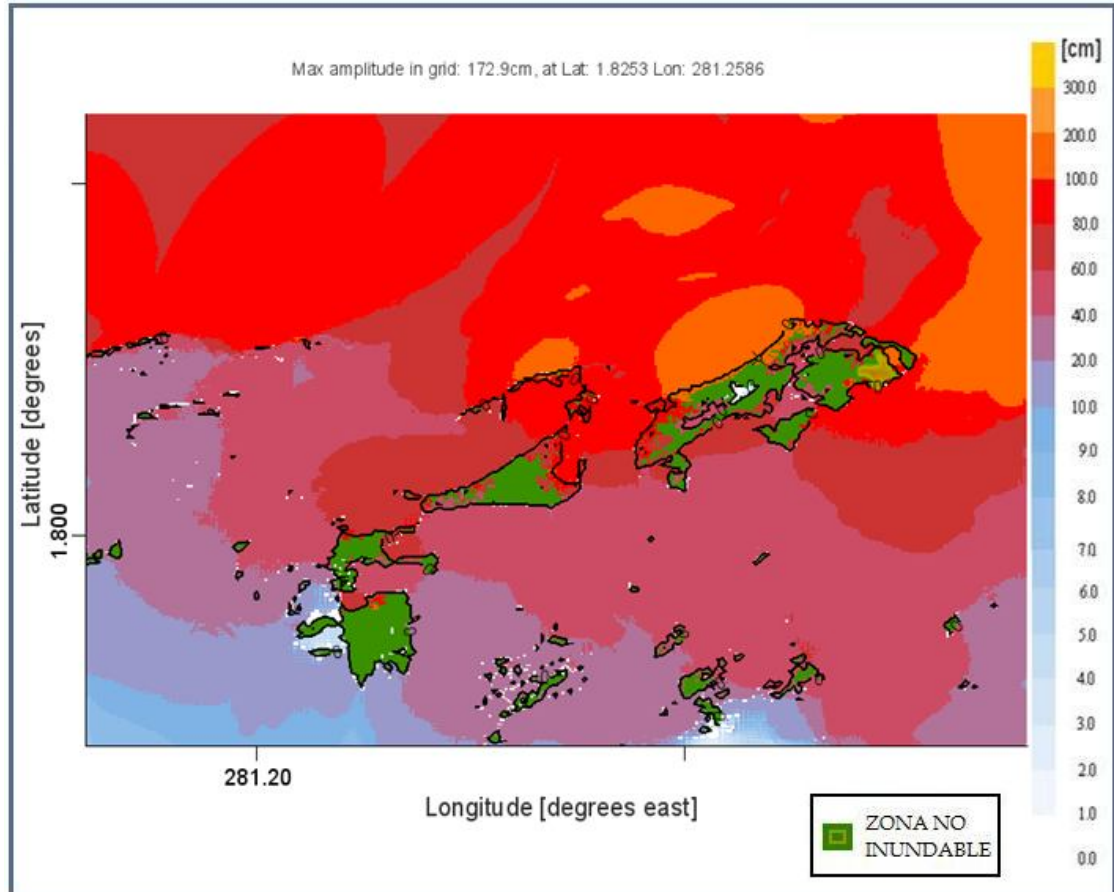


Figura 37. Escenario 1 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

EVENTO 2 - ORIGEN CERCANO

Tabla 9. Características del escenario 2 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Escenario 2	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	15 min
Máxima altura de ola (m)	3.390
Nivel de marea	Media

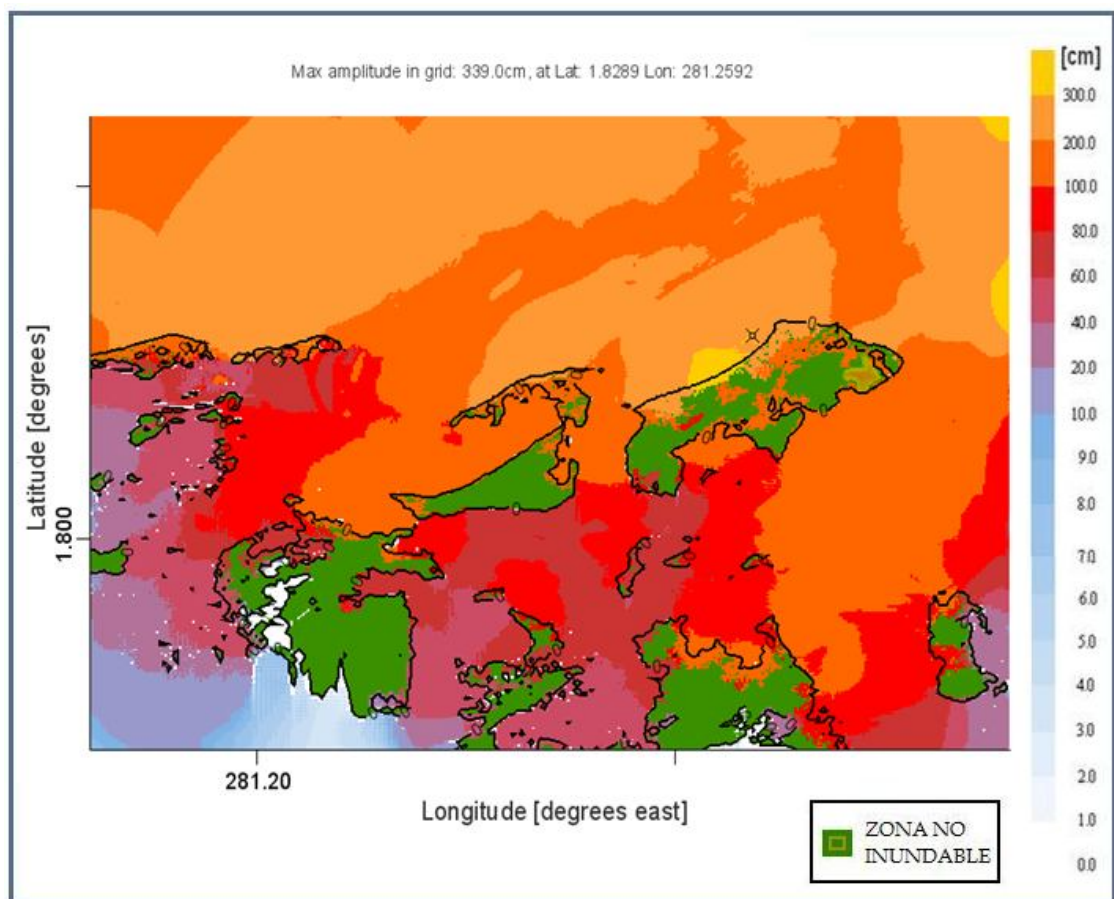


Figura 38. Escenario 2 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Tabla 10. Características del escenario 3 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Escenario 3	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	14 min
Máxima altura de ola (m)	3.909
Nivel de marea	Alta

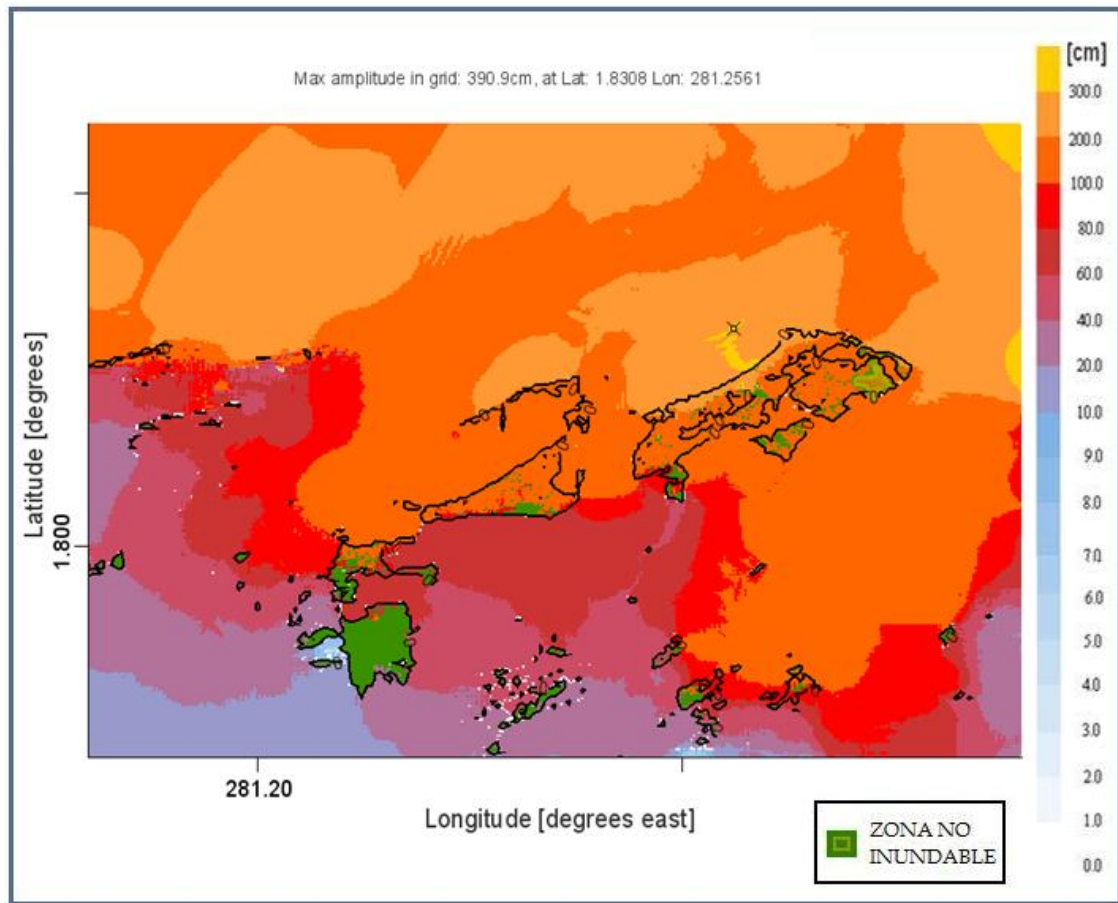


Figura 39. Escenario 3 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

EVENTO 3 - ORIGEN CERCANO

Tabla 11. Características del escenario 4 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Escenario 4	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	28 min
Máxima altura de ola (m)	3.835
Nivel de marea	Alta

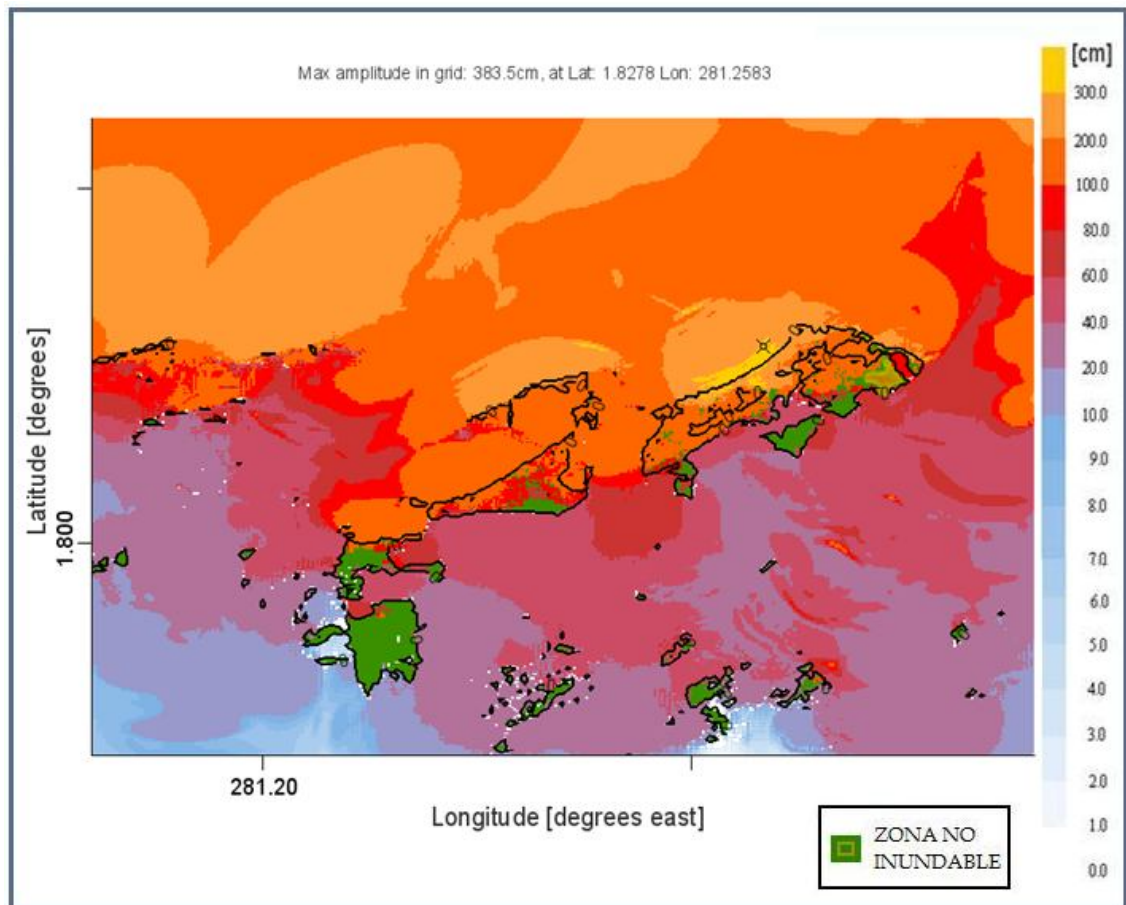


Figura 40. Escenario 4 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

EVENTO 4 - ORIGEN CERCANO

Tabla 12. Características del escenario 5 correspondiente al evento 4 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Escenario 5	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	23 min
Máxima altura de ola (m)	1.086
Nivel de marea	Alta

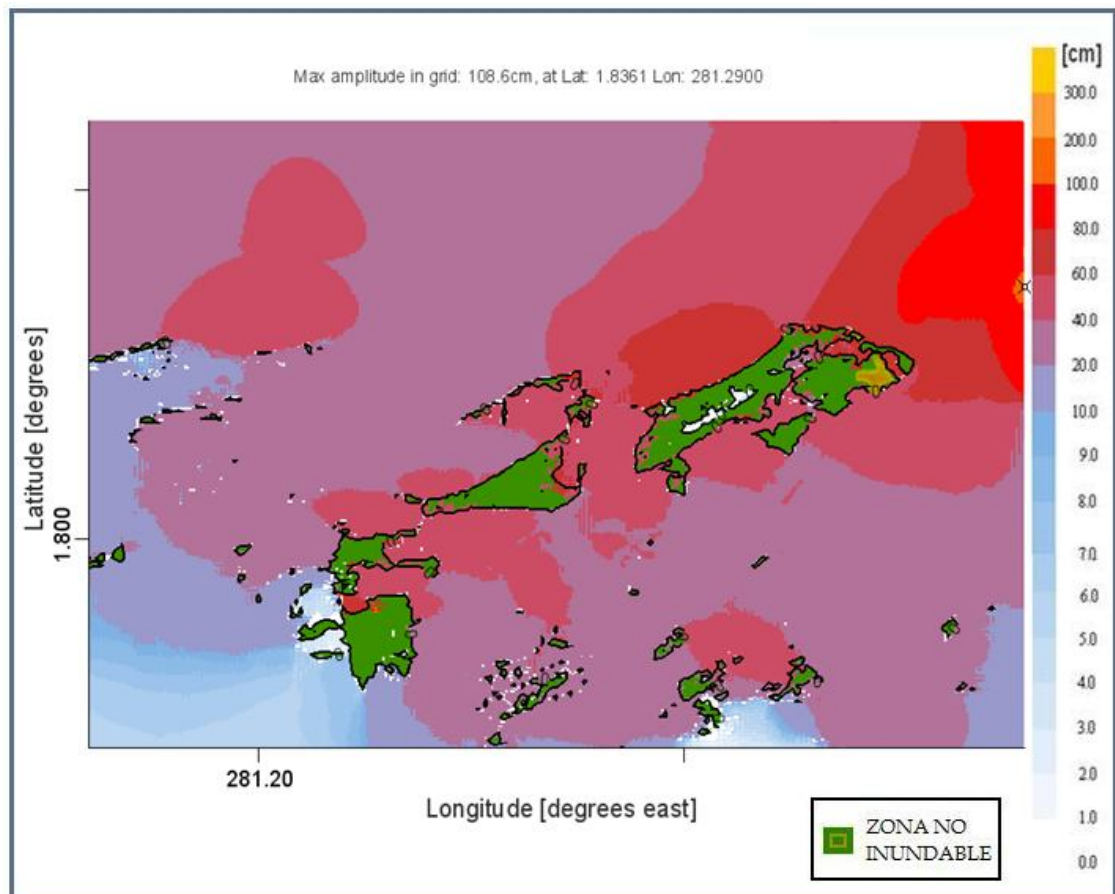


Figura 41. Escenario 5 correspondiente al evento 4 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

EVENTO 5 - ORIGEN CERCANO

Tabla 13. Características del escenario 6 correspondiente al evento 5 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.

Escenario 6	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 32 min
Máxima altura de ola (m)	3.022
Nivel de marea	Alta

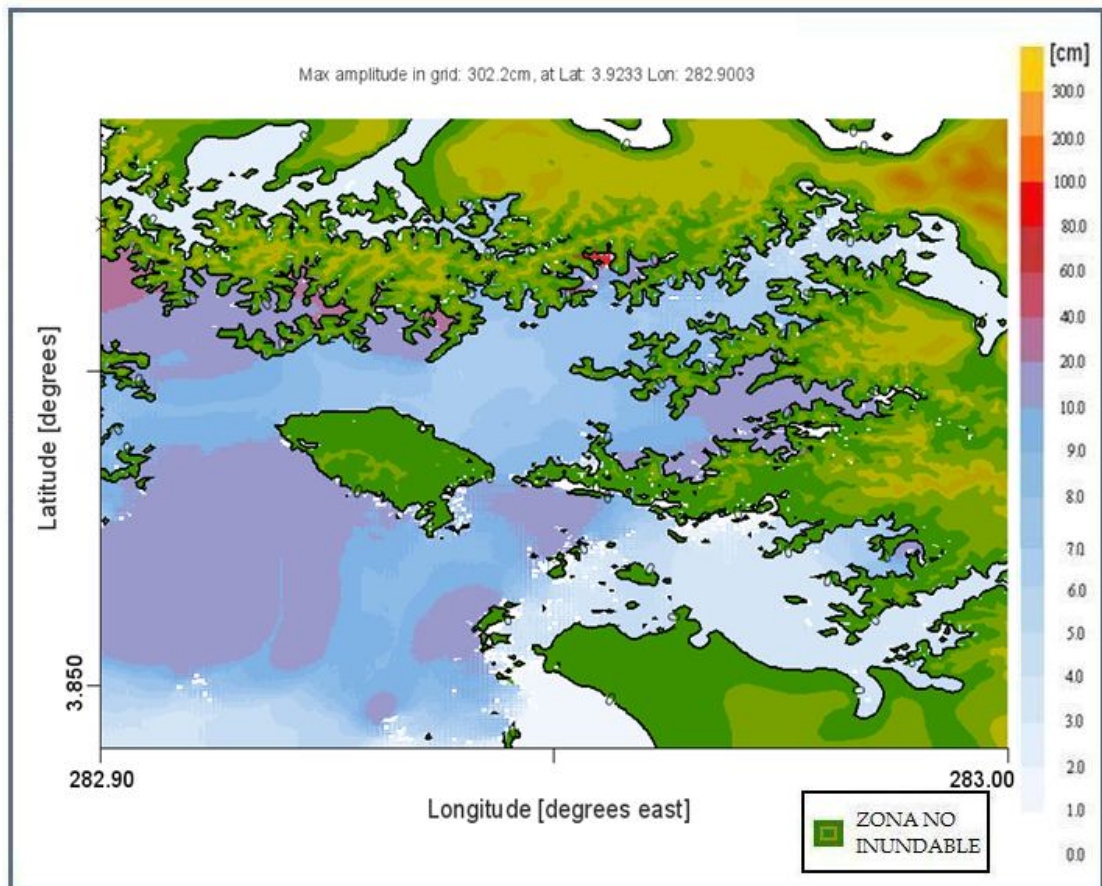


Figura 42. Escenario 6 correspondiente al evento 5 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.

Tabla 14. Características del escenario 7 correspondiente al evento 5 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.

Escenario 7	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	42 min
Máxima altura de ola (m)	2.705
Nivel de marea	Alta

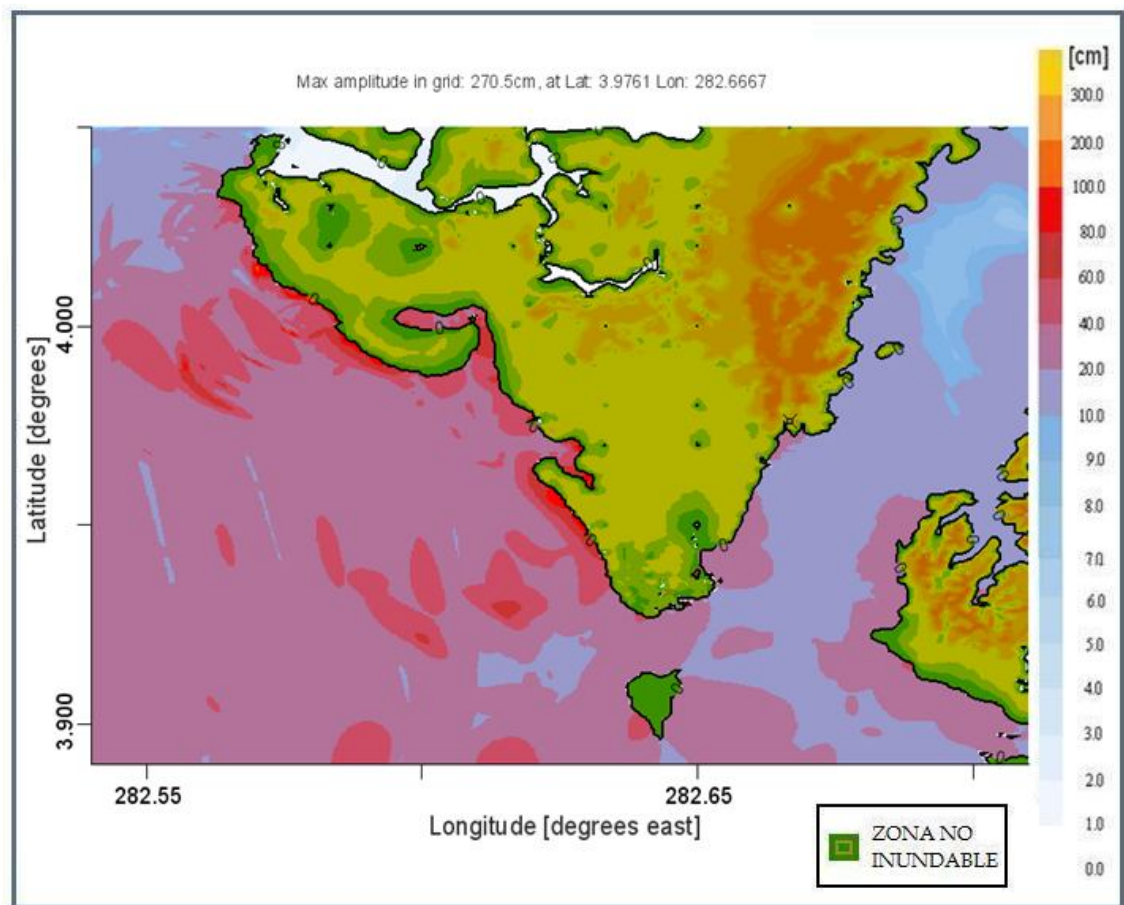


Figura 43. Escenario 7 correspondiente al evento 5 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.

EVENTO 6 - ORIGEN CERCANO

Tabla 15. Características del escenario 8 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.

Escenario 8	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 22 min
Máxima altura de ola (m)	2.999
Nivel de marea	Alta

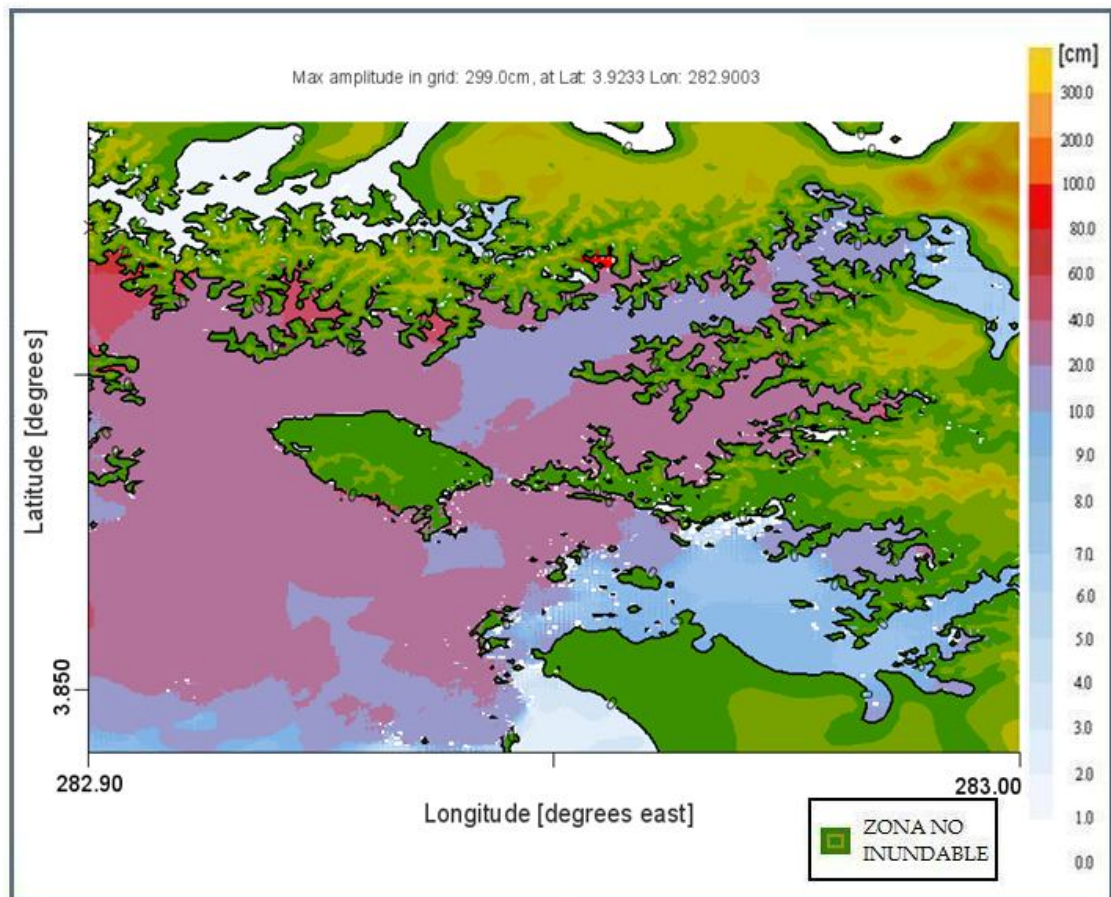


Figura 44. Escenario 8 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.

Tabla 16. Características del escenario 9 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.

Escenario 9	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	30 min
Máxima altura de ola (m)	2.908
Nivel de marea	Alta

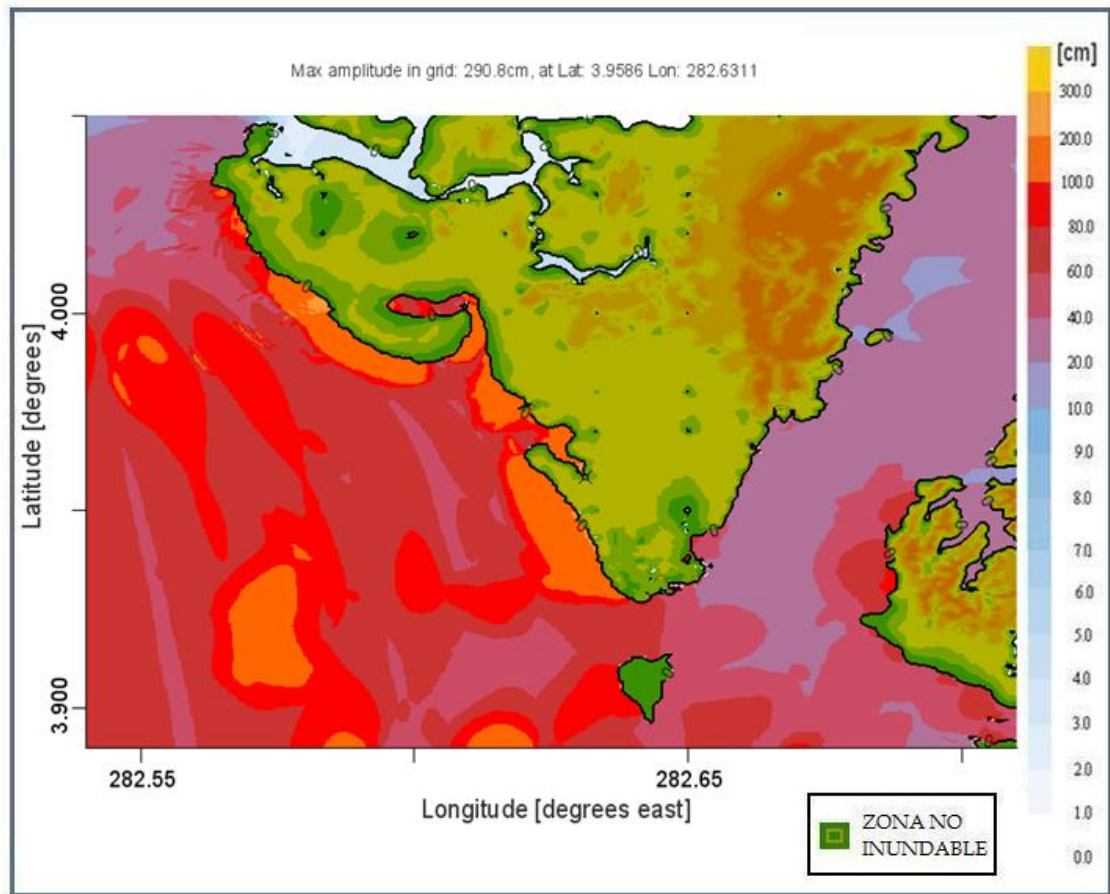


Figura 45. Escenario 9 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.

EVENTO 7 - ORIGEN CERCANO

Tabla 17. Características del escenario 10 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.

Escenario 10	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1h 16 min
Máxima altura de ola (m)	3.019
Nivel de marea	Alta

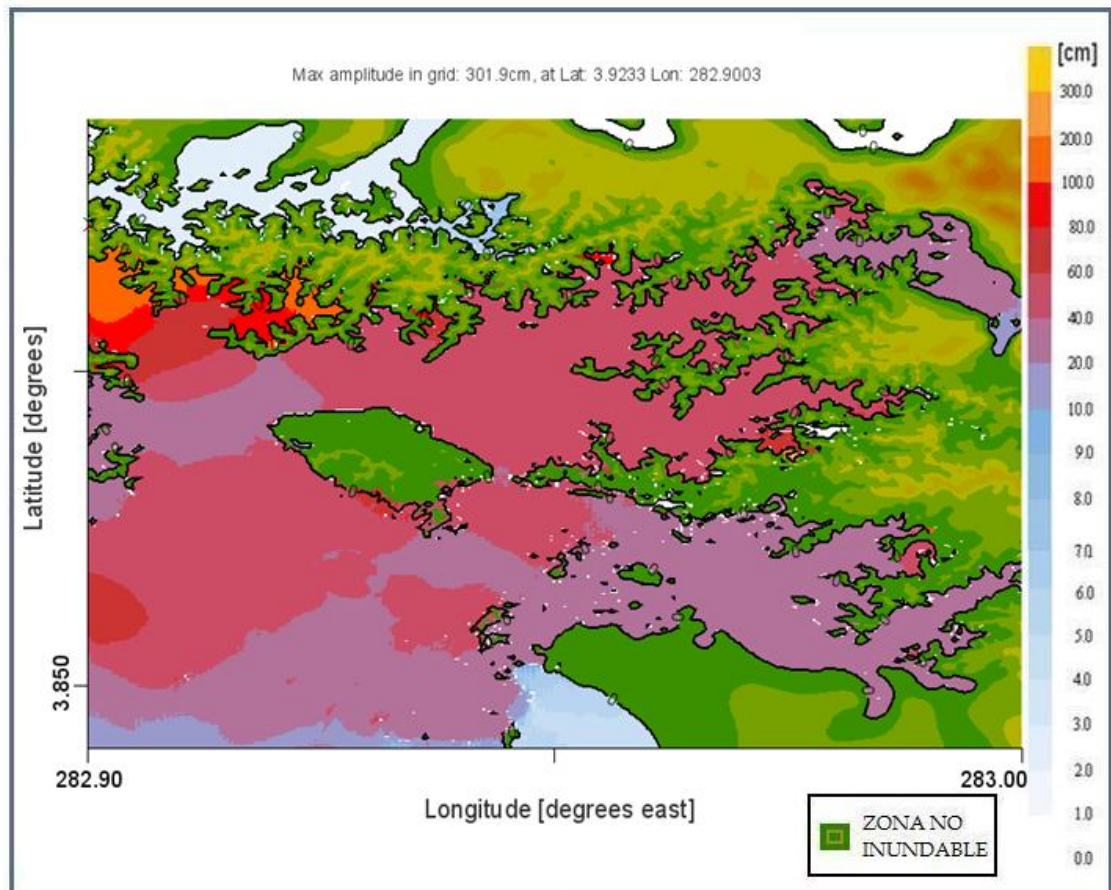


Figura 46. Escenario 10 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.

Tabla 18. Características del escenario 11 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.

Escenario 11	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	23 min
Máxima altura de ola (m)	2.726
Nivel de marea	Alta

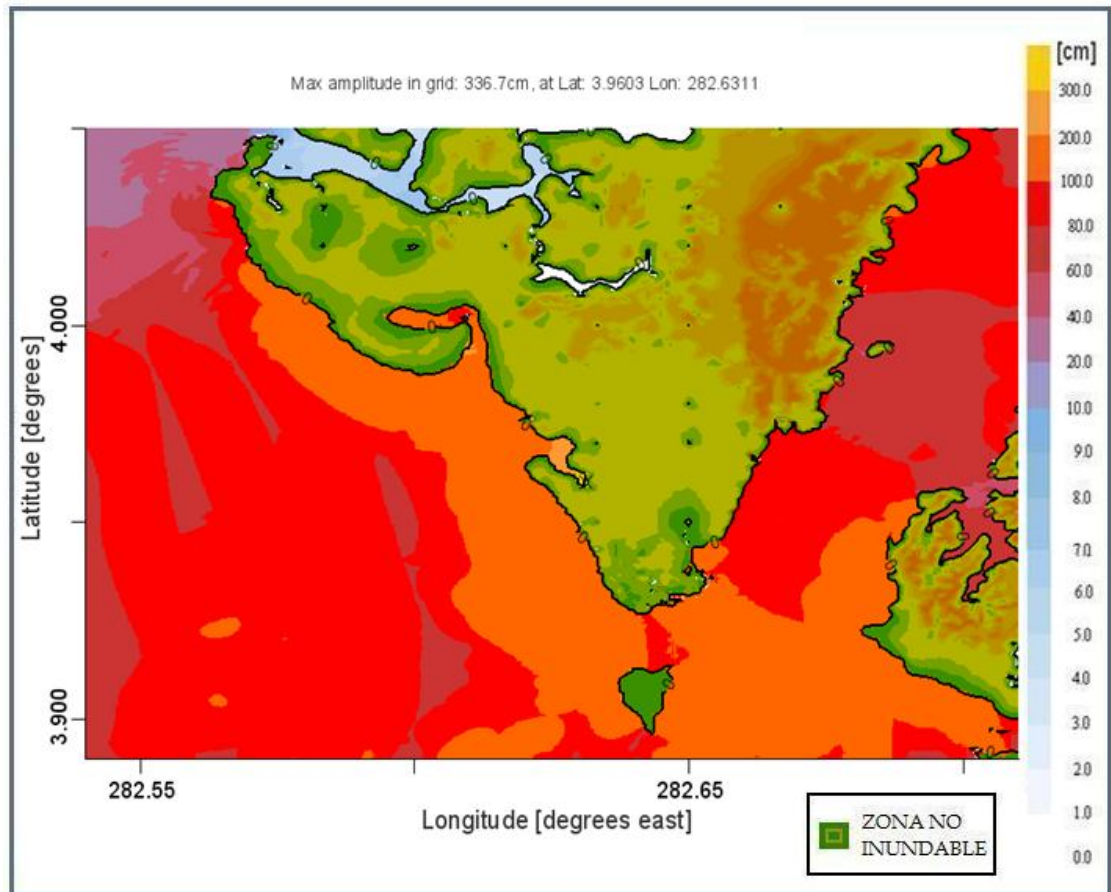


Figura 47. Escenario 11 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.

EVENTO 1 - ORIGEN LEJANO

Tabla 19. Características del escenario 12 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Escenario 12	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.5
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 13 min
Máxima altura de ola (m)	3.572
Nivel de marea	Alta

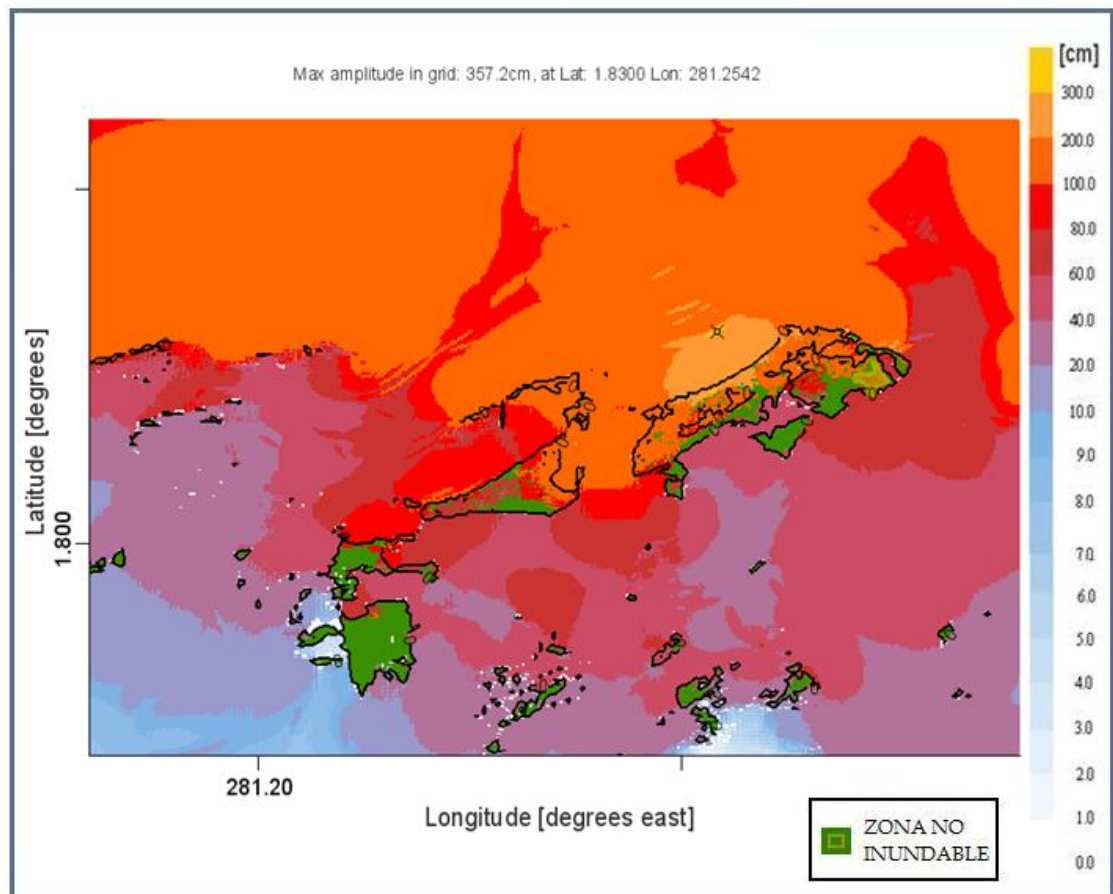


Figura 48. Escenario 12 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Tabla 20. Características del escenario 13 correspondiente al evento 1 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.

Escenario 13	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	8.5
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 51 min
Máxima altura de ola (m)	3.023
Nivel de marea	Alta

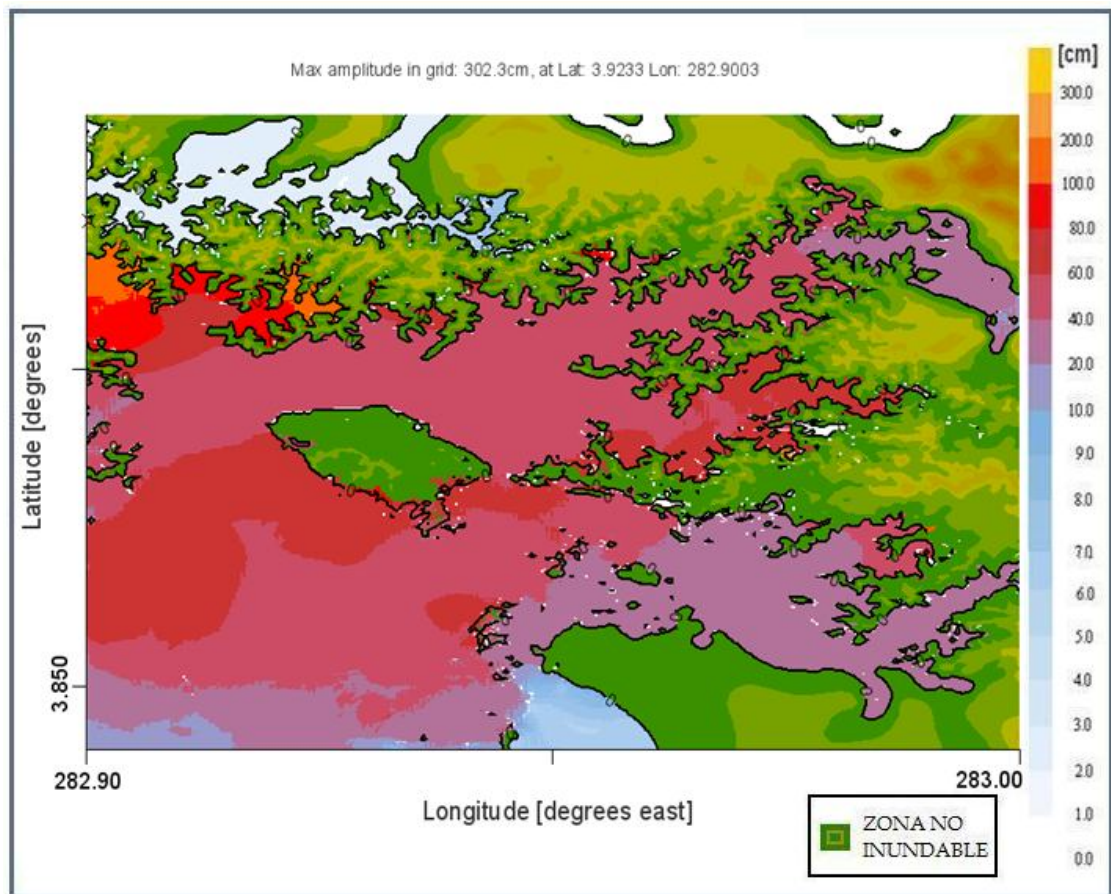


Figura 49. Escenario 13 correspondiente al evento 1 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.

Tabla 21. Características del escenario 14 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.

Escenario 14	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	8.5
Tiempo de llegada de la ola a la costa	58 min
Máxima altura de ola (m)	4.559
Nivel de marea	Alta

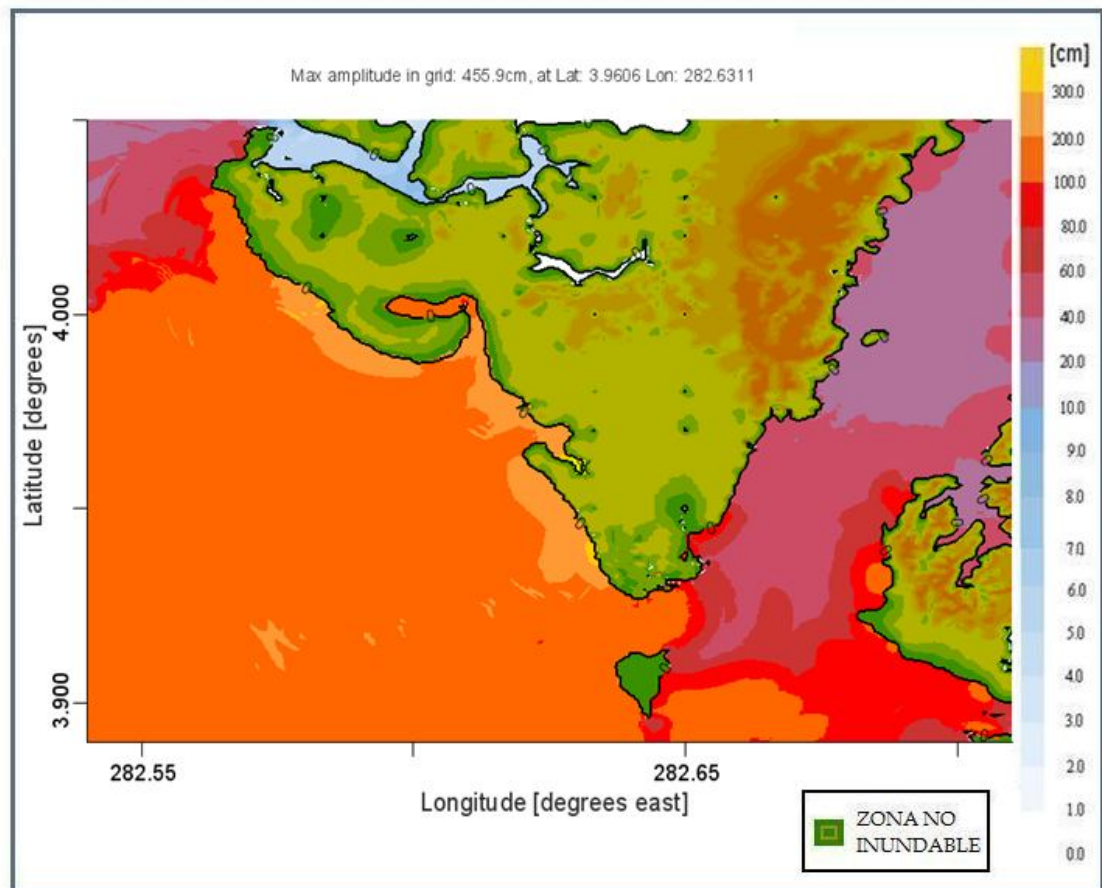


Figura 50. Escenario 14 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.

EVENTO 2 - ORIGEN LEJANO

Tabla 22. Características del escenario 15 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Escenario 15	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.5
Tiempo de llegada de la ola a la costa	4 h 03 min
Máxima altura de ola (m)	1.216
Nivel de marea	Alta

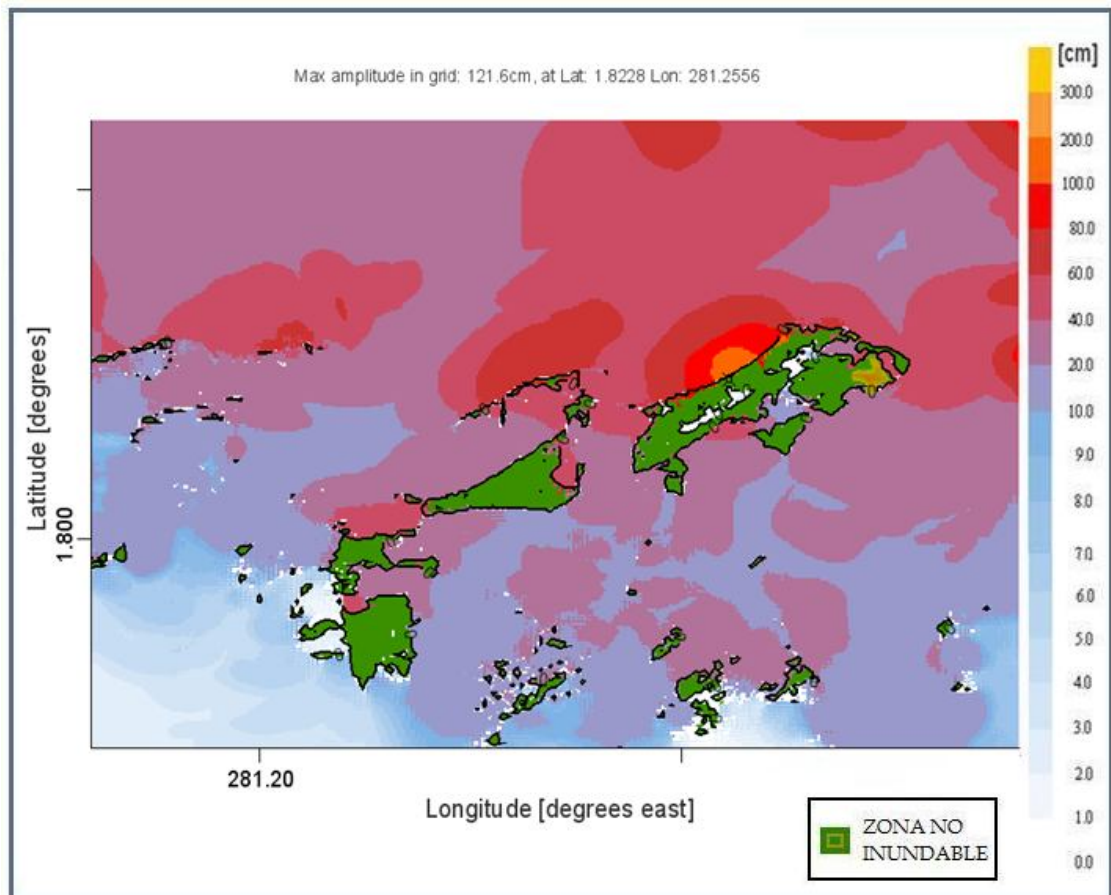


Figura 51. Escenario 15 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

4.2 BANCO DE ESCENARIOS

Terminada la totalidad de las simulaciones, para la identificación y elaboración del banco de escenarios se diseñó un documento en el cual se recopilan los datos obtenidos, estos son el origen del tsunami, la población en la que se concentra la modelación, la magnitud del sismo o fuente generadora de tsunami, la ubicación geográfica del sismo precursor, el tiempo de llegada a la costa, la máxima altura de ola, el nivel de marea y una imagen en la que se visualiza la inundación generada por el arribo de la onda tsunami a la costa, como se ilustra en la figura 52. Se generó un banco con 354 simulaciones o escenarios.

Tabla 23. Información de la simulación de tsunami.

ORIGEN	CERCANO		
POBLACIÓN	TUMACO		
MAGNITUD DEL SISMO (Mw)	7.9		
UBICACIÓN DEL SISMO (Coord. Geográficas)	EN MAPA	LONGITUD	LATITUD
	3	-79.1407 O	2.1675 N
TIEMPO DE LLEGADA DE LA OLA A LA COSTA	30 min.		
MAXIMA ALTURA DE OLA (m)	3.987		
NIVEL DE MAREA	MEDIA		

El modelo también entrega los resultados en una carpeta con todos los datos de generación, propagación e inundación, por lo tanto también se creó un archivo o carpeta digital con cada una de las simulaciones realizadas. Estas simulaciones pueden ser cargadas en el modelo cada vez que se necesiten, para esto solamente hay que copiar la carpeta de la modelación que se desea cargar en la carpeta que tiene por nombre "scratch" ubicada en la carpeta donde se instaló el modelo MOST. Estos documentos fueron entregados al CCCP como apoyo para el Centro Nacional de Alerta de Tsunami CNAT.

Con el banco de modelaciones se disminuirán los tiempos de reacción ante la presencia de un evento tsunamigénico, debido a que es posible acceder a los datos que arroja la simulación de forma inmediata, sin la necesidad de correr el modelo o sistema ya que los tiempos de cómputo de estas simulaciones son muy largos. Además, a través de los pronósticos obtenidos a partir de los resultados del proyecto se pueden tomar decisiones acertadas en función de la magnitud del tsunami, de tal manera que se genere una evacuación temprana solamente si es necesaria, lo que permitirá salvar las vidas de las personas que se ubican en las zonas de influencia del fenómeno. De no ser necesaria la evacuación, entonces no se realizará, esto permitirá minimizar el pánico entre los pobladores y por ende evitar una tensión psicológica innecesaria entre la población.

4.3 DISCUSIÓN

A partir de las simulaciones realizadas se obtuvieron 86 escenarios, que presentan inundación en las localidades elegidas para el estudio, los 15 más representativos fueron mostrados anteriormente y algunos de los restantes se muestran en el anexo A, de estos escenarios 11 son para Tumaco, 7 para Buenaventura y 6 para Málaga. No se presentan todos debido a la gran cantidad de información que se tendría y que corresponde a la base de datos suministrada a la entidad. Estos escenarios se eligieron debido a que la altura de la ola generada es mayor de 0.50 metros, la cual es la mínima altura con la cual se presenta inundación en los lugares estudiados.

Al analizar los escenarios se evidencia que la inundación depende directamente de la magnitud, ubicación del sismo o evento generador, de la topografía y batimetría de la zona, resultados obtenidos también en estudios realizados donde se afirma que la topografía (Titov et al. (2003)), la batimetría [29], la magnitud y ubicación del sismo (Gica et al. (2008)), son variables que influyen directamente en la generación de ondas tsunami y por ende en la inundación producida por estas. Las características de las olas tsunami generadas por un terremoto varían según el lugar donde la fuente está ubicada [30], es por eso que se puede ver que la mayor inundación se presenta en los eventos ubicados enfrente de las regiones de estudio, este es el caso de los eventos 2 y 3 para la población de Tumaco y los eventos 6 y 7 para las regiones de Buenaventura y Málaga, esto aplica para eventos de origen cercano. Para el caso de eventos de origen lejano, entre más alejada se

encuentre la fuente generadora menor es la altura de la ola y por ende menor es la inundación provocada por esta, es así que la mayor altura de ola e inundación se presentan para los eventos 1 y 2, que se encuentran más cerca de la región de estudio.

La magnitud del sismo es una de las variables que tiene mayor influencia en la generación de olas tsunami y en la posterior inundación producida por estas a su llegada a la costa, Gica et al (2008), a esta afirmación se llega en este estudio debido a que se trabajó con diferentes magnitudes para cada evento, y se evidencia que entre mayor es la magnitud del sismo hay una mayor altura de la ola y por ende hay una mayor inundación debida a esta. Analizando las simulaciones realizadas se encontró que para eventos de origen cercano la menor magnitud con que se obtiene un escenario de riesgo es de 7.5 Mw..

Para eventos de origen lejano y de origen cercano se obtuvo los mismos resultados. Al igual que con los eventos de origen cercano, para los de origen lejano se trabajó con diferentes magnitudes, arrojando como resultado que la mínima magnitud del sismo que genera una ola que produce inundación es de 8.0 Mw., estos resultados son confiables en comparación con los datos de la figura 27, (Relación entre magnitud y la profundidad del evento sísmico y su potencial como precursor de ondas de tsunami), de donde se deduce que la mínima magnitud de sismo que origina un tsunami es de 6.5 Mw. para un tsunami no desastroso y de 7.9 Mw. para un tsunami desastroso.

Si se agrupan estas dos causas, se puede decir que para los eventos de origen cercano para la región de Tumaco, entre más frente a esta se encuentre el epicentro y mayor sea la magnitud del sismo, la altura de la ola generada es superior y en consecuencia hay una inundación mayor. Esto se comprueba en los escenarios 2, 3 y 4, con alturas de 3.39, 3.909, 3.835 metros y tiempos de llegada de 15, 14, 28 minutos, respectivamente. Para los eventos de origen lejano entre más cerca este ubicada la fuente de origen de la región de estudio y mayor sea la magnitud del sismo, se obtiene una altura de ola superior y una mayor inundación, como se ve en los escenarios 12 y 15, con alturas de 3.572, 1.216 y tiempos de llegada de 1 hora 13 minutos y 4 horas 45 minutos, respectivamente.

La topografía, batimetría y ubicación de la zona de estudio son variables que determinan en una gran medida la magnitud de la inundación provocada por el arribo de las ondas de tsunami. Tumaco es una región que se caracteriza por tener gran parte de sus terrenos como rellenos y zona de bajamar, lo que permite que toda esta zona sea fácilmente inundable debido a la mínima diferencia de altura que tiene con respecto a la línea de más alta marea (Cardona 2004), lo que constituye una gran amenaza por inundación, además Tumaco se encuentra en una ubicación geográfica desfavorable, debido a que está situada de frente al mar, lo que se traduce en un choque directo de la onda tsunami; debido a esto, Tumaco es la región que mayor riesgo tiene ante la presencia de un evento tsunamigénico, esto se ve reflejado en los resultados obtenidos, en donde Tumaco es la región que tiene mayor número de escenarios de riesgo.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Cardona, et al (2006), donde ellos ubican como escenario más devastador un evento ubicado frente a la bahía de Tumaco, también concluyen que las áreas inundadas son mayores cuando el nivel de marea es alto y que la mayor inundación se presenta en los eventos con magnitudes superiores a 7.8 Mw., la diferencia entre estos estudios radica principalmente en la información batimétrica y topográfica de detalle.

Por otro lado, Buenaventura se encuentra ubicada dentro de una bahía que cuenta con demasiados esteros, los cuales se convierten en una protección ante el embate de una onda tsunami, debido a que al llegar la ola a estos esteros esta empieza a perder energía, la onda queda encerrada en estos esteros y las alturas máximas se presentan en este lugar, así esta región no está expuesta a un choque directo de la onda tsunami. Todo esto representa una disminución en la energía de la ola y por ende en la altura de esta al llegar a la ciudad de Buenaventura, por esta razón la inundación en esta zona es menor comparada con la inundación producida en Tumaco para los eventos realizados en este estudio.

Los resultados obtenidos en este trabajo para el caso de Buenaventura coinciden con lo encontrado por [31], quienes evaluaron el impacto de ondas tsunami generadas por sismos de 7.9 Mw., y concluyen que la magnitud es un parámetro determinante al evaluar la amenaza de tsunami en el casco urbano de Buenaventura, la magnitud del sismo genera cambios significativos en las zonas afectadas por la inundación y la altura de la ola, además afirman que la

morfometría de la línea de costa reduce los efectos adversos de un tsunami, conclusión que concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo.

Según los resultados obtenidos en este estudio para los eventos de origen cercano para la región de Buenaventura, entre más cercano y de frente a la bahía se encuentre el epicentro y mayor sea la magnitud del sismo, se genera una mayor altura de la ola, lo que causa mayor inundación, como se obtuvo en el escenario 10, con una altura de ola de 3.019 metros y un tiempo de arribo de 1 hora 16 minutos. En el caso de eventos de origen lejano, entre menor sea la distancia de la fuente de origen y mayor sea la magnitud del sismo, se tiene una ola de mayor altura y una zona inundada mayor, escenarios 13, con altura de ola de 3.023 y un tiempo de llegada de 1 hora 51 minutos.

En Málaga, aunque se encuentra al igual que Tumaco, de frente o expuesta a un choque directo de la onda, las poblaciones ubicadas en esta región tienen una mayor diferencia de altura con respecto a la línea de más alta marea, lo que conlleva a que así se generen alturas de ola considerables la zona de inundación va a ser menor que para los casos anteriores, esto no quiere decir que no se encuentre en riesgo por la ocurrencia de un evento de esta magnitud, si no que es una población que tendrá menor cantidad de daños o pérdidas.

Al igual que en los casos anteriores para eventos de origen cercano se observa mayor inundación en la zona cuando la ubicación del sismo generador esta de frente a esta y el sismo es de mayor magnitud, escenarios 9, con una altura de ola de 2.908 y un tiempo de llegada de 30 minutos. También para los eventos de origen lejano se encontró al igual que en los casos anteriores que la ubicación y magnitud del sismo son los causantes de la mayor inundación de la zona, escenarios 14, con una altura de ola de 4.359 y tiempo de arribo de 58 minutos.

Es muy importante tener en cuenta el nivel de marea en que se encuentra la región de estudio al llegar la onda tsunami, dependiendo del nivel de marea la inundación será mayor o menor, en este caso se observa que en todos los escenarios las áreas no inundadas son mayores cuando el arribo de ondas de tsunami coincide con estado de la marea media.

El evento tsunamigénico ocurrido el día 20 de Septiembre de 2007, sismo de 8.0 Mw. cuyo epicentro tuvo lugar a unos 204 kilómetros al suroeste de Samoa, figura 6, coincide con el evento 7 de origen lejano figura 20; el mareógrafo ubicado en el muelle de guardacostas en la isla del morro registro el tiempo de llegada de la ola el cual fue de 16 horas [32], tiempo que concuerda con la simulación realizada para el evento 7 de origen lejano con una magnitud del sismo de 8.0, esto muestra la buena predicción de tiempo de arribo de la ola que el modelo arroja.

CONCLUSIONES

El modelo numérico MOST permite simular los eventos tsunamigénicos de una manera fácil y amigable, ya que su interface gráfica deja ingresar los parámetros de entrada de una manera sencilla y los resultados son visualizados en la misma interface.

La realización de este proyecto ofrece gran cantidad de información que hace posible brindarles una mayor seguridad a los pobladores del Litoral Pacífico Colombiano ante la presencia de tsunami en esta zona.

A través de los pronósticos obtenidos a partir del banco de escenarios generado se pueden tomar decisiones en función del evento sísmico, de tal manera que se genere una alerta de evacuación solamente si es necesaria.

Los resultados de las simulaciones servirán como herramientas base para generar alertas tempranas ante eventos tsunamigénicos, lo que permitirá salvar las vidas de las personas que se ubican en las zonas de influencia del fenómeno.

La magnitud del sismo es uno de los factores que más influyen en la generación o no generación de un evento tsunamigénico y de la posible inundación de la costa, para los eventos de origen cercano la mínima magnitud del sismo que genera ondas tsunami es de 7.5 Mw. y para eventos de origen lejano la mínima magnitud del sismo oscila entre 8.0 Mw..

El nivel de marea juega un factor importante en la inundación o no inundación de la región, debido a que se presenta una menor inundación si al llegar la ola se encuentra un nivel de marea medio, con respecto al nivel de marea alto.

El evento de origen cercano que genera la máxima altura de ola y mayor inundación para la región de Tumaco es el evento 2 con una magnitud de 8.0 Mw., marea alta, con altura de 3.909 metros y tiempo de llegada de 14 minutos, escenario que tiene mayor riesgo por inundación. El evento de origen lejano que mayor altura de ola y mayor inundación genera es el evento 1 con magnitud de 8.5

Mw., marea alta, con altura de 3.572 y tiempo de llegada de 1 hora 13 minutos, escenario de mayor riesgo por inundación.

El evento de origen cercano que genera la máxima altura de ola y mayor inundación para la región de Buenaventura es el evento 7 con una magnitud de 8.0 Mw., marea alta, con altura de 3.019 metros y tiempo de llegada de 1 hora 16 minutos, escenario que tiene mayor riesgo por inundación. El evento de origen lejano que mayor altura de ola y mayor inundación genera es el evento 1 con magnitud de 8.5 Mw., marea alta, con altura de 3.023 y tiempo de llegada de 1 hora 51 minutos, escenario de mayor riesgo por inundación.

El evento de origen cercano que genera la máxima altura de ola y mayor inundación para la región de Málaga es el evento 7 con una magnitud de 8.0 Mw., marea alta, con altura de 2.908 metros y tiempo de llegada de 30 minutos, escenario que tiene mayor riesgo por inundación. El evento de origen lejano que mayor altura de ola y mayor inundación genera es el evento 1 con magnitud de 8.5 Mw., marea alta, con altura de 4.359 y tiempo de llegada de 58 minutos, escenario de mayor riesgo por inundación.

El modelo tuvo una buena predicción del tiempo de llegada de la ola producida por el sismo ocurrido en la región de las islas Samoa, tiempo registrado por el mareógrafo ubicado en el puerto de guardacostas de Tumaco.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Bunting T., Chapman C., Christie P., Singh S., Sledzik J., 2005. La ciencia de los Tsunamis, Oilfield Review.
- [2]. National Oceanic and atmospheric Administration, United States department of commerce, URL: <http://www.tsunami.noaa.gov>, 2009.
- [3]. Cardona Y., 2004. Modelación de tsunamis en la Costa Pacífica colombiana, caso de aplicación bahía de Tumaco, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos.
- [4]. Reyna J., 1997. Simulación numérica de un Tsunami de origen lejano en su aproximación a la costa Pacífica colombiana. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Escuela de Oceanografía Física.
- [5]. Convenio marco de colaboración científica, técnica y académica entre el ministerio de defensa nacional – dirección general marítima (colombia) y la fundación leonardo torres quevedo de la universidad de cantabria (españa), 2003. Asesoría en el diseño de propuestas de actuación que sirvan como elemento de protección ante el impacto de un tsunami sobre el casco urbano de Tumaco (regeneración de la isla del guano).
- [6]. Farreras, S., 1995. "Tsunamis en México". Unión Geofísica Mexicana. Monografía No. 5.
- [7]. Kenji Satake, 2004. The 2004 sumatra-andaman earthquake and tsunami in the indian ocean, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.
- [8]. Quiceno A., Ortiz M., 2001. Evaluación del impacto de Tsunamis en el Litoral Pacífico colombiano parte II (Región de Tumaco), Boletín Científico, Armada Nacional de Colombia.

- [9]. Taboada A., Dimaté C., Fuenzalida A., 1998. Sismotectónica de Colombia: Deformación continental activa y subducción, Física de la Tierra, No.10.
- [10]. Iida, K., 1963. Magnitude, energy and generation and mechanisms of tsunamis and a catalog of earthquakes associated with tsunamis. Proc. of the 10th Pacific Science Congress Symposium. International Union of Geodesy and Geophysics U.G.G.I., Monograph 24.
- [11]. Titov V.V., F.I. Gonzalez, 1997. Implementation and Testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) model, Laboratory Pacific Marine Environmental, NOAA Technical Memorandum ERL.
- [12]. Okada, Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space. Bull. Seism. Soc. Am.
- [13]. Burridge, R. and L. Knopoff, 1964. Body force equivalents for seismic dislocations. Bull. Seism. Soc. Am.
- [14]. Kanamori, H. and D.L. Anderson, 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. Bull. of the Seismological Society of America. Vo. 65, N. 5.
- [15]. Wells, D y Coppersmith, K. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacements. Bull Seism. Soc. Am.
- [16]. Kajiura, K. and N. Shuto, 1992. 11. Tsunamis. Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Vol. 3: Wave Phenomena and Coastal Structures. Golf. Publishing Company.

- [17]. Edison Gica, Mick C. Spillane, Vasily V. Titov, Christopher D. Chamberlin, Jean C. Newman, 2008. Development of the forecast propagation database for noaa's short-term inundation forecast for tsunamis (sift). Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO) University of Washington, Pacific Marine Environmental Laboratory.
- [18]. Vasily V. Titov, 1998. Numérical modeling of tidal wave run up. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.
- [19]. Yuri n. Skiba, Denis m. filatov, 2006. Esquemas conservativos basados en el método de separación, para la simulación numérica de vórtices en la atmósfera. Inteciencia, vol 31 N° 1.
- [20]. Costas E. Synolakis, Eddie N. Bernard, Vasily V. Titov, Utku Kanoglu, Frank I. Gonzáles, Standards, 2007. Criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models. NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration, PMEL Pacific Marine Environmental Laboratory, NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-135.
- [21]. Md. Fazlul Karim, Gauranga Deb Roy, Ahmad Izani M. Ismail, Mohammed. Ashaque Meah, 2008. Numerical Simulation of Indonesian Tsunami 2004 along Southern Thailand: A Nested Grid Model. School of Mathematical Sciences, Universiti Sains Malaysia, 11800 Penang, Malaysia Brac University, Dhaka, Bangladesh.K.
- [22]. Santana M., 2001. Solucion Numerica de un Problema de Dispersion en una Guia de Ondas usando Generación de Mallas. Departamento de Física y Matemáticas Universidad de los Andes-Trujillo. Venezuela, Divulgaciones Matemáticas Vol. 9 No. 2.

- [23]. Gómez U., 1997. Los modelos digitales de elevación y sus aplicaciones en un SIG. Centro de Investigaciones en percepción Remota CIAF, República de Colombia, Ministerio de hacienda y crédito público, Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC.
- [24]. Conceptos de cartografía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI, Navegante Geoestadístico de México.
- [25]. MAGNA-SIRGAS, 2004. Marco Geocéntrico Nacional de Referencia, densificación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC,.
- [26]. SURFER, Surfer user´s guide golden software, inc 1993-2002.
- [27]. Deposito de documentos de la FAO, el uso de computadoras, programas e instrumentos electrónicos en la planificación y seguimiento de planes de manejo del bosque húmedo tropical - un caso en Costa Rica, procesamiento de la información, basado en el trabajo de Germán Obando, gerente del programa de investigación y desarrollo fundecor, Costa Rica, organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación roma, 2001.
- [28]. Community Model Interface for Tsunami (ComMIT), User manual.
- [29]. Kowalik Z., Knight W., Logan T., Whitmore P., 2005. Numerical modeling of the global tsunami: Indonesian Tsunami of 26 December 2004. Institute of Marine Science, University of Alaska, NOAA/NWS/West Coast and Alaska Tsunami Warning Center, Arctic Region Supercomputing Center, NOAA/NWS/West Coast and Alaska Tsunami Warning Center. Science of Tsunami Hazards, Vol. 23, No. 1.

- [30]. James F. Lander, Lowell S. Whiteside & Patricia A. Lockridge, 2003. Tsunami Data Issue Two Decades Of Global Tsunamis - 1982-2002. Science Of Tsunami Hazards. The International Journal of The Tsunami Society, Volume 21 Number 1 Published Electronically.
- [31]. Restrepo, J. C. & Luis J. Otero: Modelación numérica de eventos tsunamigénicos en la Cuenca Pacífica Colombiana - Bahía de Buenaventura. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31.
- [32]. Cambios en el nivel del mar por tsunami de Samoa se detectaron en Tumaco y en el resto de Sudamérica, CCCP, 2009.
URL:<http://www.cccp.org.co/modules.php?name=News&file=article&sid=596>.

ANEXO A.

ESCENARIOS DE RIESGO POR TSUNAMI

INDICE DE TABLAS

Tabla 24. Características del escenario 16 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	108
Tabla 25. Características del escenario 17 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	109
Tabla 26. Características del escenario 18 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	110
Tabla 27. Características del escenario 19 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	111
Tabla 28. Características del escenario 20 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	112
Tabla 29. Características del escenario 21 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	113
Tabla 30. Características del escenario 22 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	114
Tabla 31. Características del escenario 23 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	115
Tabla 32. Características del escenario 24 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	116
Tabla 33. Características del escenario 25 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.....	117
Tabla 34. Características del escenario 27 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.....	118
Tabla 35. Características del escenario 28 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.....	119
Tabla 36. Características del escenario 29 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.....	120

Tabla 37. Características del escenario 30 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.....	121
Tabla 38. Características del escenario 31 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.....	122
Tabla 39. Características del escenario 32 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.....	123
Tabla 40. Características del escenario 33 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.....	124
Tabla 41. Características del escenario 34 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.....	125
Tabla 42. Características del escenario 35 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.....	126
Tabla 43. Características del escenario 36 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.....	127
Tabla 44. Características del escenario 37 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.....	128
Tabla 45. Características del escenario 38 correspondiente al evento 1 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.....	129
Tabla 46. Características del escenario 39 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.....	130
Tabla 47. Características del escenario 40 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.....	131

INDICE DE FIGURAS

Figura 53. Escenario 16 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	108
Figura 54. Escenario 17 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	109
Figura 55. Escenario 18 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	110
Figura 56. Escenario 19 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	111
Figura 57. Escenario 20 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	112
Figura 58. Escenario 21 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	113
Figura 59. Escenario 22 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	114
Figura 60. Escenario 23 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	115
Figura 61. Escenario 24 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano	116
Figura 62. Escenario 26 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano	117
Figura 63. Escenario 27 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano	118
Figura 64. Escenario 28 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano	119
Figura 65. Escenario 29 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano	120
Figura 66. Escenario 30 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano	121

Figura 67. Escenario 31 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano	122
Figura 68. Escenario 32 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano	123
Figura 69. Escenario 33 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano	124
Figura 70. Escenario 34 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano	125
Figura 71. Escenario 35 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano	126
Figura 72. Escenario 36 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	127
Figura 73. Escenario 37 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.	128
Figura 74. Escenario 38 correspondiente al evento 1 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.	129
Figura 75. Escenario 39 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.	130
Figura 76. Escenario 40 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.	131

ORIGEN CERCANO
EVENTO 1 - ORIGEN CERCANO

Tabla 24. Características del escenario 16 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Escenario 16	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	21 min
Máxima altura de ola (m)	2.215
Nivel de marea	Media

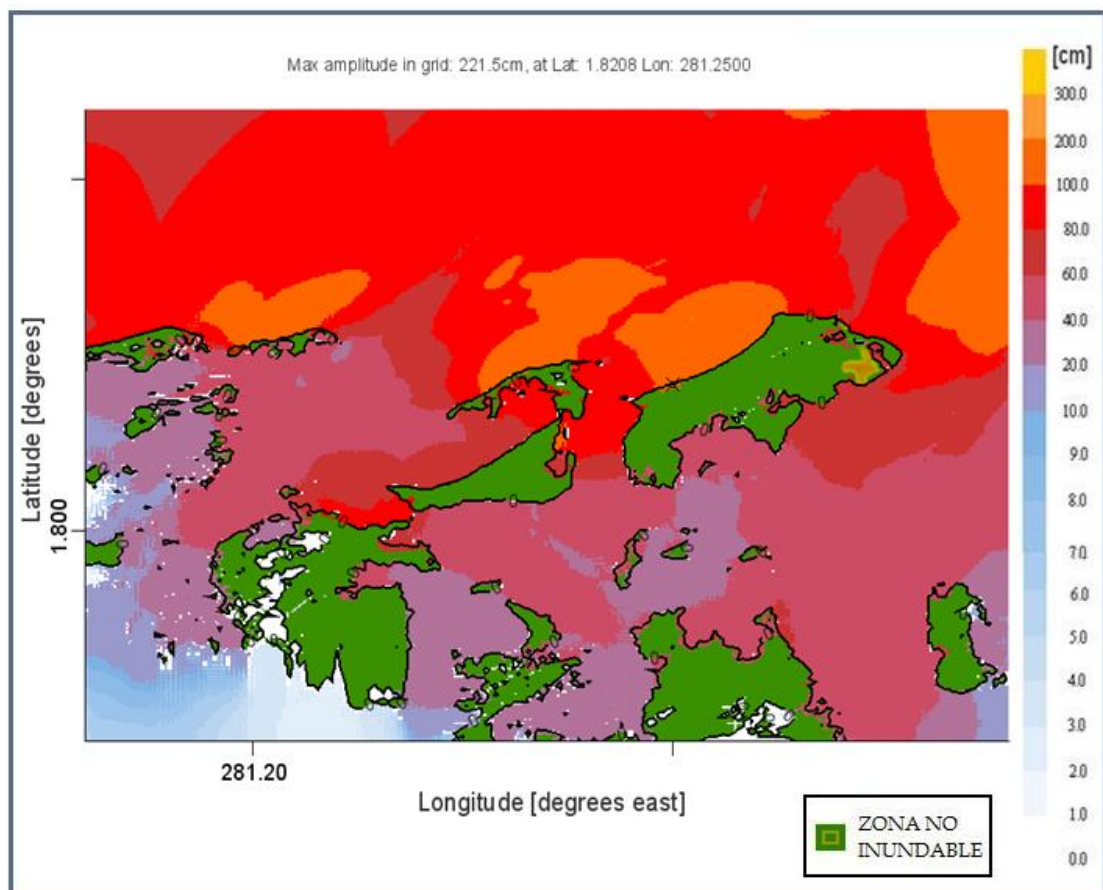


Figura 53. Escenario 16 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Tabla 25. Características del escenario 17 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Escenario 17	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	20 min
Máxima altura de ola (m)	1.435
Nivel de marea	Alta

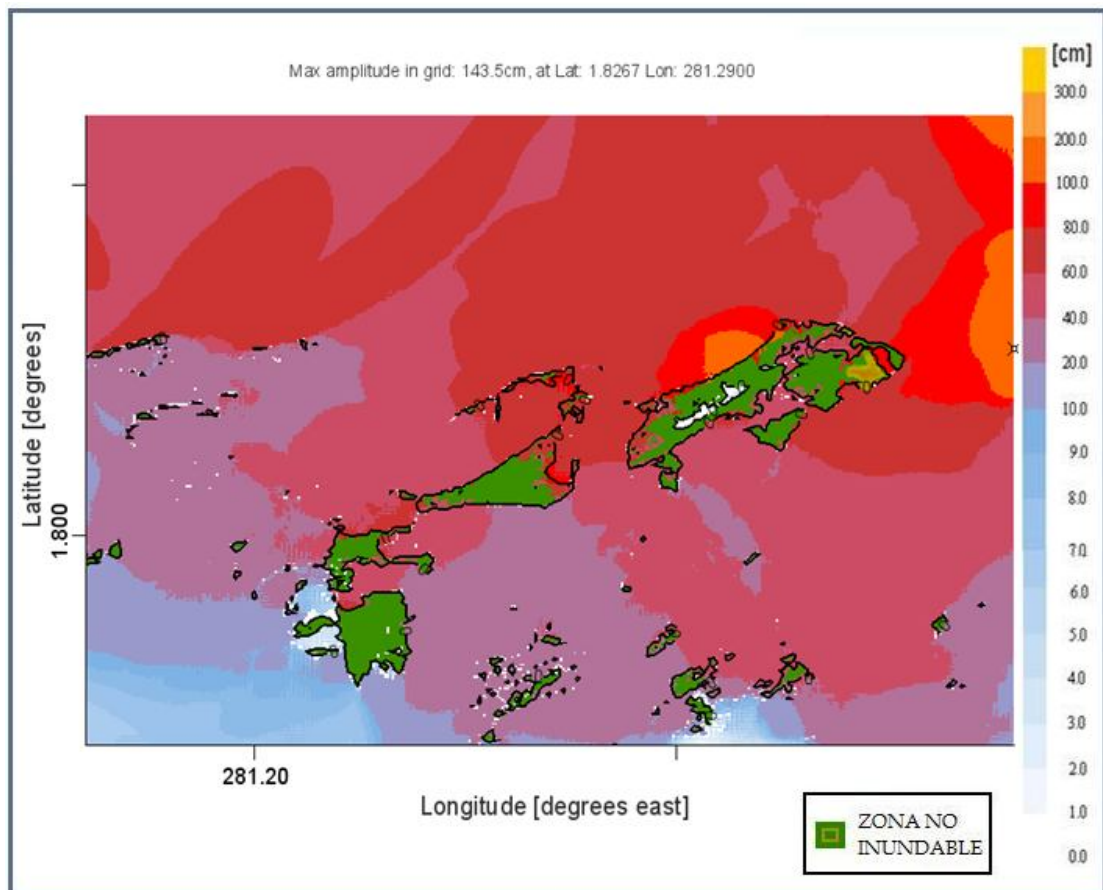


Figura 54. Escenario 17 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

EVENTO 2 - ORIGEN CERCANO

Tabla 26. Características del escenario 18 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Escenario 19	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	15 min
Máxima altura de ola (m)	2.945
Nivel de marea	Media

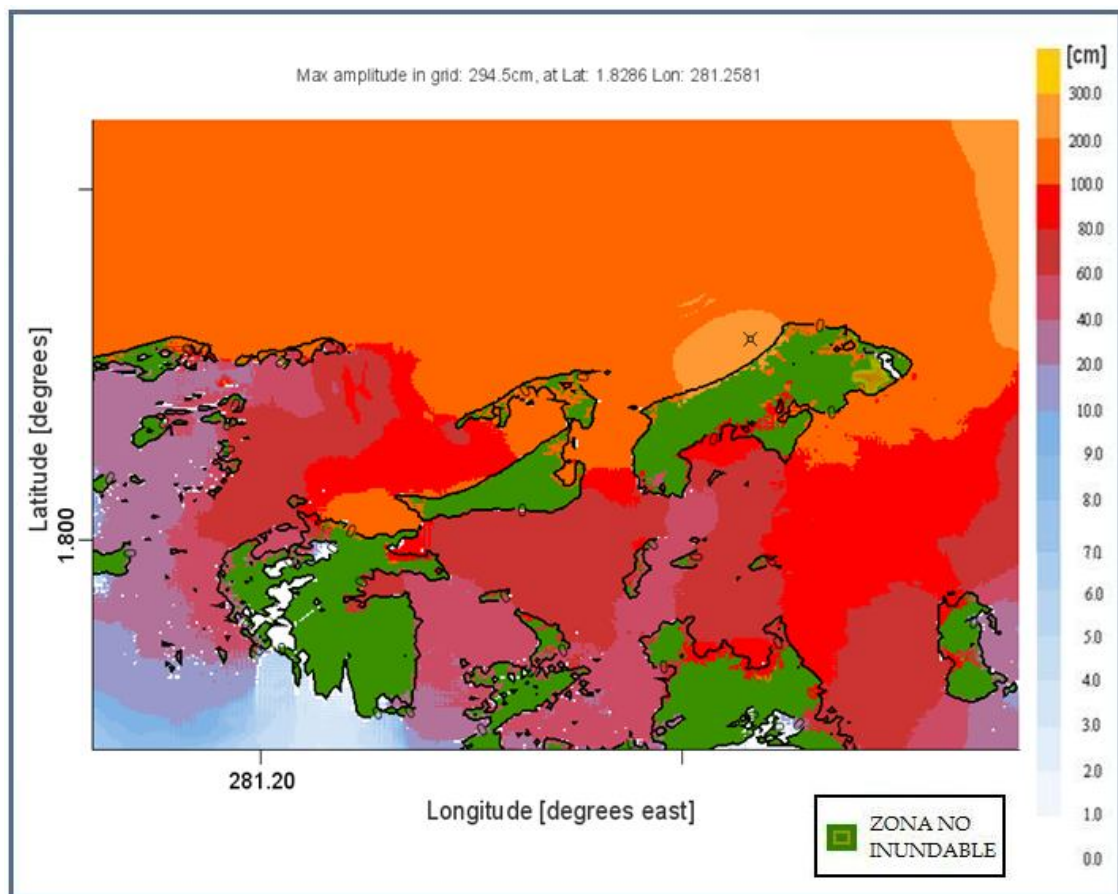


Figura 55. Escenario 18 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Tabla 27. Características del escenario 19 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Escenario 20	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	7.5
Tiempo de llegada de la ola a la costa	14 min
Máxima altura de ola (m)	0.911
Nivel de marea	Alta

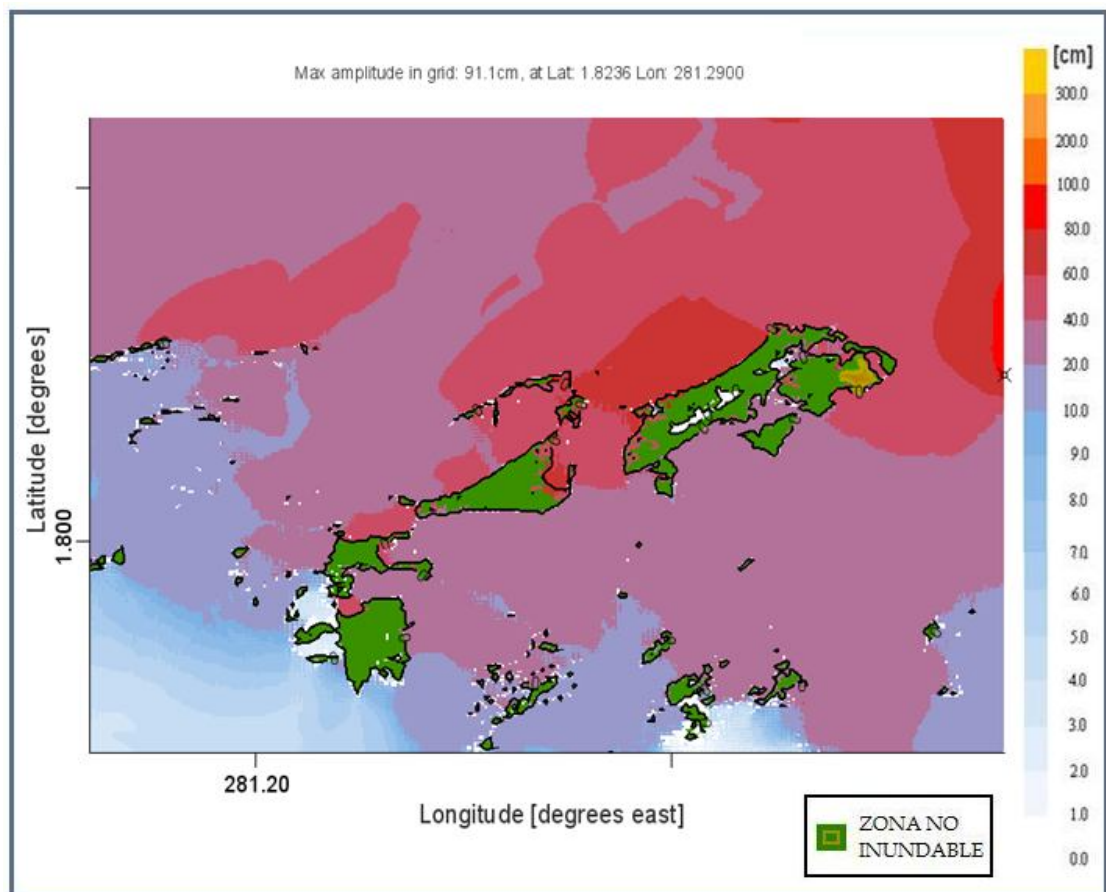


Figura 56. Escenario 19 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Tabla 28. Características del escenario 20 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Escenario 21	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	7.5
Tiempo de llegada de la ola a la costa	14 min
Máxima altura de ola (m)	0.911
Nivel de marea	Alta

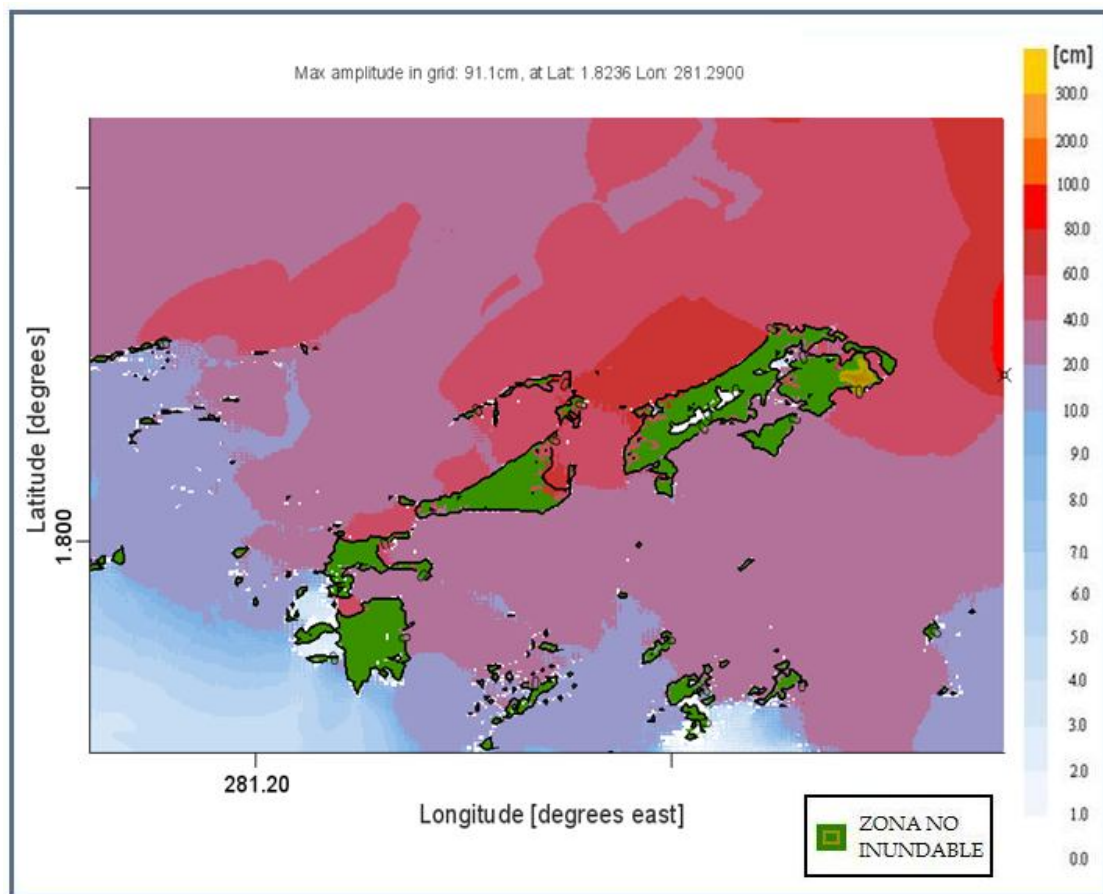


Figura 57. Escenario 20 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Tabla 29. Características del escenario 21 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Escenario 22	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	14 min
Máxima altura de ola (m)	3.638
Nivel de marea	Alta

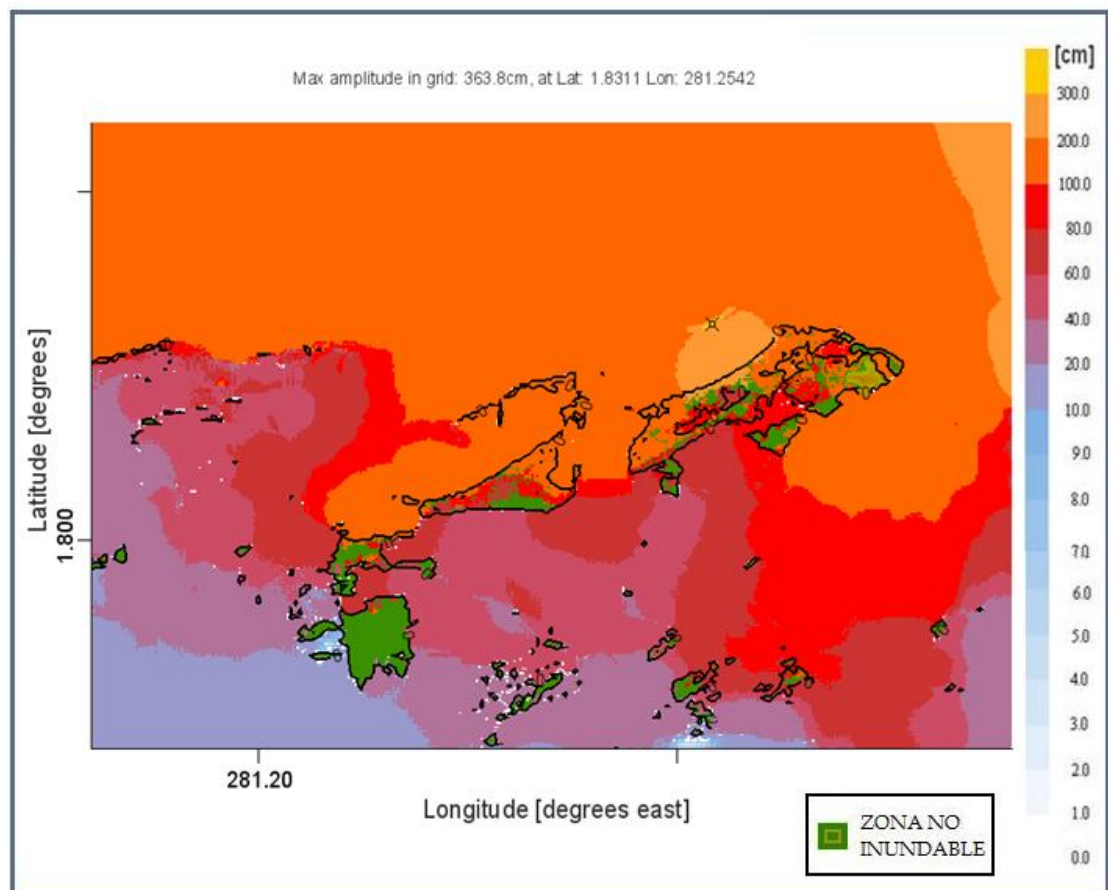


Figura 58. Escenario 21 correspondiente al evento 2 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

EVENTO 3 – ORIGEN CERCANO

Tabla 30. Características del escenario 22 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Escenario 24	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	30 min
Máxima altura de ola (m)	3.987
Nivel de marea	Media

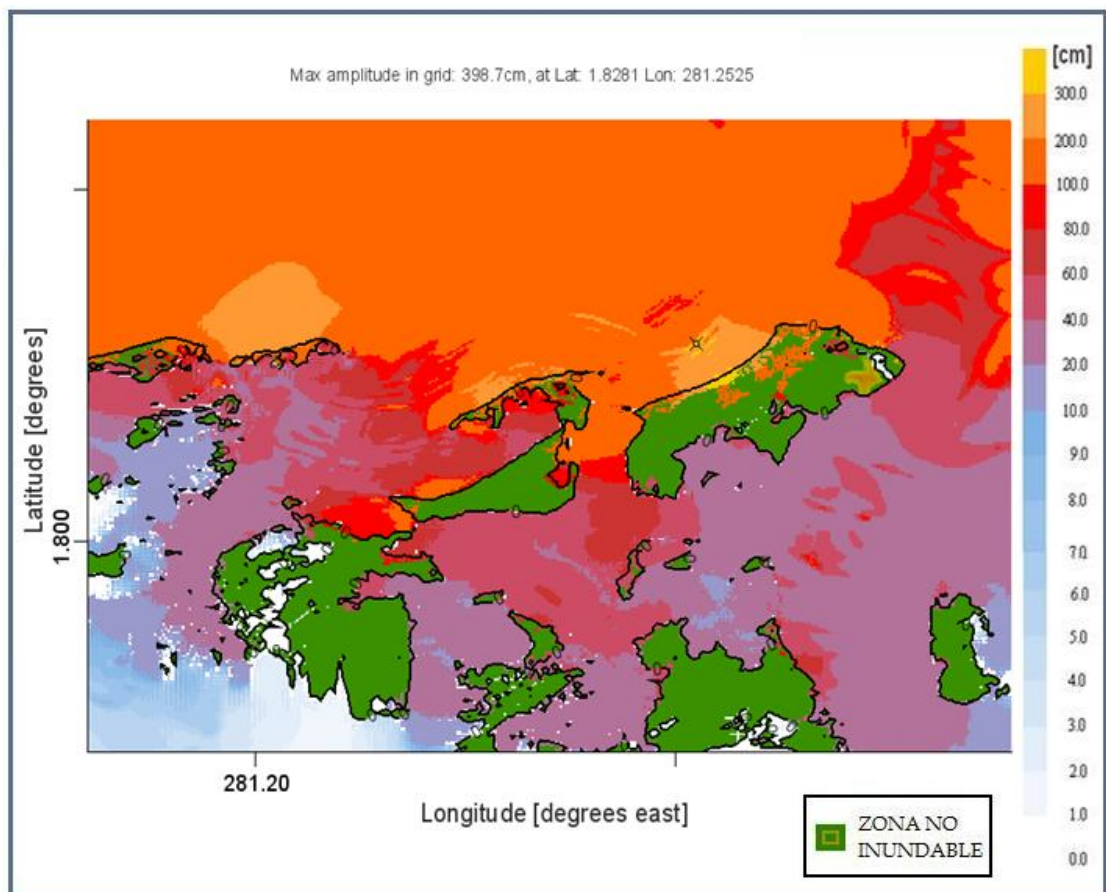


Figura 59. Escenario 22 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Tabla 31. Características del escenario 23 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Escenario 25	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	30 min
Máxima altura de ola (m)	4.45
Nivel de marea	Media

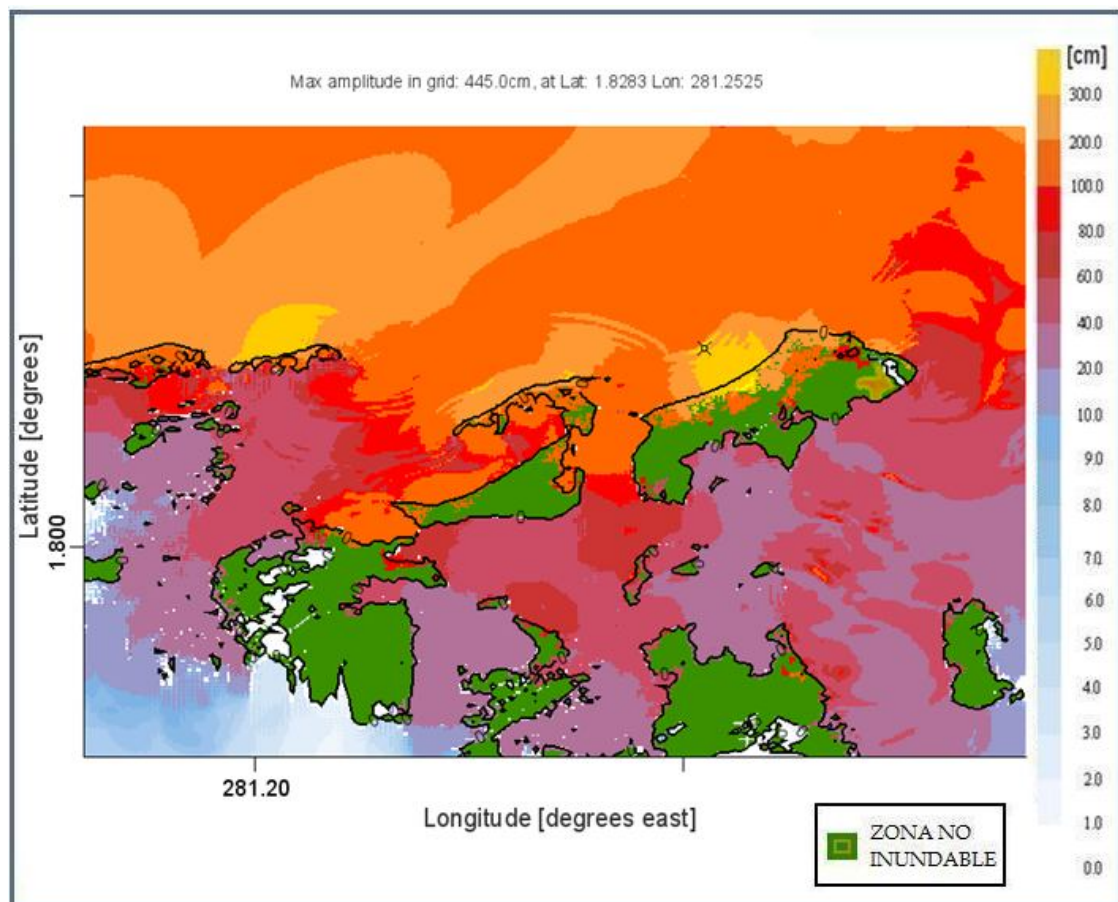


Figura 60. Escenario 23 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Tabla 32. Características del escenario 24 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Escenario 27	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	28 min
Máxima altura de ola (m)	3.132
Nivel de marea	Alta

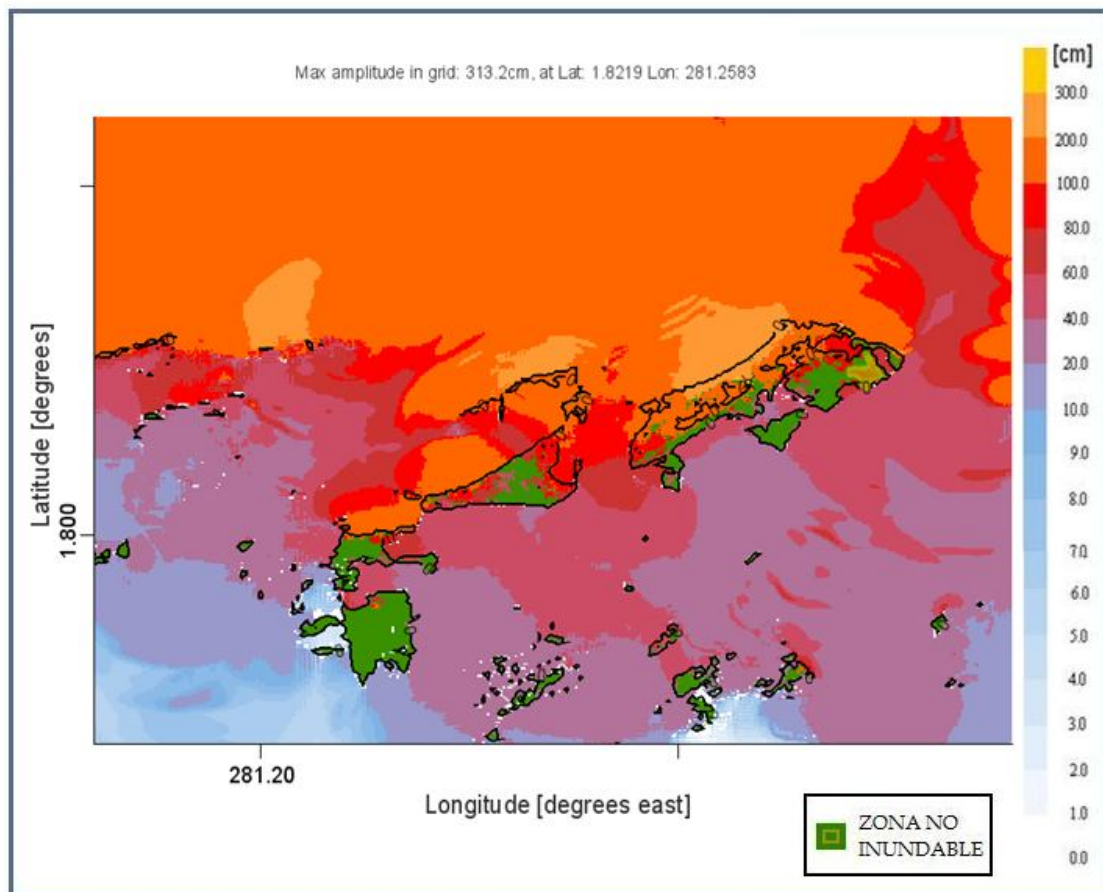


Figura 61. Escenario 24 correspondiente al evento 3 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

EVENTO 6 - ORIGEN CERCANO

Tabla 33. Características del escenario 25 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Escenario 41	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 23 min
Máxima altura de ola (m)	1.695
Nivel de marea	Media

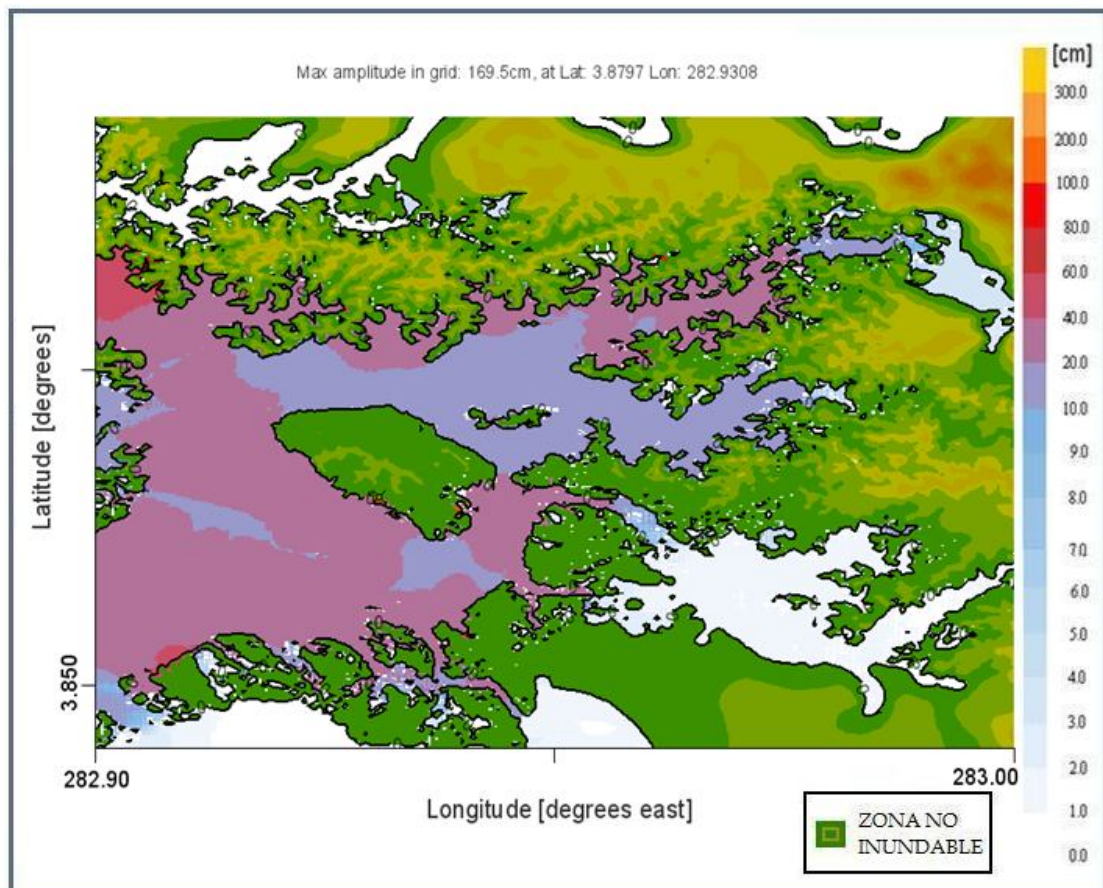


Figura 62. Escenario 26 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Tabla 34. Características del escenario 27 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Escenario 42	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 23 min
Máxima altura de ola (m)	1.695
Nivel de marea	Media

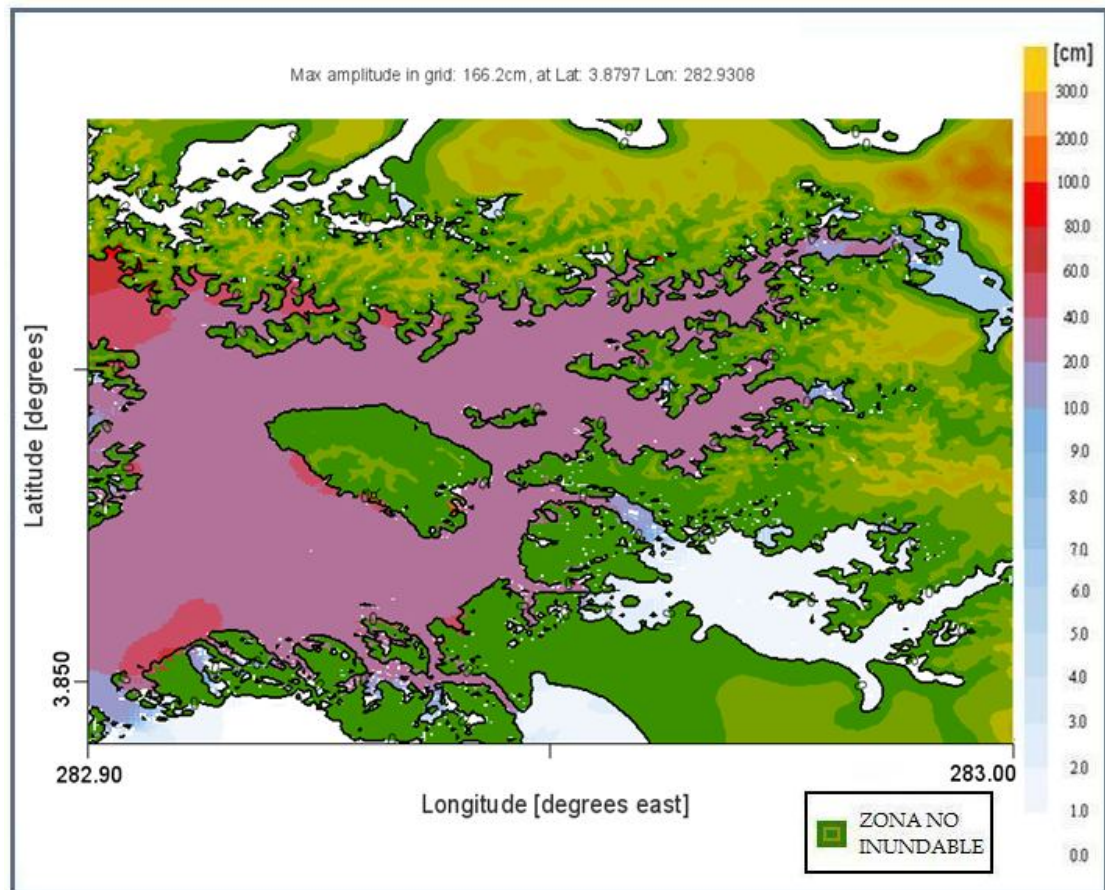


Figura 63. Escenario 27 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Tabla 35. Características del escenario 28 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Escenario 43	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 22 min
Máxima altura de ola (m)	3.243
Nivel de marea	Alta

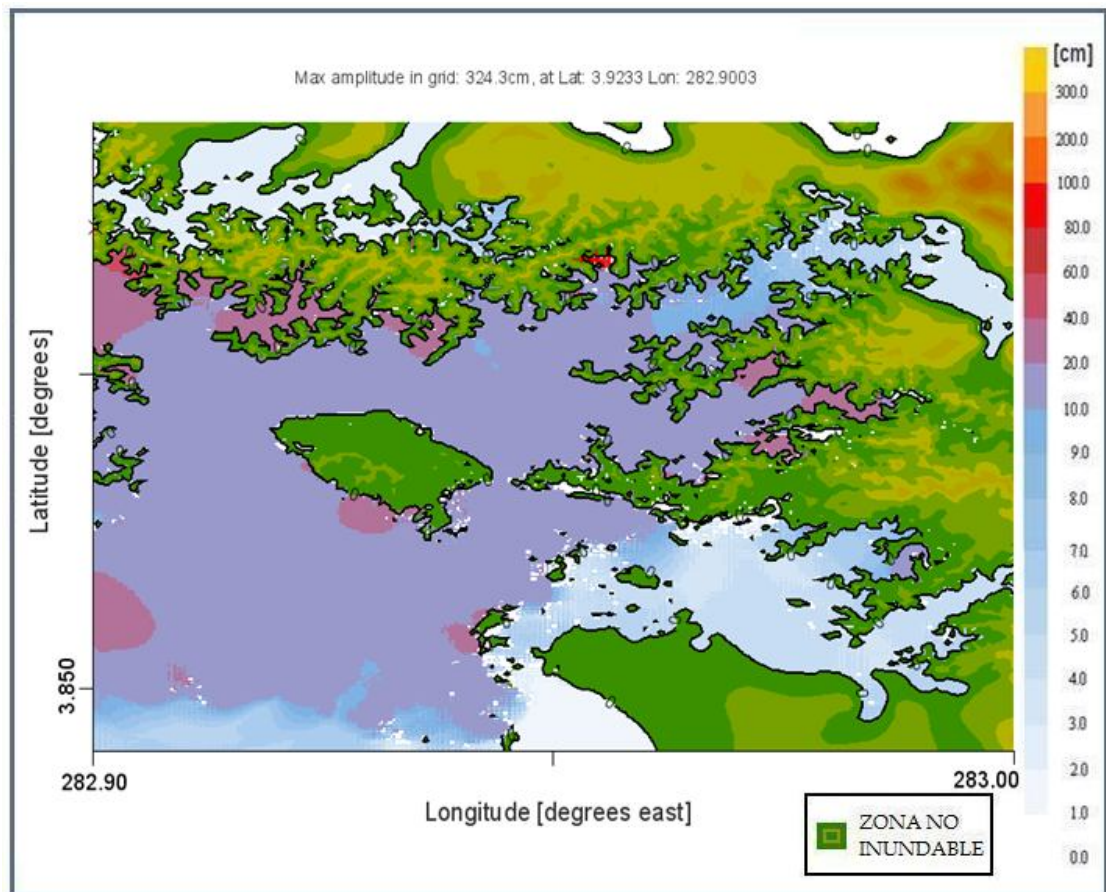


Figura 64. Escenario 28 correspondiente al evento 6 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Tabla 36. Características del escenario 29 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

Escenario 44	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	33 min
Máxima altura de ola (m)	3.791
Nivel de marea	Media

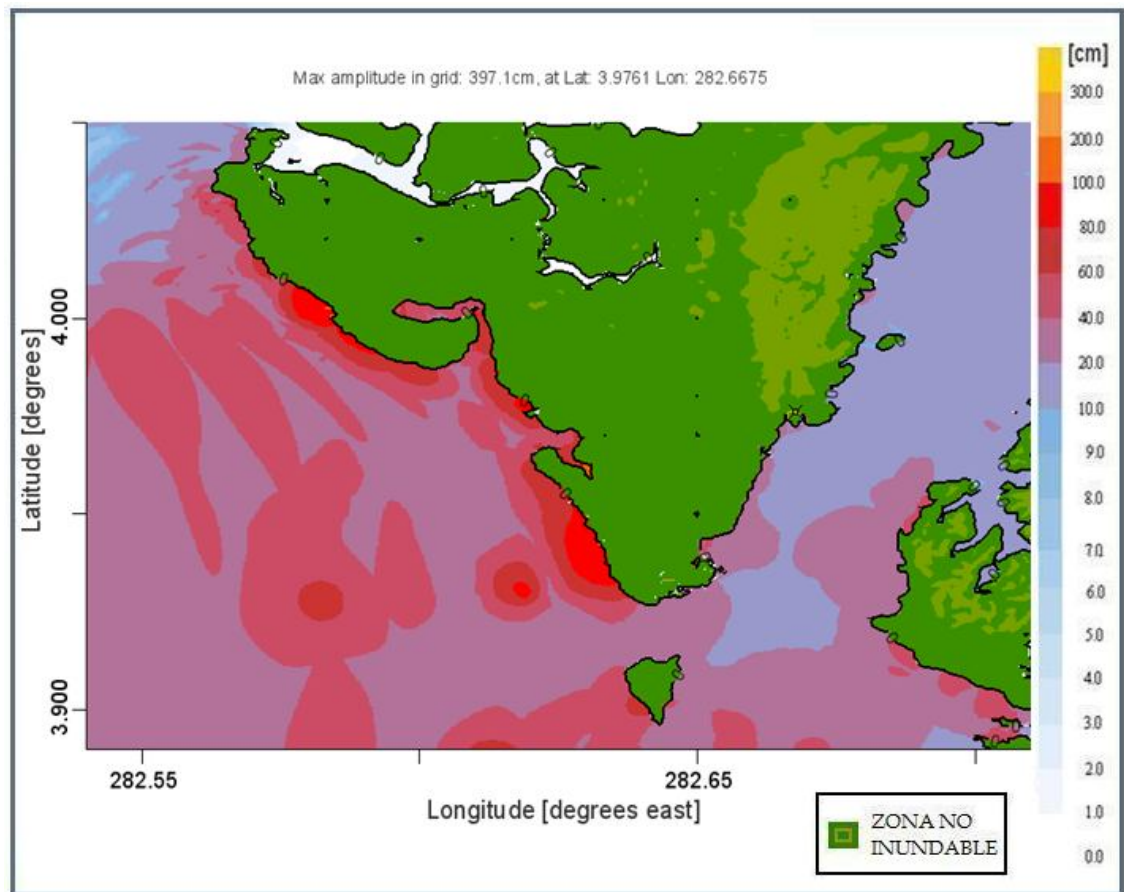


Figura 65. Escenario 29 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

Tabla 37. Características del escenario 30 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

Escenario 45	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	33 min.
Máxima altura de ola (m)	3.823
Nivel de marea	MEDIA

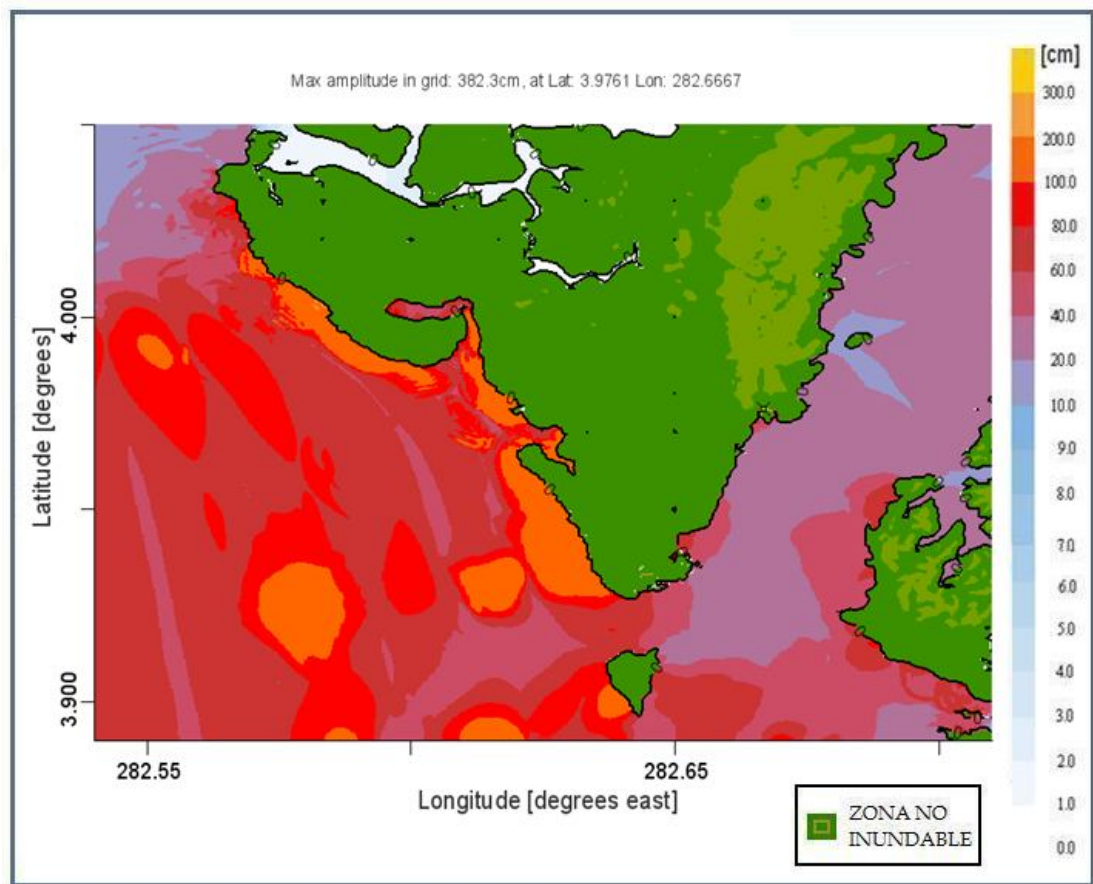


Figura 66. Escenario 30 correspondiente al evento 6 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

EVENTO 7 - ORIGEN CERCANO

Tabla 38. Características del escenario 31 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Escenario 47	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 16 min
Máxima altura de ola (m)	1.685
Nivel de marea	Media

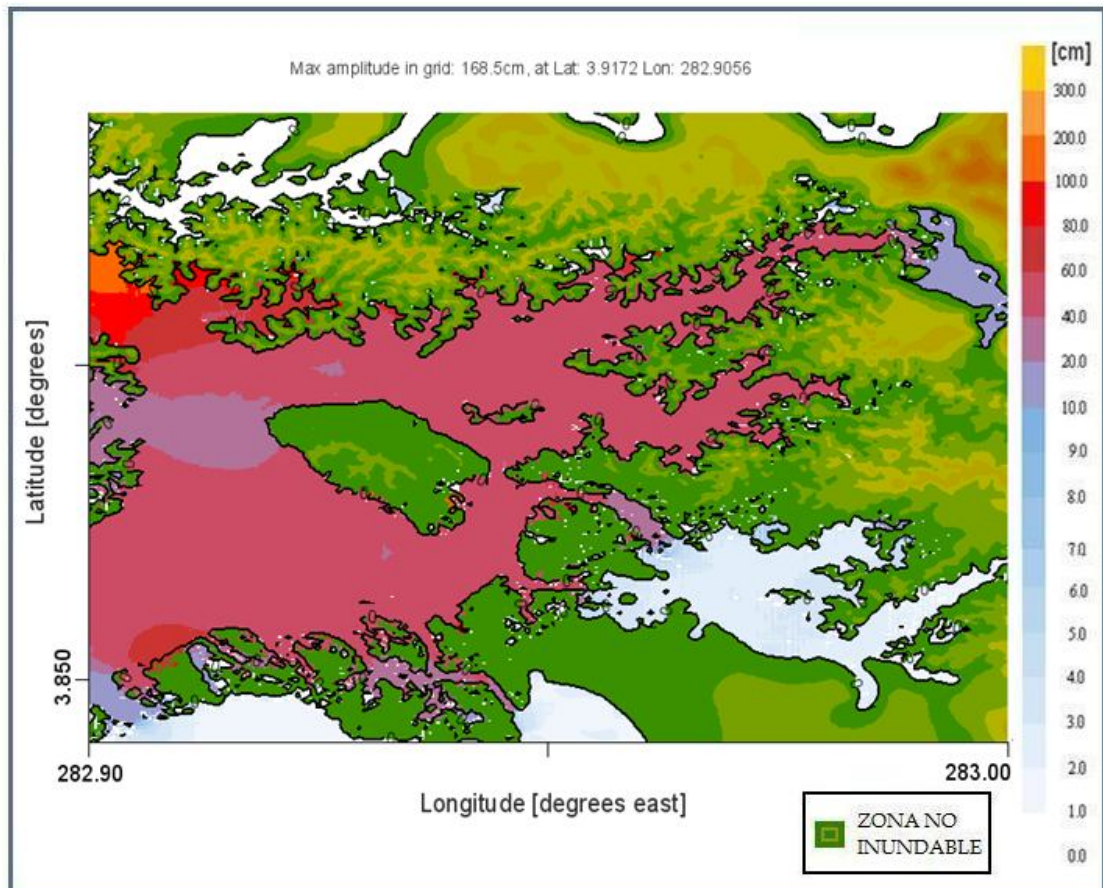


Figura 67. Escenario 31 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Tabla 39. Características del escenario 32 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Escenario 48	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	8.0
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 16 min
Máxima altura de ola (m)	2.571
Nivel de marea	Media

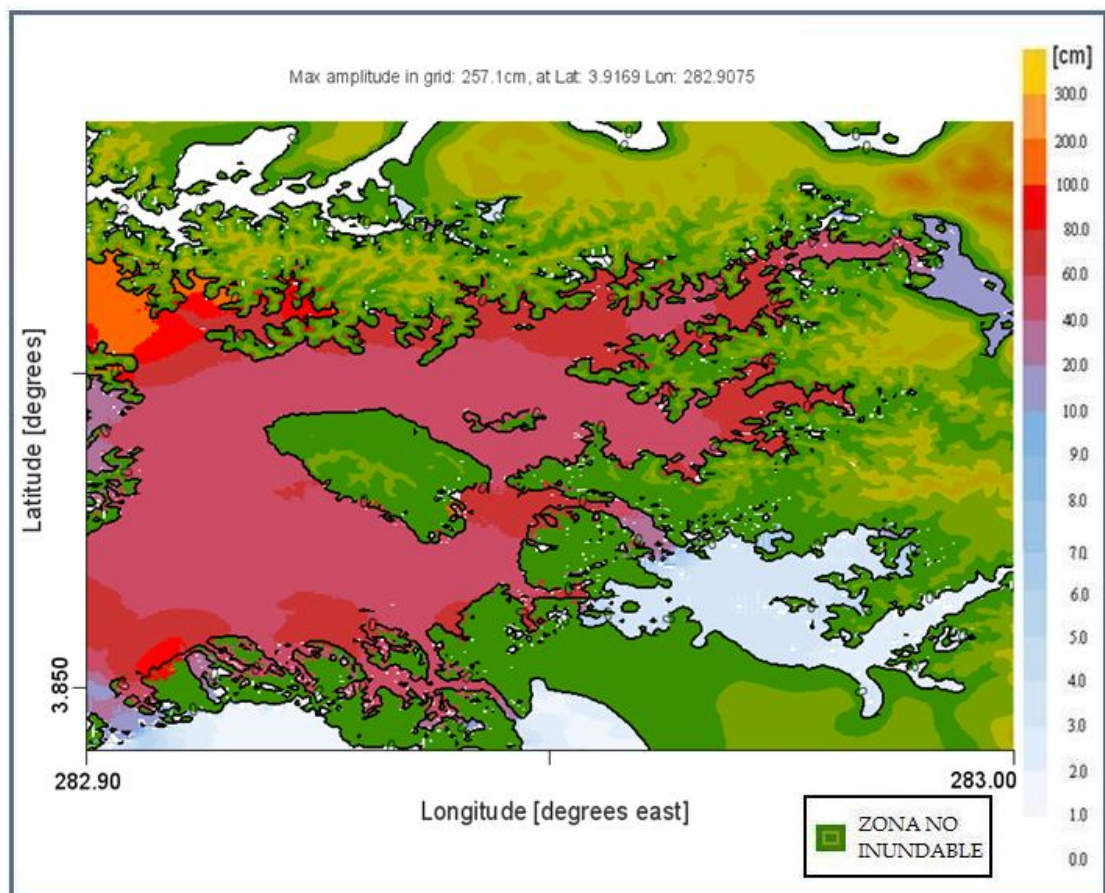


Figura 68. Escenario 32 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Tabla 40. Características del escenario 33 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Escenario 49	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 16 min
Máxima altura de ola (m)	3.038
Nivel de marea	Alta

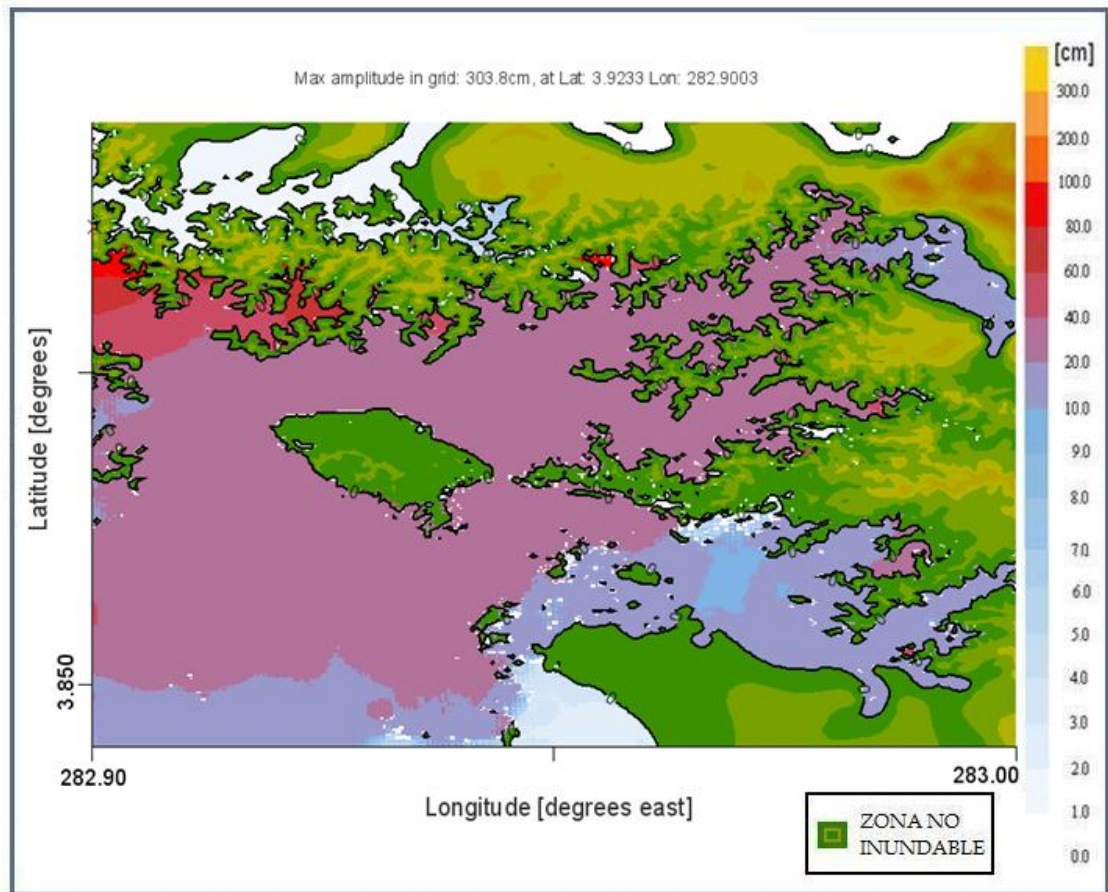


Figura 69. Escenario 33 correspondiente al evento 7 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Tabla 41. Características del escenario 34 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

Escenario 50	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	23 min
Máxima altura de ola (m)	3.611
Nivel de marea	Media

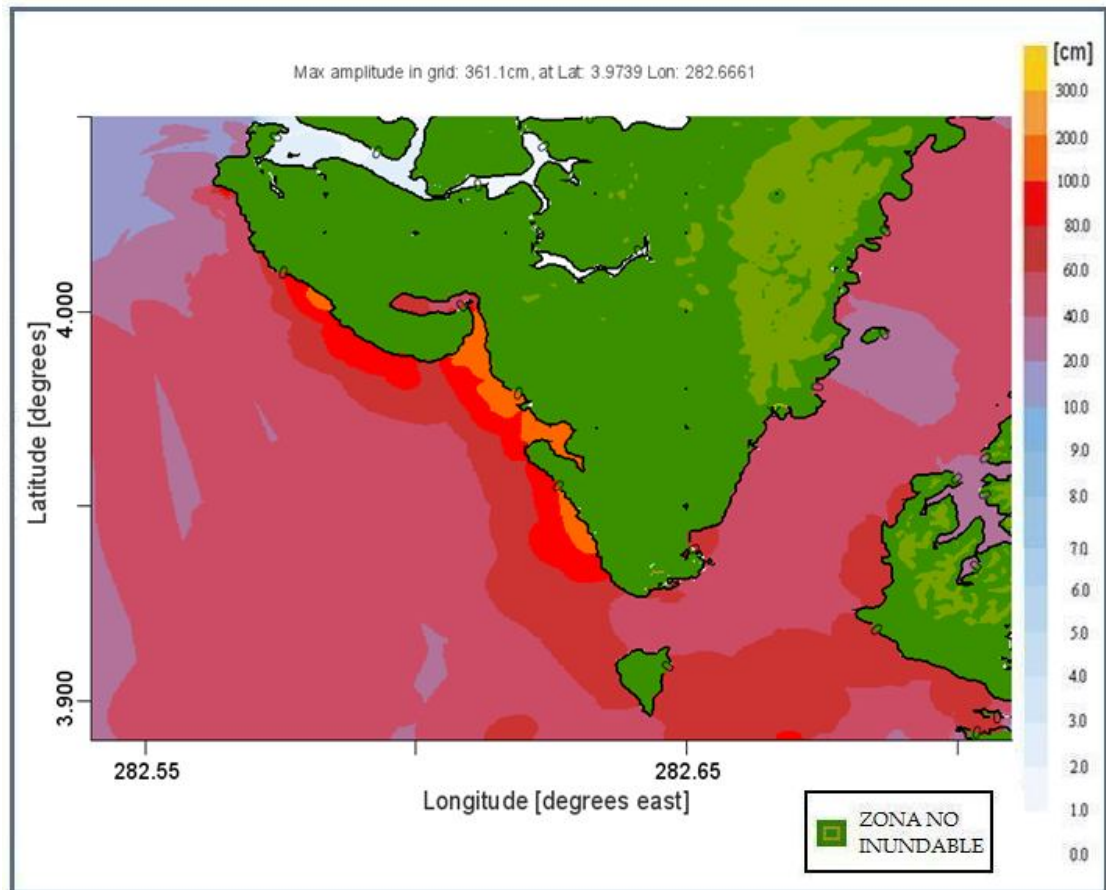


Figura 70. Escenario 34 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

Tabla 42. Características del escenario 35 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

Escenario 52	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	7.9
Tiempo de llegada de la ola a la costa	23 min
Máxima altura de ola (m)	2.72
Nivel de marea	Alta

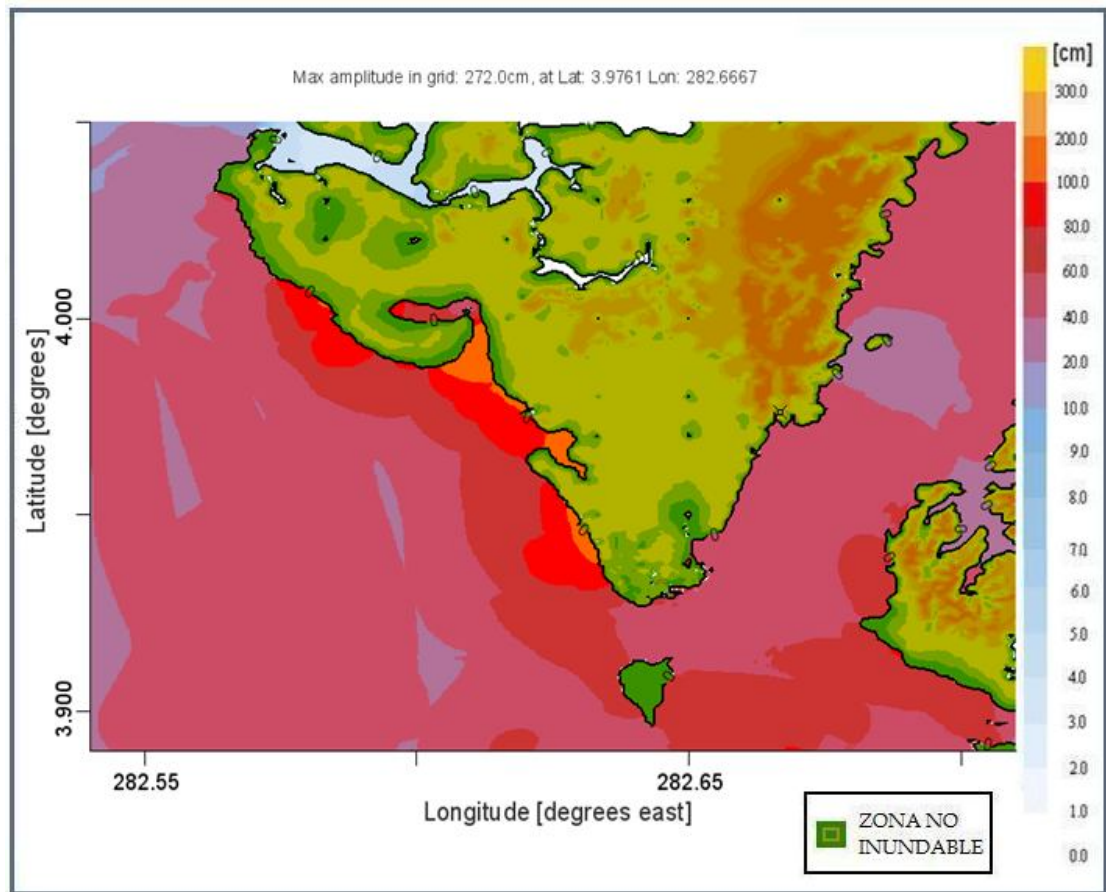


Figura 71. Escenario 35 correspondiente al evento 7 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

ORIGEN LEJANO
EVENTO 1 - ORIGEN LEJANO.

Tabla 43. Características del escenario 36 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Escenario 55	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.5
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 13 min
Máxima altura de ola (m)	3.401
Nivel de marea	Media

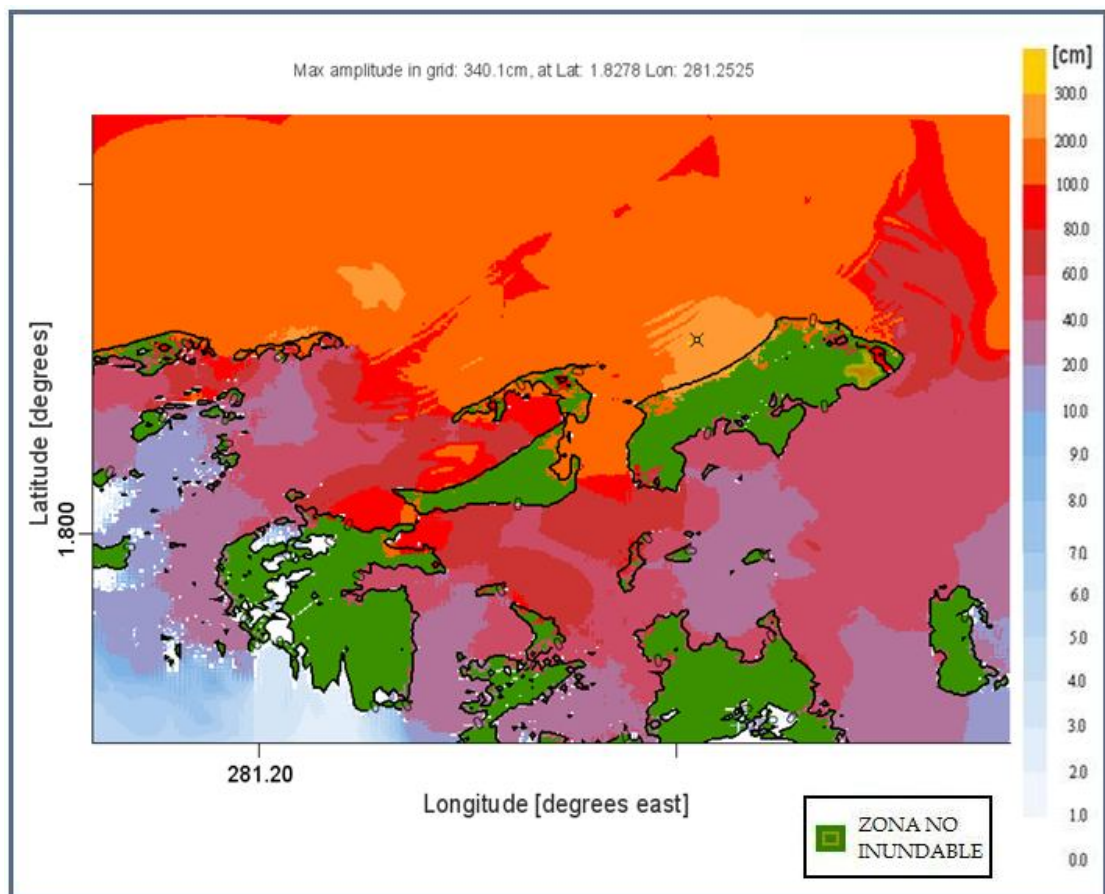


Figura 72. Escenario 36 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Tabla 44. Características del escenario 37 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano

Escenario 57	
Población	Tumaco
Magnitud del sismo (Mw)	8.2
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 13 min
Máxima altura de ola (m)	1.48
Nivel de marea	Alta

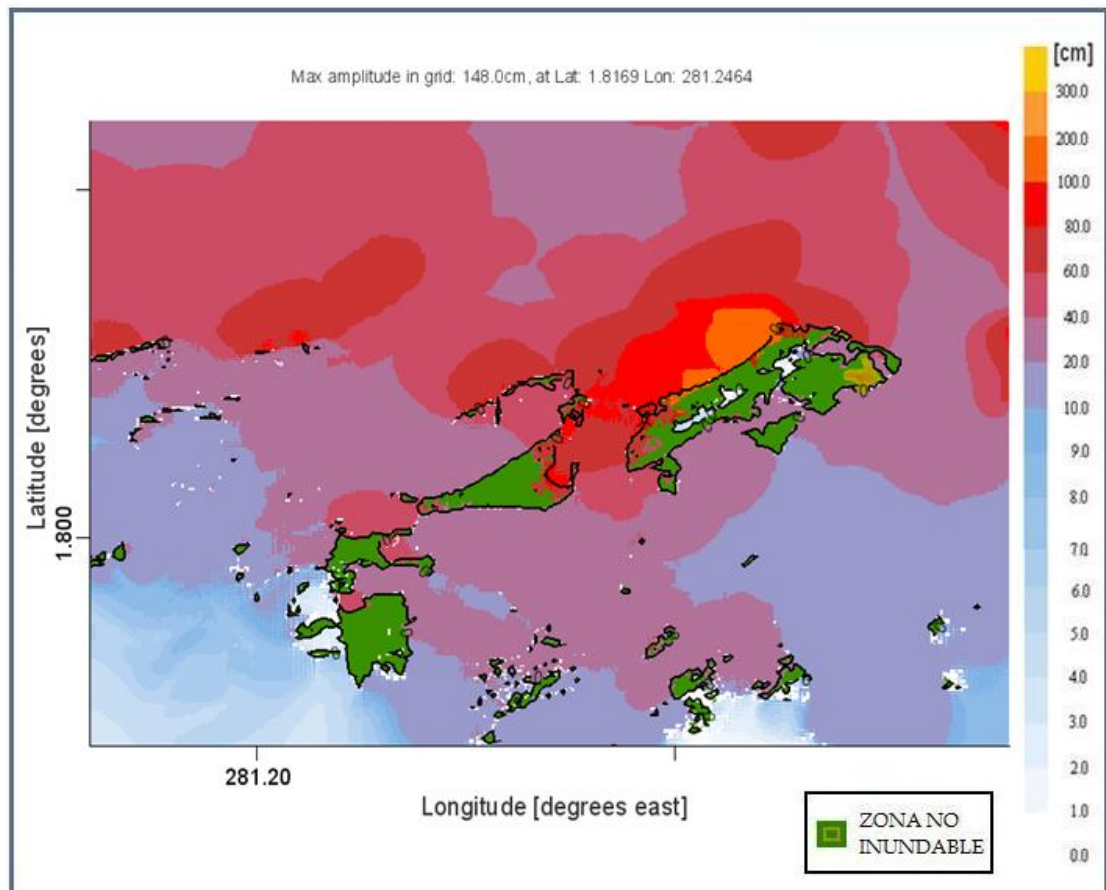


Figura 73. Escenario 37 correspondiente al evento 1 de inundación en Tumaco, Pacífico Colombiano.

Tabla 45. Características del escenario 38 correspondiente al evento 1 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano

Escenario 60	
Población	Buenaventura
Magnitud del sismo (Mw)	8.5
Tiempo de llegada de la ola a la costa	1 h 51 min
Máxima altura de ola (m)	2.071
Nivel de marea	Media

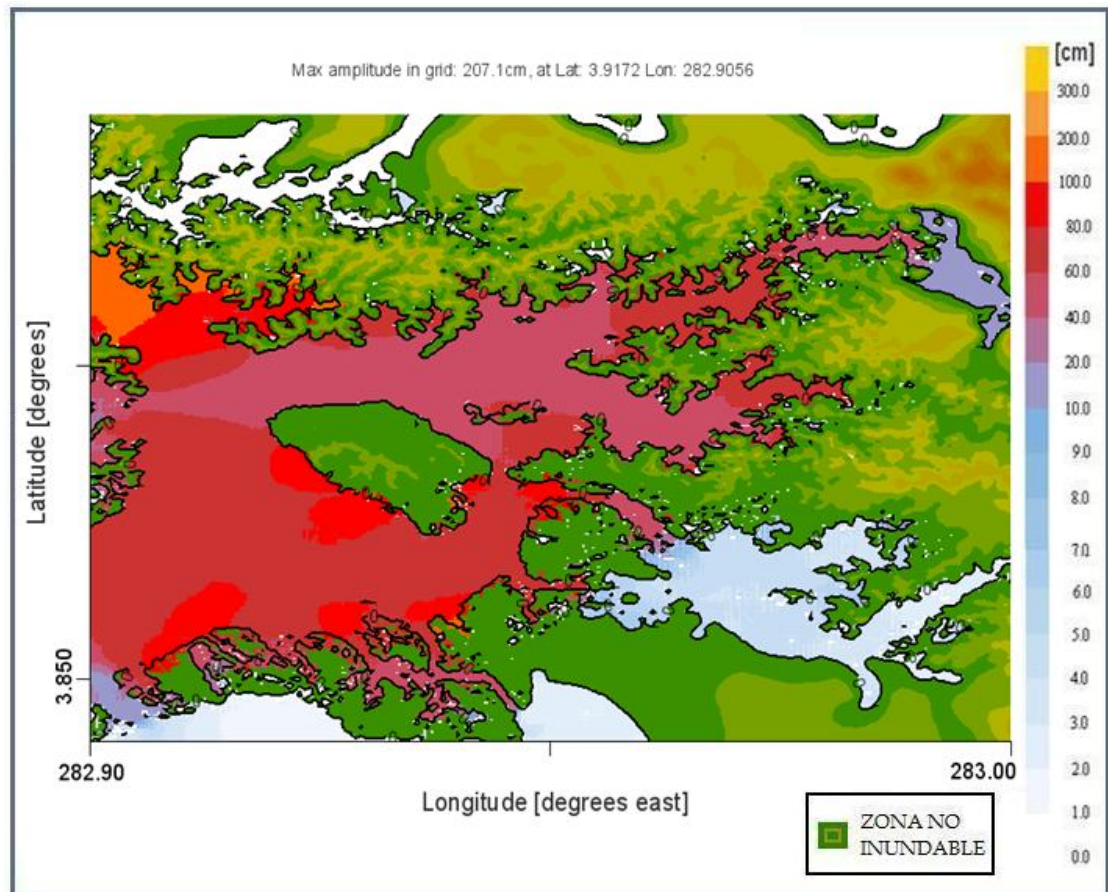


Figura 74. Escenario 38 correspondiente al evento 1 de inundación en Buenaventura, Pacífico Colombiano.

Tabla 46. Características del escenario 39 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

Escenario 65	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	8.5
Tiempo de llegada de la ola a la costa	58 min
Máxima altura de ola (m)	4.01
Nivel de marea	Media

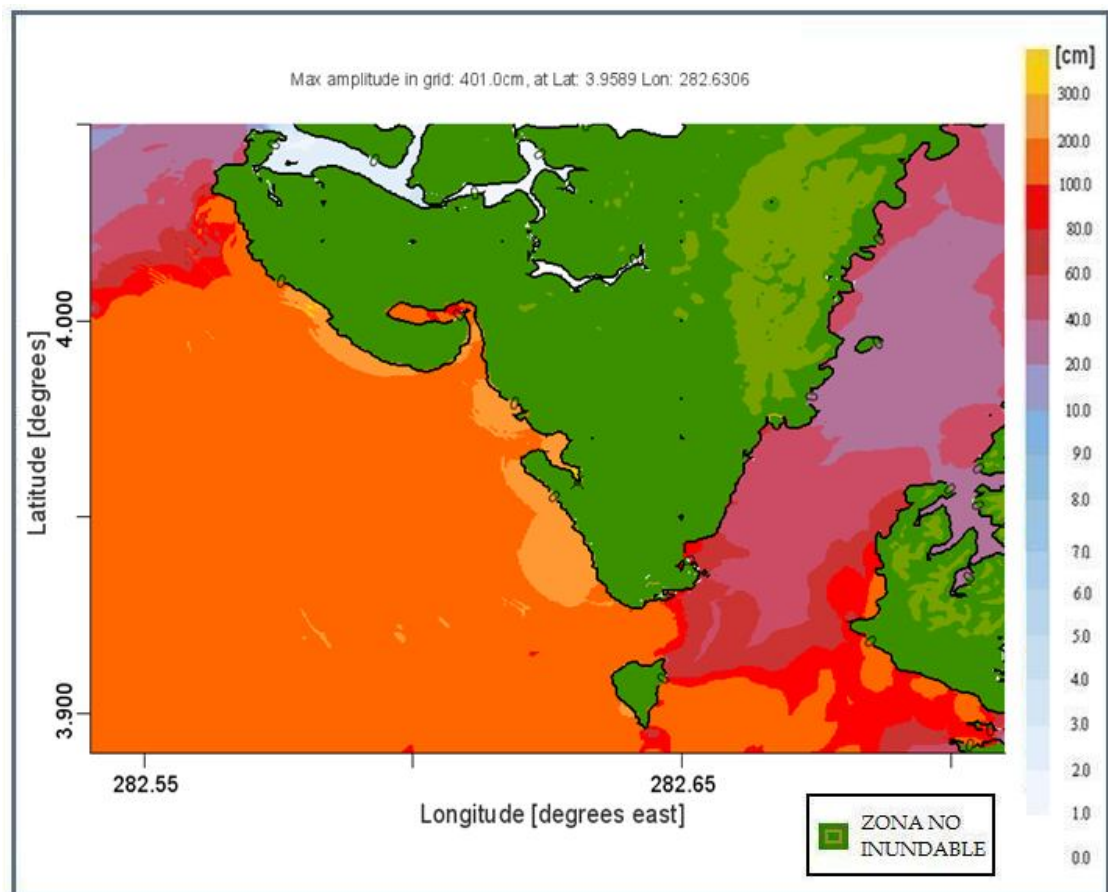


Figura 75. Escenario 39 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.

Tabla 47. Características del escenario 40 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano

Escenario 67	
Población	Málaga
Magnitud del sismo (Mw)	8.2
Tiempo de llegada de la ola a la costa	58 min
Máxima altura de ola (m)	2.71
Nivel de marea	Alta

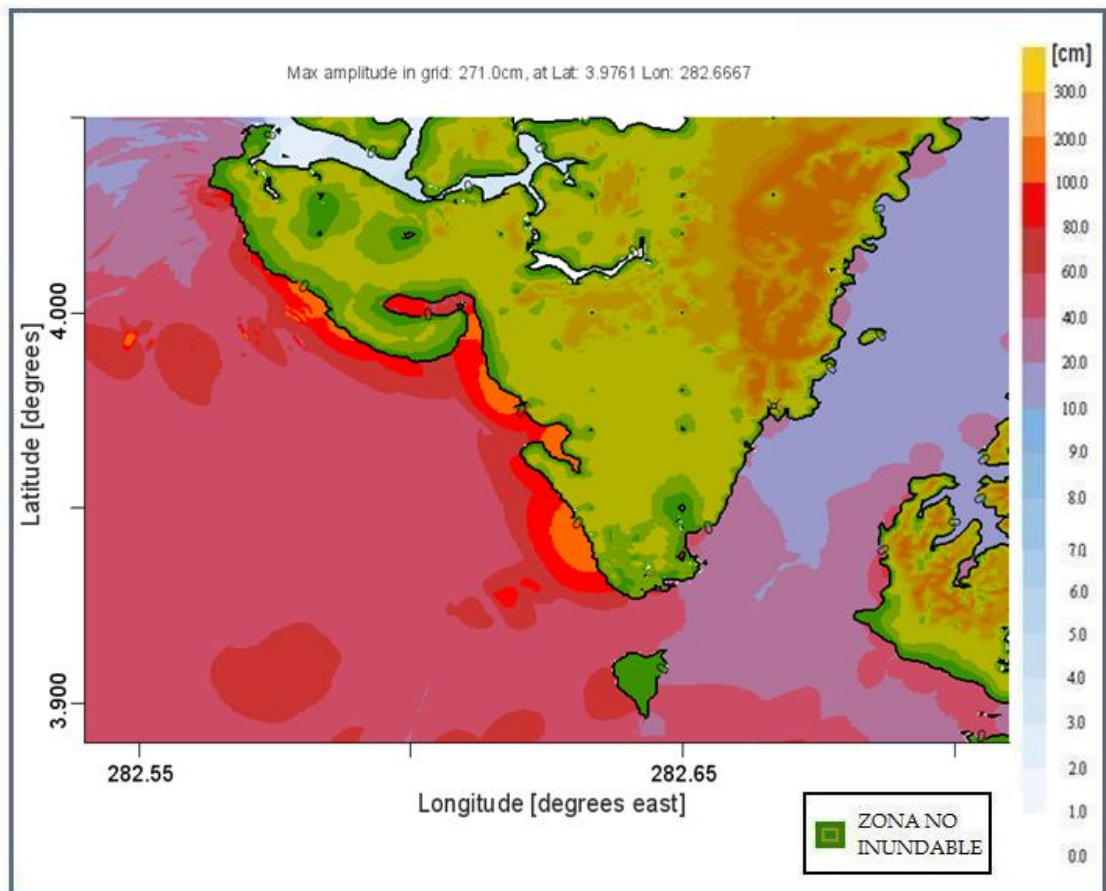


Figura 76. Escenario 40 correspondiente al evento 1 de inundación en Málaga, Pacífico Colombiano.