UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco

Tesis
que para obtener el grado de

Doctora en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas

Presenta:
Elizabeth Trejo Gómez

Director Interno:
Dr. Francisco Javier Nuñez Cornú
Codirector Externo:
Dr. Modesto Ortíz Figueroa

Puerto Vallarta, Jalisco. 19 de Septiembre del 2015.

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Puerto Vallarta, Jalisco, el día 30 de Agosto de 2014, la que suscribe Elizabeth Trejo Gómez, alumna adscrita al Doctorado en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis, bajo la dirección de Dr. Francisco Javier Núñez Cornú y Codirector Dr. Modesto Ortiz Figueroa, y cede los derechos del trabajo intitulado *Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco,* a la Universidad de Guadalajara para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas y datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y director y codirector del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección electrónica: elyt@cuc.udg.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar fuente del mismo.

…….

Elizabeth Trejo Gómez

Resumen de la tesis de Elizabeth Trejo Gómez, presentada para la obtención del grado DOCTORA EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS. Puerto Vallarta, Jalisco, 19 Septiembre de 2014.

Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco.

En este trabajo se caracteriza el peligro directo de inundación por tsunami en Puerto Vallarta Jalisco y se identifican las condiciones de vulnerabilidad que interactúan en la afectación por este peligro. La hipótesis de trabajo consistió en suponer una fuente sísmica tsunamigénica de magnitud Mw8 en la brecha sísmica de Jalisco que en este trabajo se localiza desde Pérula, Jalisco, hasta Bahía de Banderas. Los resultados del modelo numérico de propagación de este tsunami permitieron estimar el peligro directo por tsunami: alturas de inundación y tiempos de arribo en las primeras diez horas después del sismo, y límites de la inundación en las diferentes cuencas hidrológicas. Para validar la metodología de trabajo se realizó la simulación numérica del tsunami del 9 de octubre de 1995, obteniendo resultados acordes a las observaciones de campo de altura y extensión de la inundación que se realizaron ese mismo año en 20 sitios de la costa de Jalisco, una extensión aproximada de 100 km de largo. Para la estimación de la vulnerabilidad se consideró la distribución de la densidad de población; población vulnerable por edad o limitación física; características de la vivienda; nivel de educación; costo de limpieza en el área de afectación; costo de enseres en el área de afectación; ubicación de las instalaciones vitales, y cambio del uso del suelo en la zona de afectación que incrementan la vulnerabilidad por tsunami local. Los resultados del estudio indican que la vulnerabilidad es muy alta en la cuenca Salado, y alta en las cuencas Pitillal y Ameca-Mascota.

Dedicatoria

A Gloria Gómez Viveros, ella lo sabe, en esta ocasión lo escribiré: gracias porque has hecho todo lo mejor que has podido por nosotros tus hijos.

María Remedios García Montoya

Graciela Padilla Gutiérrez

Esperanza Viveros Acosta

Agradecimientos

A Dr. Francisco Javier Núñez Cornú, por la dirección de esta tesis y por formar a sus alumnos como investigadores. Por el apoyo que he recibido desde mis estudios en la Licenciatura y Maestría. Gracias también a la Familia Núñez por la confianza y el buen trato que siempre he recibido.

A Dr. Modesto Ortiz Figueroa, por la codirección de esta tesis, la enseñanza en la Ciencia y por el apoyo invaluable a esta tesis. Gracias también a la Familia Ortiz, por la confianza y el buen trato que recibí durante mi Estancia Académica en *CICESE*.

A Dra. Rosa María Chávez Dagostino, al participar como Asesora del Comité Particular, y quien me ha brindado confianza y apoyo desde mis estudios en la Maestría, asimismo por apoyar en la gestión de trámites para la Estancia Académica en la Universidad de Oviedo, España.

A Dra. Araceli Zamora Camacho y Dr. Fabio Germán Cupul Magaña, Integrantes del Jurado del examen doctoral, y por sus aportaciones invaluables a esta tesis.

A Universidad de Guadalajara y al Centro de Sismología y Volcanología de Occidente (*SisVoc*), por permitirme el acceso a los laboratorios, equipo e instalaciones.

A CONACYT por la beca que me otorgó para estudiar el Posgrado Doctorado en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas, Universidad de Guadalajara.

A CONACYT por el soporte al Proyecto CONACYT – FOMIXJAL 2008 –96539 (2009), *Red Sismológica Telemétrica de Jalisco (RESAJ).*

A CONACYT por el soporte al Proyecto CONACyT-FOMIXJal M0010-2012-08-189963, *Caracterización del Peligro Sísmico y Tsunamigénico asociado a la estructura cortical del contacto Placa de Rivera-Bloque Jalisco (TSUJAL)*.

A Ministerio de Ciencia e Innovación, Dirección General de Investigación y Gestión del Plan Nacional de I+D+i, España, por el soporte al Proyecto de Investigación CGL2011-29474-C02-01, *TSUJAL*.

Contenido

		Página
	Introducción……	**1**
	Hipótesis de trabajo……	**3**
	Objetivo General…….....	**3**
	Objetivos Particulares……	**4**
	Área de Estudio……..…….	**4**
	Metodología…….	**6**
1	**Simulación Numérica del Tsunami del 9 de Octubre de 1995, en Bahía Tenacatita, Jalisco.**	
1.1	Antecedentes..……...…….……...	**7**
1.2	Efectos del Tsunami de 1995 en la Costa sur de Jalisco……..	**16**
1.3	Modelo Numérico del Tsunami de 1995 en la Costa Sur de Jalisco ……...	**19**
1.4	Resultados de la Simulación del Tsunami de 1995……..	**25**
2	**Simulación Numérica del Tsunami Local Hipotético en la Brecha Sísmica de Jalisco.**	
2.1	Fuente Sísmica Hipotética en la Región de Estudio…….....	**34**
2.2	Estimación de Alturas del Tsunami……..	**35**
2.3	Estimación de los Tiempos de Arribo del Tsunami……..	**38**

Contenido (continuación)

Página

3 Peligro de inundación por tsunami local en Puerto Vallarta

3.1 Gestión del Riesgo..……...…….……..... **50**

3.2 Caracterización del Peligro de Inundación por Tsunami Local Hipotético en Puerto Vallarta……..... **57**

4 Vulnerabilidad

4.1 La Importancia de estimar la Vulnerabilidad por Tsunami Local…… **69**

4.2 Dinámica Demográfica del Municipio de Puerto Vallarta……... **77**

4.3 Método para el Cálculo la Vulnerabilidad de la Población, Vivienda e Instalaciones Vitales por tsunami local en Puerto Vallarta.……. **83**

5 Etapas para el cálculo de la vulnerabilidad por tsunami local en Puerto Vallarta

5.1 Distribución de la Densidad de Población…… **88**

5.2 Población vulnerable por Edad o Limitación Física……..... **90**

5.3 Población Ocupada……... **94**

5.4 Distribución de la Población de Clase Media por las Características de la Vivienda…… **95**

5.5 Distribución de la Población de Clase media por el Nivel de Educación…. **96**

5.6 Costo de Limpieza en el Área de Afectación……... **96**

5.7 Costos de Enseres en el Área de Afectación……. **98**

5.8 Cambios del Uso del Suelo en la Zona de Afectación que Incrementan la Vulnerabilidad……..... **98**

Contenido (continuación)

Página

5.9 Ubicación de las Instalaciones Vitales…… **101**

5.10 Vulnerabilidad por Tsunami Local en Puerto Vallarta……... **102**

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones en la Zona de Estudio……... **105**

6.2 Investigaciones Futuras en la Zona de Estudio……... **106**

6.3 Investigaciones Futuras en la Región de Estudio…… **107**

Bibliografía…… **108**

Mapas

Mapa 1…… **115**

Mapa 2…… **116**

Mapa 3…… **117**

Mapa 4…… **118**

Mapa 5…… **119**

Mapa 6…… **120**

Mapa 7…… **121**

Mapa 8…… **122**

Mapa 9…… **123**

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura		Página
1	Polígono del área de estudio en color rojo, a) Zona urbana de Puerto Vallarta; b) Municipio de Puerto Vallarta y municipios colindantes; c) Estados de Jalisco y Nayarit. Fuente: Carta Topográfica escala 1: 50 000 por INEGI (2002) y Núñez-Cornú et al. (2006)……	5
2	Marco tectónico del Bloque de Jalisco, Núñez-Cornú (2011). Se señalan las características tectónicas y volcánicas principales.…….	7
3	Mapa de sismos históricos frente al Bloque Jalisco, de 1937-2003, (Nuñez-Cornú, 2011). Los números se relacionan con la descripción en la Tabla 1. …….....…….	9
4	Área de ruptura de los terremotos de junio de 1932, octubre de 1995 y brechas sísmicas (gaps), existentes en la región. Modificado de Rutz López et al. (2013)…….	9
5	Localidades en la región afectadas por los tsunamis de 1932 y 1995. ……	12
6	Inundación y fisuras en el Templo de La Manzanilla (Ortiz et al, 1995)…..	16
7	Parámetros que definen el movimiento de una falla. Fuente: Udias y Mezcua, 1997…….....…….	20
8	Perfil de un tsunami al impactar la costa. Fuente: UNESCO, citado por Levin y Nosov, 2009…….	22
9	Mapa de la región y ubicación del plano fractura utilizado en el modelo numérico del tsunami de 1995. Los puntos negros indican los sitios en los que se midieron el run up del tsunami por Ortiz et al. (1995). Los triángulos negros indican los VTG utilizados en el modelo para calcular run up teórico de 1995. Para la costa sur de Jalisco se tienen VTG 1 al VTG 7. Para el norte de Colima desde el VTG 8 al VTG 10……	26

Lista de Figuras (continuación)

Capítulo 1

Figura		Página
10	Comparación de los valores del run up teórico (hm) y el que fue medido en 1995 a lo largo del plano de fractura (hc); a) El plano de fractura propuesto en este trabajo y que se muestra en la Figura 9; b) El plano de fractura 30 km más alejado de la costa; c) El plano de fractura 30 km en sentido NW; d) El plano de fractura 30 km en sentido SE……	28
11	Tiempos de arribo en minutos en la región de estudio, con de modelo de generación y propagación del tsunami del 9 de octubre de 1995……..	30
12	Alturas de onda y los tiempo de arribo para las primeras 10 horas en los VTG para simular la generación y propagación del tsunami del 9 de octubre de 1995…….	31
13	Extensión de inundación en la costa del tsunami de 1995, por la altura en m para cada VTG respecto al nivel medio del mar……...	33

Capítulo 2

Figura		Página
14	Tiempos de arribo del tsunami teórico en minutos, el plano de fractura se ubico frente a Puerto Vallarta……	35
15	Alturas de onda máxima del tsunami local sintético frente a Puerto Vallarta, VTG 14 al 18……..	37
16	Tiempos de arribo del tsunami teórico en minutos, el plano de fractura se ubico frente a Puerto Vallarta……	40
17	Inundación estimada para Puerto Vallarta a partir de la simulación de tsunami local después de un sismo de gran magnitud …….…….	41
18	Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami sintético en los sensores de presión teóricos VTG 1, VTG 2 y VTG 3…….	42
19	Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami sintético en los sensores de presión teóricos VTG 4, VTG 5 y VTG 6…….	43

Lista de Figuras (continuación)

Capítulo 2

Figura		Página
20	Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami sintético en los sensores de presión teóricos VTG 7, VTG 8 y VTG 9…….	44
21	Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami sintético en los sensores de presión teóricos VTG 10, VTG 11 y VTG 12……...	45
22	Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami sintético en los sensores de presión teóricos VTG 13, VTG 14 y VTG 15……...	46
23	Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami sintético en los sensores de presión teóricos VTG 16, VTG 17 y VTG 18……...	47
24	Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami sintético en los sensores de presión teóricos VTG 19, VTG 20 y VTG 21……...	48
25	Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami sintético en los sensores de presión teóricos VTG 22, VTG 23 y VTG 24……....	49

Capítulo 3

Figura		Página
26	Diagrama de flujo de la gestión del riesgo. Modificado de Smith (1996)....	55
27	Superficie de inundación por tsunami local sintético en Puerto Vallarta, según la ocurrencia de marea……	59
28	Cuencas hidrográficas en la zona de estudio. Fuente: Núñez-Cornú, et al. (2006)……	60
29	Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Ameca-Mascota..	62
30	Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Salado……..	63
31	Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Pitillal……..	64
32	Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Camarones……..	65
33	Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Cuale……...	66

Lista de Figuras (continuación)

Capítulo 3

Figura		Página
34	Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Nogalito……..	67
35	Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Mismaloya……..	68

Capítulo 4

Figura		Página
36	Modelo de los tiempos de arribo del tsunami de Sumatra en 2004, las isolíneas son a intervalos de 30’. Fuente: Russian Academy of Science, (2014)……	70
37	Muro de contención (barrera) para tsunamis en Japón. Fotografía: River Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan (ITIC, 2014)……..	73
38	Torre Nishiki en Japón. Fuente: FEMA, 2008……..	74
39	Total de habitantes (INEGI, 2002), para el área de estudio de 1970 a 2010, a) localidades menores a 9000 habitantes, El Pitillal fue conurbado a Puerto Vallarta después de 1980, b) localidades con mayor población……...	78
40	Pirámide de población del municipio de Puerto Vallarta para los años 2005 y 2010, los datos son del los censos de población, por INEGI……	79
41	Proporción de la extensión urbana de los años 1970 a 2012 en la zona de estudio……	80
42	Crecimiento de población vulnerable al peligro de inundación del tsunami por AGEB. En el cálculo se consideró la población base los datos del censo del 2010 de INEGI……..	83

Lista de Figuras (continuación)

Capítulo 5

43 Distribución de las frecuencias de los índices de densidad de población en el área de estudio……... 88

44 Distribución de la frecuencia de los índices de densidad de población en el área de estudio, a) con el valor estándar z; b) con la clasificación en ArGis 10 y cortes naturales "Jenks"……. 90

45 a) Carta topográfica de INEGI en la década 1970; la línea azul es la afectación por tsunami local en marea alta, b) el cálculo de superficies con vegetación (reportada por Núñez-Cornú, et al., 2006), y en la actualidad es de uso urbano…… 100

46 Erosión de la playa desembocadura del río Pitillal. Fotografía de Suárez Plascencia. Fuente Núñez-Cornú, et al. (2006)……. 101

Lista de Tablas

Capítulo 1

Tabla		Página
1	Relación de algunos sismos históricos con epicentros en la costa, 1937-2003. Ver también la Figura 2. Tomado de Nuñez-Cornú, 2011.……..……	10
2	Percepción del tsunami de 1995 en la costa sur de Jalisco, basado en Ortiz et al., 1995…….....	15
3	Efectos del tsunami de 1995 en la costa sur de Jalisco (Ortiz et al., 1995)…….....……...	17
4	Magnitud del tsunami en la escala Imamura-Iida (m_{II}) basado en run up medido en la costa sur de Jalisco por Ortiz et al. (1995).....	18
5	Comparación entre la altura del run up medido en la costa (Ortiz et. al., 1995), y el resultado según el modelo de generación y propagación de tsunami, con una fuente sísmica similar a la del terremoto del 9 de octubre de 1995…….....	29
6	Tiempos de arribo de las ondas inicial y run up en la simulación del tsunami de 1995, para el sur de Jalisco y norte de Colima……...	32

Capítulo 2

Tabla		Página
7	Alturas de las ondas inicial y run up del tsunami hipotético en la región. .	36
8	Tiempo de arribo de las ondas inicial y run up del tsunami hipotético para la región de estudio……...	39

Lista de Tablas (continuación)

Capítulo 3

Tabla		Página
9	Ajuste del valor de las alturas del tsunami hipotético en Puerto Vallarta con el cambio de marea……	58
10	Superficie de inundación del tsunami local hipotético en Puerto Vallarta...	61
11	Extensión de inundación en la simulación del tsunami local hipotético en Puerto Vallarta……..	61

Capítulo 4

Tabla		Página
12	Estimación de habitantes vulnerables al peligro de inundación del tsunami……..	82

Capítulo 5

Tabla		Página
13	Valores para la ponderación de la vulnerabilidad de la población por edad o limitación física……..	92
14	Ponderación de la vulnerabilidad de la población en un polígono por condición de edad o limitación física……...	93
15	Costo de limpieza en la simulación de afectación del tsunami local en marea baja…….	97
16	Costo de limpieza en la simulación de afectación del tsunami local en marea alta……..	98
17	Datos de vulnerabilidad para población y vivienda en la zona de afectación del tsunami local hipotético y marea alta……	103
18	Datos de vulnerabilidad en instalaciones en la zona de afectación del tsunami local hipotético y marea alta……...	104

Introducción

Comprender cómo se genera un tsunami, cómo se propaga y cuáles son sus efectos al impactar a una comunidad, es fundamental para reducir la pérdida de vidas y de bienes. En la franja costera deben comprenderse como parte de los sistemas costeros e integrarse al manejo de zonas costeras. Es por ello importante describir de manera general los mecanismos de generación y propagación de tsunamis en la costa occidental de México. En esta costa la mayoría de los tsunamis han sido de origen sismotectónico (Farreras, 1997), y los menos por deslizamiento de grandes masas de sedimento en el talud continental. En ambos casos, la dislocación súbita de una gran área del lecho marino en el talud continental produce a su vez un levantamiento de toda la columna de agua. La fuerza de gravedad, siempre presente, tiende a regresar a la superficie del océano a su posición original dando origen a la primera ola del tsunami. En mar abierto, en la parte profunda del talud, el tsunami alcanza una velocidad de propagación de 800 km/hora, mientras que en su proximidad a la costa su velocidad disminuye a 100 km/hora, dando lugar a que la parte "posterior" del tsunami vaya alcanzando continuamente su "frente", hecho que explica el continuo aumento de amplitud del tsunami conforme éste se aproxima a la costa.

Entre los tsunamis documentados que más han afectado la costa de Jalisco, se encuentran los que ocurrieron en 1932, dos por sismos de gran magnitud y uno de ellos probablemente por deslizamiento de los sedimentos del Río Armería. El más reciente ocurrió e inundó la costa sur de Jalisco fue el 9 de octubre de 1995 a consecuencia de un sismo (M8.0) con epicentro frente a Bahía Tenacatita.

En estas costas, en donde los tsunamis generados localmente son recurrentes, se esperan mejores resultados de la gestión del riesgo cuándo si se implementan acciones preventivas y de mitigación del peligro para modificar la vulnerabilidad. Una adecuada gestión del riesgo establece acciones preventivas para minimizar la vulnerabilidad ante un peligro. En este caso, es la educación continua dirigida a la población la que le permitirá identificar los lugares vulnerables y los lugares seguros para tomar medidas de autoprotección. Sin embargo, es necesaria la implementación de protocolos ante la ocurrencia del peligro, por los diferentes niveles de gobierno.

El aporte de este proyecto de investigación *Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco*; es identificar el peligro por inundación y la vulnerabilidad de la población si ocurriera un tsunami local en la brecha sísmica de la costa norte de Jalisco. Esta información es parte de la gestión del riesgo, accesible y fundamental en un plan operativo ante la ocurrencia de un tsunami local.

En el capítulo uno *Simulación numérica del tsunami del 9 de octubre de 1995 en Bahía Tenacatita, Jalisco* se determinaron las condiciones iniciales de este tsunami local que afectó la costa sur de Jalisco. En esta parte del trabajo se generó un modelo simplificado de la fuente sísmica para reproducir adecuadamente las observaciones de altura y extensión de inundación por el tsunami, en una zona de estudio de 100 km a lo largo de la costa sur de Jalisco, desde Chalacatepec hasta Barra de Navidad. Un equipo dirigido por Ortiz et al. (1995), midió la altura y extensión en sitios con evidencias físicas del tsunami como la erosión de playa, daños en las edificaciones y rastros en la vegetación.

En el capítulo dos, *Simulación Numérica del tsunami local hipotético en la brecha sísmica de la costa de Jalisco,* se propone un modelo para una fuente sísmica hipotética en la brecha de la costa norte de Jalisco y sur de Nayarit con las condiciones iniciales del tsunami del 9 de octubre de 1995 que se validaron en el primer capítulo. Los resultados fueron la estimación de las alturas y tiempos de arribo del tsunami en 24 sitios distribuidos en las costas de Nayarit, Jalisco y Colima.

En el capítulo tres *Peligro de inundación por tsunami local en Puerto Vallarta* Se presentan las evaluaciones del peligro por inundación por tsunami local en el área urbana de Puerto Vallarta, delimitado en ocho micro-cuencas, para dos escenarios de tsunami local: en ocurrencia de marea baja y en marea alta. Se midió la superficie inundada y la extensión de la inundación basados en la estimación de las alturas del tsunami y sus tiempos de arribo calculados en el capítulo dos. En este capítulo también se presenta una breve descripción de dos paradigmas para calcular un riesgo y diseñar estrategias para evitar un desastre.

En el capítulo cuatro *Vulnerabilidad en Puerto Vallarta por tsunami local* se presenta la importancia de calcular la vulnerabilidad para este peligro con el paradigma de la

interpretación estructural del riesgo. También características de la dinámica demográfica del municipio y la proyección de crecimiento de la población en la zona de estudio.

En el capítulo cinco *Etapas para el Cálculo de la Vulnerabilidad por Tsunami Local en Puerto Vallarta* se describe el desarrollo del trabajo. La vulnerabilidad es el resultado de la interacción de condiciones identificadas en el territorio de estudio y para este peligro como lo son: la distribución de población, características socio-económicas e instalaciones altamente vulnerables. La vulnerabilidad se cuantificó con las mejores respuestas de un modelo teórico de la fuente sísmica en el gap de la costa norte de Jalisco y un modelo del terreno con la escala que representa las condiciones locales de vulnerabilidad.

Hipótesis

Es posible determinar los efectos de un tsunami local generado por un terremoto de gran magnitud en la Trinchera Mesoamericana, con un algoritmo sintetizador de tsunamis y un modelo digital del terreno a una escala local para representar la vulnerabilidad en área urbana de Puerto Vallarta.

Objetivo General

Caracterizar la vulnerabilidad por zonas en el área urbana de Puerto Vallarta ante un tsunami local generado por un terremoto en la brecha sísmica de Jalisco; al utilizar un modelo numérico de propagación de tsunamis, prescribiendo la dislocación cosísmica y la propagación de las olas sobre un modelo digital del terreno que muestra las condiciones locales.

Objetivos Particulares

1. Analizar el efecto de tsunamis en la costa de Jalisco producido por fuentes símicas hipotéticas.

2. Obtener el modelo digital del terreno que mejor describa las condiciones locales de la Bahía de Banderas con batimetría y topografía.

3. Evaluar la vulnerabilidad por zonas en Puerto Vallarta

4. Generar diferentes mapas temáticos y el de vulnerabilidad en la zona urbana de Puerto Vallarta.

Área de estudio

El área de estudio comprende la zona urbana de la Ciudad de Puerto Vallarta, (Figura 1), con coordenadas extremas: 105º 20’ W, 20º 45’ N y 105º 11’ W, 20º 30’ N; del municipio del mismo nombre y dentro de la región económica Costa Norte, en el Estado de Jalisco. El municipio de *Puerto Vallarta* limita con los municipios de Jalisco: en dirección nororiente *San Sebastián del Oeste*, hacia el suroriente *Mascota y Talpa de Allende*, al sur *Cabo Corrientes*. Al norte limita con municipio de *Bahía de Banderas*, Estado de Nayarit; y al occidente con el Océano Pacífico.

La parte urbana del municipio de Puerto Vallarta es una franja en la costa, aún sigue su expansión en dirección hacia la montaña, de forma general en las direcciones oriente y norte. Para el resto del municipio, las localidades menores a 2500 habitantes se encuentran en la región fisiográfica Sierra Madre Sur, estas últimas quedan excluidas del peligro directo por tsunami local.

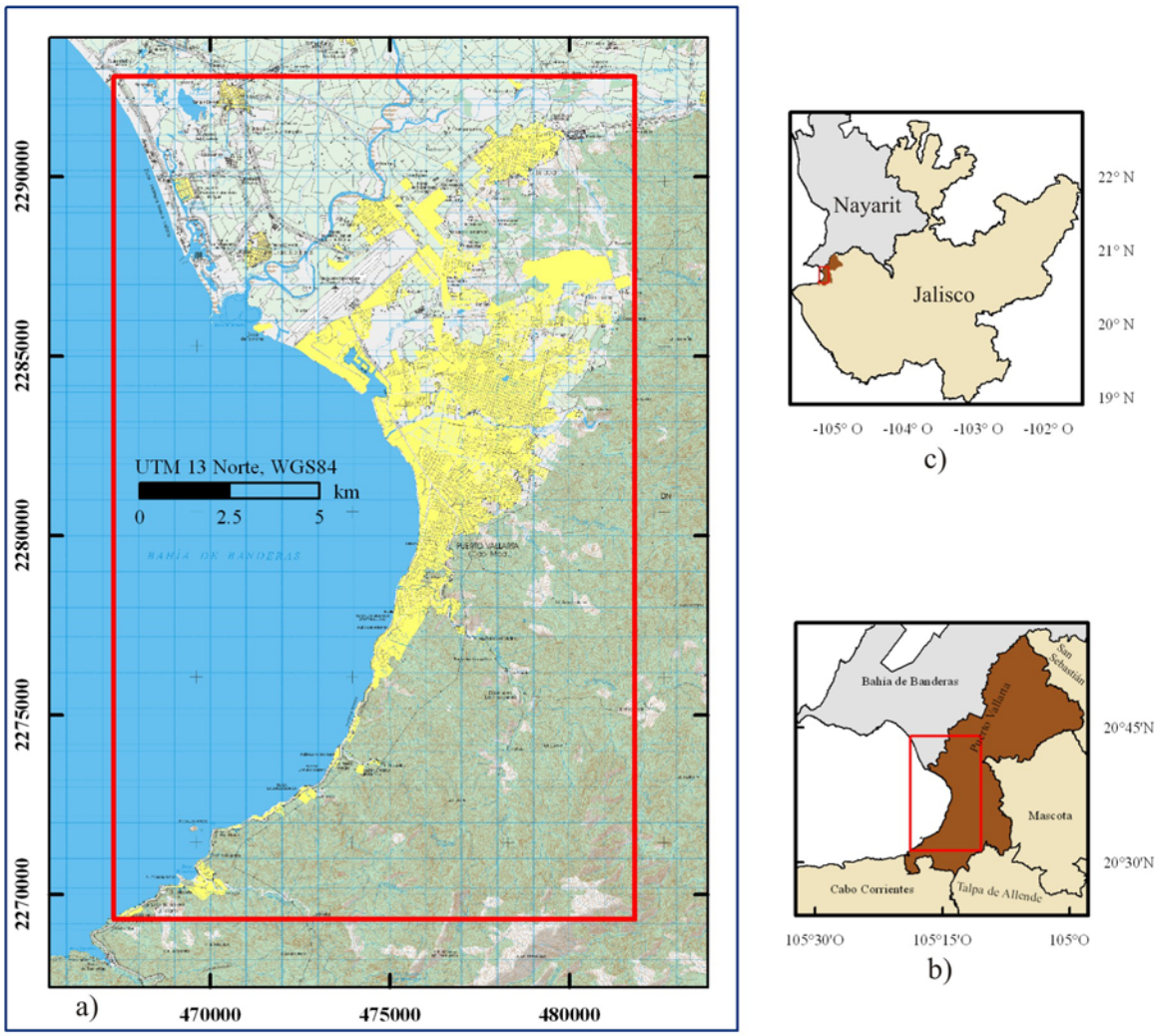


Figura 1. Polígono del área de estudio en color rojo, a) Zona urbana de Puerto Vallarta; b) Municipio de Puerto Vallarta y municipios colindantes; c) Estados de Jalisco y Nayarit. Fuente: Carta Topográfica escala 1: 50 000 por INEGI (2002) y Núñez-Cornú et al. (2006).

Metodología

Para estimar el peligro por tsunami se utilizó un modelo numérico de generación y propagación de tsunami. La metodología es de Ñuñez-Cornú et al. (2008), para modelar el mecanismo de la fuente sísmica a partir de información histórica de los efectos y las ondas de inundación del Tsunami de 1787, en Oaxaca. Para este trabajo se consideró un tsunami local debido a un sismo de gran magnitud en la Trinchera mesoamericana, frente a Puerto Vallarta, dentro de la brecha sísmica de la costa norte de Jalisco.

Se simuló un tsunami local para caracterizar este peligro y representarlo en un mapa, este resultado por sí mismo representa una acción preventiva. A partir de esta información se estimó por zonas la vulnerabilidad de la localidad. A continuación se describe la metodología de este proyecto:

1. Se probó la validez del modelo numérico de generación y propagación de tsunami; al considerar como referencia las condiciones que generaron el tsunami del 9 de octubre de 1995.

2. Se realizó la simulación de tsunami local en Puerto Vallarta. Los resultados del modelo consisten en la estimación de alturas del tsunami y tiempos de arribo en la costa.

3. En un modelo digital de terreno, que representa las condiciones locales, se delimitó la extensión de inundación por tsunami local.

4. Se establecieron diez etapas para calcular la vulnerabilidad. Para ello se identifico la dinámica de la población en el municipio de Puerto Vallarta y también características de la zona de afectación del peligro como la proyección del crecimiento de la población, la distribución de la población vulnerable, características socioeconómicas y la ubicación de instalaciones altamente vulnerables.

5. Se evaluó la vulnerabilidad de Puerto Vallarta por cuencas hidrográficas dentro de la superficie de afectación del peligro.

Capítulo 1 Simulación Numérica del Tsunami del 9 de Octubre de 1995 en Bahía Tenacatita, Jalisco.

1.1 Antecedentes

Tectónica regional

En la región se encuentra la Placa de Norte América o Norteamericana; convergen a ésta las Placas de Rivera y Cocos. Se tiene la certeza que las tres placas están interactuando y se conoce poco de la actividad sísmica derivada de la tectónica regional (Figura 2).

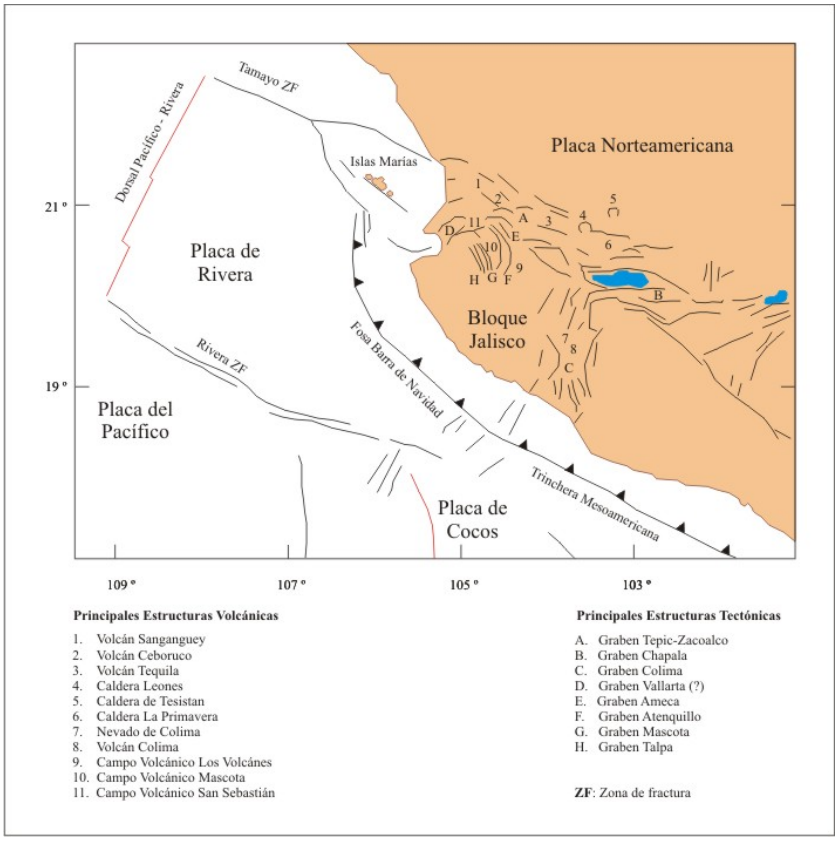


Figura 2. Marco tectónico del Bloque de Jalisco, Núñez-Cornú (2011). Se señalan las características tectónicas y volcánicas principales**.**

En la región de este estudio hay una unidad tectónica llamada El Bloque Jalisco (Luhr et al., 1985). La delimitación del Bloque Jalisco aún se discute; pero en general se conoce que es una estructura pequeña en la placa Norteamericana. El borde poniente converge a lo

largo de la costa del Pacífico y también ahí se encuentran la zona de contacto de las placas de Rivera y Cocos. En el extremo norte El Bloque Jalisco se une al Graben Tepic-Zacoalco y en el límite sur con el graben Colima. El límite Nororiente de El Bloque Jalisco es la unión a dos graben continentales: uno es el Graben Río Verde–San Cristóbal de la Barranca y el otro Graben de Chapala.

La placa de Rivera inicia desde el sur de la boca del Mar de Cortés, es parte de uno de los segmentos de la dorsal del Pacífico Oriental y subduce bajo el continente, bajo el Bloque Jalisco. En la porción sureste, la Placa de Rivera está separada de la Placa del Pacífico por la zona de Fractura de Rivera (ZF) y converge a la Placa de Cocos. La zona de contacto y el movimiento relativo entre las placas de Rivera y de Cocos aún no queda claramente definida.

Sismicidad regional

La sismicidad en la costa de Jalisco se asocia al movimiento de subducción de la placa de Rivera bajo el Bloque Jalisco (Tabla 1 y Figura 3). Los terremotos de junio de 1932 (Singh et al.1985), el día 3 de magnitud superficial Ms = 8.2, con un área de ruptura de largo L= 220 km y ancho w= 80 km; y el del día 18 la magnitud fue Ms=7.8 y un área de ruptura de L= 60 km y ancho w= 80 km. La fractura de estos dos sismos rompe todo el contacto de la Placa de Rivera con el Bloque de Jalisco (Figura 4).

Por otra parte, la complejidad de esta región tectónica refleja la existencia de estructuras desconocidas o no estudiadas, capaces de generar terremotos de magnitud media (7.0 - 7.6), como el ocurrido cerca de las Islas Marías, donde causó gran destrucción el 3 de diciembre de 1948 (M= 7.0).

También han ocurrido sismos derivados de la actividad interplaca, como el que ocurrió el 22 de enero del 2003, fue un terremoto somero Mw7.4, localizado en la costa de Ciudad de Armería (Núñez-Cornú et al, 2004, 2010).

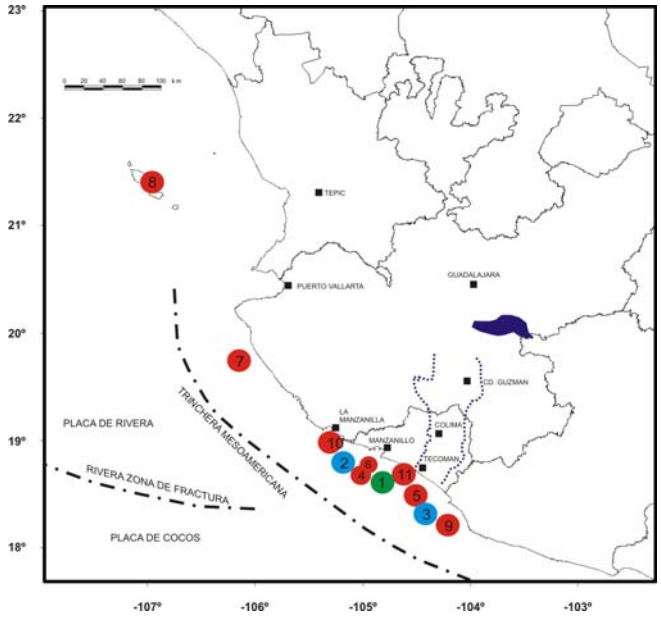


Figura 3. Mapa de sismos históricos frente al Bloque Jalisco, de 1937-2003, (Nuñez-Cornú, 2011). Los números se relacionan con la descripción en la Tabla 1. En color rojo los sismos instrumentales, en color cian dos sismos con algunos datos instrumentales y descripciones macrosísmicas extensas. En color verde un sismo con descripciones macrosísmicas limitadas.

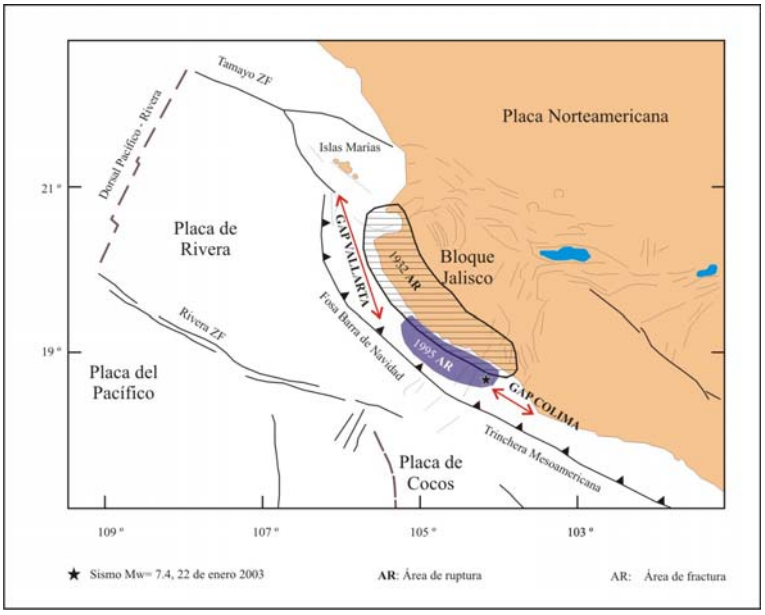


Figura 4. Área de ruptura de los terremotos de junio de 1932, octubre de 1995 y brechas sísmicas (gaps) existentes en la región. Modificado de Rutz López et al. (2013).

Número	Fecha dd/mm/aaaa	Descripción del sismo
1	22/11/1837	(M= 7.7, I= VI) "Temblor de Sta. Cecilia". Agrietó la fachada de la catedral de Guadalajara y otras edificaciones. Se sintió también en Zapotlán y en el sur de Jalisco.
2	09/03/1875	(M= 7.4, I= VI) Sismo que ocurrió en la Costa de Jalisco, por el rumbo de Autlán, cerca del epicentro del terremoto de 1932. En Guadalajara agravó los daños a edificaciones causadas por el sismo del 11 de febrero y sus réplicas: los templos más dañados fueron: La Merced, San Diego, Aránzazu, Mexicaltzingo, Analco y Loreto.
3	19/01/1900	(M= 7.6, I= VII) Destructor en Colima. Hubo además daños en muchas poblaciones de Jalisco (Ocotlán, Sayula, Zapotlán, San Gabriel, Autlán, Unión de Tula y Mascota. En Guadalajara sufrieron daños la cúpula de El Sagrario, los templos de Santa María de Gracia, San Felipe, Santa Mónica, San Diego, Capilla de Jesús, San Sebastián de Analco y Mezquitán.
4	03/06/1932	(Ms= 8.2, I= VI) El sismo de mayor magnitud en México en el siglo XX. Su epicentro se ubicó a unos 230 km de Guadalajara. Causó fuertes daños en Cihuatlán, Autlán y Mascota. Hubo réplicas fuertes (magnitudes de 4 a 8) hasta al menos diciembre del mismo año. El Padre Severo Díaz hizo un interesante análisis (Díaz Galindo, 1932). El 13 de junio entró en erupción el Volcán de Colima.
5	18/06/1932	(Ms= 7.8, I= VI) Intensa réplica del terremoto del 3 de junio. Destructor en el estado de Colima, sobre todo en Tecomán y Colima. Un tsunami invadió Cuyutlán.
6	09/04/1933	(M= 6.5, I= IV) daños en Tenacatita y otros lugares de la Costa de Jalisco (Autlán, Purificación). Fuerte en Colima
7	30/11/1934	(M= 7.2, I= IV) Muy fuerte en la Costa de Jalisco. Sentido en Puerto Vallarta, Mascota y Autlán.
8	03/12/1948	(M= 7.0) Epicentro en las Islas Marías, destruyó la colonia penal.
9	30/01/1973	(Ms= 7.4) Conocido como el Terremoto de Colima, aunque en realidad ocurrió en el occidente de Michoacán, región poco poblada en esa época.
10	09/10/1995	(Ms= 7.6, Mw8.0, I= VI) Fuerte terremoto frente a las costas de Colima y Jalisco. Causó fuertes daños especialmente en Manzanillo y Cihuatlán, pero también en Jaluco, Barra de Navidad, Tenacatita y Puerto Vallarta. Se sintió fuerte en Guadalajara, a 240 km del epicentro, pero causó daños menores. Después del terremoto ocurrió un tsunami.
11	22/01/2003	(Mw7.4,) Terremoto somero frente a la costa de Armería en Colima, fuertes daños en la Cd. Colima y en localidades de Jalisco al Oeste del Volcán, su patrón de daños es muy diferente al de 1995.

Tabla 1. Relación de algunos sismos históricos con epicentros en la costa, 1937-2003. Ver también la Figura 2. Fuente: Nuñez-Cornú, 2011.

El 9 octubre de 1995 a las 9:35 hora local, ocurrió un sismo con una magnitud de momento sísmico Mw8.0, con epicentro en la Bahía Tenacatita y que generó un tsunami. Se estimó el área de ruptura paralela a la Trinchera Mesoamericana de largo L=160 ± 20 km y de ancho w = 60 km (Pacheco et al., 1997, Ortiz, 1998 y Ortiz et al., 2000). La fractura representa solo la mitad sur del área propuesta por Singh et al. (1985) para los terremotos de 1932, por lo que falta por romper la costa norte de Jalisco y en Bahía de Banderas, Nayarit.

Los daños por el sismo de 1995 en Jalisco fueron daños en edificaciones con un mal diseño en la forma o la falta de seguimiento a normas para estructuras sismoresistentes; sumados a la energía del sismo se observó el efecto de la licuefacción y subsidencia (Juárez et al., 1997). En Jalisco el municipio con mayor número daños en edificaciones o colapsos de los mismos por la energía del sismo fue Cihuatlán. Otros municipios fueron Autlán, La Huerta y El Grullo.

Se observó licuefacción en la autopista Federal 200, en tramos entre Barra de Navidad y Manzanillo, y también en Barra de Navidad, Jaluco y Boca Iguanas (Figura 5). En Barra de Navidad se ubicó en los canales que previamente se rellenaron para edificar después sobre ellos, en Boca Iguanas la licuefacción generó un colapso parcial en una estructura de concreto reforzado y en Jaluco la subsidencia del suelo fue de 0.50 m.

Los deslizamientos de tierra ocurrieron en poblaciones frente al epicentro del sismo, en las comunidades de La Manzanilla y Cuastecomate, se observaron en las laderas de los cerros del lugar; estos no llegaron al mar (Ortiz et al., 1995).

El estado actual del conocimiento científico que permite determinar si un sismo causará un tsunami sigue en discusión, no habiendo aún ningún modelo teórico ni método operacional totalmente satisfactorio. Tradicionalmente se usó como indicador de certeza de generación de tsunami, que la Magnitud del sismo (M_s) fuera mayor que 7.5, sin embargo este no es un indicador confiable para sismos muy grandes o de duración larga.

Un parámetro para estimar la posible ocurrencia de tsunami es el Momento Sísmico Escalar (Mo_i), que es proporcional al área de ruptura y a la dislocación vertical de la falla, y que se determina de los registros de sismógrafos de banda ancha, para Mo_i mayor que 10^{22} Newton-metros.

Figura 5. Localidades en la región afectadas por los tsunamis de 1932 y 1995, con datos de INEGI, basado en Sánchez y Farreras, 1993.

Los tsunamis locales en México.

Los registros de la red mareográfica del pacifico mexicano comenzaron en 1952, desde entonces y hasta 1985, (Sánchez y Farreras, 1993), se han registrado tsunamis de origen lejano con alturas máximas dentro del rango de $0.10\ m \leq h \leq 2.5\ m$.

Si bien los tsunamis lejanos recientes como los de Sumatra (2004), Chile (2010) y Japón (2011) y aquellos históricos como Chile (1965), Alaska (1964), Aleutianas (1957) no han generado daños importantes en la costa occidental de México, los tsunamis destructivos históricos se originaron después de sismos locales con momento sísmico $Mw \geq 7$, en la zona

de contacto interplaca localizada entre la costa y la Trinchera Mesoamericana, como el que ocurrió en frente a las costa de Oaxaca en 1787 (Núñez-Cornú et al, 2008).

Los tsunamis locales en Jalisco.

En el caso de Jalisco en el siglo pasado se registraron tsunamis locales destructivos, tres de ellos en 1932 y uno en 1995. Los reportes históricos mezclan los daños por los diferentes tsunamis en el mes de junio de 1932, al ocurrir en un período de tiempo tan corto en una región poco poblada y mal comunicada. De estos tsunamis existen poca información y no hay estudios publicados de la fuente sísmica. Se sabe que dos de ellos se generaron después de terremotos de gran magnitud y se estima que uno muy probablemente por deslizamiento de los sedimentos del Río Armería.

El tsunami del 3 de junio de 1932, asociado a un sismo de Ms= 8.2, fue observado en Barra de Navidad (Jalisco) y en San Blas (Nayarit) hubo inundación parcial del puerto. En la bahía de Manzanillo (Colima), las embarcaciones de mediana y gran tonelaje corrieron el riesgo de encallar y volcarse debido al rápido cambio del nivel del mar. En Bahía de Santiago, Colima, se estimó una diferencia de altura de 3 m. En Cuyutlán, Colima, la costa aparentemente se elevó y hubo inundación (Sánchez y Farreras, 1993).

El sismo del 18 de junio de 1932, Ms = 7.8, afectó la misma zona del día 3. El terremoto causo daños en Tecoman, Colima. En la Ciudad de Guadalajara hubo daños en La Catedral y la Universidad de Guadalajara. El tsunami ocasionó un cambio de nivel del mar de aproximadamente 1 m en la Bahía de Manzanillo, el agua inundó el puerto y la forma de la playa cambió, pues una larga extensión rocas en la costa, que se mostraban en las cartas náuticas antiguas, se perdieron.

El sismo del 22 de junio de 1932, Ms = 7.7, generó el tsunami que más daño causó en la región. Se ha calculado que su altura máxima fue $h \leq 15$ m y la extensión promedio de inundación fue 1 km a lo largo de 20 km de costa. Este tsunami posiblemente se generó por el deslizamiento de sedimentos del Río Armería acumulados en la plataforma continental, hacia uno de los cañones de la Fosa Mesoamericana (Ortiz, citado por Pacheco et al., 1997).

La mayoría de los daños fueron en Cuyutlán. En una primera inundación el tsunami derribó edificaciones próximas a la orilla de la playa, tanto de concreto y estructura armada al igual que de materiales livianos como las llamadas enramadas. La erosión por el agua quitó de raíz a las palmeras. El agua arrastró ganado vacuno y caballos, se menciona que en la calle principal de Cuyutlán quedaron peces y tiburones (Sánchez y Farreras, 1993). Las narraciones históricas mencionan que Cuyutlán fue invadido por otras dos ondas de menor altura: una el mismo día 22 y la siguiente para el día 23. También se vieron afectadas las comunidades de El Real, Salinas de Guasago y Tecuanillo.

El más reciente y mejor documentado tsunami ocurrió en la mañana del 9 de octubre de 1995, después de un sismo con epicentro en Bahía Tenacatita y Mw8. La fuente sísmica del tsunami del 9 de octubre de 1995 ha sido muy bien documentada mediante la inversión de datos de GPS y de sismogramas (ver Courboulex et al., 1997, y Pacheco et al., 1997). Los parámetros de la fuente sísmica se utilizaron en este trabajo para simular la propagación del tsunami de 1995.

Los testimonios de los habitantes como su percepción y los efectos como erosión, inundación y altura del tsunami, (Tablas 2 y 3), fueron cuidadosamente registrados por un grupo de investigadores dirigidos por Ortiz et al. (1995).

Sitio	Percepción de la gente
Chalacatepec	- El tsunami se extendió primero por el lado suroeste y después por la noroeste.
Pérula	- El tsunami entro por el estero Pérula. - El tsunami no llegó a la calle. - Pescadores alejados 10 km de la costa al momento del temblor y tsunami sintieron que tembló, porque la panga vibró de forma inusual. Escucharon un ruido alrededor, no muy fuerte, pero les pareció que venía de la profundidad. Miraron hacia la costa, a lo lejos les pareció ver una columna de humo por lo que decidieron ir a la orilla. Al dirigirse hacia la playa y después de 8 minutos del temblor, la mar se quedó plana como un espejo, ellos continuaron navegando. Después del temblor, 20 minutos aproximadamente, vieron la onda del tsunami, en sentido de la mar a la playa. Intentaron regresar a tierra pero la ola los rebasó, por lo que permanecieron navegando, les pareció que era un sitio más seguro. Permanecieron navegando por 2 horas aproximadamente, hasta que reconocieron que la mar estaba tranquila. Llegaron a la playa y notaron que perdieron su vivienda y sus pertenecías, debido al tsunami.
San Mateo	- Sin testigo presencial
Chamela	- Las personas permanecieron en sus casas de madera después que sintieron el temblor, al transcurrir un tiempo se percataron que el nivel del mar subía rápidamente y corrieron para no ser alcanzadas por el agua. Lograron salir de la playa hasta la carretera en vehículo.
Punta Careyes	- Las personas observaron que el mar se quedo quieto, después se retiró y entro por el canal del lugar.
El Tecúan	- Sin testigo presencial
Boca de Iguanas	- Daños en la estructura de un hotel, se debió al tsunami, no por el sismo. El mar se retiro la primera vez y por eso las personas desalojaron el hotel y se salvaron.
Entre la manzanilla y Boca de Iguanas	- Sin testigo presencial
La Manzanilla	- A una persona le pareció que después del sismo le había salido polvo al mar. - Otra persona observó que el tsunami entró tres veces en 90 minutos. - Una persona que estaba en Puerto Vallarta, al momento del tsunami, mencionó que lo observó con un movimiento más leve a comparación que lo que escuchó que paso en La Manzanilla.
Cuastecomate	- Personas que sintieron el temblor y corrieron contrario a la playa, hacia la calle. - algunas observaron como el mar se retiraba, para después invadir de forma pareja.
San Patricio (Melaque)	- El Prof. Rafael García de Quevedo Machain de la Universidad de Guadalajara, después del temblor, alertó a los moradores del sitio que estaban en la playa de la posibilidad de tsunami y se alejaron. Minutos después vieron como el mar se retiraba para después invadir la playa. - Una posible víctima, una que pescaba con tarraya, no confirmado.
Entre Barra de Navidad y San Patricio (Melaque)	- Un testigo caminaba en la playa cuando sintió el temblor y regresó a su casa para desalojar a su familia. Observó como entró el tsunami, se resguardaron en el albergue. No se encontraba en el momento que la onda máxima del tsunami inundó su vivienda.
Barra de Navidad	- Habitantes del lugar vieron como el mar se retiraba, para después invadir la playa. - La inundación por tsunami fue de menor extensión en comparación con la que provocan las olas del temporal de huracanes.

Tabla 2. Percepción del tsunami de 1995 en la costa sur de Jalisco, basado en Ortiz et al. 1995**.**

1.2 Efectos del tsunami de 1995 en la costa sur de Jalisco.

El trabajo del Ortiz et al., 1995 registró los efectos del tsunami en la costa norte de Colima y costa sur de Jalisco, una extensión de al menos de 100 km. Estos trabajos son muy importantes (Levin y Nosov, 2009), porque se mide el daño que sufre la población costera y es útil para la gestión del riesgo.

En este trabajo de campo se midió la altura y extensión de inundación con estadal y nivel de mano, en sitios con evidencia física como daños en las edificaciones, erosión y marcas del tsunami en la vegetación (Tabla 3). Las alturas de inundación o nivel hasta donde penetró el tsunami fueron corregidas o reducidas a la altura sobre el nivel del mar ($\mathbf{h_c}$), empleando la predicción de marea al momento de la inundación del tsunami. La altura de inundación, $\mathbf{h_c}$, es lo que se comúnmente se conoce en la literatura como "tsunami run-up" o simplemente "run-up".

En la región correspondiente a la costa sur de Jalisco, desde Chalacatepec hasta Barra de Navidad (Figura 2), las mayores alturas de inundación fueron observadas en la Bahía Tenacatita, en las comunidades de La Manzanilla y Boca de Iguanas, correspondiente a $h_c \leq 5$ m. Una de las marcas del tsunami dentro del Templo en La Manzanilla fue $h_c = 4$ m, como se muestra en Figura 6.

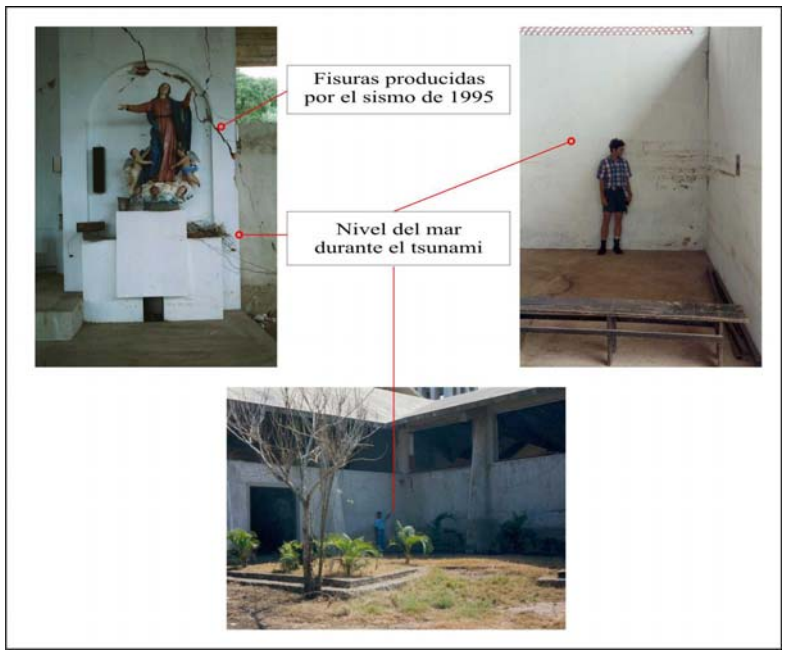


Figura 6. Inundación y fisuras en el Templo de La Manzanilla (Ortiz et al, 1995).

Sitio	Impacto en objetos artificiales o naturales, incluyendo embarcaciones de diferentes tamaños
Chalacatepec	- Rastros de algas en las dunas.
Pérula	- El tsunami entró por el estero Pérula, dejó marcas en la vegetación. - El tsunami no llegó a la calle, pero inundó las casas próximas a la playa, a una altura de 0.5 m respecto su piso y el agua se llevó las sillas y mesas. - Daño a edificaciones, las más próximas al estero. En un restaurante los cimientos se socavaron y se perdió el piso de cemento y el techo de palma se perdió.
San Mateo	- El tsunami cubrió el andador costero del lugar. - La playa tiene pendiente muy pronunciada.
Chamela	- El mar alcanzó la cresta de la berma de la playa. - Las embarcaciones pequeñas resguardadas en la playa fueron arrastradas por el tsunami, hacia tierra adentro. - Edificaciones de madera frente a la playa inundada, pero sin colapsar. - El tsunami entró por el río del lugar y avanzó aproximadamente a 1 km de la costa, fue observado desde la carretera y el puente del río Chamela. - Aquí se ubica el estero Chamela.
Careyes	- Se retiró el mar y dejó descubierto el muelle del lugar. - El tsunami avanzó tierra adentro, por un canal del lugar. - En un hotel frente a la playa, respecto su piso la altura llegó a 0.95 m. - La arena de la playa de bolsillo del lugar se la llevo el tsunami. -El tsunami arrastro contenedores para basura, construidos de concreto.
El Tecúan	- Evidencia de marcas del tsunami en la vegetación. - La playa tiene una pendiente muy pronunciada, la altura de la berma aproximadamente 3 m.
Boca de Iguanas	- Algunos campers de turistas fueron arrastrados por el tsunami 400 m tierra adentro, siguiendo el cauce del arroyo de la localidad. - Evidencia de erosión en la playa, muchas palmeras tenían las raíces descubiertas. - Daños severos a un hotel de dos niveles situado a 50 m de la playa. El tsunami erosionó alrededor de los cimientos del hotel, los socavó, por lo que el edificio se inclinó, al grado de que había que demolerse. - En las edificaciones frente a la playa el agua sobrepaso y derribo paredes 3 m de altura. - Casas con techo de palma frente a la playa con marcas del tsunami, las marcas sugieren que el agua sobrepasó el techo, pero sin derribarla.
Entre La Manzanilla y Boca de Iguanas	- Evidencia del tsunami en un escarpe de arena y marcas en la vegetación. - El tsunami llegó hasta el camino, como a 200 m después de la playa. - En un hotel frente a la playa, en proceso de demolición antes de la ocurrencia del tsunami, había arena en los lavamanos de las habitaciones del primer nivel, aproximadamente a 1.2 m respecto a su nivel
La Manzanilla	- Había polvo en los cerros. Alguno con deslizamiento en sus laderas, pero estos no llegaron al mar. - Una persona navegó en su lancha al mismo tiempo que el agua del tsunami inundó la plaza del lugar. - La segunda onda del tsunami entró de manera que le permitió correr a una persona para no ser alcanzada, pues esta fue a tomar fotografías al lecho marino que quedo descubierto después que se retiró la primera onda. -Se observaron daños en las edificaciones de la avenida principal, pero también en otros lugares del poblado, por la energía del sismo y el tsunami. - Grietas en las paredes debido al sismo y marcas de inundación del tsunami dentro del templo del lugar. Se midió 172 m de extensión de la inundación, en la puerta de metal detrás del templo.
Cuastecomate	- Deslizamiento en la ladera de un cerro al noroeste de la Bahía Cuastecomate. - El tsunami entro como un remolino, en un movimiento contra reloj.
San Patricio (Melaque)	- Las sillas y mesas de restaurantes frente a la playa fueron arrastradas por la primera ola y depositadas en la playa. - La segunda onda llego hasta la calle detrás de las palapas. - En la rivera del arroyo lugar, a 300 m de la playa, algunos campers fueron arrastrados, ya que el tsunami entró por este lugar.
Entre Barra de Navidad y San Patricio (Melaque)	- Se observó erosión en la playa, pero sin confirmar que ello fuera por el tsunami. - Las casas frente a la playa fueron inundadas por el tsunami, pero sin daño a la estructura.
Barra de Navidad	- Evidencia de arena en la cavidad de un monumento el andador costero del lugar, lo que sugiere que la inundación sobrepaso 1 m del andador costero del lugar.

Tabla 3. Efectos del tsunami de 1995 en la costa sur de Jalisco (Ortiz et al., 1995)

Para caracterizar un tsunami se estima la magnitud de tsunami en la escala Immamura-Iida (Bryant, 2001). En la definición de la escala se usaron los datos de los sismos que generaron los tsunamis en las costas de Japón, aproximadamente 100, entre los años 1700 – 1960 y que tiene por ecuación:

$$m_{II} = \log_2 H_{rmax}$$

donde **m_{II}**: magnitud del tsunami en la escala Immamura-Iida

H_{rmax}: Altura máxima de onda (run up)

Para la región entre Chalacatepec y Barra de Navidad, Jalisco, se determinó la magnitud del tsunami en la escala Immamura-Iida; al igualar H_{rmax} con las mediciones corregidas de altura máxima de onda por Ortiz et al. (1995). Para la región comprendida desde Chalacatepec hasta El Tecuán la magnitud del tsunami fue ≥ 1.5 $m_{II} \leq 1.9$. En la región del epicentro, al sur de Jalisco, desde Boca Iguanas hasta Barra de Navidad la magnitud del tsunami fue ≥ 2.0 $m_{II} \leq 2.4$ (Tabla 4).

m_{II}	**Localidad**	**Extensión de la inundación**
1.5	Chalacatepec	En el sur se midió 100 m y al norte 60 m.
1.7	Pérula	40 m.
2.3	San Mateo	40 m.
1.7	Chamela	En la cresta de la berma de la playa 30 m.
1.8	Careyes	En el primer nivel del hotel se midió 115 m.
1.9	El Tecúan	Se midió en vegetación con huella del tsunami, a una distancia de 70 m.
2.4	Boca de Iguanas	Se midió en el techo de una casa a 15 m.
2.1	Entre La Manzanilla y Boca de Iguanas	30 m.
2.0	La Manzanilla	Se midió en la puerta de metal detrás del templo del lugar 172 m.
2.1	Cuastecomate	156 m en la calle de acceso.
2.2	San Patricio (Melaque)	41 m al nivel de la primera calle.
2.4	Entre Barra de Navidad y San Patricio (Melaque)	Se midió en las marcas de la vegetación 25 m.
1.9	Barra de Navidad	Se midió en el muro del andador costero 17 m.

Tabla 4. Magnitud del tsunami en la escala Imamura-Iida (**m_{II}**), basado en run up medido en la costa sur de Jalisco por Ortiz et al. (1995).

1.3 Modelo numérico del tsunami de 1995 en la costa sur de Jalisco.

En este trabajo se utilizó el algoritmo utilizado por Núñez-Cornú et al. (2008) para el caso de tsunamis de origen sismotectónico. Con este algoritmo se estimó el mecanismo de la fuente sísmica del tsunami de 1787 en Oaxaca a partir de los datos históricos de sus efectos e inundación, y los resultados fueron muy próximos a los reportes históricos.

Los detalles y procedimientos del algoritmo mencionado no se presentan en este trabajo por razones de simplicidad y por considerarlos ajenos a los objetivos de la tesis. En otras palabras, se recurre al modelo como una herramienta, tal como fue propuesta por Ortiz et al. (2000), Farreras y Ortiz (2002), porque es necesario caracterizar el peligro y después determinar la vulnerabilidad. Sin embargo se establece un marco teórico de la simulación de tsunamis y las variables utilizadas en este trabajo y sus resultados.

En esta sección del trabajo se generó un modelo de la fuente sísmica del terremoto basado en las mediciones del run up y de la extensión horizontal de la inundación del tsunami del 9 de octubre de 1995. Este evento es la referencia que se utilizó en este trabajo para evaluar el peligro por tsunami local en Puerto Vallarta, en un lugar que no se tiene registros históricos de la ocurrencia de tsunami local, sin embargo, es necesario conocer el peligro para la estimación de la vulnerabilidad.

Parámetros de la falla.

Se mencionarán los parámetros de la falla, pues algunos de ellos son los datos iniciales que describen la fuente sísmica, y que se utilizaron en este trabajo. Si consideramos el movimiento de una falla (Figura 7), los parámetros que la caracterizan son la orientación, las dimensiones de largo y ancho, la dirección y magnitud de su deslizamiento.

AA'BB': Este es el plano de la falla.

bl 1: bloque uno;

bl 2: bloque dos;

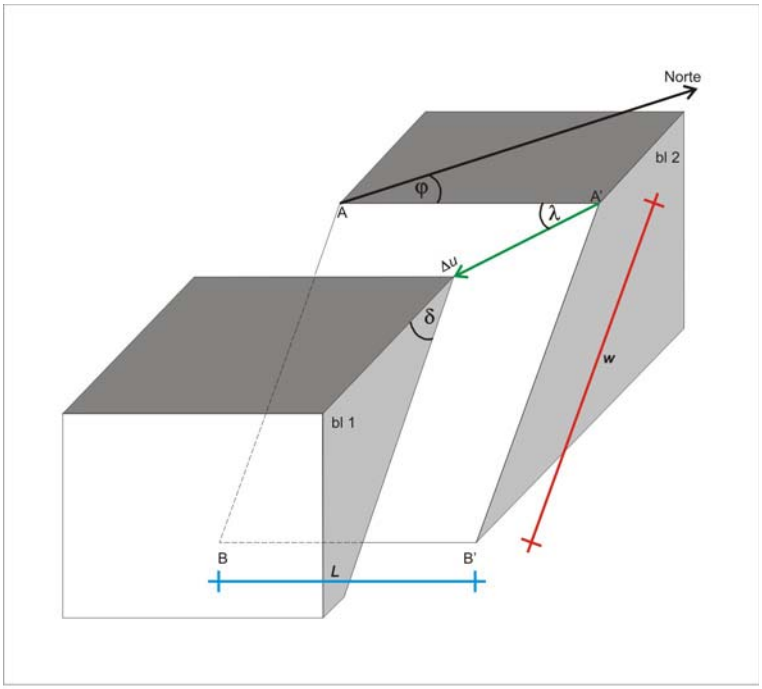


Figura 7. Parámetros que definen el movimiento de una falla. Fuente: Udias y Mezcua, 1997.

S = Lw La dimensión del plano de falla, suponiendo que fuera un rectángulo

S: área del Plano de Falla;

L: longitud de la falla;

w: ancho de la falla;

Traza de la Falla: Delimitado por la línea AA', también la intersección del plano de falla con el plano horizontal;

φ: acimut (*strike*). Es el ángulo que forma la traza de la falla respecto al norte geográfico;

δ: buzamiento del plano (*dip*). Es la inclinación del plano de falla respecto a la superficie.

λ: ángulo de deslizamiento (*slip angle*). Es el ángulo que hace el vector deslizamiento con el acimut. Se mide el ángulo desde la horizontal a la dirección de Δu sobre el plano de falla. Los valores positivos corresponden a las fallas inversas.

Δu: deslizamiento o dislocación del bloque (*slip*). Movimiento del bl 1 respecto a bl 2.

Los diferentes tipos de fallas se describen de acuerdo al valor que tomen los ángulos δ y λ, dos ejemplos de tipos de fallas son:

Si $\delta = 90º$; $\lambda = 0º$, entonces es una *falla de desgarre*, es de movimiento horizontal.

Si $\delta = 135º$; $\lambda = 90º$, entonces es una *falla inversa*, es de movimiento vertical. En las fallas de este tipo, $0º \leq \lambda \leq 180º$. En este movimiento se genera un tsunami.

A la región formada por todos los puntos que sufrieron algún deslizamiento se le conoce como *área de ruptura*.

Generación y propagación del tsunami.

La modelación avanzada de los registros de tsunamis generados por sismos que ocurrieron entre la costa occidental de México y la Trinchera Mesoamericana ha permitido emplear el método inverso para la determinación de áreas de ruptura de dislocaciones cosísmicas y la determinación de desplazamientos verticales de la costa (Ortiz et al., 2000). Sus resultados demuestran la relación entre la altura del tsunami y la estimación de los parámetros de la fuente sísmica; lo que ha permitido a su vez el empleo de funciones de Green con fines de investigación para caracterizar la fuente sísmica en función de observaciones costeras del tsunami y de una segmentación adecuada del plano de falla (Satake, 1987; Ortiz y Bilham, 2003; Singht et al., 2006).

Para delimitar la extensión de inundación del tsunami de 1995 en la costa sur de Jalisco se utilizó información del run up que fue registrado a lo largo del plano de fractura (*hc*), de 150 – 160 km desde Chalacatepec, Jalisco; hasta Cuyutlán en Colima (Ortiz et al., 1995). El run up (Figura 8), facilita la delimitación de la extensión de inundación en un modelo digital del terreno para la región de estudio.

La fuente sísmica del tsunami.

Para modelar la fuente sísmica del terremoto del 9 de octubre de 1995 se determinaron los valores que adquieren la dimensión del plano de falla (**S= Lw**), la magnitud el momento

sísmico (**Mw**), y la dislocación cosísmica (**Δu**). Se parte de la información de estudios anteriores basados en el método de inversión de los datos de GPS y de sismicidad (Courboulex et al., 1997, Pacheco et al., 1997, Ortiz, 1998 y Ortiz et al, 2000).

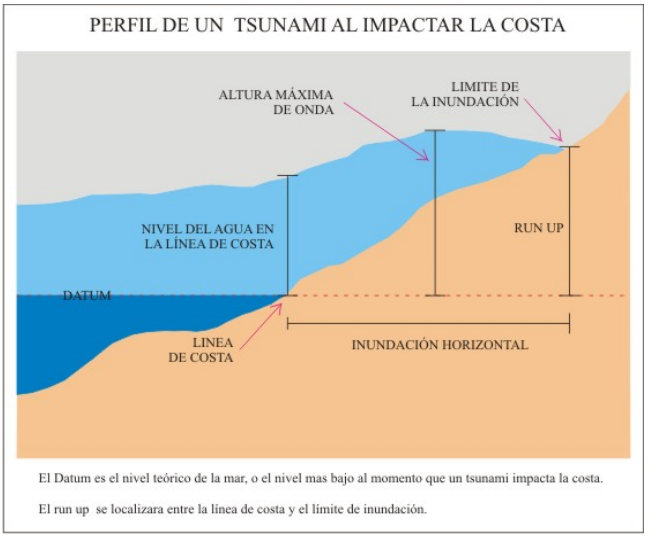


Figura 8. Perfil de un tsunami al impactar la costa. Fuente: UNESCO, citado por Levin y Nosov, 2009.

La dimensión del plano de falla en la simulación se determino con una longitud L = 160 ± 20 km y un ancho de w = 60 km, con una inclinación del plano de falla a 11^0 hacia la costa y a una profundidad de 10 km, dentro de región interplaca.

La magnitud del terremoto de acuerdo a Pacheco et al., (1997), fue Mw ≈ 8.0 y se cumple la siguiente relación:

$$Mw = \log_{10}(S) + 4.0$$ (Utsu y Seki, 1954; Wyss, 1979; Shigh et al., 1980),

donde la superficie total, S, se calcula en kilómetros cuadrados.

En esta metodología la superficie total, S, se subdivide en diez segmentos, $\mathbf{S_i}$, en donde cada uno tiene un área de S_i = 30 x 30 km, y cada uno se le puede prescribir una dislocación independiente.

El momento sísmico en cada uno de los segmentos, ($\mathbf{Mo_i}$), puede variar el valor de de la dislocación cosísmica en cada plano, $\mathbf{\Delta u_i}$, de acuerdo a la relación $Mo_i = \mu\ S\ \Delta u_i$, para

estimar el momento del terremoto (Hanks and Kanamori, 1979). En el cálculo del momento se asumió que el modulo de rigidez corresponde a $\mu = 5x10^{11}$ dina-cm^2 se cumplió con la siguiente ecuación:

$$M_w = \frac{2}{3}\log_{10}\left(\sum_{i=1}^{10} Mo_i\right) - 10.7.$$

La deformación vertical cosísmica del lecho marino correspondiente al plano de falla se calculó con el modelo de Mansinha y Smylie (1971), para el cual supone un mecanismo focal puramente inverso en cada uno de los segmentos. A su vez, la deformación vertical cosísmica del lecho marino se impone como condición inicial de la superficie del mar para simular al tsunami.

Para validar la hipótesis de trabajo se realizaron diferentes experimentos en los cuales se asumió que la magnitud del sismo y el área de fractura se mantenían constantes. También se estableció que el plano de falla en la simulación tendría una geometría simple y una magnitud de dislocación cosísmica $\Delta u \leq 4$ m, el valor estimado por Pacheco et al., (1997).

Propagación, estimación de altura esperada y tiempos de arribo del tsunami.

La propagación del tsunami se simuló con las ecuaciones lineales bidimensionales para ondas largas aguas someras, integradas verticalmente (Pedlosky, 1979):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot M = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh\nabla\eta = 0.$$

Este modelo supone que las longitudes de las ondas son extensas, de decenas a centenares de kilómetros. En estas ecuaciones, *t* es el tiempo, η es el desplazamiento vertical del agua por arriba del nivel equipotencial, *h* es la profundidad de la columna de agua en el océano,

g es la aceleración gravitacional y M es el vector de la velocidad integrada en la vertical en las direcciones longitudinal y latitudinal. Las ecuaciones se resuelven en un sistema de coordenadas esféricas por el método de diferencias finitas con esquema Leap-Frog (Goto et al. 1997). El paso del tiempo en el cómputo se prescribió en 1 segundo para mantener la estabilidad numérica del modelo. El dominio de integración o modelo digital del relieve del fondo marino se construyó sobre una malla o rejilla con espaciamiento de 27 segundos.

Para la batimetría cercana a la costa, desde 1000 m de profundidad hacia la playa, se obtuvo de las cartas náuticas locales, mientras que para las profundidades mayores de 1000 m se utilizo se emplearon los datos de ETOPO-2 (Smith and Sandwell, 1997). El modelo digital del terreno se construyó con los datos digitales del Geo-modelo de Altitud del Territorio Nacional (GEMA) generado por INEGI, (1994), el cual se generó por fotogrametría entre los años 1980-1990.

El modelo digital del terreno, MDT, las celdas fueron de 10 x 10 m^2 para el mapa que representa la extensión de la inundación horizontal. Se utilizaron los datos vectoriales de la carta topográfica escala 1:50,000 con vuelo fotogramétrico de 1995 (INEGI, 1998), muy próximo a la fecha del tsunami, de curvas de nivel del terreno y las superficies de esteros o marismas; en los que el nivel de la altitud en ocasiones es inferior al nivel medio del mar; son terrenos inundables y asimismo ingresan los tsunamis.

Para este estudio se ubicaron diez localidades distribuidas en una extensión de aproximadamente 100 km a lo largo de la costa, en la región de Jalisco y Colima, para obtener del modelo de tsunami las alturas de inundación, los mareogramas sintéticos y los tiempos de arribo del tsunami. En este trabajo les llamamos a esos puntos mareógrafos virtuales o Virtual Tide Gauge (*VTG*), para ser consistentes con el artículo derivado de esta tesis.

En cada *VTG* se estimó el run up sintético o del modelo (*hm*) y el tiempo de arribo del tsunami. Para la costa sur de Jalisco se ubicaron siete *VTG* y el resto corresponden a la zona del norte de Colima (Figura 9), los que se mencionan a continuación:

VTG	Zona	Municipio/Estado
1	Chalacatepec	Tomatlán/Jalisco
2	Chamela	La Huerta/Jalisco
3	Careyes	La Huerta/Jalisco
4	El Tecuán	La Huerta/Jalisco
5	Tenacatita	La Huerta/Jalisco
6	San Patricio (Melaque)	Cihuatlán/Jalisco
7	Marabasco	Cihuatlán/Jalisco
8	Playa de Oro	Manzanillo/Colima
9	Majagua	Manzanillo/Colima
10	Manzanillo	Manzanillo/Colima

1.4 Resultados de la simulación del tsunami de 1995.

La Fuente Sísmica

Para una dislocación cosísmica uniforme, en la que $\Delta u = 4$ m para los 10 segmentos del plano de falla que se indican en la Figura 9, los valores calculados del run up en todos los *VTG* sobreestimaron a los que fueron medidos en campo. Se realizaron diferentes experimentos en los que se cambiaron los valores de la dislocación cada 0.1 m, el rango fue $1 \leq \Delta u \geq 4$ m, hasta obtener el mejor ajuste entre *hm* y *hc*.

El mejor ajuste entre *hm* y *hc* se obtuvo prescribiendo una dislocación $\Delta u = 1$ m en los primeros 60 km del plano de falla a partir de su extremo NW, frente a Chalacatepec y Chamela. Y en los restantes 90 km, frente a las bahías Tenacatita, Navidad y Manzanillo, se prescribió una dislocación $\Delta u = 3$ m.

La magnitud del momento para este modelo de falla con dislocaciones no uniformes fue de Mw7.93. La Figura 9 muestra la propuesta final de localización del plano de ruptura, con S = 9000 km^2, L = 150 km y de w = 60 km y la distribución de las dislocaciones.

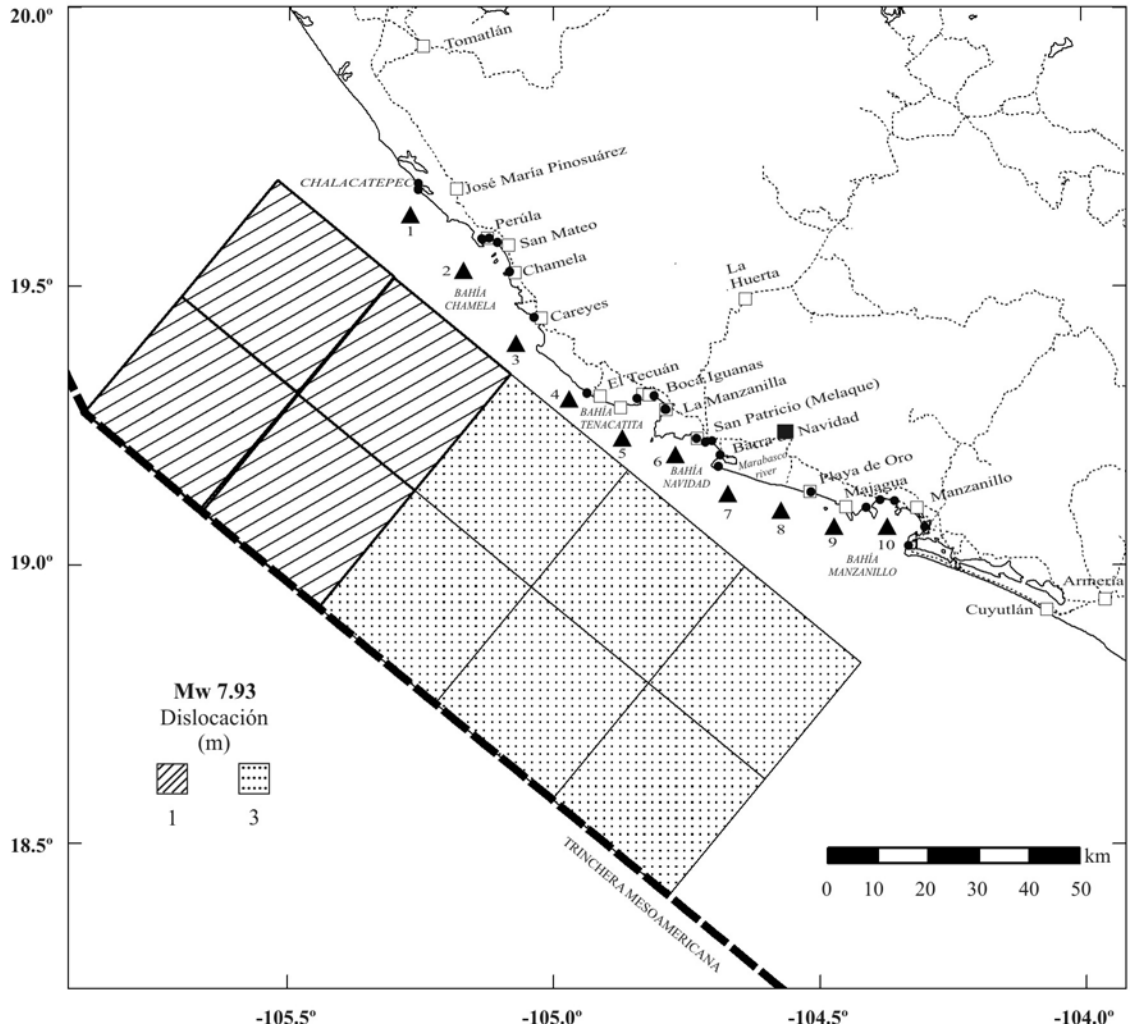


Figura 9. Mapa de la región y ubicación del plano fractura utilizado en el modelo numérico del tsunami de 1995. Los puntos negros indican los sitios en los que se midieron el run up del tsunami por Ortiz et al. (1995). Los triángulos negros indican los VTG utilizados en el modelo para calcular run up teórico de 1995. Para la costa sur de Jalisco se tienen VTG 1 al VTG 7. Para el norte de Colima desde el VTG 8 al VTG 10. Fuente: Trejo-Gómez et al., 2015.

Altura del run up en el modelo

De la comparación entre los valores del *hm* del tsunami simulado y los que fueron observaron en 1995, se calcularon 82.6 % de los valores cumplen con la condición que la altura del run up del modelo y el que se observo fuesen similares. Los sitios del modelo que no se ajustaron representan un 17.4 % de los sitios observados (Figura 10). Las diferencias mayores del run up se observaron en las bahías Chamela, Tenacatita y Melaque, posiblemente por efectos locales en la batimetría. Los valores simulados del run up se muestran en la Tabla 5.

Diferencia relativa de altura (Δh)

Con la finalidad de comparar las alturas de inundación resultantes del modelo de tsunami con las correspondientes observadas en el campo, se define en este trabajo la diferencia relativa:

$$\Delta h = \left(\frac{h_m - h_c}{h_c} \right) 100$$

donde **Δh**: diferencia relativa de alturas

hm: Altura de inundación resultante en el modelo

hc: Altura de inundación observada

En la Tabla 5 se muestra el conjunto de diferencias relativas (Δh) a lo largo de la costa de Jalisco y Colima.

Localización del plano de falla

Con la finalidad de investigar la sensibilidad de los resultados del modelo de tsunami en función de la localización del plano de falla, se tomó como referencia el plano de falla que se muestra en la Figura 9; esta localización se hizo variar alejándolo de costa y desplazándolo tanto al NW como al SW. Los resultados de estos experimentos se ilustran en la Figura 10, en función de las diferencias relativas (Δh).

Como se aprecia en la Figura 10, al alejar o cambiar de posición el plano de falla 30 km mar adentro, las alturas de inundación resultantes del modelo son menores, casi de la mitad de altura, que la altura de inundación observada en la mayoría de las localidades. Al cambiar la localización del plano de falla 30 km al NW, las alturas de inundación resultan del doble de altura que las observadas en Chamela; y de la mitad de altura que las observadas en Manzanillo. Mientras que cambiar la localización del plano de falla 30 km al SE, la mayoría de las alturas resultantes son menores que las observadas, excepto una de las localidades en Bahía Manzanillo.

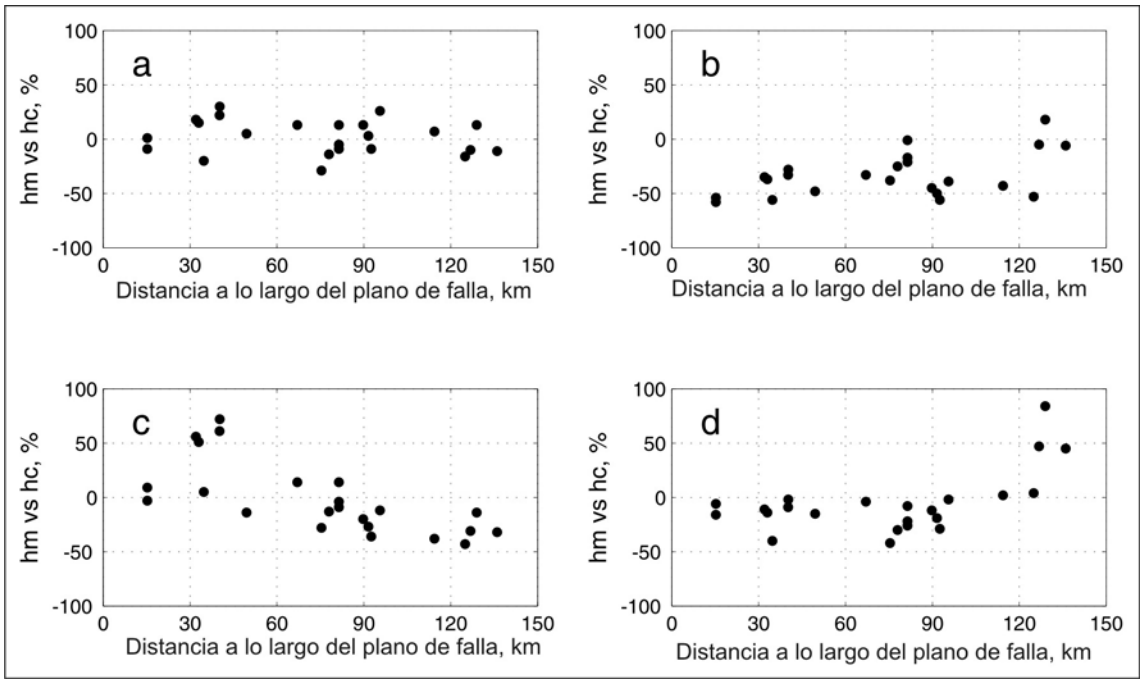


Figura 10. Comparación del run-up resultante del modelo de tsunami (*hm*) versus el run-up observado *(hc),* en función de la localización del plano de falla*;* a) El plano de falla propuesto en este trabajo y que se muestra en la Figura 9; b) El plano de falla alejado 30 km mar adentro; c) El plano de falla desplazado 30 km en sentido NW; d) El plano de falla desplazado 30 km en sentido SE. Fuente: Trejo-Gómez et al., 2015.

Sitios medidos en 1995					Modelo				
+Distancia km	Long.	Lat.	Inundación (m)	Altura run up ⊙ **hc** (m)	Altura run up ◆**hm** (m)	**Δh** (%)	Tiempo minutos	VTG/zona	Municipio
15	105.26	19.68	100	2.90	2.63	- 9	41	1/Chalacatepec	Tomatlán
15	105.26	19.67	60	2.60		- 1			
32	105.13	19.59	40	3.3	3.90	18	40	2/Chamela	La Huerta
33	105.12	19.59	40	3.4		15			
35	105.11	19.58	40	4.9		- 20			
40	105.08	19.53	30	3.2		22			
40	105.08	19.53	15	3.0		30			
50	105.04	19.44	115	3.5	3.67	5	48	3/Careyes	La Huerta
67	104.94	19.31	70	3.8	4.30	13	72	4/El Tecuán	La Huerta
75	104.81	19.30	15	5.10	3.62	- 29	39	5/Tenacatita	La Huerta
78	104.81	19.30	30	4.20		- 14			
81	104.79	19.28	172	3.80		- 5			
81	104.79	19.28	141	4.00		- 9			
81	104.79	19.28	77	3.20		13			
90	104.73	19.23	30	4.10	4.64	13	46	6/San Patricio (Melaque)	Cihuatlán
92	104.71	19.22	41	4.50		3			
93	104.70	19.22	25	5.10		- 9			
96	104.68	19.20	17	3.70		26			
-	-	-	-	-	3.68	-	37	7/Marabasco	Cihuatlán
114	104.51	19.13	-	3.87	4.12	7	48	8/Playa de Oro	Manzanillo
125	104.41	19.10	-	4.40	3.69	- 16	82	9/Majagua	Manzanillo
127	104.38	19.12		3.74	3.38	- 10	51	10/Manzanillo	Manzanillo
129	104.35	19.16		3.00		13			
136	104.31	19.07		3.79		- 11			

\+ Distancia a lo largo del plano de falla, comienza en la sección NW
⊙ hc = run up height medido 1995
◆ hm = run-up height simulado
***Δ h** = 100 (hm-hc) / hc. Es una diferencia relativa

Tabla 5. Comparación entre la altura del run up medido en la costa (Ortiz et. al., 1995), y el resultado según el modelo de generación y propagación de tsunami, con una fuente sísmica similar a la del terremoto del 9 de octubre de 1995. Fuente: Trejo-Gómez et al., 2015.

Los tiempos de arribo del tsunami.

En la Figura 11 se muestran los frentes de onda resultantes del modelo del tsunami del 9 de octubre de 1995, inferidos a partir de los mareogramas sintéticos (Figura 12), resultantes en cada una de las localidades en donde se establecieron lo VTG. En la Tabla 6 se indican los tiempos de arribo del tsunami y la mayor altura resultante en los VTG durante las primeras 10 horas después de ocurrido el sismo del 9 de octubre de 1995.

En los VTG que localizados en la costa de Jalisco, el primer arribo del tsunami o tiempo inicial ($\mathbf{T_i}$) se observa entre los 9 y 11 minutos después del sismo y el tiempo de arribo del run up ($\mathbf{T_m}$) entre los 37 y 46 minutos. En El Tecuán con T_i = 72 minutos, y en Majagua, Colima, T_i = 82 minutos.

Cabe hacer notar que en 80% de las localidades *VTG*, las alturas de arribo del tsunami (hi) fueron menores a 2 metros, mientras que las mayores alturas corresponden a la segunda o tercer ola, y son estas las que corresponden a las h_m , mismas que son comparables con las alturas de inundación observadas h_c (Tabla 5).

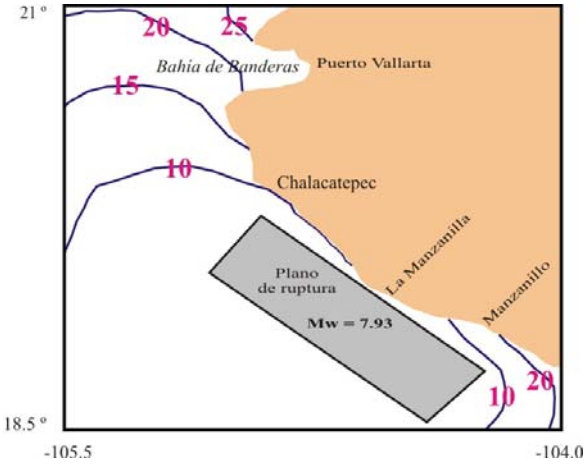


Figura 11. Tiempos de arribo en minutos en la región de estudio, con de modelo de generación y propagación del tsunami del 9 de octubre de 1995. Fuente: Trejo-Gómez et al., 2015.

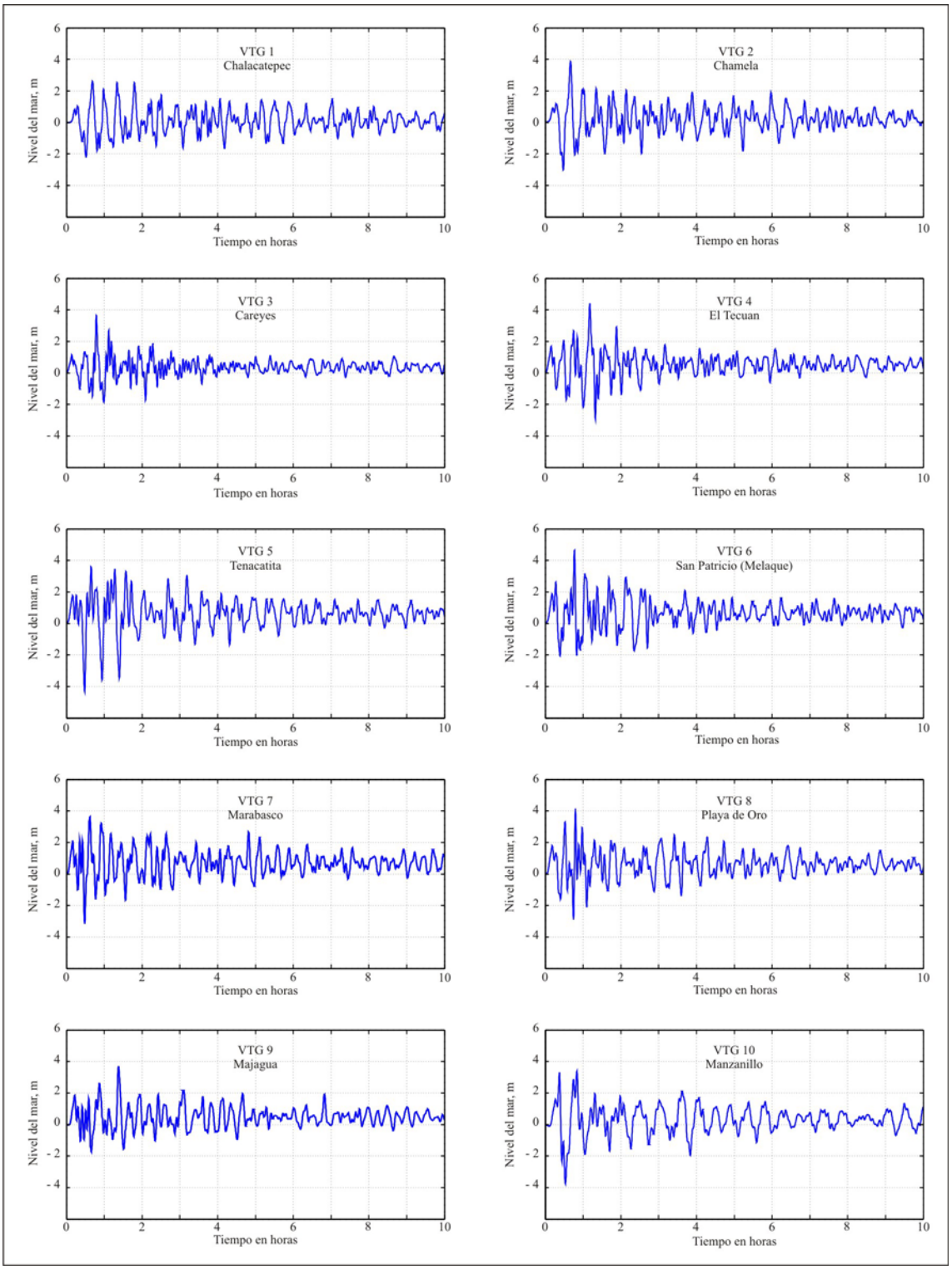


Figura 12 Alturas de onda y los tiempo de arribo para las primeras 10 horas en los VTG para simular la generación y propagación del tsunami del 9 de octubre de 1995. Fuente: Trejo-Gómez et al., 2015.

Arribo inicial (T_i) en minutos	**Arribo run up (T_m) en minutos**	VTG / zona	Municipio
10	41	1 / Chalacatepec	Tomatlán
11	40	2 / Chamela	La Huerta
8	48	3 / Careyes	La Huerta
10	72	4 / El Tecuán	La Huerta
10	39	5 / Tenacatita	La Huerta
10	46	6 / San Patricio (Melaque)	Cihuatlán
9	37	7 / Marabasco	Cihuatlán
10	48	8 / Playa de Oro	Manzanillo
11	82	9 / Majagua	Manzanillo
20	51	10 / Manzanillo	Manzanillo

Tabla 6. Tiempos de arribo de las ondas inicial y run up en la simulación del tsunami de 1995, para el sur de Jalisco y norte de Colima. Fuente: Trejo-Gómez et al., 2015.

Extensión de la inundación por del tsunami del 9 de octubre de 1995.

El resultado teórico del run up en cada VTG se aproximo los datos de altura del agua en referencia a nivel medio del mar para trazar las zonas de inundación. En general la extensión de inundación es una franja de 50 m a partir de la línea de costa. Las inundaciones mayores se observaron en Chalacatepec, la parte norte de Bahía Chamela, Bahía Tenacatita y Bahía Navidad (Figura 13). En estos lugares se encuentran las zonas de marisma y esteros, también en los cauces de los arroyos del lugar, en sitios que los moradores del lugar señalaron que el tsunami ingreso tierra adentro hasta 400 m. Este mapa puede ser utilizado para la planificación del territorio y los planes preventivos y operativos en las localidades afectadas por el tsunami que ocurrió en 1995.

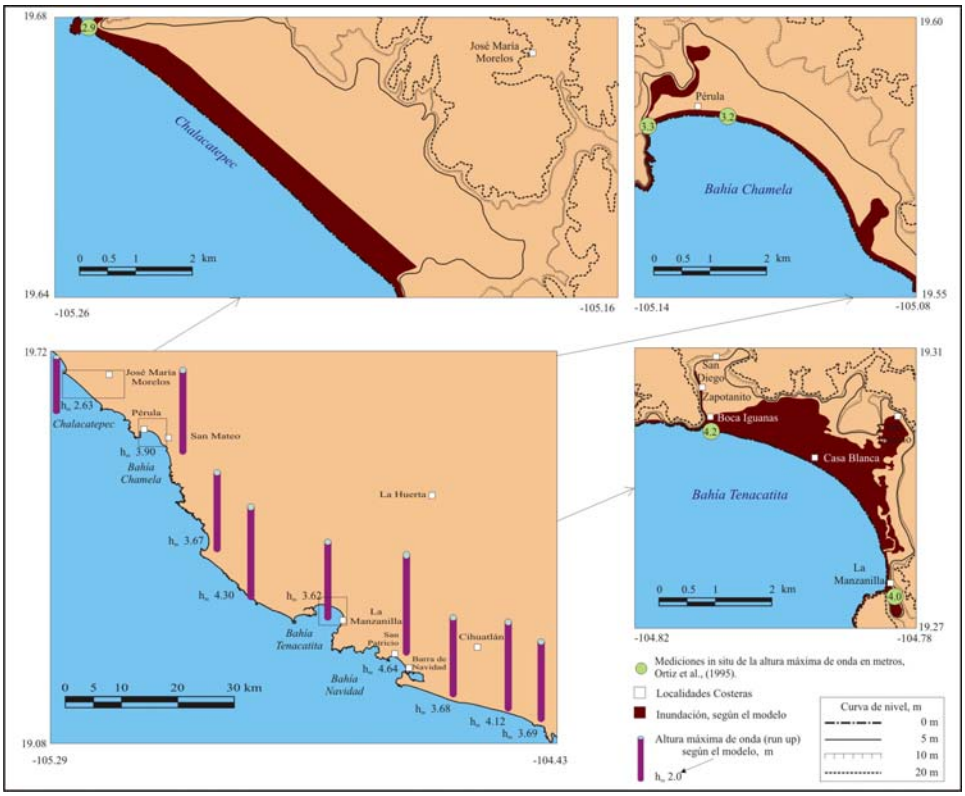


Figura 13 Extensión de inundación en la costa del tsunami de 1995, por la altura en m para cada VTG respecto al nivel medio del mar. Fuente: Trejo-Gómez et al., 2015.

Capítulo 2 Simulación numérica del tsunami local hipotético en la brecha sísmica de Jalisco.

2.1 La fuente sísmica hipotética en la región de estudio

Se presenta el modelo numérico de generación y propagación de tsunami local en la región de estudio. Su fundamento es el método utilizado para la simulación del tsunami de 1995 en la costa sur de Jalisco. Para esta sección del trabajo se estableció la hipótesis que después de un sismo de gran magnitud en la Trinchera Mesoamericana ocurre un tsunami.

- Un sismo de magnitud del momento sísmico $Mw \leq 8.0$ cuyo epicentro se ubique en la brecha sísmica frente a la costa de Jalisco.
- El área de fractura esperada equivale a una extensión de largo $140 < L \geq 180$ km y un ancho $w = 60$ km.
- La ruptura genera una deformación del lecho marino homogénea y sin cambios bruscos, por lo que los diferentes planos de la fractura forman una geometría simple.
- La dislocación en cada segmento del plano de fractura $1 < \Delta u_i > 4$ m.

La fuente sísmica hipotética resultante en la región, en sentido sur a norte de Jalisco, se extiende desde Perúla hasta la Bahía de Banderas como se muestra en la Figura 14. La dimensión del plano de falla en la simulación se determinó con una longitud L = 180 km y un ancho de w = 60 km, con una inclinación del plano de falla a 11 grados hacia la costa y a una profundidad de 10 km dentro de región interplaca. La superficie total de la fractura corresponde a 10,800 km^2, calculada al sumar 12 segmentos, cada uno tiene un área de $S_i = 30 \times 30$ km.

La dislocación en cada uno de los segmentos del plano de fractura fue de $\Delta u_i = 2.7$ m.

La magnitud del momento sísmico en este modelo corresponde a Mw8.0.

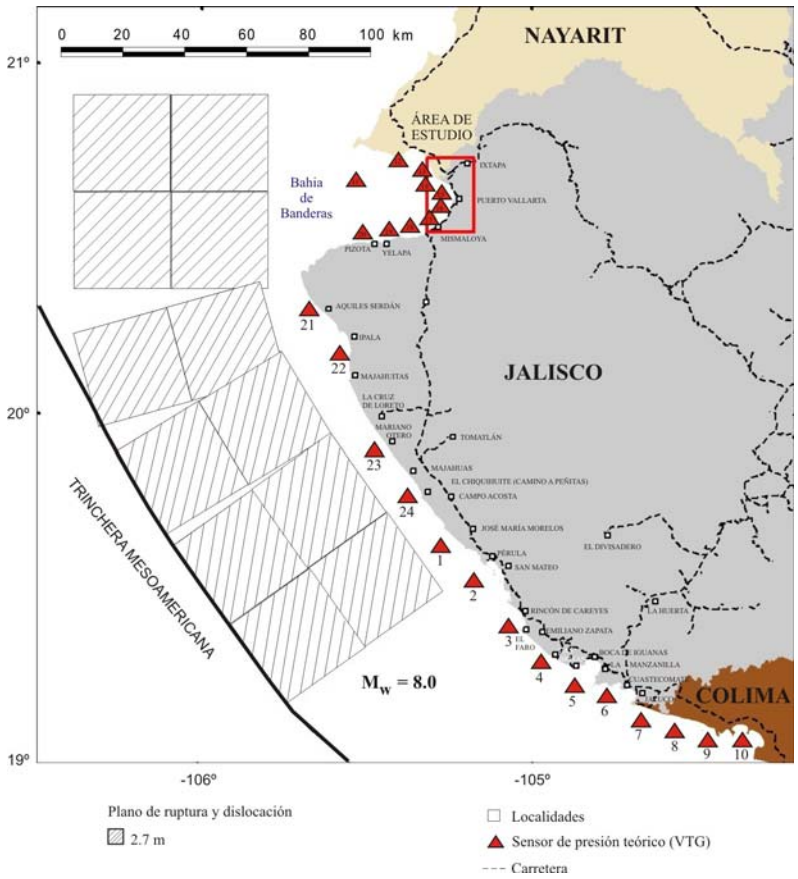


Figura 14. Localización del plano de ruptura y 24 VTG en el modelo numérico de generación y propagación de tsunami en el gap de la costa de Jalisco.

2.2 Estimación de alturas del tsunami.

En el modelo se estableció que el nivel cero del agua en la costa, o sin perturbación, es el nivel medio del mar. También se distribuyeron 24 sitios para obtener mareogramas sintéticos (VTG), para calcular los tiempos de arribo en minutos y la altura en metros para el tsunami local hipotético. La cobertura en los VTG (Figura 14), es la siguiente: dos cubren el sur de Nayarit, 19 la costa de Jalisco y tres al norte de Colima. En la Tabla 7 se indica la zona que cubre cada VTG, para la localidad costera más próxima basado el marco geoestadístico de INEGI, con las alturas del primer arribo ($\mathbf{h_i}$), y run up del tsunami ($\mathbf{h_m}$).

Altura primer arribo (h_i) m	Altura del run up (h_m) m	Sensor teórico (VTG)	Zona	Municipo/Estado
2.90	3.79	12	Cruz de Huanacaxtle	Bahía de Banderas/Nayarit
2.61	3.10	13	Nuevo Vallarta	Bahía de Banderas/Nayarit
1.21	3.43	11	Dentro de la Bahía	Puerto Vallarta/Jalisco
1.70	2.47	14	Ameca	Puerto Vallarta/Jalisco
2.32	3.65	15	Pitillal	Puerto Vallarta/Jalisco
2.00	3.54	16	Cuale	Puerto Vallarta/Jalisco
1.48	2.94	17	Garza Blanca	Puerto Vallarta/Jalisco
0.75	2.16	18	Boca de Tomatlán	Puerto Vallarta/Jalisco
0.78	2.46	19	Yelapa	Cabo Corrientes/Jalisco
1.08	2.37	20	Pizota	Cabo Corrientes/Jalisco
3.13	4.86	21	Aquiles Serdán	Cabo Corrientes/Jalisco
3.27	5.87	22	Ipala	Cabo Corrientes/Jalisco
2.47	4.36	23	Esteros El Colorado y Majahuas	Tomatlán/Jalisco
2.14	3.60	24	El Chiquihute	Tomatlán/Jalisco
1.49	2.72	1	Chalacatepec	Tomatlán/Jalisco
0.73	2.78	2	Chamela	La Huerta/Jalisco
0.54	1.37	3	Careyes	La Huerta/Jalisco
0.55	1.27	4	El Tecuán	La Huerta/Jalisco
0.50	1.71	5	Tenacatita	La Huerta/Jalisco
0.43	1.18	6	San Patricio (Melaque)	Cihuatlán/Jalisco
0.35	0.80	7	Marabasco	Cihuatlán/Jalisco
0.32	0.96	8	Playa de Oro	Manzanillo/Colima
0.36	0.94	9	Majahua	Manzanillo/Colima
0.50	2.08	10	Bahía Manzanillo	Manzanillo/Colima

Tabla 7. Alturas de las ondas inicial y del run up del tsunami hipotético en la región.

Alturas del tsunami local hipotético para el sur de Nayarit: la onda inicial $2.6 < h_i \geq 2.9$ m. El run up $3.0 < h_m \geq 3.8$ m.

Alturas del tsunami local hipotético en Jalisco: Los resultados de este modelo de generación y propagación de tsunami local en la región. Para Puerto Vallarta (Figura 15), la altura del primer arribo $0.7 < h_i \geq 2.4$ m. El run up $2.1 < h_m \geq 3.7$ m, en sentido sur a norte, desde Boca de Tomatlán hasta el valle del río Ameca.

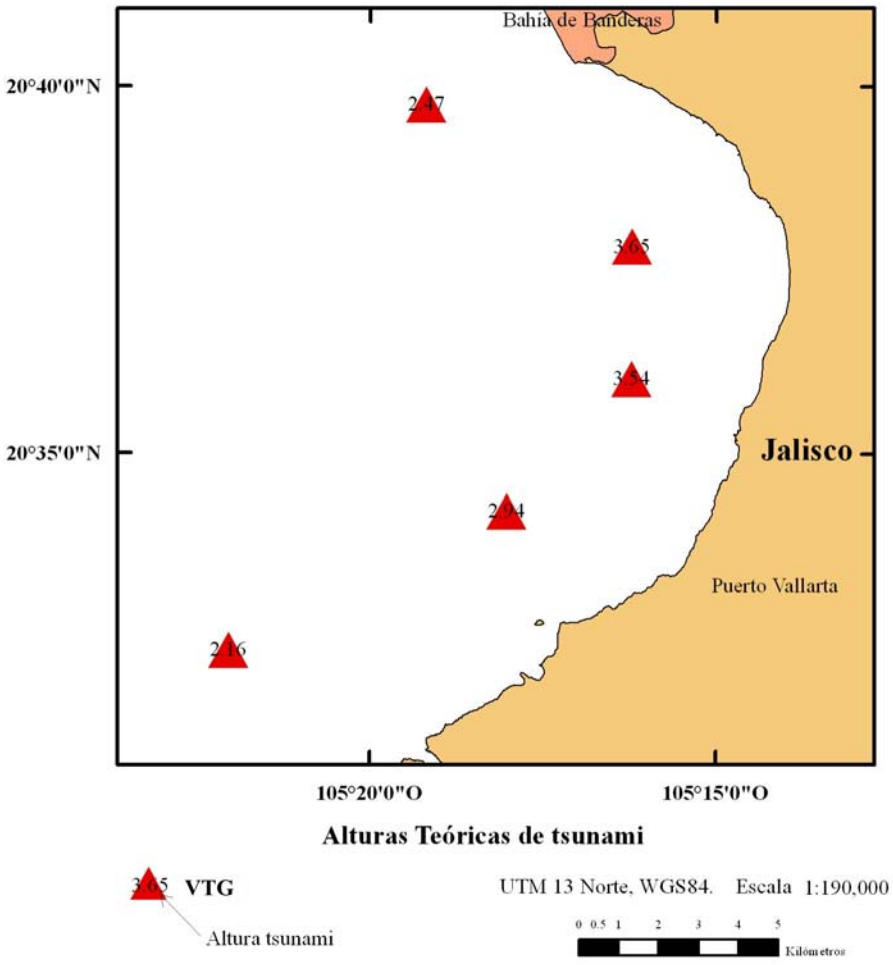


Figura 15. Alturas de onda máxima del tsunami local sintético frente a Puerto Vallarta, VTG 14 al 18.

En Cabo Corrientes, la altura del primer arribo del tsunami fue $0.7 < h_i \geq 3.3$ m. El run up frente Ipala fue $h_m = 5.85$ m, y frente a Aquiles Serdán $h_m = 4.86$ m. Para Pizota y Yelapa el run up $2.5 < h_m \geq 2.5$ m.

En el municipio de Tomatlán, la onda inicial fue $1.5 < h_i \geq 2.5$ m y se observó para el run up $2.7 < h_m \geq 3.4$ m.

En La Huerta la altura del primer arribo $0.5 < h_i \geq 0.75$ m. El run up $1.2 < h_m \geq 2.8$ m. En Bahía Tenacatita, donde se encuentra La Manzanilla, el run up $h_m \geq 1.8$ m.

En el municipio de Cihuatlán, la altura del primer arribo $0.3 < h_i \geq 0.5$ m. Para el run up $0.8 < h_m \geq 1.2$ m.

Alturas del tsunami local para el norte de Colima: se calculó que la onda inicial $0.3 < h_i \geq 0.5$ m. El run up $0.9 < h_m \geq 2.1$ m.

2.3 Estimación de los tiempos de arribo del tsunami.

Los tiempos de arribo del tsunami fueron calculados en minutos en el modelo de generación y propagación de un tsunami generado en la brecha sísmica, frente a la costa de Jalisco, se muestran en la Tabla 8 y en la Figura 16, para el tiempo de arribo de la onda inicial ($\mathbf{T_i}$) y para el tiempo del run up ($\mathbf{T_m}$).

Los tiempos de arribo para el sur de Nayarit: el tiempo de arribo de la onda inicial $T_i =$ 23 minutos y para el run up $T_m = 85$ minutos.

Arribo onda inicial (T_i) en minutos	Arribo run up (T_m) en minutos	Sensor teórico (VTG)	Zona	Municipo/Estado
24	86	12	Cruz de Huanacaxtle	Bahía de Banderas/Nayarit
23	85	13	Nuevo Vallarta	Bahía de Banderas/Nayarit
12	29	11	En Bahía de Banderas	Puerto Vallarta/Jalisco
23	69	14	Ameca	Puerto Vallarta/Jalisco
20	71	15	Pitillal	Puerto Vallarta/Jalisco
19	74	16	Cuale	Puerto Vallarta/Jalisco
21	74	17	Garza Blanca	Puerto Vallarta/Jalisco
14	77	18	Boca de Tomatlán	Puerto Vallarta/Jalisco
13	78	19	Yelapa	Cabo Corrientes/Jalisco
11	78	20	Pizota	Cabo Corrientes/Jalisco
11	26	21	Aquiles Serdán	Cabo Corrientes/Jalisco
13	96	22	Ipala	Cabo Corrientes/Jalisco
13	51	23	Esteros El Colorado y Majahuas	Tomatlán/Jalisco
12	47	24	El Chiquihute	Tomatlán/Jalisco
11	139	1	Chalacatepec	Tomatlán/Jalisco
11	61	2	Chamela	La Huerta/Jalisco
10	85	3	Careyes	La Huerta/Jalisco
13	163	4	El Tecuán	La Huerta/Jalisco
16	98	5	Tenacatita	La Huerta/Jalisco
17	106	6	San Patricio (Melaque)	Cihuatlán/Jalisco
17	218	7	Marabasco	Cihuatlán/Jalisco
19	243	8	Playa de Oro	Manzanillo/Colima
20	109	9	Majahua	Manzanillo/Colima
25	177	10	Bahía Manzanillo	Manzanillo/Colima

Tabla 8. Tiempo de arribo de las ondas inicial y run up del tsunami hipotético para la región de estudio.

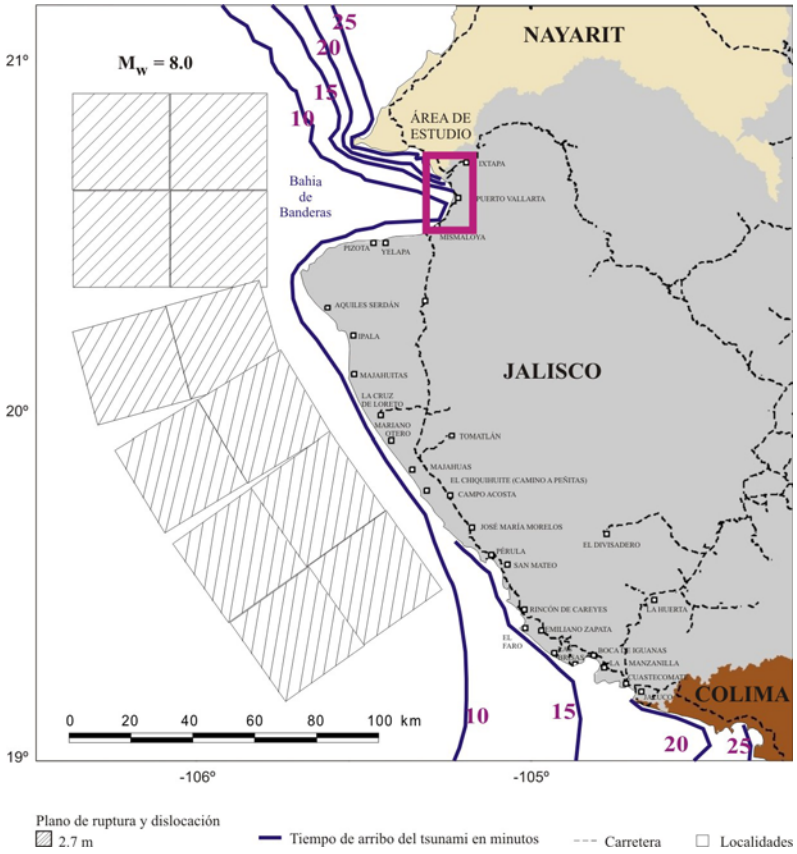


Figura 16. Tiempos de arribo del tsunami teórico en minutos, el plano de fractura se ubico frente a Puerto Vallarta.

Los tiempos de arribo para Jalisco: El sitio de menor tiempo observado para el primer arribo fue Careyes, donde T_i = 10 minutos.

Para Puerto Vallarta el arribo inicial $14 \leq T_i \geq 23$ minutos. El run up fue $69 \leq T_m \geq 77$ minutos. También se delimitó la inundación para cuatro arribos en la porción urbana de Puerto Vallarta, se muestran en la Figura 17, basados en los resultados de VTG (Figuras 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 y 25).

En Cabo Corrientes la onda inicial $11 \leq T_i \geq 13$ minutos. El run up fue $26 \leq T_m \geq 96$ minutos. Frente a la zona de Ipala se observo el run up en T_m = 26 minutos.

En Tomatlán el primer arribo $11 \leq T_i \geq 13$ minutos. El run up $47 \leq T_m \geq 139$ minutos.

En La Huerta la onda inicial $10 \leq T_i \geq 16$ minutos. El run up $61 \leq T_m \geq 163$ minutos.

En Cihuatlán el primer arribo $T_i = 17$ minutos. El run up $106 \leq T_m \geq 218$ minutos.

Los tiempos de arribo para el norte de Colima: el tiempo de arribo de la onda inicial $19 \leq T_i \geq 25$ minutos. El run up $109 \leq T_m \geq 243$ minutos.

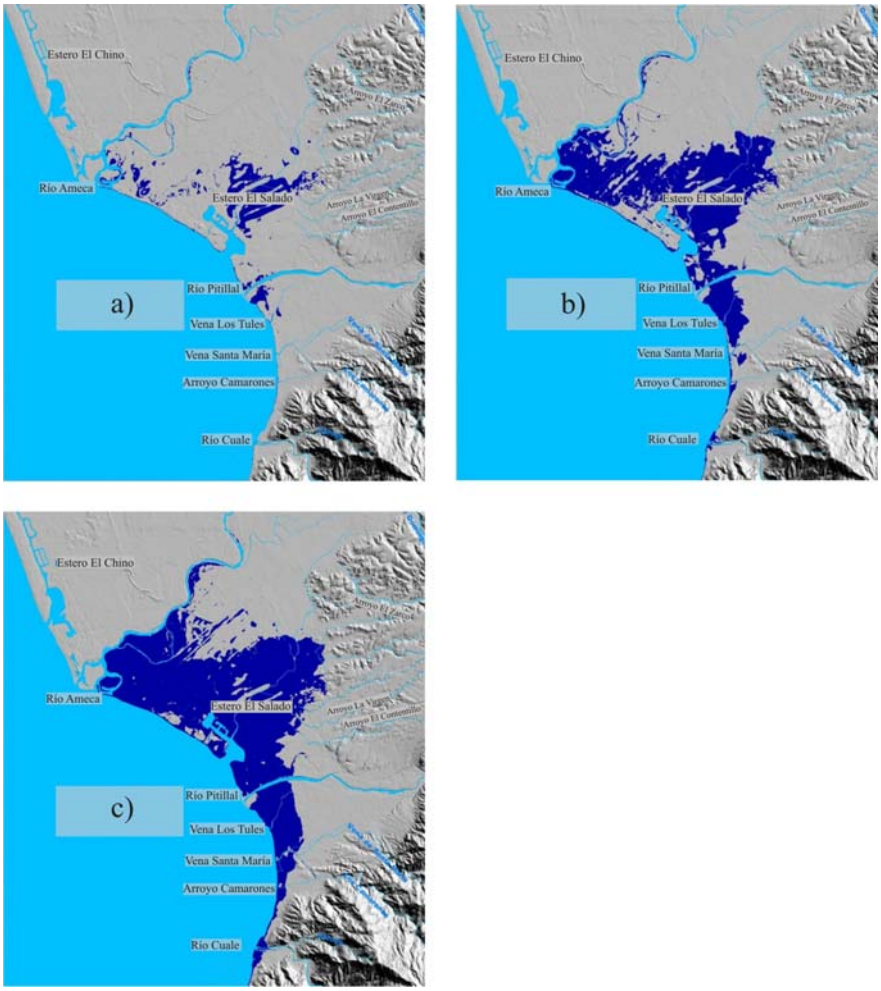


Figura 17. Inundación estimada para Puerto Vallarta, a partir de la simulación de tsunami local después de un sismo de gran magnitud, a) para el primer arribo y en 10 minutos, b) para el segundo arribo y en 15 minutos, c) para el tercer y cuarto arribo en 25 minutos y 75 minutos respectivamente.

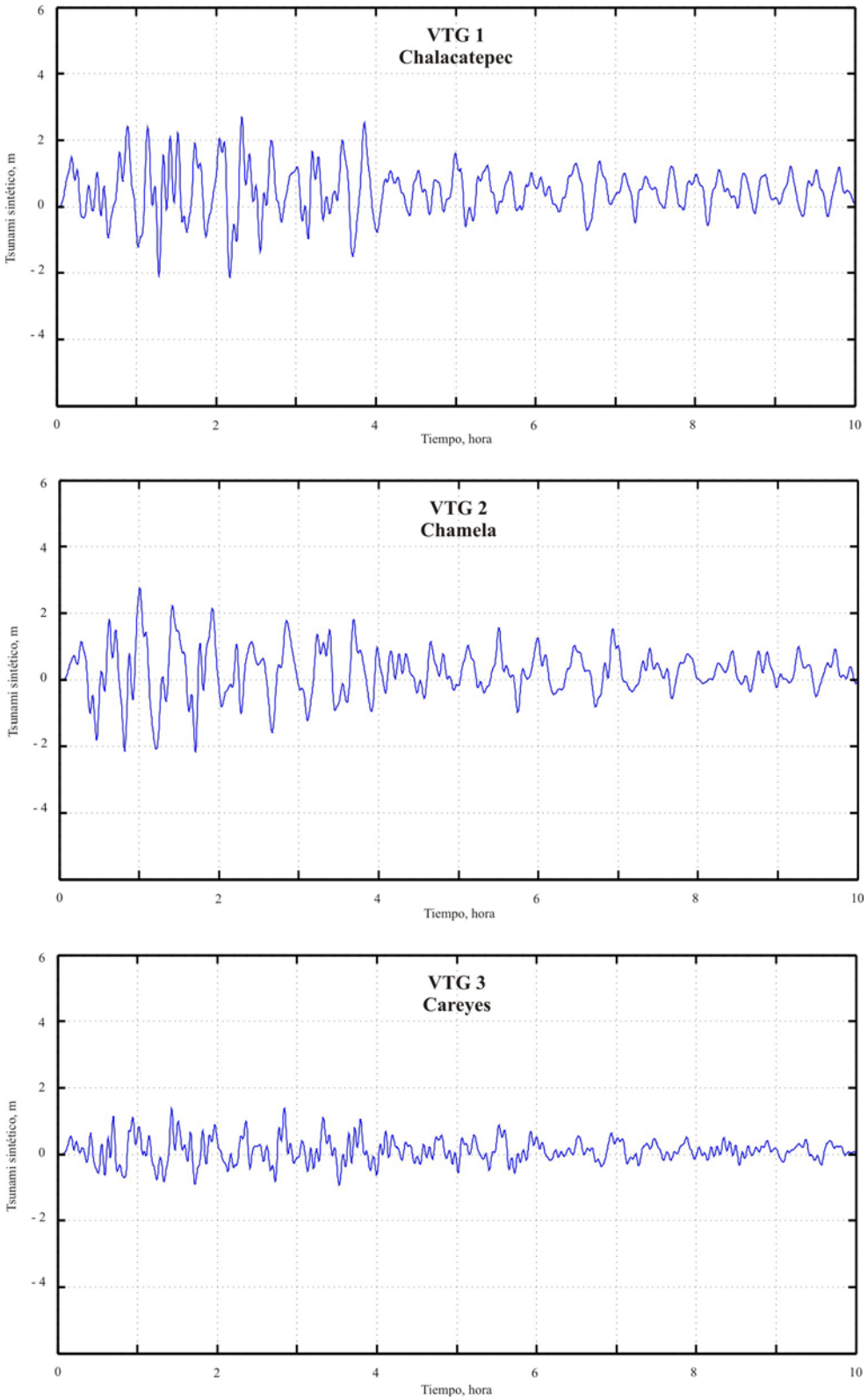


Figura 18. Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami hipotético en los sensores de presión teóricos VTG 1, VTG 2 y VTG 3.

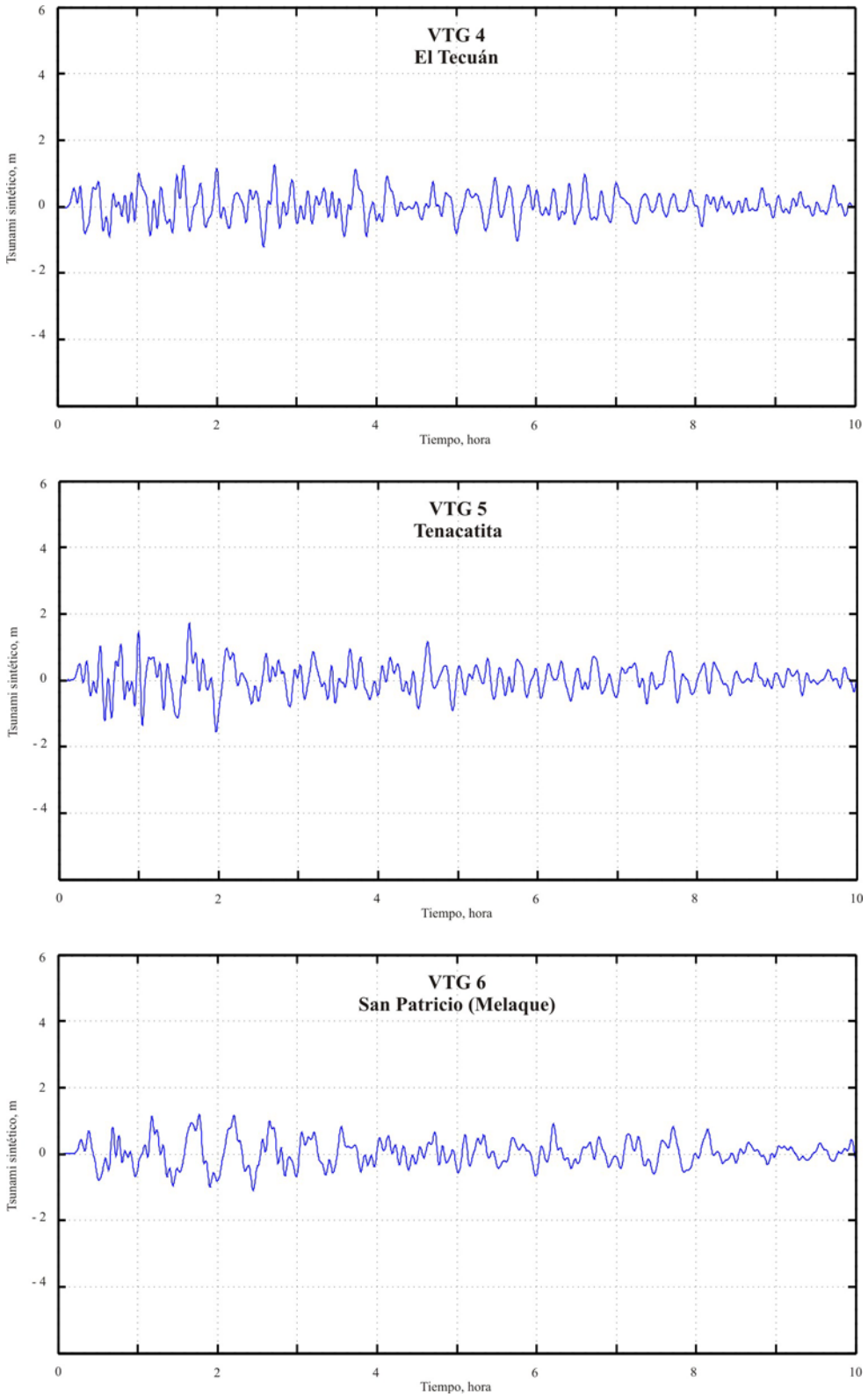


Figura 19. Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami hipotético en los sensores de presión teóricos VTG 4, VTG 5 y VTG 6.

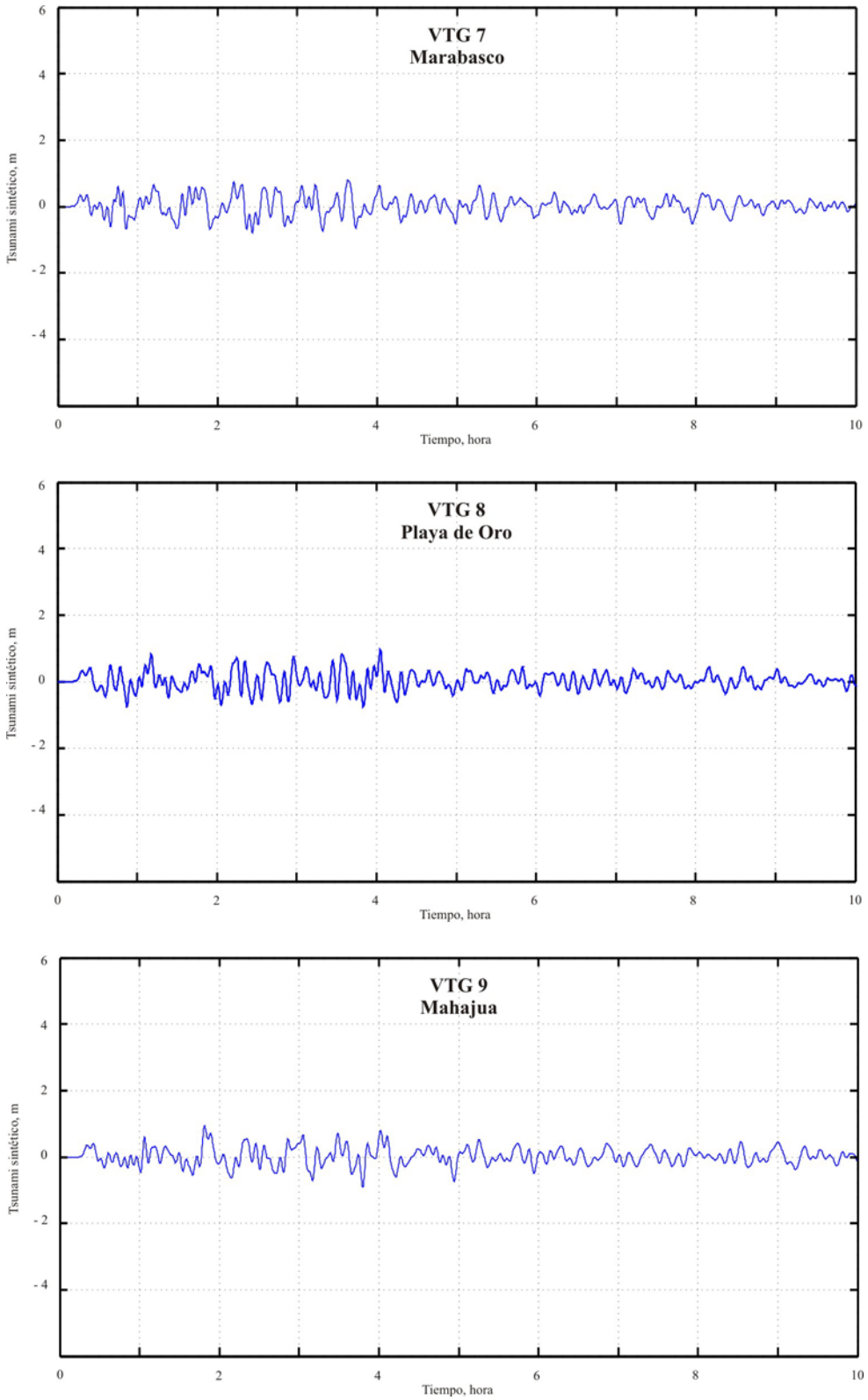


Figura 20. Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami hipotético en los sensores de presión teóricos VTG 7, VTG 8 y VTG 9.

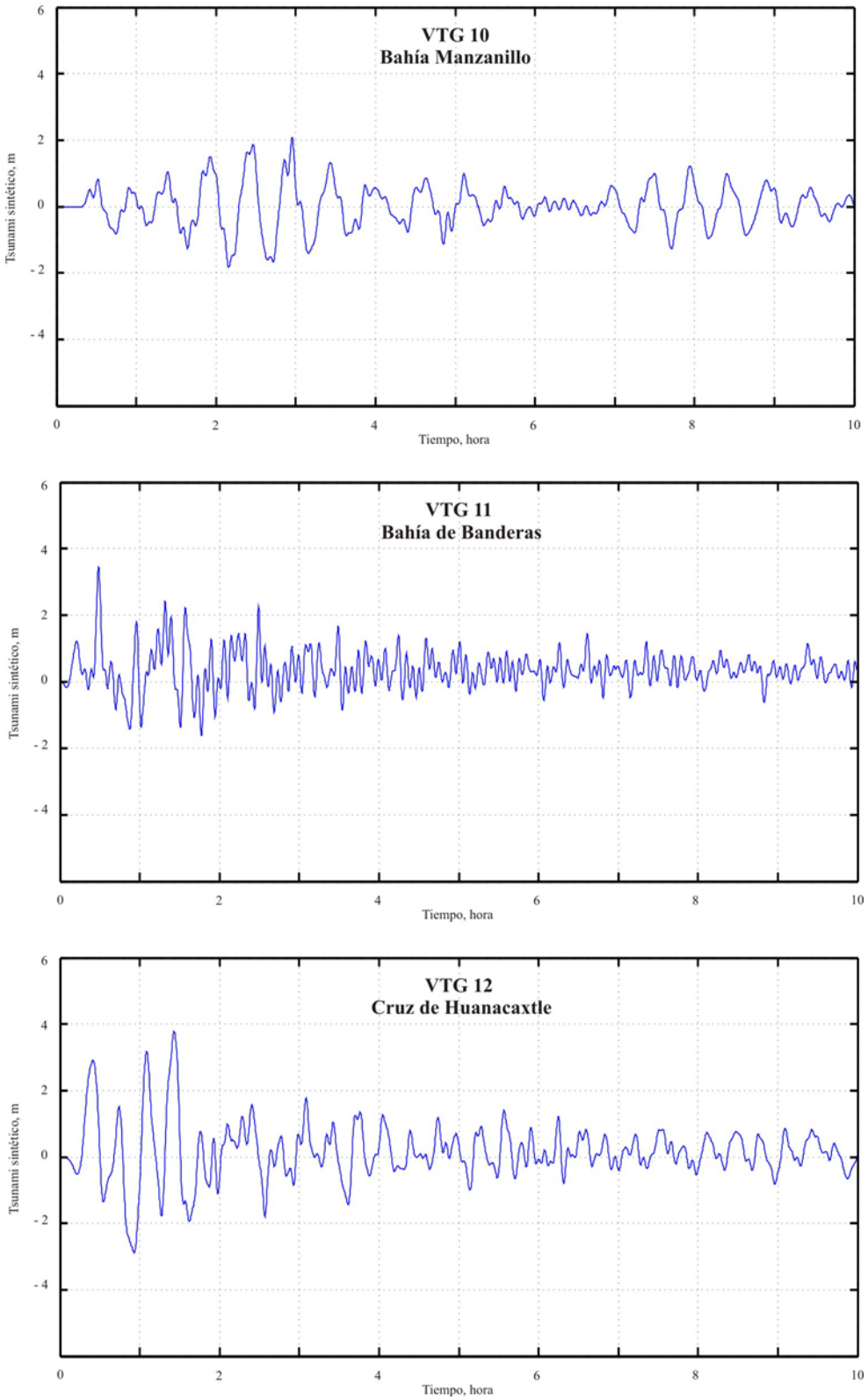


Figura 21. Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami hipotético en los sensores de presión teóricos VTG 10, VTG 11 y VTG 12.

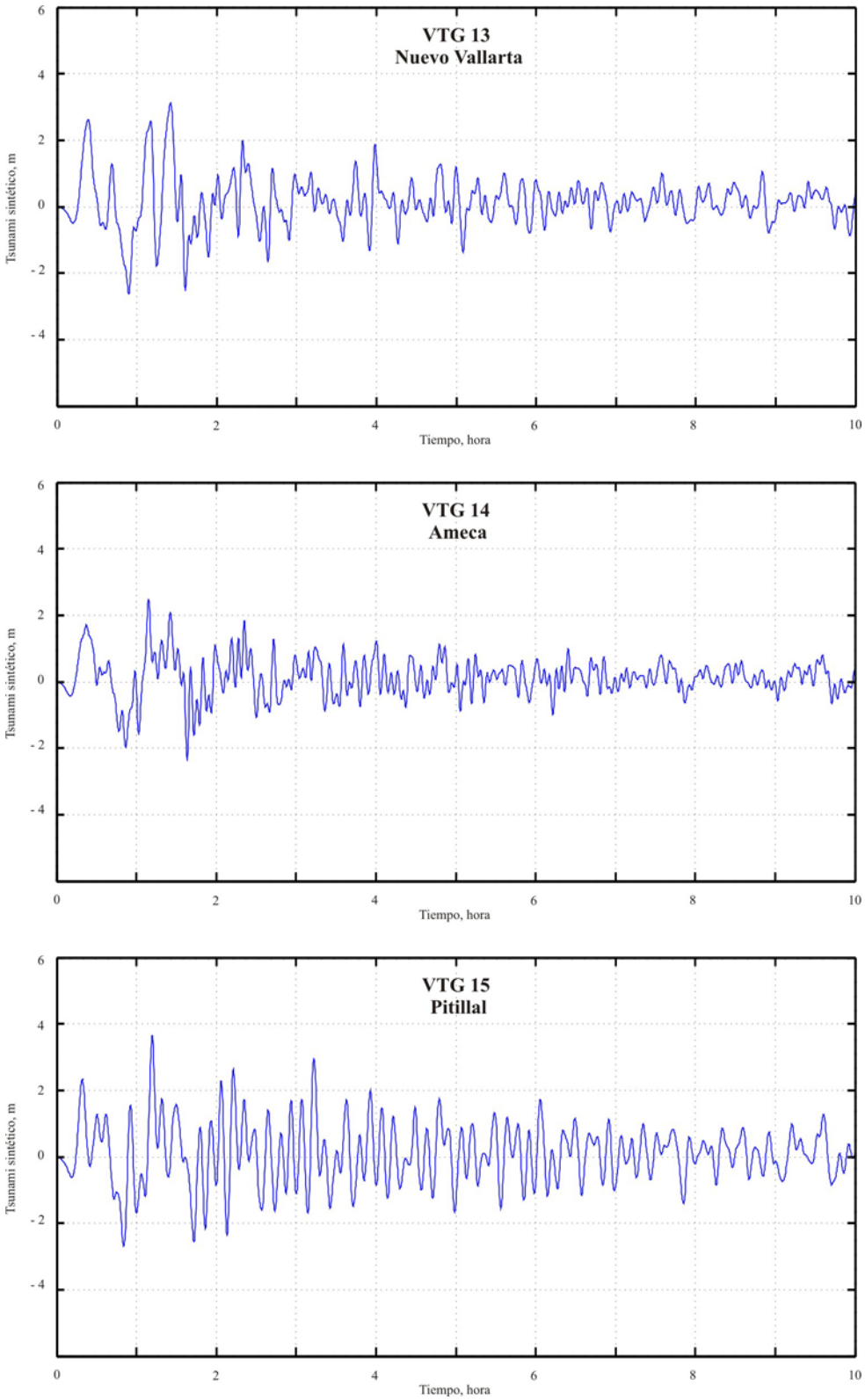


Figura 22. Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami hipotético en los sensores de presión teóricos VTG 13, VTG 14 y VTG 15.

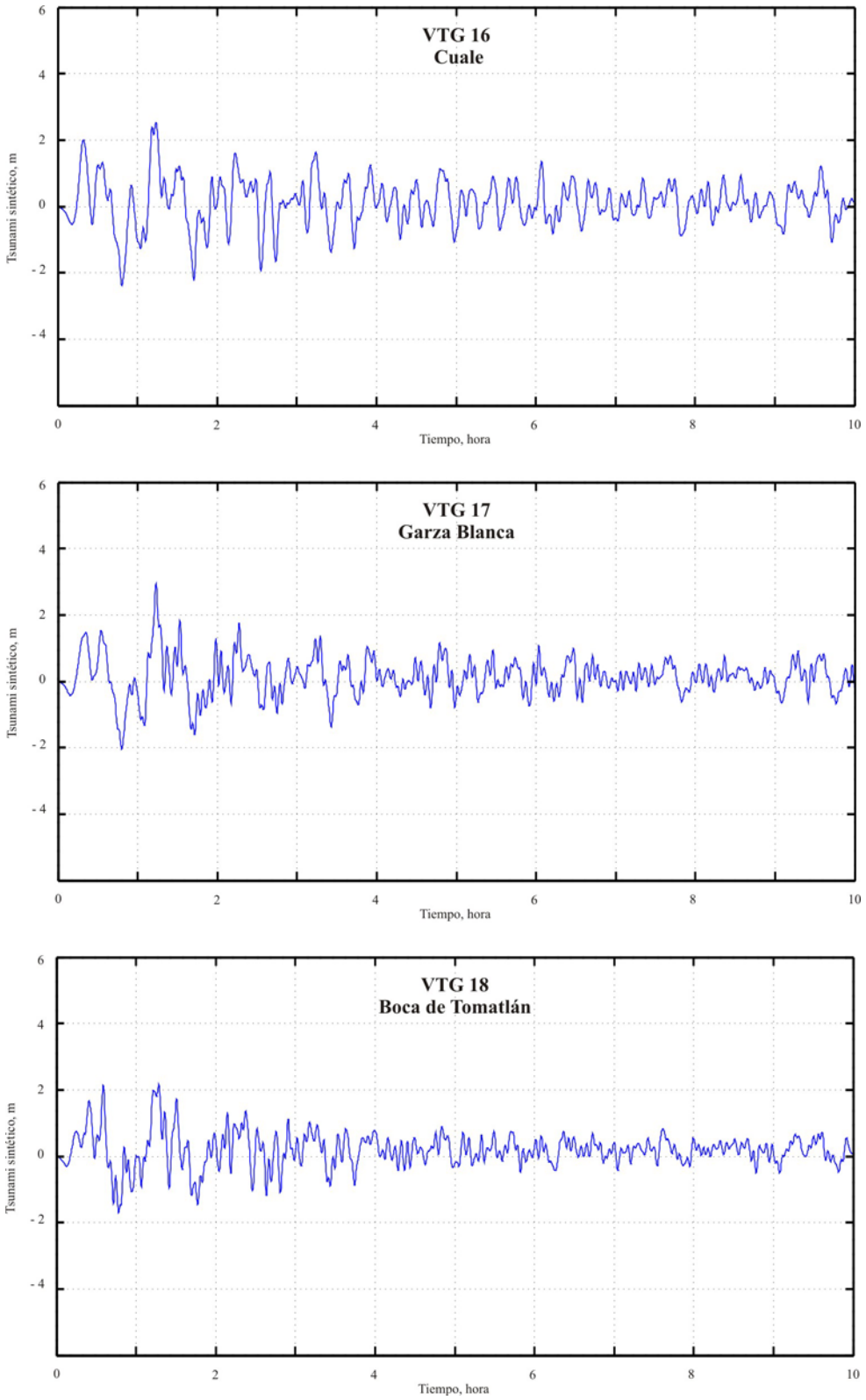


Figura 23. Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami hipotético en los sensores de presión teóricos VTG 16, VTG 17 y VTG 18.

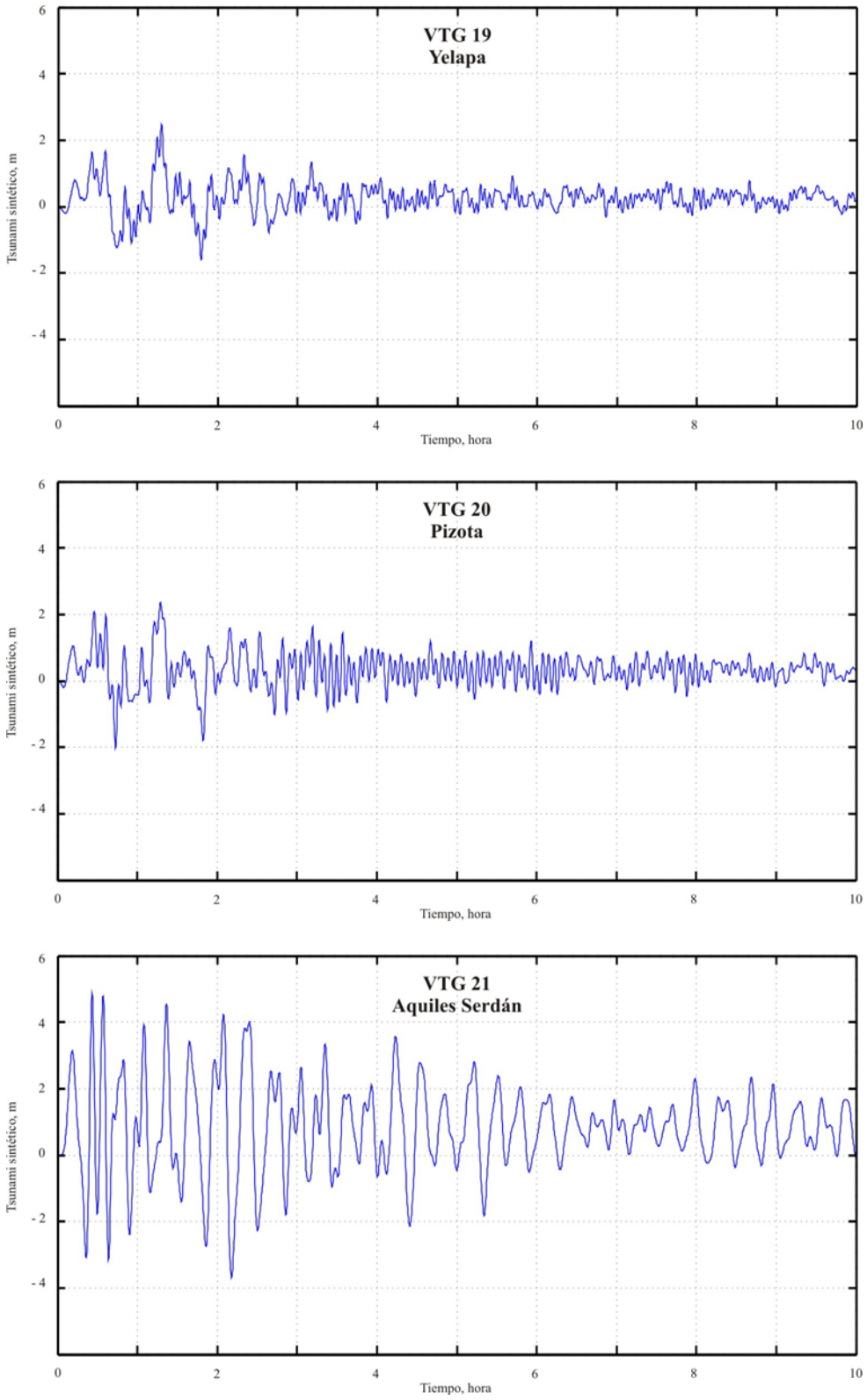


Figura 24 Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami hipotético en los sensores de presión teóricos VTG 19, VTG 20 y VTG 21.

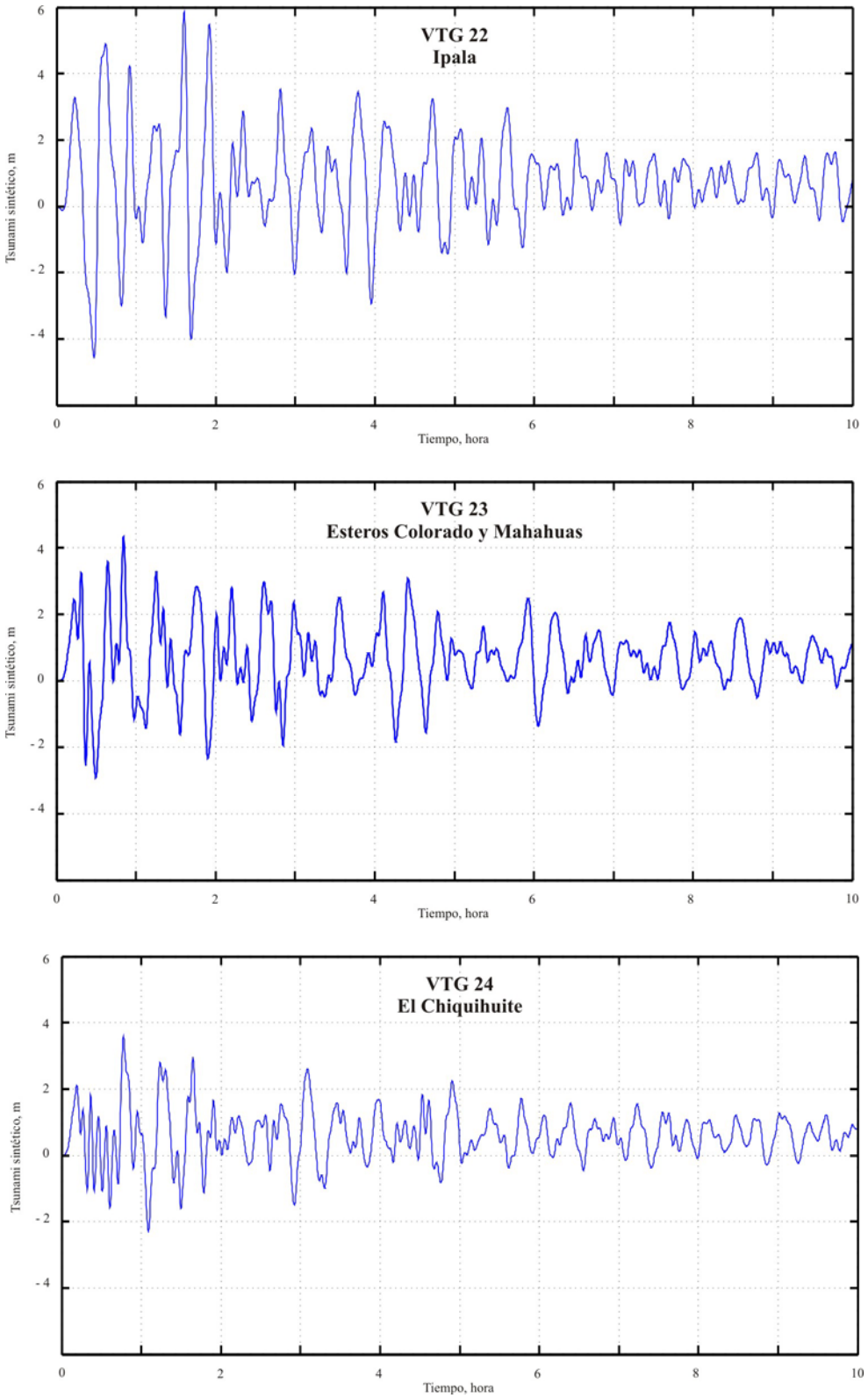


Figura 25. Tiempo de arribo y altura de onda del tsunami hipotético en los sensores de presión teóricos VTG 22, VTG 23 y VTG 24.

Capítulo 3 Peligro de inundación por tsunami local en Puerto Vallarta.

3.1 Gestión del riesgo

Para establecer la diferencia entre dos modelos de estudio para manejo o gestión del riesgo en un *sistema*, es necesario primero definir una serie de procesos: *peligro, vulnerabilidad, riesgo y desastre*. Una buena gestión del riesgo tiene por objetivo reducir la vulnerabilidad en el sistema para evitar un desastre.

Definiciones

Sistema es el conjunto integrado de población, infraestructura y actividades económicas en un territorio específico susceptibles al peligro.

Peligro en algunos documentos y países latinoamericanos emplean el término *amenaza* como sinónimo de *peligro*. Sin embargo en las diferentes regiones de México el término amenaza se percibe como "quizás se genere el peligro". Se entiende por *peligro* a la probabilidad de ocurrencia de un proceso o un evento, natural o inducido por el hombre en un área dada y un período de tiempo determinado con el potencial de crear pérdidas en el *sistema*. La Ley General de Protección Civil en México clasifica el peligro con base al agente perturbador que le da origen, definiendo así los siguientes tipos: Geológico, Hidro-meteorológico, Químico-tecnológico, Sanitario-ecológico y Socio-organizativo. Los peligros que afectan un ecosistema (ambientales) son difíciles de encuadrar en alguna de estos tipos de clasificación del peligro debido a que probabilidad de ocurrencia es la suma de diferentes agentes perturbadores.

Vulnerabilidad es el cálculo de los costos por daños ocasionados por el peligro en el sistema. La vulnerabilidad entonces calcula cada pérdida como número de víctimas, daños en los bienes de la población, costos para reparar o reedificar la infraestructura vital, también para el patrimonio cultural y costos para restablecer los servicios públicos de una comunidad en el área de afectación del peligro; en un periodo de tiempo específico. Por lo tanto la vulnerabilidad es única para determinado territorio. La vulnerabilidad puede ser

modificada para tratar de minimizar las pérdidas (Smith, 1996), al implementar tres fases en la gestión del riesgo:

Fases en la gestión del riesgo

Modificación de la vulnerabilidad

A) Antelación o Preparados para actuar.

En esta fase las acciones preventivas se justifican en los estudios que caracterizan al peligro y la zona de afectación en un territorio y el objetivo es tener claro la conducta de los habitantes, la organización del gobierno y los cuerpos de emergencia ante la ocurrencia del peligro. Se considera que la antelación es el resultado de una adecuada percepción del riesgo, esto significa que las autoridades y la comunidad reconocen que son susceptibles ante un peligro; y por ello buscan minimizar las pérdidas. En esta fase quedan establecidas las responsabilidades de las autoridades de gobierno en sus diferentes niveles, se establecen los protocolos y el desarrollo de programas para la atención preventiva, así como durante la contingencia y recuperación.

Ejemplo las acciones preventivas son la señalización de rutas de evacuación, organización de los servicios de atención en emergencias, prever el abasto de alimentos y medicamentos al ocurrir el peligro, impulsar los programas preventivos que educan a la comunidad para que conozcan las conductas individuales o colectivas ante el peligro. La clave para modificar la vulnerabilidad es un adecuado plan educativo dirigido a la comunidad.

Los programas preventivos implican un fuerte trabajo político de las autoridades hacia la comunidad para prepararla y mantenerla organizada. Una desventaja de los programas que se desarrollan a largo plazo es que la percepción del peligro cambie; y la población o los planificadores del territorio consideren que el peligro no ocurrirá, en otras palabras negar el peligro.

B) Planificación de los usos del territorio.

La planificación es posible al implementar leyes que regulan el aprovechamiento óptimo de los recursos del territorio y la vigilancia para que se cumplan los ordenamientos. En esta fase se tiene claro que de ocurrir el peligro hay pérdidas aceptables debido a las actividades económicas y los administradores del territorio implementan leyes para minimizar el riesgo, entonces condicionan, restringen o niegan los usos de suelo. Un uso inadecuado del suelo por lo general incrementa el riesgo.

En la práctica organizar el aprovechamiento óptimo de los recursos depende de:

- Caracterizar el peligro: El origen del peligro, los periodos de recurrencia y delimitar la zona de afectación. Esto solo es posible por observación científica del evento, por registros históricos o en la memoria colectiva de la comunidad cuando que ha sido testigo del peligro y ha sufrido alguna afectación.

- Asumir los altos costos de estudios científicos para generar los mapas de peligros, realizar inventario de usos de suelo, actualizar el cálculo de la densidad de población, tendencias económicas entre otros, que se manifiestan en un documento legal llamado Atlas de Peligros. También los costos de operación de red monitoreo del peligro, obras de mitigación del peligro, normas de construcción, programas educativos y de prevención entre otros factores, que hacen posible regular las actividades económicas.

Algunos de los factores que explican la falta de planificación del territorio:

- Pasar el costo del riesgo a otros.

- Mantener la inercia del territorio sin planificar.

- Resistencia a cambiar las actividades económicas que aceleran e incrementan el riesgo por otras de menor impacto.

C) Monitorear el peligro y emitir una alerta.

Los sistemas de monitoreo permiten realizar un pronóstico confiable y si fuese necesario emitir una alerta pública. Esta fase se basa en el uso de las nuevas tecnologías y se limita a al pronóstico de algunos peligros, como ejemplo para un huracán, en cambio para

terremotos o sequias prolongadas existe gran incertidumbre del pronóstico. De manera general se puede mencionar que los sistemas de monitoreo requieren un robusto equipo de computo, los diferentes instrumentos en red que registran la evolución del evento, enlace de la información de la red local con otras redes, sistemas de comunicación avanzados, personal operativo especializado y protocolos muy específicos para emitir la alerta. Se organiza en los estados de pronóstico, monitoreo y alerta.

- Pronóstico. Es una teoría basada en la generación de diferentes simulaciones del peligro, las estadísticas de registros en un periodo largo, más de 25 años, y con un nivel de confianza que permiten estimar la probabilidad de recurrencia similar del evento, aunque sin precisar la fecha.

- Monitoreo. Con el uso de instrumentos en red y equipo de computo robusto se evalúa la secuencia del peligro. Un evento monitoreado se puede ubicar, conocer su evolución y magnitud. Es una observación científica de los hechos que permite brindar indicaciones claras para responder bien ante el peligro.

- Alerta. Es un mensaje público de las indicaciones a seguir para minimizar las pérdidas y se basa en el pronóstico y monitoreo. El mensaje de alerta se emite por diferentes medios de comunicación. Se establecen de manera preliminar al evento los protocolos y responsables de emitir la alerta y también se ha calculado las pérdidas económicas que generan una falsa alarma. Los responsables del sistema de monitoreo y pronóstico no emiten la alerta, ya que su responsabilidad es evaluar los registros de los instrumentos y si lo amerita generar una serie de mensajes de advertencias dirigidos a las autoridades de gobierno y las instituciones de seguridad y atención en emergencia. Los mensajes de advertencia son transmitidos por diferentes medios de comunicación como lo son el teléfono, fax, radio y correo electrónico porque el objetivo es que se logren recibir los mensajes. Estos mensajes de advertencia cambian conforme al pronóstico del evento perturbador, por lo que hay diferentes grados de advertencia del mensaje. Si el pronóstico indica que el peligro evoluciono y que afectara a la localidad, entonces se emitirá la alerta publica.

Riesgo en términos generales es una función de las variables peligro y vulnerabilidad, que se interceptan en un territorio y en un tiempo determinado

$$\mathbf{R = (P) \cap (V)}$$

donde

P: es peligro, la probabilidad de ocurrencia de un *evento* de origen natural o antrópico capaz de producir pérdidas en un lugar y momento dados.

V: es la vulnerabilidad, el costo de regresar el sistema a la normalidad después de ocurrido el desastre.

Por lo que el RIESGO es la exposición al peligro de personas o bienes y que tienen un valor. En la práctica, la ecuación anterior se reduce a dos variables: el peligro y el aspecto económico. Por lo tanto, el riesgo se define como una función de los dos variables.

$$\mathbf{R\ (P, V) = P\ (p)\ \cap\ V\ (e)}$$

donde

P (p): El peligro, es una función probabilística.

V (e): La vulnerabilidad, es una función económica.

De esta forma tenemos un concepto que es el producto de dos funciones; una probabilística que es "el peligro" y la económica que es "la vulnerabilidad", que es única para un territorio y un periodo de tiempo determinado. Dicho de otra forma; son las perdidas que se van a tener sobre el total de la inversión, aunque en algunos casos las perdidas podrían ser superiores a la inversión. A partir de aquí se puede manejar tanto el peligro y la vulnerabilidad como funciones escalares y vectoriales; que pueden ser analizadas a través del álgebra matricial, con la complejidad que sea necesaria, pero en realidad va depender de las series de datos disponibles.

Desastre es el momento cuando el riesgo se vuelve un hecho y ocurre como consecuencia de una inadecuada gestión del riesgo. Se identifica como desastre al evento dentro de la zona que se manifiesta el peligro y que genera afectaciones en diferentes elementos del sistema: un gran número de personas damnificadas, colapso de las actividades económicas,

finanzas públicas deficientes, pérdida de los acervos históricos y culturales, devastación y colapso de la infraestructura vital y del equipamiento. Por lo que se puede considerar al desastre como la realización de los escenarios previstos en los estudios de riesgo previos; aunque no existe una definición universal para escalar las perdidas. Se busca evitar un desastre mediante la adecuada gestión del riesgo (Figura 26).

Figura 26. Diagrama de flujo de la gestión del riesgo. Modificado de Smith (1996).

Gestión del Riesgo es un modelo de trabajo científico para calcular un riesgo y diseñar estrategias para evitar un desastre. Para el análisis y el manejo de un riesgo las soluciones estarán basadas en alguno de los dos paradigmas, uno de ellos es la evaluación conductual y el otro es la interpretación estructural del riesgo (Smith, 1996).

La evaluación conductual del riesgo enfatiza el uso de la tecnología de punta para evitar un desastre. Sustenta que las soluciones están condicionadas por la aplicación de recursos económicos, con el propósito de aliviar la situación al momento que ocurriera el evento perturbador. En este paradigma se asume que los eventos geofísicos son la causa principal de los riesgos, por lo que las medidas de prevención más urgentes deben estar enfocadas hacia la observación y el control de la naturaleza. Las estrategias para la reducción de la vulnerabilidad dependen en buena parte por la aplicación de la tecnología. La atenuación de las consecuencias producidas por fenómenos geofísicos extremos quedaría en manos de la ciencia aplicada y de futuros avances tecnológicos, mientras para los países en vías de desarrollo el manejo del riesgo estará basado en las transferencias y aplicación de las nuevas tecnologías. El énfasis puesto en la alta tecnología esta estrechamente vinculado a parámetros de organización jerárquicos e institucionales, por lo que solamente los organismos públicos o gubernamentales tendrían la competencia y los fondos suficientes para financiar este tipo de estrategia preventiva. El aplicar una práctica tecnológica como factor central, alrededor del cual se supeditan otros elementos esenciales del proceso de desarrollo; la tecnología en si es inoperante e irrealizable, ya que las ayudas técnicas y de beneficencia pueden aumentar la vulnerabilidad al perpetuar las estructuras de dependencia externas a la comunidad.

La interpretación estructural del riesgo identifica los procesos de producción óptimos para una población específica. Lo que propone este modelo es una interpretación objetiva del peligro y riesgo para buscar soluciones prácticas y enfatiza el uso óptimo de los recursos con los que cuenta la población vulnerable. La interpretación del riesgo se basa en la observación científica de los procesos presentes en la comunidad por lo que son únicos. El punto básico reside en identificar las causas estructurales del origen del peligro y las

asumir los costos aceptables de los riesgos. Además de los eventos geofísicos es necesario evaluar los sistemas de producción masivos y sin control que impactan negativamente a la sociedad. Más que de la carencia de información o de la percepción equivocada de los peligros, un desastre es el resultado de 'factores estructurales', como la nula o poca implementación de medidas preventivas, de advertencia y de rehabilitación.

Los estructuralistas subrayan la importancia de establecer cambios sociopolíticos para la prevención de riesgo, pues con una estructura sólida se logra la autosuficiencia en la formación local.

3.2 Caracterización del peligro de inundación por tsunami local hipotético en Puerto Vallarta.

En el capitulo dos se simuló la generación y propagación del tsunami local sintético en el brecha sísmica frente a la costa de Jalisco y se determinó los tiempos de arribo y las alturas esperadas en la costa. Esta información es necesaria para generar el mapa de peligro por inundación ocasionado por tsunami local en Puerto Vallarta.

Para delimitar la inundación por el tsunami sintético se generó un modelo digital del terreno (**MDT**), de la zona de afectación, que si representa las condiciones locales de la topografía en la parte urbana de Puerto Vallarta. El MDT se generó mediante el método de mínima curvatura suavizada (método *spline*), con celdas a una resolución 2.5 x 2.5 m. Los datos se registraron en un vuelo fotogramétrico a escala 1:20,000 del año 2000. Esta escala permite delimitar la inundación en zonas urbanas. En la hipótesis de trabajo se estableció que los valores correspondientes a la altura nivel del agua máximo del tsunami sintético se hacen igual a los valores de elevación del terreno de la zona urbana de Puerto Vallarta.

Ajuste del valor de alturas del tsunami local teórico frente a Puerto Vallarta.

El cambio de nivel debido a la marea alta o baja en el instante que ocurriese el sismo de gran magnitud modifica el nivel sin perturbación del agua, que en este trabajo se estableció que fuese el nivel medio del mar.

Para calcular las variaciones en la altura del tsunami local teórico explicadas por el cambio en la marea, se ajustaron los valores que fueron observados en la simulación del tsunami, en base los calendarios mensuales pronósticos de marea para Puerto Vallarta publicados por CICESE correspondientes al año 2013.

Si se diera el caso que el tsunami ocurriera en la época de marea alta, los valores de alturas generadas en modelo se les deben sumar un metro. Para el caso de ocurrencia de un tsunami local y marea baja los valores de altura del modelo se ajustan a menos un metro (Tabla 9).

Alturas modificadas del tsunami sintético con marea baja en Puerto Vallarta: para la onda inicial $-0.2 < h_i \leq 1.4$ m y el run up $1.1 < h_m < 2.7$ m.

Alturas modificadas del tsunami sintético con marea alta en Puerto Vallarta: para la onda inicial $1.7 < h_i \leq 3.4$ m y run up $3.1 < h_m < 4.7$ m.

Ajuste marea baja		**Ajuste marea alta**			
Altura de onda inicial (h_i) m	Altura de run up (h_m) m	Altura de onda inicial (h_i) m	Altura de run up (h_m) m	**VTG**	**Zona**
0.21	2.43	2.21	4.43	11	Bahía
0.70	1.47	2.70	3.47	14	Ameca
1.32	2.65	3.32	4.65	15	Pitillal
1.00	2.54	3.00	4.54	16	Cuale
0.48	1.94	2.48	3.94	17	Garza Blanca
-0.25	1.16	1.75	3.16	18	Boca de Tomatlán

Tabla 9. Ajuste del valor de las alturas del tsunami hipotético en Puerto Vallarta con el cambio de marea

El cambio de nivel en la mar modifica la extensión de inundación por tsunami local (Figura 27) y para calcular la superficie de inundación en las cuencas hidrológicas de la zona de estudio (Figura 28), basados en Rodríguez et al. (2012). Se tomaron los valores a la altura máxima del nivel del agua en el modelo, h_m, ajustados en marea alta y baja. Los resultados

se presentan en la Tabla 10 para las superficies de inundación y en la Tabla 11 la extensión de la inundación lineal a partir del nivel medio del mar.

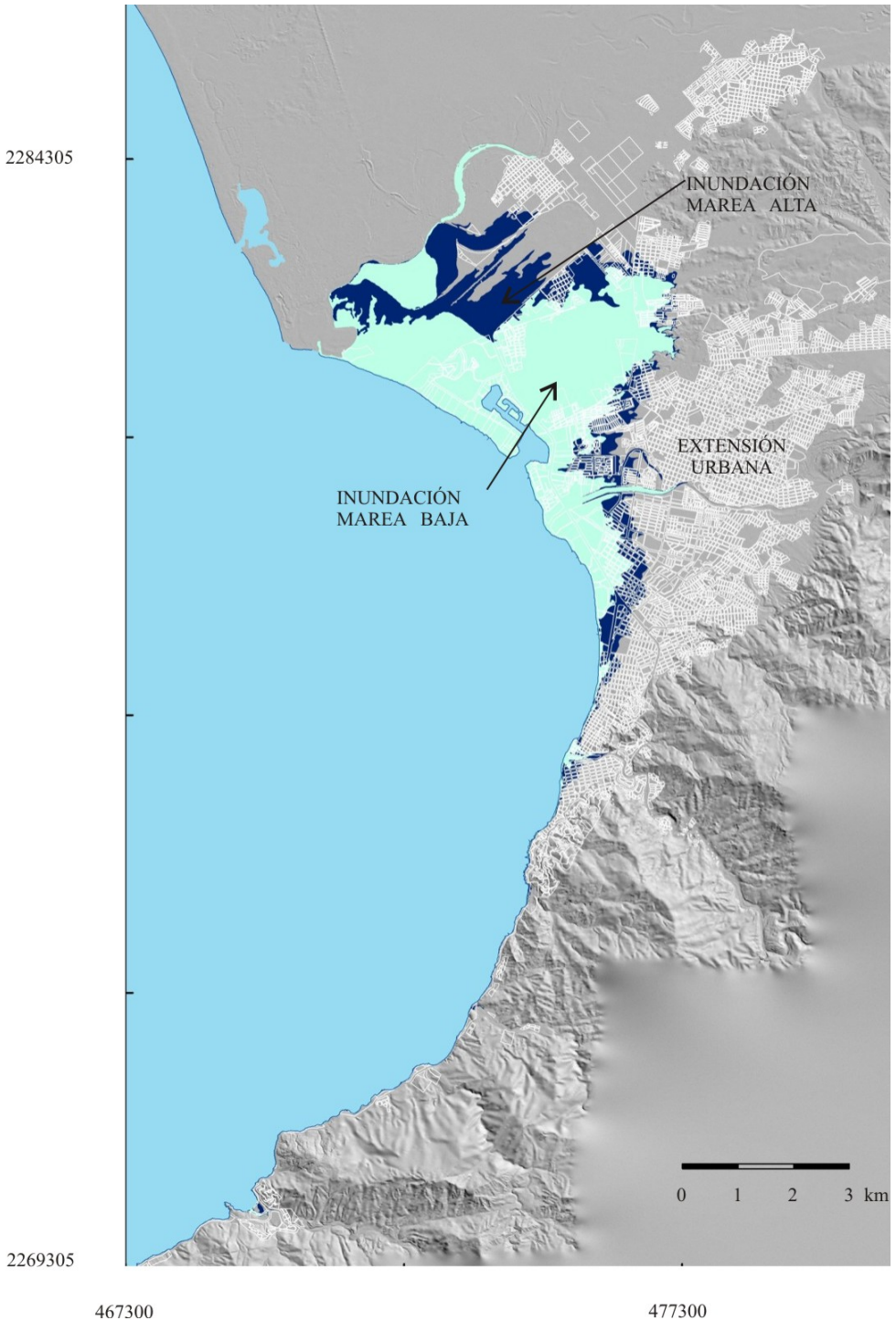


Figura 27. Superficie de inundación por tsunami local sintético en Puerto Vallarta, según la ocurrencia de marea.

Figura 28. Cuencas hidrográficas en la zona de estudio. Fuente: Núñez-Cornú, et al. (2006).

Superficie de inundación en marea baja (S_1) m^2	**Superficie de inundación en marea alta (S_2) m^2**	**Cuenca hidrológica**
5’264,408	7’819,704	Ameca - Mascota
6’624,285	9’310,758	Salado
2’379,831	3’568,647	Pitillal
126,650	581,745	Camarones
135,881	362,253	Cuale
71,933	136,616	Nogalito
24,107	55,227	Palo María
15,627	38,813	Mismaloya

Tabla 10. Superficie de inundación del tsunami local hipotético en Puerto Vallarta.

Extensión en marea baja (E_1) m	**Extensión en marea alta (E_2) m**	**Cuenca hidrológica**
1,604	4,135	Ameca - Mascota
3,540	3,835	Salado
970	1,575	Pitillal
215	756	Camarones
170	330	Cuale
70	240	Nogalito
20	20	Palo María
40	360	Mismaloya

Tabla 11. Extensión de inundación en la simulación del tsunami local hipotético en Puerto Vallarta.

Cuenca Ameca – Mascota

La superficie de inundación calculada en marea alta fue de 7’819,704 m^2. La invasión del tsunami hipotético en el cauce del Río Mascota (Figura 29), fue una distancia de 5.15 km tanto en marea baja o alta. En el resto de la cuenca los valores de la extensión de inundación 1.6 km en marea baja y 4.1 km en marea alta.

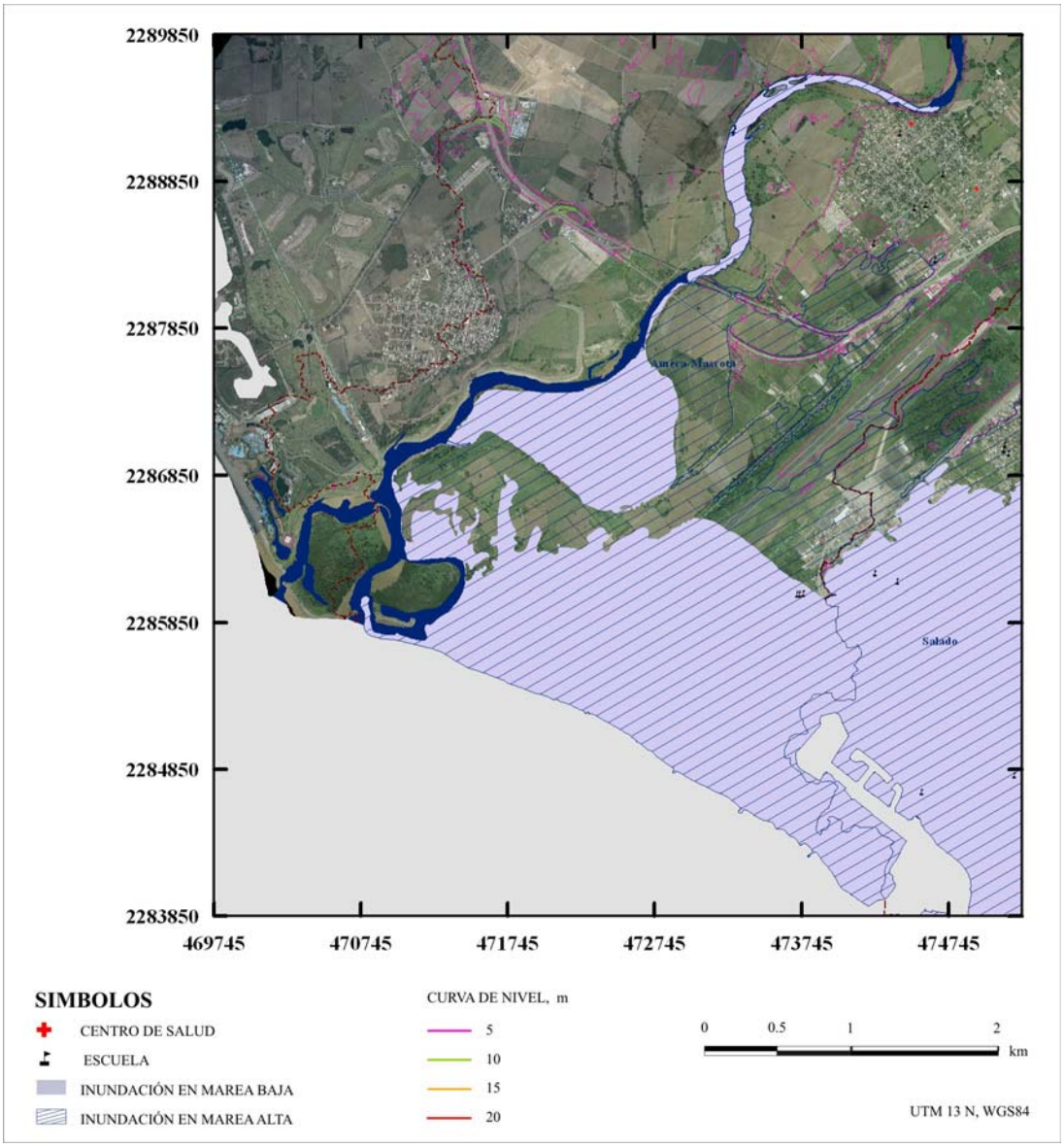


Figura 29. Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Ameca-Mascota.

Cuenca Salado

La superficie de inundación calculada en marea alta fue de 9’310,758m^2 en marea baja de 6’624,285 m^2 (Figura 30). La invasión del tsunami hipotético en el estero fue una distancia de 3.5 km en marea baja y de 3.8 km en alta.

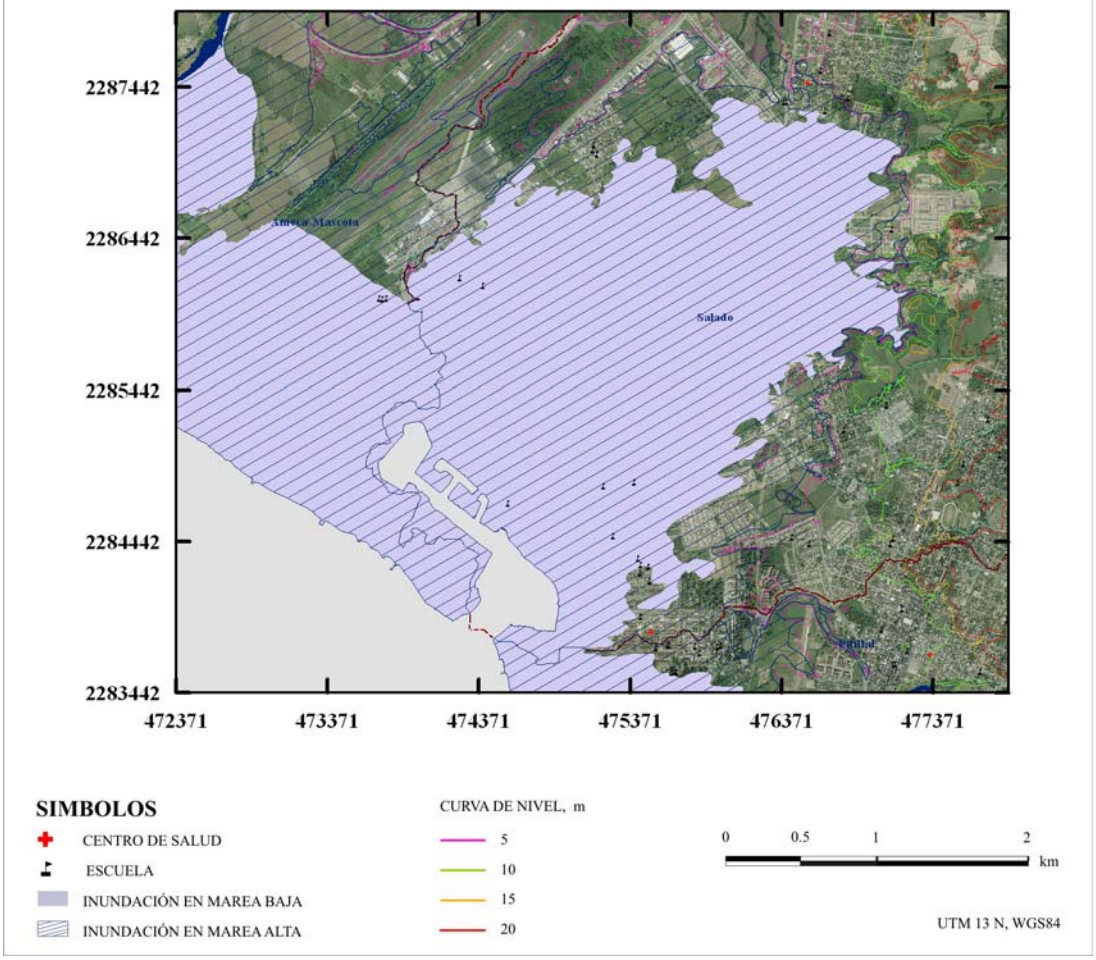


Figura 30. Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Salado.

Cuenca Pitillal

La superficie de inundación calculada en marea baja fue de 2’379,831 m^2 y en marea alta 3’568,647m^2 (Figura 31). La invasión del tsunami sintético en el cauce del Río Pitillal fue una distancia de 2.6 km en marea baja y de 2.8 km en marea alta. En el resto de la cuenca los valores de la extensión de inundación 0.97 km en marea baja y 1.6 km en marea alta.

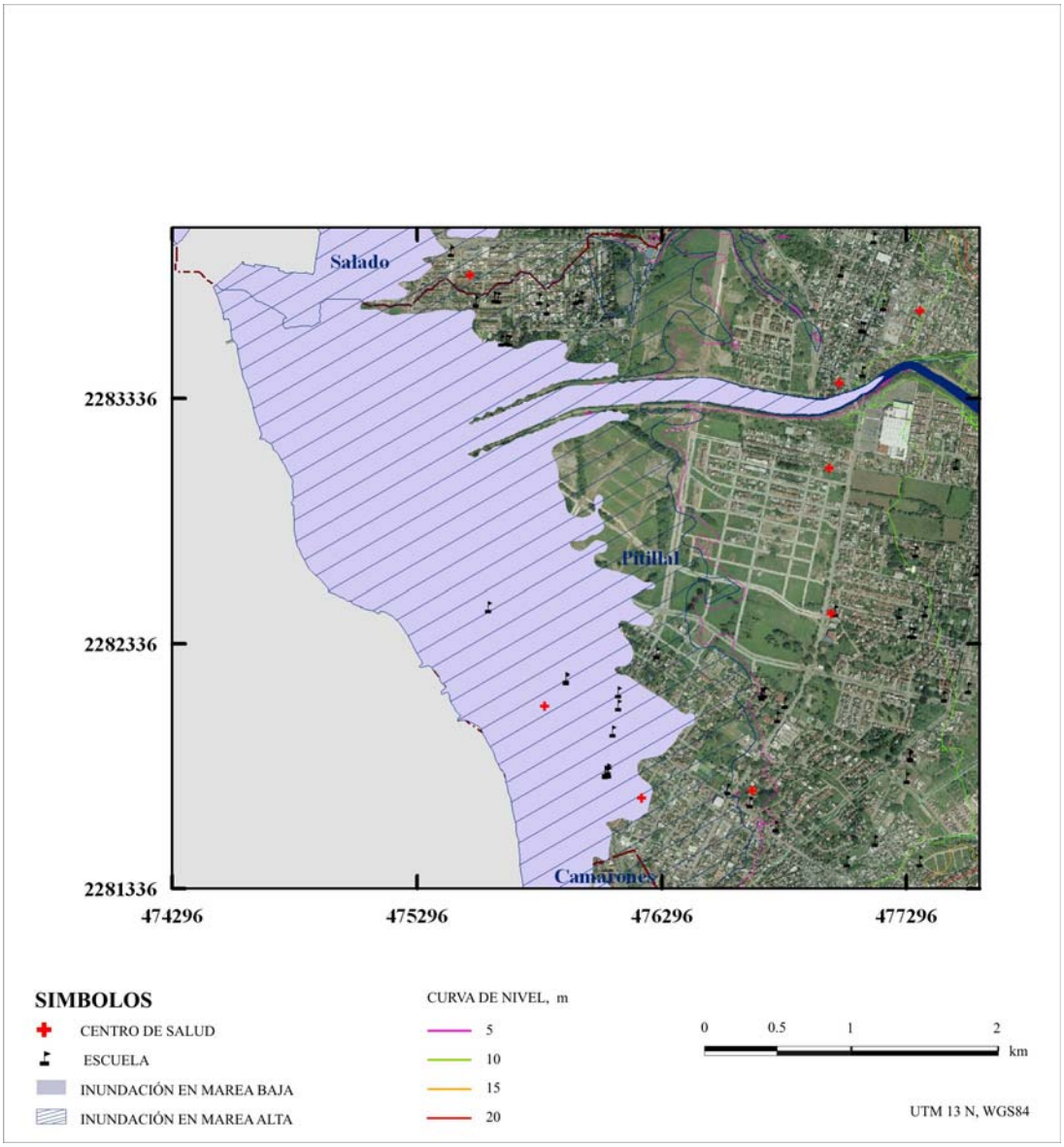


Figura 31. Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Pitillal.

Cuenca Camarones

La superficie de inundación calculada en marea baja fue de 126,650 m^2 y en marea alta de 581,745 m^2 (Figura 32). La extensión de inundación del tsunami hipotético 0.2 km en marea baja y 0.8 km en marea alta.

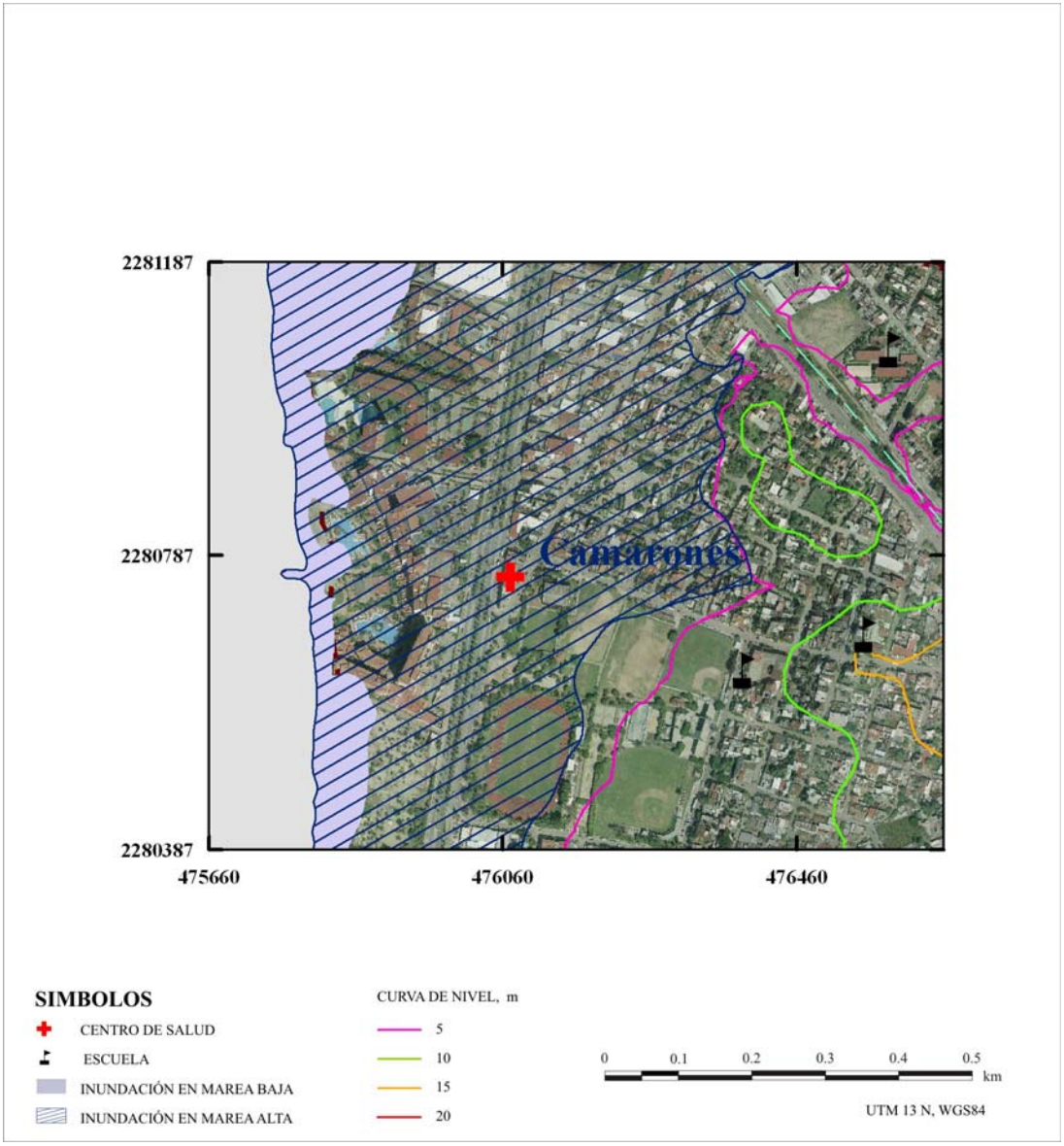


Figura 32. Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Camarones.

Cuenca Cuale

La superficie de inundación calculada en marea baja fue de 135,881 m^2 y en marea alta de 362,253 m^2 (Figura 33). La invasión del tsunami hipotético en el cauce del Río Cuale fue una distancia de 0.6 km en marea baja y 0.8 km en marea alta. En el resto de la cuenca los valores de la extensión de inundación fueron 0.2 km en marea baja y 0.3 km en marea alta.

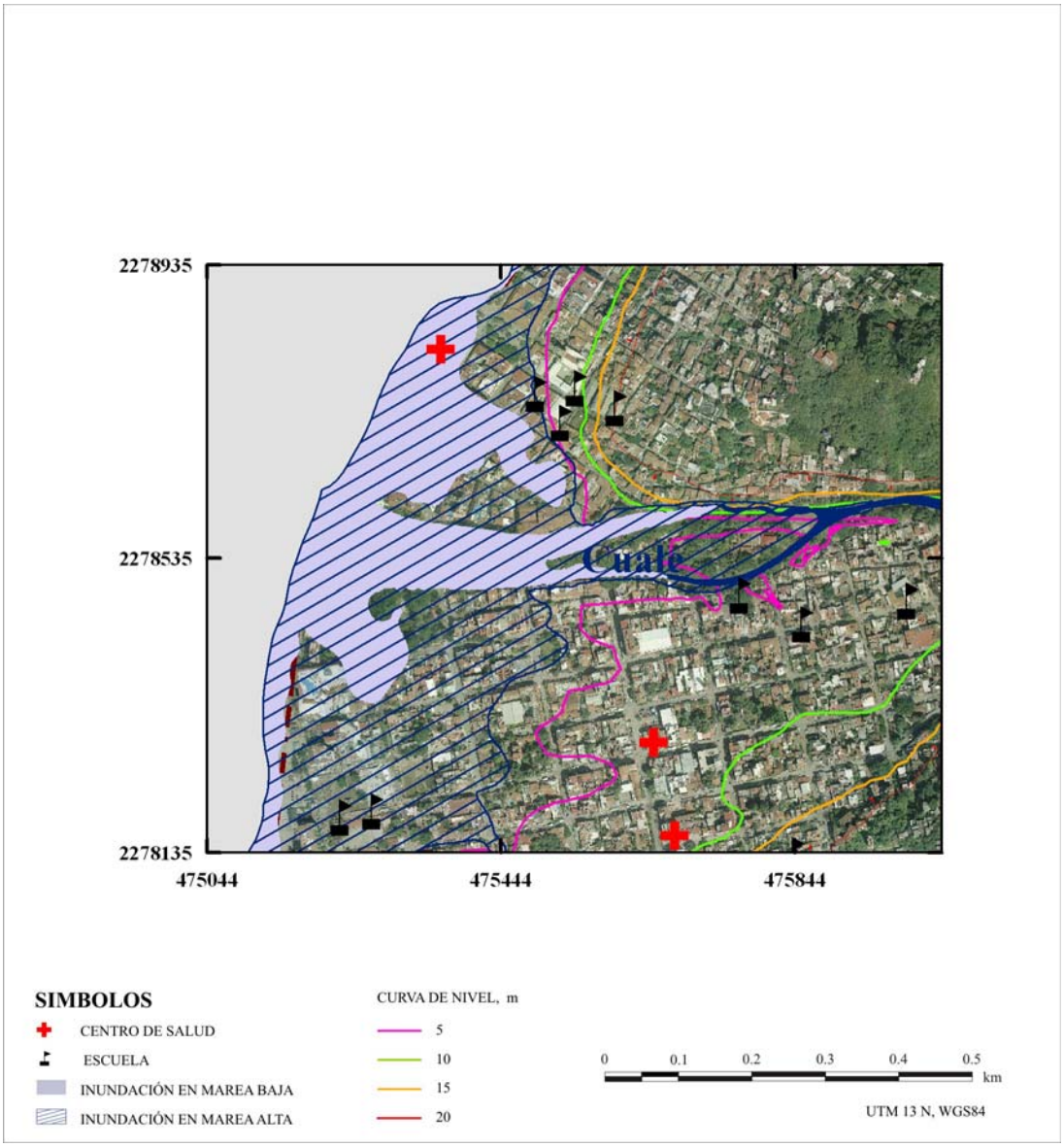


Figura 33. Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Cuale.

Cuenca Nogalito

La superficie de inundación calculada en marea baja fue de 71,933 m^2 en marea alta de 136,616 m^2. La extensión de inundación de 70 m en marea baja y 270 m en marea baja (Figura 34).

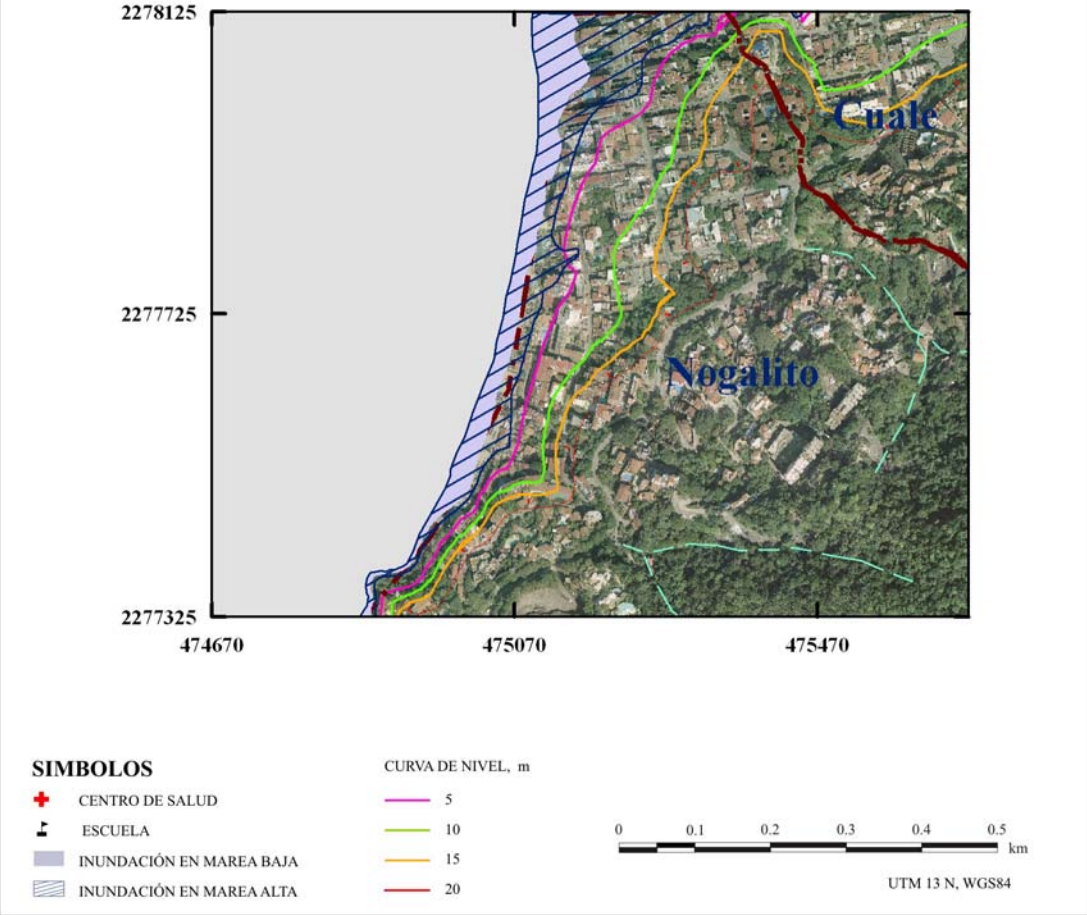


Figura 34. Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Nogalito.

Cuenca Mismaloya

La superficie de inundación calculada en marea baja fue de 15,627 m^2 y en marea alta de 38,813 m^2. La invasión del tsunami sintético en el cauce del Río Mismaloya a una distancia de 290 m en marea baja y de 360 m en marea alta (Figura 35).

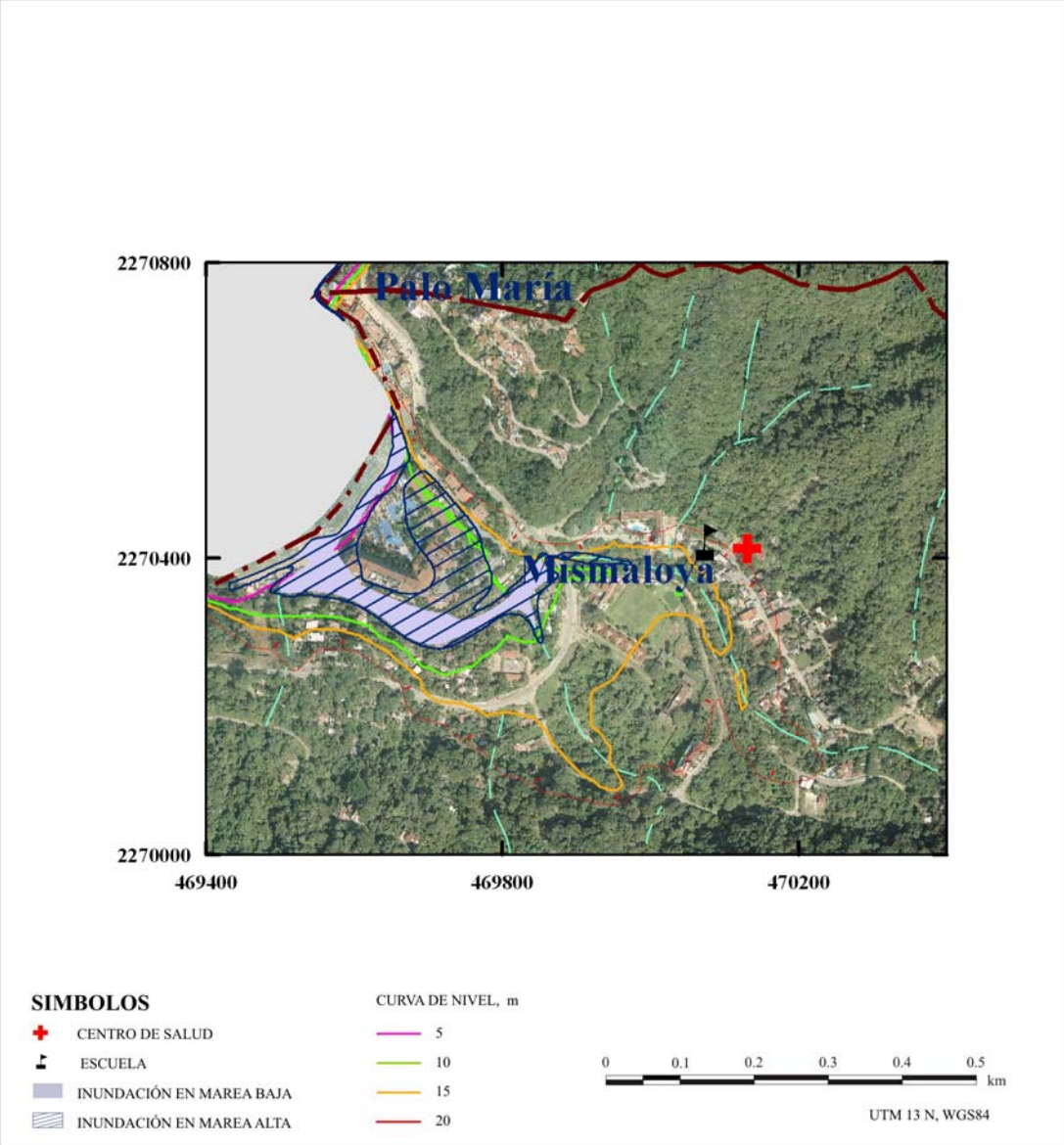


Figura 35. Superficie de inundación por tsunami local en la cuenca Mismaloya.

Capítulo 4 Vulnerabilidad

4.1 La importancia de estimar la vulnerabilidad por tsunami local.

Una vez que se ha identificado el peligro el siguiente paso es calcular la vulnerabilidad sin la ocurrencia del peligro, para después implementar acciones que reduzcan el riesgo.

Sistema de alerta temprana para tsunamis lejanos.

Si bien los sistemas de monitoreo y de alerta para tsunami se enfocan en la implementación de alta tecnología para modificar la vulnerabilidad; es también conocido que estos tipos de sistema y monitoreo responden a un peligro que se generó a una distancia lejana a la comunidad de interés (Levin y Nosov, 2009).

Las condiciones para que funcione un sistema de alerta temprana para tsunamis lejanos son:

- Existen protocolos que establecen de manera clara las autoridades responsables de emitir la alerta.
- Se cuenta con un pronóstico confiable sustentado en estadísticas, de largo período de tiempo, para tsunamis que han impactado a la localidad de interés.
- Se dispone de los datos registrados por los instrumentos que monitorean el evento en tiempo real. Una robusta red de instrumentos sísmicos y de sensores que miden el cambio de presión de las ondas para que un equipo multidisciplinario de especialistas interpreten estos datos y elaboren un informe. El informe de alerta temprana es trasmitido a otros centros regionales de alerta de tsunamis y es accesible a todo el público, por ejemplo en internet.
- La fuente sísmica se ubica en distancias transoceánicas o regionales. A partir del arribo de las ondas **p** a las estaciones símicas muy próximas al sismo de gran magnitud, un sismólogo tarda diez minutos para determinar si el terremoto es tsunamigénico, la ubicación del epicentro y la distancia hasta la costa para calcular el arribo.
- Se han creado algoritmos para la localización de sismos tsunamigénicos, eso permite la simulación de manera preliminar, antes que se presente el peligro, de

varios escenarios de las alturas del run up del tsunami y los tiempos de arribo. Se conoce la batimetría de próxima a la localidad de interés con gran detalle.

- Se han calculado las pérdidas económicas para la localidad de interés en el caso que se emitiera una falsa alerta.

Un ejemplo lo es el Centro de Alerta por Tsunamis del Pacífico, centro operador del Sistema Internacional de alerta temprana por Tsunamis en el Pacífico (ITSU) desde 1948, año en el que comenzó a operar, ya que el 90% de tsunamis se han originado en este océano después de un sismo. El tiempo de operación del centro le permite tener la experiencia, pues han logrado identificar las variables físicas para explicar los mecanismos de generación y propagación del tsunami, de este modo elabora un reporte de alerta temprana.

Una de las variables es que el tsunami se generó a distancias lejanas de la localidad que recibe la alerta, por ejemplo en la Figura 36 muestra un modelo con los tiempos de arribo y trayectorias del tsunami del norte de Sumatra del 26 de diciembre de 2004.

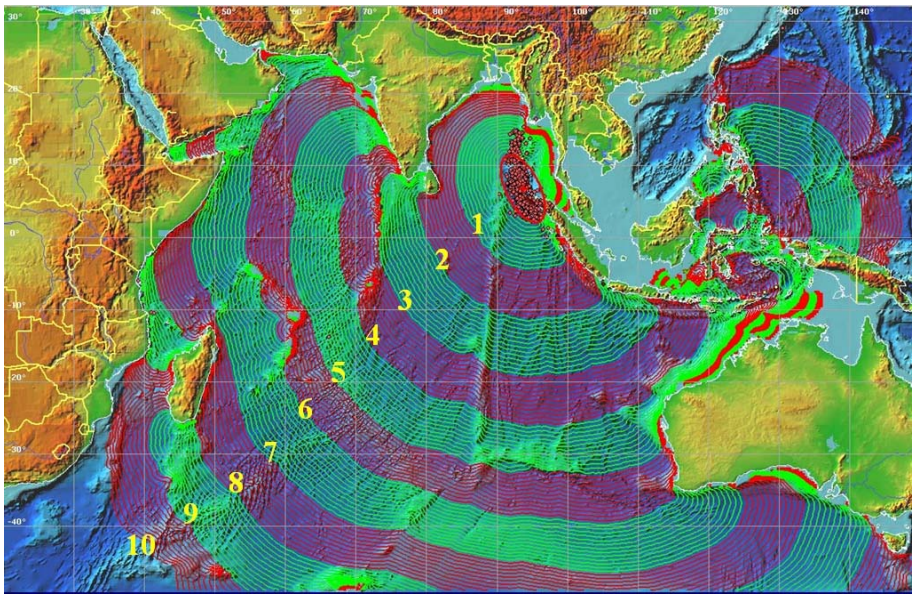


Figura 36. Modelo de los tiempos de arribo del tsunami de Sumatra en 2004, las isolíneas son a intervalos de 30'. Fuente: Russian Academy of Science (2014).

Sistema de alerta oportuna para tsunamis locales: acciones de educación y prevención.

Desde el punto de vista de la gestión del riesgo estructural, el más orientado hacia la prevención y reducción del riesgo, los sistemas de monitoreo y alerta al ocurrir un tsunami local son inoperables, ya que la vulnerabilidad permanece sin cambios y frecuentemente se genera un desastre. En otras palabras, debido a que el tiempo requerido por el sistema de monitoreo, para generar un pronóstico confiable y transmitir el mensaje de alerta, exige más tiempo que el tiempo de arribo del tsunami local.

La fuente sísmica de los tsunamis locales se ubica a distancias menores 100 km de la costa de la localidad de interés, el tiempo de arribo de la ola inicial e inundación es aproximadamente 15 minutos después del terremoto de gran magnitud, donde el tiempo para hacer del conocimiento a las autoridades correspondientes del protocolo de emergencia, emitir una alerta a la población y a los responsables de los sistemas vitales y de emergencia es inviable.

La gestión del riesgo desde un enfoque estructural basa las interpretaciones de los riesgos en la observación del peligro y el territorio susceptible. Además de los eventos geofísicos; en México es necesario evaluar los usos del suelo sin control que impactan e incrementan el riesgo, asimismo los sistemas de producción económicas del territorio que impactan negativamente a la sociedad.

Imposible detener un tsunami.

En la ciudad de Wakayama, en Japón, se encuentra el monumento al alcalde sabio. Hay una leyenda que se cuenta sobre un alcalde de esta ciudad; una vez que él sintió el terremoto entendió que no tenía tiempo suficiente para advertir a la población próxima a la costa sobre el tsunami. Entonces él corrió hacia la colina, donde estaban sembrado el arroz, y provoco un incendio. La gente al notar el fuego intento salvar los cultivos y se apresuraron para llegar allá, de esta manera evadieron el letal peligro que trae un tsunami y salvaron la vida, (Levin y Nosov, 2009). La población en agradecimiento edificó el monumento al alcalde sabio.

En el tsunami del 15 noviembre del 2006, después de un terremoto localizado en las coordenadas 153.230 ºE y 46.607 ºS, en la región de las Islas Kuril, se propagó por el Océano Pacífico. El primer arribo del tsunami se registró con una amplitud de 20 cm para la localidad de Crescents City, USA. El pronóstico disponible de este tsunami llevó a las autoridades a asumir que el riesgo en esa ciudad era menor. Sin embargo hubo daños materiales debido a que ocurrió una redirección del trayecto inicial del tsunami por el Guyot Koko (montaña submarina) y una segunda onda llegó de 2 a 3 horas después de la primera, con una amplificación a 88 cm, por efecto local del suelo marino en la bahía de Crescents City (Kowalik et al, 2008). La población sufrió pérdidas como ejemplo los botes que se encontraban dentro de la bahía fueron arrastrados hacia tierra y se dañaron. De haber tomado acciones preventivas se hubiesen resguardado las embarcaciones aguas adentro, donde la altura de onda es menor que dentro de la bahía, y no hubiesen sufrido daños en su patrimonio

El tsunami del 29 septiembre de 2009 se generó después de un temblor Mw = 8.0, el foco fue localizado en las coordenadas 172.0995 ºW y 15.489 ºS, en la Región de las Islas Samoa, el tsunami en total dejó 192 víctimas (NOAA y NGDC, 2014). En algunos sitios de la región la población fue evacuada en coche y hubo gran congestión del tráfico vehicular. Aunque las colinas estaban muy cerca de la playa, a solo 91 metros de distancia, hubo víctimas. Tranquilamente podrían haber subido a pie a la colina, a una altura de 10 metros y habrían estado a salvo y evitado el riesgo, en lugar de estar en un embotellamiento para alejarse de la playa.

El sismo en Japón del 11 de marzo del 2011 rebasó todos los pronósticos que tenían para esa región, fue un evento sísmico sin comparación hasta ese momento. La magnitud fue de Mw = 9.0, el epicentro fue localizado en las coordenadas 142.369 °E y 38.322 °N, la fractura fue de 500 km de largo aproximadamente, ello generó un tsunami muy devastador. En localidades como Rikuzen-Takata y Minami-Sanriku más del 70% de las casas fueron devastadas, entre los preparativos de estas localidades para minimizar la vulnerabilidad había muros de contención (Figura 37), de 6.5 m y 8 m respectivamente, pero el tsunami fue mayor a esas alturas (Sánchez Aguilar et. al., 2011). El terremoto y tsunami fueron diferentes a lo que los análisis científicos sabían para esta región de Japón. Sin embargo,

hubo personas que conocían que después de un sismo de gran magnitud hay probabilidades de un tsunami, conocían los sitios altos y salvaron su vida.

Figura 37. Muro de contención (barrera) para tsunamis en Japón. Fotografía: River Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan (ITIC, 2014).

Podemos aprender de la leyenda del alcalde sabio que sin una alta tecnología se emite una alerta de tsunami y eso es consecuencia de una educación de la población, sabe que después de un sismo de gran magnitud hay posibilidades de un tsunami. Se identifican los recursos disponibles en la comunidad costera para mantenerla en un lugar a salvo y se asumen los riesgos y pérdidas aceptables; como quemar el arroz para salvar a la gente. También que una vez que se percibe el riesgo se determinan los lugares óptimos para desarrollar las actividades económicas de la localidad y subsistir, aunque ocurriera un tsunami, la comunidad de Wakayama tenía los cultivos de arroz fuera de la zona de impacto del tsunami y no los perderían.

Cada vez que se genera un tsunami ocurren procesos no previstos, fallas en el sistema de alerta temprana, explicado por los la historia sísmica, los datos disponibles y los modelos del escenario del peligro. La educación y la ruta de evacuación siguen siendo dos aspectos muy efectivos de la gestión del riesgo por un tsunami local.

El lugar para mantenerse a salvo depende del sitio en donde se encuentra la población al momento del temblor. Si subir a un lugar alto es rápido, la manera es ascender

desplazándose a pie. Sin embargo en poblaciones urbanas y de alta densidad la evacuación se vuelve caótica y se ha observado mejores resultados con la *evacuación vertical.*

En Japón existen edificaciones que fueron diseñados con el propósito de ser refugios para el peligro específico de tsunami y que permiten una *evacuación vertical*; un ejemplo es La Torre Nishiki (FEMA, 2008), que tiene 320m^2 de superficie y 22 m de altura; se muestra en la Figura 38. Fue construida para resistir un sismo con intensidad XII en la escala de Mercalli modificada, del terremoto se espera el daño total o parcial en estructuras, en esta intensidad del terremoto se han observado las ondas superficiales en el suelo y los objetos son lanzados al aire.

Figura 38. Torre Nishiki en Japón. Fuente: FEMA, 2008.

La estructura de la torre es de concreto reforzado y tiene cinco pisos, está cimentada en una capa de arena y gravilla de 4 m de profundidad y sostenido por pilotes de concreto que se extienden 6 m bajo el terreno. La posibilidad de licuefacción es mínima. El diseño estructural de la Torre Nishiki es elástico, lo que permite a este refugio soportar las fuerzas de un tsunami, basados en la información de aquel que ocurrió en Tou-Nankaido en 1944,

para una altura máxima de onda de 6 m. La estructura y diseño de la torre se calculó para resistir el impacto de una embarcación de 10 toneladas viajando a 10 m/s, el tamaño de las embarcaciones ancladas en el puerto vecino. Asimismo se espera soporte un daño parcial en la estructura del edificio y evitar, por el impacto de la embarcación, alguna víctima. Mientras que no ocurra un tsunami La Torre Nishiki se utiliza para eventos de la comunidad y es un museo. El primer nivel tiene baños públicos y un área que resguarda equipo contra incendios, el segundo nivel tiene una sala de reuniones; el tercero tiene una biblioteca de archivos de desastres naturales. El cuarto y quinto nivel cuentan con 73 m^2, éstos son destinados para el refugio de 500 personas.

En una *evacuación vertical* opta por desplazarse a un refugio, donde el nivel es mayor a la altura del tsunami (FEMA en Red Sísmica de Puerto Rico, 2012), y esperar a que el agua se retire, los refugios de 20 m de altura son una buena opción. Esto implica que en la ciudad se aplica una ley para las edificaciones sean con un diseño estructural adecuado y sismo-resistentes a un terremoto de gran magnitud, mientras que los sitios destinados para refugios soporten la fuerzas del tsunami como la hidrodinámica, boyante, impulso y de empuje.

En la experiencia de quienes habitan en zonas con recurrencia de tsunami local, como en Japón, la alerta oportuna y confiable comienza con la implementación de acciones preventivas de las autoridades de gobierno que tienen una percepción del riesgo y eligen reducirlo.

En el caso de la zona urbana de Puerto Vallarta la importancia de evaluar la vulnerabilidad por tsunami local es reconocer los lugares críticos para después reducir el riesgo, mediante algunas las acciones de prevención se sugiere sean las siguientes:

a) Delimitar las zonas de inundación del tsunami para establecer las rutas de evacuación vertical en la franja costera.

b) Programas de educación y protección civil dirigidos a la población y sin interrupciones, con el fin de preparación ante este y otros peligros. También los programas de educación dirigidos a las autoridades de gobierno y empresarios, para que perciban que una buena gestión del riesgo es posible.

c) Establecer usos del suelo y programas que permitan mitigar la vulnerabilidad de la zona urbana. Con ello se brindará certeza en las inversiones en la actividad turística. La gestión del riesgo adecuado no aleja las inversiones.

d) Revisar la ubicación de las instalaciones de distribución de agua, energía eléctrica, trasporte, de atención en emergencias y de resguardo de archivos catastrales y otros documentos de interés para el gobierno. Tendrán que evaluarse como lugares seguros ante sismos y tsunami, para mantener su operación durante y después de la contingencia.

e) En la región de estudio la prevención es educar a la población costera en localidades menores a 2500 habitantes para establecer rutas de evacuación a sitios seguros del tsunami. Preparar a los habitantes de la costa susceptibles a un tsunami local para que identifiquen el mensaje de alerta temprana equivale a una reacción oportuna ante el peligro, porque son capaces de reconocer que en el mar hay indicios de que se aproxima el tsunami y reconocen los sitios para mantenerse seguros.

Para reducir el riesgo por tsunami en Puerto Vallarta significa proteger la vida de los habitantes, las edificaciones e infraestructura vital al implementar acciones de prevención, por lo que para fines prácticos la atención inmediata es del gobierno municipal. Como los programas de educación enfocados a la población, empresarios y aquellos que gestionan el territorio.

Después de un sismo de gran magnitud existe la probabilidad que ocurra un tsunami local en Puerto Vallarta.

Esta fue la hipótesis de trabajo de esta investigación. Como se mencionó anteriormente; el proceso vital de un sistema de alerta para tsunamis, de tipo local o regional, la integran diferentes acciones de antelación al peligro. Es imposible determinar el instante en el que ocurrirá un tsunami, si ello ocurriera, no se le puede detener. Lo que sí es posible hacer es prepararse para cuando llegue alguno a Puerto Vallarta. Las extensiones de la inundación por tsunami local en la porción urbana del municipio de Puerto Vallarta, generado por un

terremoto de gran magnitud, se calcularon para la probabilidad si el peligro ocurriera al momento de marea baja o alta, como se muestra en el mapa 1.

4.2 Dinámica demográfica del municipio de Puerto Vallarta.

Las actividades económicas en el área de estudio son las relacionadas con el turismo que han incentivado la emigración de población de la región y de otras zonas del país hacia la Ciudad de Puerto Vallarta. En estudios aislados de la calidad de vida en la región (Massam et al., 2003), se ha establecido bajo la percepción ciudadana, que la calidad de vida fue media y alta aún en comunidades marginadas, con bajos ingresos y en muchos de los casos sin servicios básicos.

Si consultamos el Archivo Histórico de Localidades del INEGI (2002), fue un crecimiento natural del número de habitantes en localidades como Puerto Vallarta, Ixtapa, Las Juntas, El Pitillal y Mismaloya (Figura 39) desde 1900 hasta los años cincuenta. En el censo de 1960 se contó en el municipio 7,484 habitantes, después se nota un aumento acelerado, con 24,155 habitantes para 1970. La tendencia de crecimiento no natural continuó en los años siguientes hasta el 2005, sin duda por la emigración hacia la zona de estudio.

La estructura de edades en el municipio de Puerto Vallarta.

Para construir la gráfica de edades en el municipio de Puerto Vallarta se consultó el total de población por grupos de edad registrados en los censos de los años 2005 y del 2010 por INEGI y se compararon (Figura 40).

En el año 2005 la estructura demográfica del municipio de Puerto Vallarta fue extraordinariamente joven. Los habitantes menores de $\leq$ 19 años fueron 40.5 %. El siguiente grupo, la población en edad de trabajar, $\geq$ 20 años y $\leq$ 64 años, presentaron el 52.1% y con 7.4 % quienes habían cumplido los 65 años o más. La población dependiente económicamente, los niños de 0 a 14 años y los adultos mayores a 65 años corresponde el 37.9 %. La población creció de manera muy acelerada entre los años 1970 a 1990.

Para el censo del año 2010 el municipio de Puerto Vallarta presentó una estructura demográfica joven, aunque la tendencia fue disminuir el número de habitantes en la base de la pirámide e incrementar en la proporción media (para el rango de 20 a 24 años), en comparación al año 2005. Los habitantes menores a 19 años representan el 38 %, para la población mayor a 20 años y menor a 64 años representan el 55.7% y el grupo de población más de 65 años fue de 6.3 %.

La población dependiente económicamente, los niños de 0 a 14 años y los adultos mayores a 65 años suman el 34.8 % del total de población en el municipio de Puerto Vallarta.

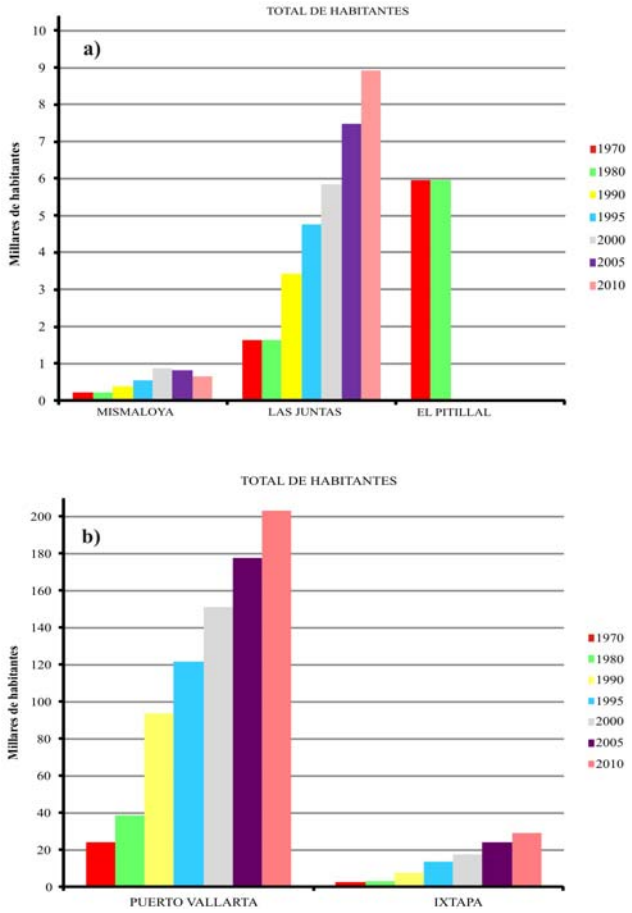


Figura 39 Total de habitantes (INEGI, 2002), para el área de estudio de 1970 a 2010, a) localidades menores a 9000 habitantes, El Pitillal fue conurbado a Puerto Vallarta después de 1980, b) localidades con mayor población.

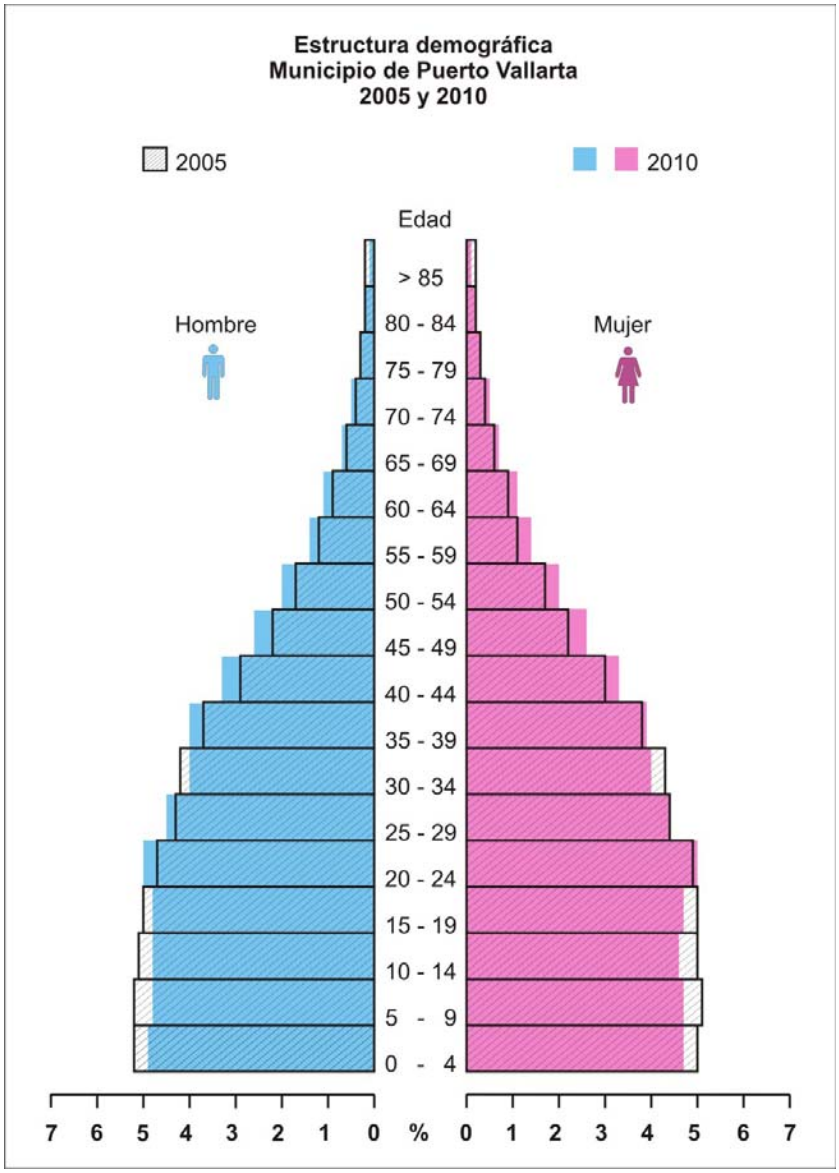


Figura 40 Pirámide de población del municipio de Puerto Vallarta para los años 2005 y 2010, los datos son del los censos de población, por INEGI.

Extensión urbana en la zona de estudio.

Con apoyo en las cartas topográficas, consulta de la base de datos inventario nacional de vivienda y los planos de localidades urbanas generados por INEGI. También se consultó los planos municipales para interpretar el posible crecimiento de la extensión urbana por manzanas para la zona desde 1970 hasta 20102 y se muestra en el mapa 2.

En la Figura 41 se muestra el crecimiento de extensión urbana por manzanas en siete períodos. La extensión urbana medida en la zona de estudio fue un total de 33.796 km^2. Para los períodos de 1970, 1980 y 2012 el crecimiento es similar, con valores entre el 5% y 10% de la superficie total medida en cada periodo. El crecimiento acelerado en los valles de los ríos Pitillal, Ameca y Mascota, así como en la zonas de montaña entre los años 1995 y 2005, con una superficie de 17 % y 32% , de la superficie total medida. La tendencia de crecimiento en la extensión urbana, después del año 2005, es hacia el norte del municipio; en este estudio no fue calculado.

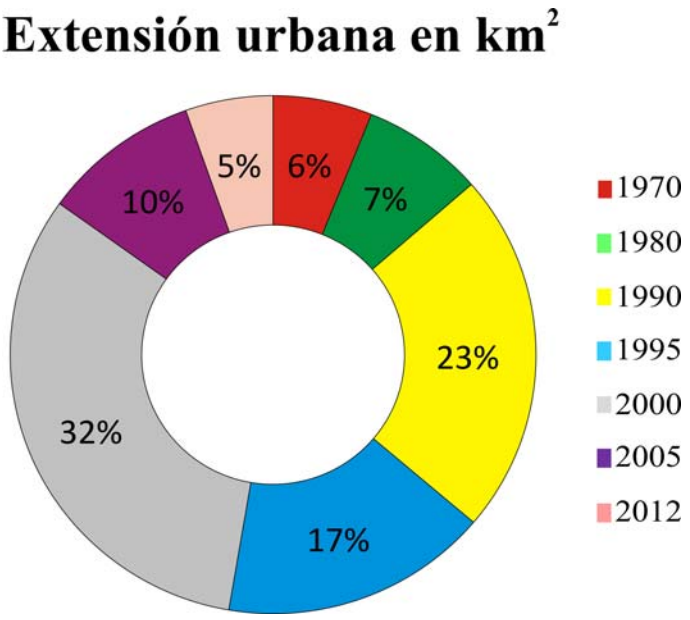


Figura 41 Proporción de la extensión urbana de los años 1970 a 2012 en la zona de estudio.

Estimación de la población susceptible por tsunami local en Puerto Vallarta.

La población afectada al momento que ocurre un peligro (Guzmán et al., 2003), se estima con los datos del último censo con la siguiente ecuación:

$$C = (P)\ (e^{r*t})$$

donde

C = es el crecimiento exponencial de la población susceptible al peligro

P = número de habitantes registrados en el último censo

e = es el número de Euler.

r = tasa de crecimiento de la población

t = es el tiempo en un año, respecto al último censo disponible.

Las condiciones para utilizar la ecuación:

- Es válido el uso de la ecuación solo para cinco años después del último censo disponible.
- Se dispone de los datos de proyección anuales de la proyección a nivel municipal.
- La población crecerá de manera lenta y constante, por lo que no existen movimientos migratorios masivos después de los registros del censo disponible. Si acaso hubiese migración es dentro del área de estudio.

Para la zona de estudio se determino el crecimiento exponencial de la población susceptible al peligro por inundación del tsunami local, los datos de habitantes iniciales corresponden a los registrados en el censo de INEGI del año 2010 por AGEB, para cinco períodos. El primer período es desde el 31 de julio de 2010 hasta 30 de junio del 2011. Para el segundo período se tomo como información de referencia el crecimiento calculado para el mes de

junio del 2011 y se finaliza con junio del 2012. Fueron similares los siguientes cálculos hasta completar los cinco períodos.

El número de Euler para el cálculo fue el valor 2.718281828.

Las tasas de crecimiento se calcularon con los datos de proyección de la población para el municipio de Puerto Vallarta 2010 al 2030 por CONAPO (2012). Solo se calcularon los valores para **r** del año 2010 hasta el 2015 y se muestran en la Tabla 12.

Año	Tasa	Habitantes mínima	Habitantes Promedio	Habitantes Máxima
2010	0.0138	91	1,742	3,690
2011	0.0230	92	1,767	3,745
2012	0.0207	95	1,808	3,831
2013	0.0186	97	1,846	3,910
2014	0.0170	98	1,880	3,983
2015	0.0157	100	1,913	4,052

Tabla 12. Estimación de habitantes vulnerables al peligro de inundación del tsunami.

El tiempo se calcula por fracción de año, inicia en junio del 2010, época en la que INEGI levanto el censo; por lo tanto t = 0. Ejemplos de los cálculos son los siguientes: para julio del 2010 el tiempo calculado fue de t = 0.08; ocurrieron 31 días después del censo, mientras que para junio del 2011 le corresponde 365 días después del censo y t = 1.

Los valores esperados de número de habitantes vulnerables en el área de estudio, para el período de años 2010-2015, como mínimo 91 hasta 100 habitantes. En promedio se espera fuesen más de 1700 y hasta 1913 habitantes. El máximo valor esperado de número de habitantes vulnerables entre 3690 y 4052 habitantes. En la Figura 42 se muestra la proyección del crecimiento del último período, de julio del 2014 al junio del 2015 de 46 AGEB en la zona de afectación del peligro.

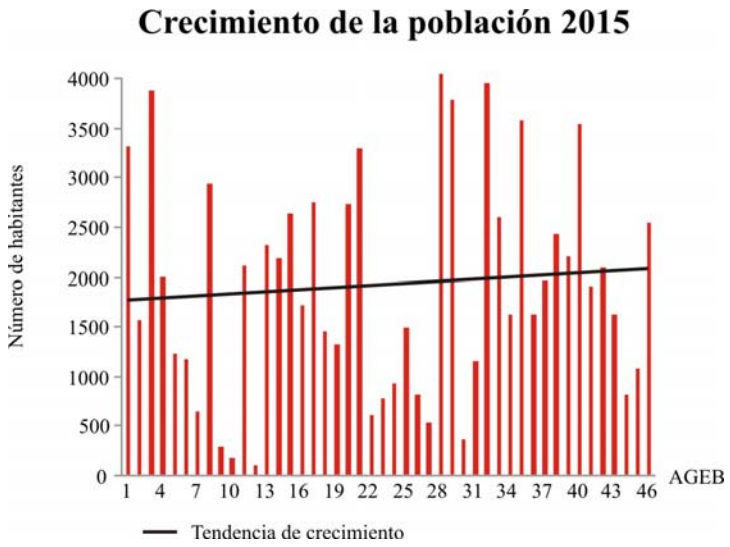


Figura 42 Crecimiento de población vulnerable al peligro de inundación del tsunami por AGEB. En el cálculo se consideró la población base los datos del censo del 2010 de INEGI.

4.3 Método para el cálculo la vulnerabilidad de la población, vivienda e instalaciones vitales vulnerables tsunami local en Puerto Vallarta.

Para este trabajo partió del método propuesto por Suárez Plascencia et al. (2008), para clasificar la vulnerabilidad de la población y de la vivienda en los tipos alta, media y baja. Esta metodología condiciona el análisis de los datos de acuerdo a una distribución normal de la frecuencia de los datos y el cálculo de la media poblacional. De esta forma se identificaban a los valores extremos de la distribución y se clasifican como una baja vulnerabilidad de la zona afectada por el peligro, para la porción izquierda de la media poblacional, y de alta vulnerabilidad para los datos del extremo derecho; mientras que la vulnerabilidad media es la porción próximas a la media.

Para los estudios previos a este, la población y la vivienda altamente vulnerables corresponden a sitios con altos índices de población, mientras que para vivienda a aquellas que carecen de un diseño en la estructura para soportar las fuerzas de un tsunami o del terremoto de gran magnitud, ya que se construyeron en su mayor proporción de materiales precarios como láminas de cartón y madera; carentes de cimientos consolidados. En los

estudios previos se cuantificó alta vulnerabilidad a lugares que con mayor frecuencia corresponden a zonas de marginación y pobreza.

Las características mencionadas anteriormente se localizan fuera de la zona de estudio, en donde la altitud es mayor a los 20 m y donde el peligro por tsunami no impacta; por lo tanto en el cálculo del riesgo para este peligro para la población y vivienda es cero. La población y las viviendas con esas características, por su ubicación, fueron excluidas del análisis de vulnerabilidad.

Se modificó el método propuesto por Suárez Plascencia et al. (2008), para ello se estableció en la hipótesis de trabajo que una alta vulnerabilidad debido a la inundación por tsunami local en Puerto Vallarta es para la población de clase media y su vivienda y que se localizan próximas a la costa debido al turismo, la actividad económica principal del municipio. Mientras que para la probabilidad de vulnerabilidad de la clase alta dentro de la zona de afectación del tsunami es menor, comparada con la clase media, al tener la posibilidad de recuperar los bienes en menor tiempo, debido a la condición económica.

De lo anterior fueron consultados los trabajos previos para identificar características relacionadas con la población de clase media. Desde un enfoque sociológico (Erikson y Goldthorpe, citado por Jorrat, 2005), las clases sociales responden a la demanda del mercado y la oferta de trabajo en el territorio, esto determina el nivel de jerarquía y la ocupación que una persona desempeña y al final del análisis, a una persona se le clasifica en una clase por el ingreso económico que recibe. De esta manera, la clase baja labora en una actividades económica que requieren esfuerzo físico, frecuentemente son actividades primarias; como el campesino dueño de su parcela y el jornalero, también un trabajador industrial calificado o un trabajador no calificado que desempeña actividades en la que las habilidades se adquirieron por práctica o sin estudios especializados. La clase alta es quienes ejercen una condición de ejercicio del poder, son altos directivos y profesionistas en grandes corporativos que cotizan en la bosa de valores, actividades en las que no hay esfuerzo físico. La clase media son personas que desempeñan cargos de nivel intermedio de mando, laboran en oficinas de gobierno, pero también en el sector privado como un supervisor o gerente, un profesionistas independiente, el comerciante en pequeño, un profesor y el técnico con estudios especializados.

Otra referencia consultada fue la definición que hace INEGI (2013) para la clase media. En resultados preliminares, con un análisis multivariado de los datos de la Encuesta Nacional de Ingresos en un periodo entre 2000 y 2010, estimó que el "42.4% de los hogares, en donde vive el 39.2% de la población total del país, son de clase media. Por su parte, 2.5% de los hogares son de clase alta, viviendo en ellos el 1.7% de la población del país, mientras que, en el otro lado del espectro social, se tiene al 55.1% de los hogares donde desarrolla su vida el 59.1% de la población mexicana". Algunas de las variables que permiten esta clasificación de clase media son que la vivienda sea propia y se esté pagando y que se adquiere con financiamiento soportado por los miembros de la familia o un crédito de interés social. Cuentan con computadora. Ejercen un gasto aproximado de $ 5,000 en alimentos y bebidas fuera del hogar. Tener una tarjeta de crédito y al menos se le abona $1,660. En cuanto a la familia la integran cuatro miembros, al menos uno de ellos labora en el sector privado y tiene contrato laboral escrito (empleo formal), el grado académico del jefe de familia es media superior y su estado civil es casado, los hijos asisten a escuela pública.

Se descartó el enfoque sociológico. Con este enfoque podría establecerse a priori que en la zona de estudio, en la que la actividad económica principal es el turismo, la población económicamente activa con mayor frecuencia es de clase media. Las actividades económicas primarias o grandes corporativos, que definen a las clases baja o alta respectivamente, no se ubican en la zona de afectación o pueden despreciarse para el caso de estudio.

Por lo anterior se estableció hacer un análisis para cuantificar vulnerabilidad socioeconómica con registros de INEGI, porque se tenía acceso al registro de algunas variables para la condición de clase media en el censo del 2010. Para este estudio se estableció analizar en 219 polígonos con la información del censo. Los objetivos del trabajo es delimitar las zonas vulnerables prioritarias, información inicial para que los que tomen decisiones en el territorio y quienes participan en la gestión del riesgo, diseñen programas que modifiquen la vulnerabilidad, para lo que se establecieron cuatro índices que permiten identificar zonas susceptibles a que habiten la población de clase media.

Para describir las características de la población vulnerable y vivienda en el área de afectación por el peligro se consultó la información generada por INEGI:

- Censo de Población y Vivienda 2010, Principales resultados por localidad.
- Censo de Población y Vivienda 2010, Principales resultados por AGEB y manzana urbana.
- Inventario Nacional de Viviendas (actualización 2012) de INEGI.

La información de localidades mayores a 2500 habitantes se muestra por polígonos que cubren la extensión urbana. Estos polígonos los define INEGI como área geoestadística básica **(AGEB)**. Para poblaciones menores a 2500 habitantes la información del censo es puntual, para lo cual se le trazo un polígono sobre la extensión urbana a la que hace referencia y se le relaciono con un polígono.

En este estudio se analizaron 214 AGEB´S que corresponden a las localidades urbanas de Puerto Vallarta, Ixtapa y Las Juntas. También se analizo los datos de cinco localidades menores a 2500 habitantes como Playa Grande, Llanitos, Getsemaní, Fraccionamiento Banus y Mismaloya. En total de polígonos analizados con información censal fueron 219. Se excluyo la información de otras localidades hacia el norte del municipio, como Las Palmas de Arriba y otras menores a 2500 habitantes, porque su ubicación queda fuera del área de estudio y no se afectarían de manera directa por este peligro.

Los datos consultados fueron total de población, categorías de edad de la población, distribución de personas con limitaciones físicas o mentales que les hace difícil desplazarse a otro lugar (desalojar la vivienda) y población ocupada. Asimismo se analizaron las características educativas en la población y las características de la vivienda.

También se ubicaron las instalaciones altamente vulnerables y que son vitales para mantener el *sistema*, basado en criterios del CENAPRED (2005, 2007 y 2011), Guzmán J. M, Silva A., Poulard S., Jovel, (2003) y SEDESOL (2012). En estos documentos también muestran que el grado de vulnerabilidad esperada ante la ocurrencia del peligro de origen natural se relaciona con características de la población y actividades económicas en el territorio.

Las instalaciones altamente vulnerables son las escuelas, hospitales públicos, teatros, cines, mercados, correos, centros comerciales, cárceles, grupos habitacionales de alta densidad, estaciones de autobús, aeropuertos, instalación portuaria, museos, archivos públicos (catastro o judiciales), estaciones de policía y bomberos, instalaciones que almacenan combustibles, plantas para la generación o distribución de energía eléctrica. Los datos para la zona de estudio fueron consultados con la cartografía del municipio y de la base de datos Directorio Estadístico Nacional de Unidades económicas (**DENUE**, 2012) de INEGI.

Capítulo 5 Etapas para el cálculo de la vulnerabilidad por tsunami local en Puerto Vallarta

5.1 Distribución de la densidad de población.

La vulnerabilidad ante un peligro es mayor en los sitios con altas concentraciones de habitantes, por ello se calculó el índice de distribución de la densidad de población. Este índice muestra la relación entre el número de habitantes respecto a la superficie que ocupan y para su cálculo se utilizó la ecuación:

$$D = \frac{P}{S}$$

donde

D: densidad de población.

P: total de población en el polígono

S: superficie del polígono, medido en kilómetros cuadrados.

La Figura 43 se muestra la frecuencia de los índices de densidad de población en la zona de estudio, es una distribución con valores del índice calculados desde 21 a 31652, semejante a una media campana, lo que dificulta establecer las clasificaciones para vulnerabilidad baja, media o alta. Los polígonos sin información o no disponibles se reclasificaron con un valor del índice igual a uno.

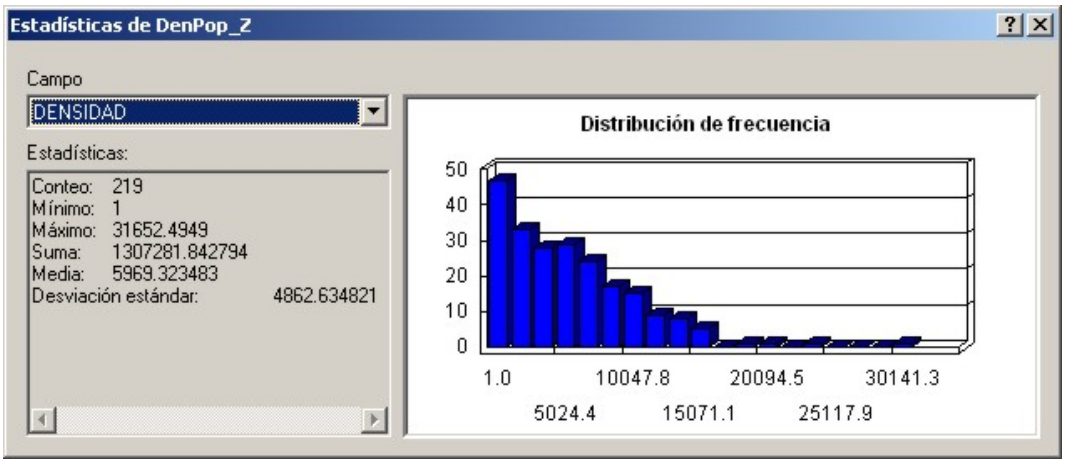


Figura 43. Distribución de las frecuencias de los índices de densidad de población en el área de estudio.

De lo anterior fue necesario buscar una alternativa para descartar información y agrupar los datos. Se optó por incluir una nueva clasificación pues se observó que hay polígonos en los que la información censal no está disponible o que el cálculo es un valor igual a cero.

Después se comparó dos formas de clasificación, la primera es la clasificación predeterminada del programa ArcGis 10, llamada cortes naturas (Jenks) para 4 categorías: información no disponible, vulnerabilidad baja, vulnerabilidad media y vulnerabilidad alta.

La otra manera de descartar los tres tipos de vulnerabilidad fue calcular el valor estándar de los índices de densidad. (Lind 2012), con la ecuación:

$$z = \frac{X-\mu}{\sigma}$$

donde

z: es el valor estándar. Es una distancia respecto a la media de los datos observados, se mide en unidades de desviación estándar.

X: variable aleatoria. Es el valor de cualquier observación y medición, en este caso para los datos de cada polígono en Puerto Vallarta.

μ: media de la distribución.

σ: desviación estándar la distribución.

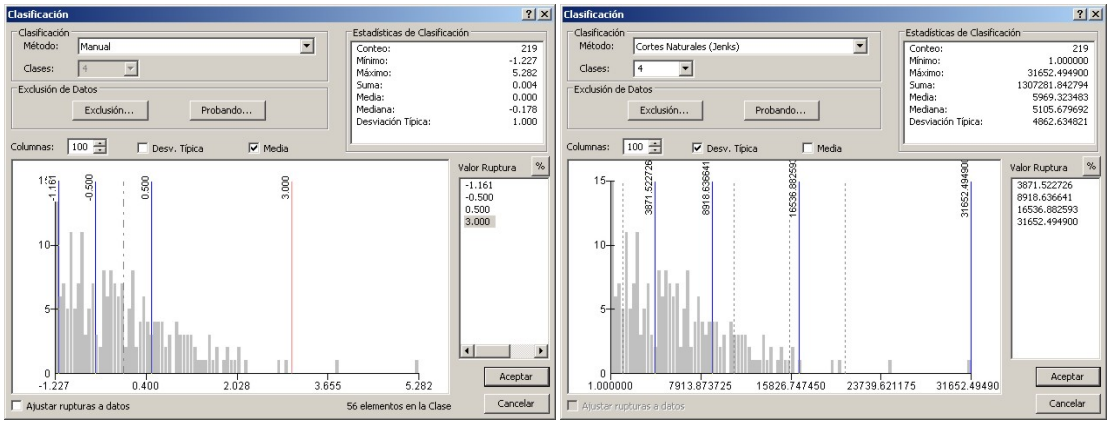
En la Figura 44 los índices de densidad con dos métodos. El que se utilizó en este trabajo fue el valor estándar (z), se separaron para representarlos en el mapa como:

No disponible: con valores igual a cero o no disponible.

Vulnerabilidad baja: cuando z sea menor o igual a - 0.5.

Vulnerabilidad media: para valores $-0.5 > z \leq +0.5$

Vulnerabilidad alta: para los valores $z > +0.5$



a) **b)**

Figura 44. Distribución de la frecuencia de los índices de densidad de población en el área de estudio, a) con el cálculo del valor estándar z; b) índices de densidad de población con la clasificación en ArGis 10 y cortes naturales "Jenks".

Las dos formas de clasificar la información son semejantes, pero se optó por utilizar el valor z solo en el caso que la distribución no sea normal, porque la distribución se normaliza con el cálculo de z, o en el caso que los cambios entre los valores dificulten generar las cuatro categorías para calificar la vulnerabilidad, como en el caso del índice de densidad. Con el valor estándar se clasificaron 58 polígonos (de un total de 219), con alta vulnerabilidad en comparación a los que se mostraban con la clasificación de cortes naturales, pues solo muestra 3 polígonos.

Los resultados de índice de la densidad de población para la zona de afectación del peligro, para 51 de 219 polígonos. Los valores de densidad de población calculados fueron: D = 138 como mínimo, la media fue de 5784, el máximo valor de densidad fue D = 31653, y se muestran en el mapa 3.

5.2 Población vulnerable por edad o limitación física.

Se considera vulnerable a la población de los niños < 14 años y adultos > 60 años al momento de presentarse una contingencia. También en esta condición se incluyo los datos

de población que presentan alguna limitación física para desplazarse libremente o de aprendizaje.

Estos indicadores se midieron en el Censo de Población y Vivienda 2010. Se observó que el censo presenta seis grupos de edad para la población vulnerable por la condición de edad o limitación física.

Para calcular la vulnerabilidad por esta condición, en los trabajos de Suárez Plascencia et al. (2008), se calcularon con la ecuación:

$$\mathbf{V_p = P_{<14} + P_{>60} + P_L}$$

donde

Vp: población vulnerable por la condición de edad o limitación física o mental.

$P_{<14}$: población ≤ 14 años en el AGEB

$P_{>60}$: población ≥ 60 años en el AGEB

P_L: población con limitación física o mental en el AGEB.

Sin embargo para este trabajo se propone modificar la ecuación y asignar pesos a la variable (Gómez Delgado et al., 2005). En este trabajo la vulnerabilidad por edad o limitación física tienen mayores pesos las categorías de población muy vulnerables, de lo anterior algunos grupos de edad son más susceptibles que otras. La suma de todas las ponderaciones es igual a 1, es decir la población vulnerable. La vulnerabilidad debido a la condición de edad o limitación se calcula con la ecuación:

$$\mathbf{V_e = P_1 + P_2 + P_3}$$

donde

V_e: Ponderación total de la población vulnerable por la condición de edad o limitación física o mental.

P_1: Los valores ponderados de la población ≤ 14 años en el polígono.

P_2: Los valores ponderados de la población ≥ 60 años en el polígono

P_3: Los valores ponderados de la población con limitación física o mental en el polígono.

En la Tabla 13 se muestra el valor de las ponderaciones. El grupo de población entre cero a dos años de edad, (**k_1**), y de tres a cinco años de edad, (**k_2**), corresponden los valores de ponderación de 0.3 y 0.25 respectivamente; porque ante una contingencia no actuarían por sí mismos y necesitan apoyo de otras personas para que los desplacen y buscar un refugio.

Para los de habitantes de 6 a 11 años, (**k_3**), o con limitación física o mental, (**k_6**), las ponderaciones corresponden a 0.15 y 0.20 respectivamente; se estimó que tienen capacidad para seguir las instrucciones de otras personas y buscar el sitio seguro.

Para los grupos de niños de 12 a 14 años, (**k_4**), y adultos > 60 años, (**k_5**), y, se les asignó una ponderación de 0.5 a cada grupo; se estimó para estas categorías de población que pueden tomar decisiones, y más aún si recibieron previamente alguna capacitación en los programas de prevención y protección civil, y que estos habitantes ayudaran a niños de menor edad.

Categorías de habitantes susceptibles en un polígono, por rango de edad (**k_i**).	Valor de la ponderación	Vulnerabilidad ponderada por edad o limitación
k_1: desde 0 a 2 años	(0.30)	$(k_1)(0.30)$
k_2: de 3 a 5 años	(0.25)	$(k_2)(0.25)$
k_3: de 6 a 11 años	(0.15)	$(k_3)(0.15)$
k_4: de 12 a 14 años	(0.05)	$(k_4)(0.05)$
k_5: más de 60 años	(0.05)	$(k_5)(0.05)$
k_6: limitación física o mental	(0.20)	$(k_6)(0.20)$
Total de habitantes vulnerable por edad o limitación	Total de la Ponderación = 1	

Tabla 13. Valores para la ponderación de la vulnerabilidad de la población por edad o limitación física.

Ejemplo del cálculo de la vulnerabilidad ponderada por condición de edad o limitación física.

En un polígono se cálculo la vulnerabilidad por condición de edad o limitación física de la siguiente manera: el dato de habitantes en cada grupo ($\mathbf{k_i}$), se multiplica por un peso, como se muestra en la Tabla14:

Categorías de habitantes susceptibles en un polígono, por rango de edad ($\mathbf{k_i}$).	Vulnerabilidad ponderada en el AGEB
k_1: 21 habitantes	$(k_1)(0.30) = (21)(0.30) = 6.30$
k_2: 20 habitantes	$(k_2)(0.25) = (20)(0.25) = 5.00$
k_3: 49 habitantes	$(k_3)(0.15) = (49)(0.15) = 7.35$
k_4: 20 habitantes	$(k_4)(0.05) = (20)(0.05) = 1.00$
k_5: 18 habitantes	$(k_5)(0.05) = (18)(0.05) = 0.90$
k_6: 18 habitantes	$(k_6)(0.20) = (18)(0.20) = 3.60$
Total de habitantes en el polígono = 146	$V_e = 24.15$

Tabla 14. Ponderación de la vulnerabilidad de la población en un polígono por condición de edad o limitación física.

Para continuar con el ejemplo, el cálculo de V_e en un polígono:

$$V_e = P_1+P_2+P_3$$

$$V_e = 19.65 + 0.90 + 3.60$$

$$V_e = 24.15$$

Una vez más, los datos de V_e en los 51 polígonos ubicados en la zona de afectación por tsunami local se estandarizaron para mostrar su ubicación, el mapa 4, se muestra la distribución de la vulnerabilidad por la condición de edad o limitación física de población en la zona de afectación del peligro, para su representación se clasificó la vulnerabilidad baja cuando $z \leq -0.5$, media para $-0.5 > z < 1$. Para el grupo de alta vulnerabilidad los valores son $1 \geq z \leq 3$.

5.3 Población ocupada.

Es el número de habitantes que son parte de la cadena productiva en el territorio y que de manera directa tendrán que ejercer un gasto para recuperar los bienes dañados de impactar el peligro en las viviendas. La estimación se hizo en 219 polígonos con información del censo (INEGI, 2010), y se uso la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Po = PEA – PEI}$$

donde:

Po: Población total ocupada. El valor se asigna a cada polígono de la cobertura del área urbana.

PEA: Población Económicamente Activa. El INEGI describe que son personas mayores de 12 años que trabajaron, tenían trabajo pero no trabajaron o buscaron trabajo en la semana de referencia (lapso en que se levanto el censo).

PEI: Población Económicamente inactiva. Considera a personas de 12 años y más, como pensionados y jubilados, a estudiantes, persona dedicada al hogar, persona con limitación física o mental permanente que le impide trabajar.

Los valores calculados de **Po** en 219 polígonos suman un total de 47,676 habitantes y el cálculo del valor estándar z las categorías de vulnerabilidad, por lo que de tipo baja vulnerabilidad fueron polígonos con el menor número de habitantes y donde $z \leq -0.5$, alta en el caso contrario y $z > 1$. La vulnerabilidad media es cuando el valor estándar fuese > -0.5 $z \leq 3$. En el mapa 5 se muestra la distribución de la vulnerabilidad por esta condición de edad o limitación física de población en la zona de afectación del peligro, para 51 polígonos, son los siguientes: un total de población ocupada de 18,592, el valor máximo en un polígono fue de Po = 1,191 personas, la media calculada fue de Po = 372 y como mínimo Po = 22.

5.4 Distribución de la población de clase media por las características de la vivienda.

La vulnerabilidad en la vivienda de en la franja costera de la ciudad de Puerto Vallarta tiene uso para comercio y habitacional. Las edificaciones más vulnerables se ubican a una altitud < 5m a partir de la línea de costa y disponen de los servicios de agua y energía eléctrica.

En el escenario hipotético de la ocurrencia del tsunami local, es prioritario que se restablezcan los servicios de agua potable y energía eléctrica para una rápida recuperación y volver a las actividades cotidianas. Se realizaron cálculos preliminares para los índices de vivienda habitada y disponibilidad de esos servicios, los resultados preliminares muestran que son muy similares los índices en los 219 polígonos. Si acaso se le diese una ponderación, el criterio son las zonas de mayor densidad de habitantes y este es el mapa 3, también en las zonas hoteleras para restablecer lo más pronto posible las actividades económicas, asimismo el acceso a la ciudad como en el aeropuerto y la central de autobuses, estas superficies que están identificadas, por lo tanto se descartó esta variable del análisis final.

Otras variables calculadas de manera preliminar y que se presentan ya en el análisis final de este estudio fueron índices para vivienda particular habitadas y el número registrado para con tres o más habitaciones y que disponen de computadora y conexión a internet.

Para estimar las zonas en las que habitan población de clase media se calcularon tres índices que caracterizan el tipo de vivienda que habitan. El primero fue el índice de vivienda habitada con tres habitaciones o más. Los sitios muy vulnerables son para índices con valores mayores o igual a 0.78. Los índices con valores entre 0.13 hasta 0.77 son sitios con vulnerabilidad media, y para la vulnerabilidad baja para índices menores al valor 0.13.

Para la vivienda habitada con computadora, los polígonos con el índice mayor a 0.50 son muy vulnerables, para los índices menores a 0.50; la vulnerabilidad es media.

Para la vivienda habitada con conexión a internet, las aéreas muy vulnerables son para índices mayores a 0.70. Los índices menores a 0.70 son sitios con vulnerabilidad media.

Al disponer de los índices de las tres variables para la vivienda habitada (con 3 habitaciones o más, computadora y conexión a internet), y que de manera individual se calcularon, se reclasificaron los polígonos con los valores siguientes: polígonos de alta vulnerabilidad con valor 3, vulnerabilidad media con 2, vulnerabilidad baja 1 para cada variable. Para cuantificar la vulnerabilidad por para la condición de vivienda se sumaron las variables y se clasificaron los polígonos con vulnerabilidad alta los valores mayores a 6 hasta 9, con vulnerabilidad media a polígonos de valores desde 5 hasta 6 y vulnerabilidad baja a polígonos con valores desde 3 hasta 4. En el mapa 6 solo se presentan resultados en la superficie de inundación, que corresponden 51 polígonos.

5.5 Distribución de la población de clase media por el nivel de educación.

Para estimar las zonas en las que habitan población de clase media se calculó el índice para población de 18 años o más con educación pos-básica en cada uno de los 219 polígonos. Esta característica es para las "personas de 18 a 130 años de edad que tienen como máxima escolaridad algún grado aprobado en: preparatoria ó bachillerato; normal básica, estudios técnicos o comerciales con secundaria terminada; estudios técnicos o comerciales con preparatoria terminada; normal de licenciatura; licenciatura o profesional; maestría o doctorado. Incluye a las personas que no especificaron los grados aprobados en los niveles señalados (INEGI, 2010)".

Se calculó el valor estándar, z, del índice para clasificar la vulnerabilidad como baja en polígonos de valores $z \leq -1.44$, vulnerabilidad media para $-1.44 \geq z \leq 1.5$, alta vulnerabilidad para $z > 1.5$. La vulnerabilidad por esta condición es el mapa 7.

5.6 Costo de limpieza en el área de afectación.

Se calculó el costo por limpieza en la zona de impacto del tsunami local teórico, en base a los costos del año 2013. Se calcularon los volúmenes de escombros para las superficies de

inundación medidas en micro-cuencas, con diez centímetros de altura, en los escenarios de inundación por marea baja o alta.

Limpieza: se consideró que fuese hecho por personas sin el uso de equipo especial, incluye el apile de material.

Transporte: se considero que fuese trasladado en camión de volteo, a una distancia de un km de distancia, en un camino revestido (excluyó que fuese de terracería). Incluye la carga y también la descarga de material de escombro con maquinaria.

Los costos calculados para limpieza en la zona de afectación se muestran en las Tablas 15 y 16. En el escenario de marea baja fueron de $58’263,391, y para la marea alta $87’035,703.

Microuenca	Limpieza	Transporte	Costo por limpieza y transporte	
Ameca-Mascota	$6,412,049	$14,535,030	$20,947,079	
Salado	$8,068,379	$18,289,651	$26,358,030	
Pitillal	$2,898,634	$6,570,713	$9,469,348	
Camarones	$154,260	$349,681	$503,940	
Cuale	$165,503	$375,167	$540,670	
Nogalito	$87,614	$198,607	$286,221	
Palo María	$29,362	$66,559	$95,922	
Mismaloya	$19,034	$43,146	$62,180	
Subtotales	**17,834,835**	**40,428,555**		**Total: $58'263,391**

Tabla 15. Costo de limpieza en la simulación de afectación del tsunami local en marea baja.

5.7 Costos de enseres en el área de afectación.

Se calculo el costo de recibir apoyo de $7,000 para la compra de enseres domésticos en las viviendas de la zona de afectación en un escenario de marea alta. En el censo del 2010 había 33,942 viviendas; de las cuales 23,271 estaban habitadas. El cálculo de costo de enseres fue entre $162’897,000 a $237’594,000.

Microuenca	Limpieza	Transporte	Costo por limpieza y transporte	
Ameca-Mascota	$9,524,399	$21,590,203	$31,114,602	
Salado	$11,340,503	$25,707,003	$37,047,506	
Pitillal	$4,346,612	$9,853,034	$14,199,646	
Camarones	$708,565	$1,606,198	$2,314,763	
Cuale	$441,224	$1,000,181	$1,441,405	
Nogalito	$166,398	$377,197	$543,595	
Palo María	$67,266	$152,482	$219,748	
Mismaloya	$47,274	$107,163	$154,437	
Subtotales	**26,642,243**	**60,393,460**		**Total: $87'035,703**

Tabla 16. Costo de limpieza en la simulación de afectación del tsunami local en marea alta

5.8 Cambios del uso del suelo en la zona de afectación que incrementan la vulnerabilidad.

Las tendencias de las actividades económicas en México frecuentemente muestran una prioridad al mayor beneficio inmediato y los costos de degradar el ambiente han sido ignorados.

En el caso de ocurrencia de un tsunami local, los beneficios que brinda la zona de manglares es la de disminuir la energía de la onda, por lo que su velocidad disminuye y

mitiga los efectos costeras por el tsunami, por ello se busca preservar este sistema natural. Un tsunami puede crear dunas (Bryant, 2001), por este motivo se buscan en la franja costera estos sitios y se hacen muestreos para buscar evidencia y detectar la ocurrencia de eventos pasados. Con las mediciones se interpreta el origen de formación del sistema de dunas, los indicadores de tsunamis, como la granulometría que frecuentemente es angular, los materiales se depositan en capas caóticas y también hay evidencia de gravas y de foraminíferos marinos (especies microscópicas), estos materiales que no pueden ser transportados por el viento pero si por un tsunami.

Se realizo una inspección rápida del cambio de uso de suelo, basada en la carta topográfica de INEGI generada a partir de un vuelo fotogramétrico de los años setenta, y del trabajo de Núñez-Cornú F. J., et al. (2006).

Se midió que en la zona de afectación del tsunami el uso de suelo ha generado la pérdida de 16.82 km^2 vegetación de 1970 al año 2006 (Figura 45). Las superficies que se midieron fueron 10.25 km^2 dedicados a la agricultura en su mayor parte en la cuenca Pitillal, 1.68 km^2 de tipo bosque espinoso, 0.36 km^2 de bosque de galería, 1.89 km^2 de bosque sub-caducifolio, 0.4 km^2 de dunas, 1.29 km^2 de manglar en la cuenca Ameca y 0.95 km^2 de palmar.

En Puerto Vallarta el de uso de suelo ha permitido la alta densidad de población muy próxima a la costa (mapa 3), asimismo edificaciones en la playa. La cantidad de sedimentos que aportan los ríos a las playas en la Bahía de Banderas se han modificado, debido a la extracción de la arena o grava de los ríos utilizados para la edificación y por la construcción de espigones (Figura 46); con ello se ha cambiado la dinámica de costa, alterando la distribución de los sedimentos y esto tiende a desequilibrarlos. En el trabajo de Núñez-Cornú et al. (2006), se registraron los sitios en los que los sedimentos de playa en desequilibrio colapsaron, se le clasifica como movimiento por compactación diferencial. Las actividades económicas locales incrementan la vulnerabilidad ante la posibilidad de tsunami por deslizamientos de los sedimentos de la playa en sitios como los estuarios, al estar estos en un equilibrio inestable y sin la condición para que ocurrencia le anteceda algún terremoto de gran magnitud.

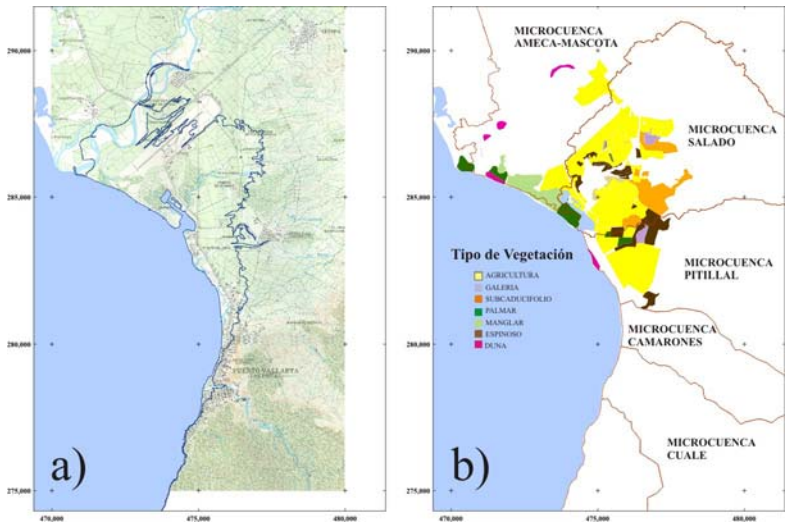


Figura 45. a) Carta topográfica de INEGI en la década 1970; la línea azul es la afectación por tsunami local en marea alta, b) el cálculo de superficies con vegetación (reportada por Núñez-Cornú, et al., 2006), y en la actualidad es de uso urbano.

De la revisión del cambio de uso del suelo en la zona de estudio, (Figura 44), un factor que aumenta la vulnerabilidad en la franja costera de Puerto Vallarta por un tsunami local es la reducción de las zonas de manglar en las cuencas Ameca y Salado. Por otra parte ya no existen dunas en la desembocadura del río Pitillal porque se edificaron cinco torres, tampoco en la desembocadura del río Ameca. El cambio de uso de suelo de agrícola a uso urbano más significativo en las cuencas Salado y Pitillal.

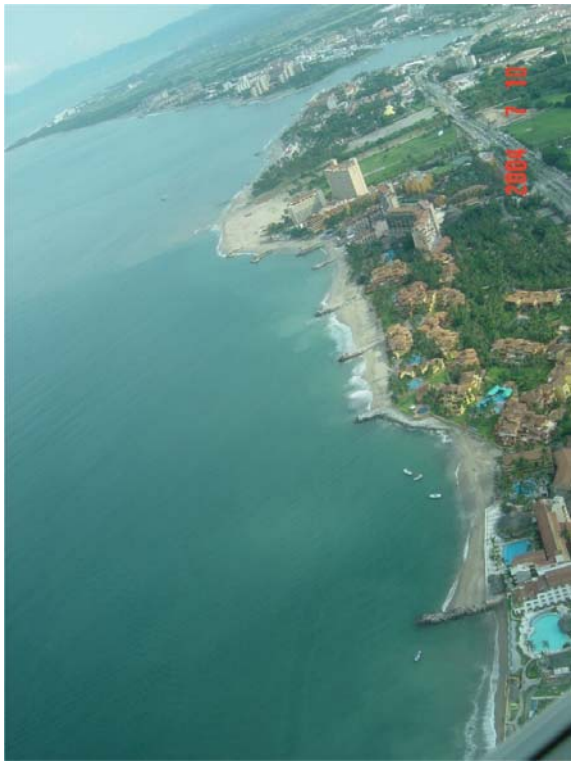


Figura 46. Erosión de la playa desembocadura del río Pitillal. Fotografía de Suárez Plascencia. Fuente Núñez-Cornú, et al. (2006).

5.9 Ubicación de las instalaciones vitales.

Para localizar instalaciones vitales para el sistema se consultó la base de datos DENUE (INEGI, 2014); y la cartografía municipal. Solo se ubico las de tipo público muy vulnerable y se excluyeron a los de tipo privado. Las instalaciones vitales son aquellas que el sistema requiere se mantengan operando después que hubiese ocurrido el peligro.

Fueron localizadas 542 instalaciones vitales en la zona de estudio, de las cuales 17.7 % se encuentran en la zona de afectación del tsunami. Los usos de las instalaciones muy vulnerables en el área de afectación del tsunami local corresponde 8.9 % escuelas, 1.1 % unidades de salud, 3 % gobierno y atención a emergencia, el 4.7 % para diversos usos como distribución de energía eléctrica, almacén de combustible, centros comerciales, entretenimiento, museo y los puentes.

El mapa 8 ubica las instalaciones altamente vulnerables dentro del área de afectación y en las Tablas 17 y 18 se muestran datos de la población y uso de las instalaciones muy vulnerables.

Prioridad para establecer planes de prevención y protección civil en las escuelas.

De los registros en la cartografía municipal se ubicaron 245 escuelas en la zona de estudio, de las cuales se encuentran el 19.6% en la zona de peligro, espacios que serían afectados por la inundación del tsunami. Se consideró que la pérdida es aceptable si el uso que se les da con frecuencia sean los albergues en la contingencia y para dar apoyo a los damnificados, se esperaría que hubiese otros, solo habrá que descartarlos para su uso para alberges ante este la eventualidad del tsunami local.

Desde el punto de vista del uso como una escuela, en el escenario que el tsunami local ocurriera en el tiempo que estarían los alumnos, la vulnerabilidad aumenta. El 57% de esas escuelas del área de inundación son de tipo primarias y para este estudio se consideró que estos alumnos son menores a 14 años de edad y la condición de vulnerabilidad es alta. Los estudios de gestión del riesgo establecen que esta población necesita de orientación e instrucciones sobre qué hacer para llegar a un sitio seguro, a salvo de la inundación, ya que necesitan de una persona capacitada que les proporcione información, no actúan por sí mismos.

5.10 Vulnerabilidad por tsunami local en Puerto Vallarta.

La vulnerabilidad total se calculó con el método de mínima curvatura suavizada y la reclasificación de 219 puntos con datos de población y vivienda, asimismo 329 puntos con datos de instalaciones vulnerables. La vulnerabilidad final tiene valores desde 3 (baja vulnerabilidad) hasta 18 (muy alta vulnerabilidad).

En caso de ocurrir un tsunami local en la cuenca Ameca la superficie de cultivo vulnerable es de 3 km^2, se consideró como baja vulnerabilidad.

En el mapa 9 muestra la vulnerabilidad dentro del área de afectación del tsunami local. La mayor vulnerabilidad es en la cuenca El Salado, después en la cuenca El Pitillal y en orden tercero Ameca-Mascota. La vulnerabilidad no aceptable se consideró que de no modificar la vulnerabilidad exista posibilidad de víctimas si ocurriese el peligro.

Si las autoridades reconocen que hay vulnerabilidad por este peligro, como resultado de usos de suelo sin control que se han tenido en la franja costera, y optan por una buena gestión del riesgo, entonces la sugerencia de este estudio es favorecer los instrumentos para la planificación de las actividades económicas en este territorio.

El mapa 9 es vulnerabilidad total por tsunami local. Es una información básica para que las autoridades en sus diferentes niveles de gobierno implementen las estrategias de prevención que busquen modificar la vulnerabilidad con el fin de reducir el riesgo. Es una prioridad implementar los programas para educar a la población respecto a este peligro, asimismo les permite diseñar estrategias para la atención a la población en el momento de la contingencia.

Microuenca	**Número de población vulnerable, con proyección al año 2015**	**Número de viviendas vulnerables**	**Costo por enseres domésticos dañados**	**Costo por limpieza y trasporte de escombros**
Ameca-Mascota	Zona de inundación en 51 polígonos	Zona de inundación en 51 polígonos	Zona de inundación en 51 polígonos.	$31,114,602
Salado				$37,047,506
Pitillal				$14,199,646
Camarones				$2,314,763
Cuale				$1,441,405
Nogalito				$543,595
Palo María				$219,748
Mismaloya				$154,437
Subtotales	**4,052 habitantes**	**33, 942 viviendas**	**$237’594,000**	**$87'035,703**

Tabla 17. Datos de vulnerabilidad para población y vivienda en la zona de afectación del tsunami local hipotético y marea alta.

Microuenca	**Escuela**	**Unidad de salud**	**Comunicación y de transporte**	**Gobierno**	**Atención en emergencia**	**Entretenimiento, comercio y cultura**
Ameca-Mascota	4		1 Aeropuerto 3 Puentes	1	2	1
Salado	19	3	1 Central de autobuses 1 Correo 1 Embarcadero 1 Recinto Portuario 1 Puente	8	1	9
Pitillal	22	2	1 Puente			2
Camarones	1	1	1 Puente	1	1	1
Cuale	2		2 Puentes	2		8
Nogalito			1 Puente			
Palo María			1 Puente			
Mismaloya			1 Puente			
Subtotales	**48**	**6**	**16**	**12**	**4**	**21**

Tabla 18. Datos de vulnerabilidad en instalaciones en la zona de afectación del tsunami local hipotético y marea alta.

Capítulo 6 Conclusiones

6.1 Conclusiones en la Zona de Estudio.

- Se calculó la superficie de afectación por tsunami local en Puerto Vallarta; para ello se utilizó el modelo propuesto por Ortiz et al. (2000); y Núñez Cornú et al. (2008). El método se validó simulando el tsunami del 9 de octubre de 1995 en La Manzanilla, frente a la costa sur de Jalisco y comparando sus resultados obtenidos por otros métodos. El modelo reproduce aproximadamente la condición inicial del tsunami de 1995: dislocación cosísmica, el área de ruptura y su localización.
- En este trabajo se modeló un tsunami local después de un terremoto de Mw = 8 en la Trinchera Mesoamericana, frente a la costa norte de Jalisco y Bahía de Banderas, con las condiciones iniciales del tsunami de 1995, en un modelo de mecanismo focal simple. Los resultados se muestran desde la figura 17 hasta la 24, son los cálculos de las alturas esperadas de ondas y los tiempos de arribo a las costas de Jalisco, Manzanillo en Colima y Bahía de Banderas en Nayarit, que también se muestran por localidades en las Tablas 7 y 8.
- A partir del modelo del tsunami local frente a Bahía de Banderas se calculó una superficie de inundación de 22 km^2 sobre un modelo digital del terreno que si representa las condiciones locales de altitud en área de afectación, la franja costera de Puerto Vallarta, obtenido mediante el método de mínima curvatura suavizada (método *spline*), con celdas a una resolución de 2.5 x 2.5 m.
- La escala permitió generar mapas de las extensiones horizontales de inundación y la distribución de las alturas de ondas posibles. En la Figura 16 se muestran las zonas de inundación según los tiempos de arribo, un tsunami es una secuencia de olas, en los intervalos 10, 15 y 25 minutos. Para el arribo a los 75 minutos es la misma extensión de inundación que a 25 minutos.
- El propósito del cálculo de la vulnerabilidad en Puerto Vallarta por tsunami local fue identificar las zonas críticas, las más susceptibles a este peligro. Este resultado es la información básica, en el ámbito de la protección civil, para intentar reducir la vulnerabilidad mediante una buena gestión del riesgo.

- El cálculo de la vulnerabilidad en la zona urbana de Puerto Vallarta es útil para identificar los lugares críticos y dentro de ellos habrá que ubicar los refugios de evacuación vertical ante este peligro en la franja costera, así como el diseñó de los programas de educación a la población para que perciba este peligro y reconozca los refugios en caso de encontrarse en la zona de impacto del peligro. En las localidades de la región de estudio, menores a 2500 habitantes, la evacuación es a pie hacia un lugar elevado. La vulnerabilidad por tsunami local es mayor en la cuenca Salado, después en las cuencas Pitillal y Ameca-Mascota y se muestra en el mapa 9.
- No se pretende con los resultados de este trabajo desalentar el desarrollo para las actividades económicas de este destino turístico. La percepción que Puerto Vallarta es lugar peligroso y tratar de negarlo a razón que se alejan las inversiones económicas para el municipio tiene su origen en el desconocimiento de la buena gestión, la cual enfatiza que la vulnerabilidad puede ser reducida y con ello minimizar el riesgo para evitar un desastre en el territorio que impacta el peligro.
- Resulta imprescindible, ante las graves evidencias de los impactos socioeconómicos y ambientales de los desastres naturales como un tsunami, que los países en franjas costeras asuman un papel preponderante y eficaz en el manejo integral de las zonas costeras y del riesgo. Para ello se requiere fomentar la mitigación de la vulnerabilidad y la cultura de la prevención, siguiendo como estrategia la planificación para el desarrollo y el efectivo ordenamiento territorial, que a su vez esta soportado por la legislación, presupuestos adecuados para estos programas y la supervisión en la aplicación de los ordenamientos de la franja costera. De lo contrario se tiene una percepción que niega el peligro en la costa, persiste la inercia del territorio sin planificar y se traslada el costo del riesgo; lo que conduce a una alta probabilidad que se presente un desastre.

6.2 Investigaciones Futuras en la Zona de Estudio

Con las condiciones iniciales del tsunami que utilizadas en esta tesis, de categoría B, altura máxima de ola mayor a 3 m y menor o igual a 5 m:

- Determinar el costo del daño de documentos catastro y acervos de los museos. En algunos casos se considera que cualquier daño es invaluable e irrecuperable; porque

algunos objetos resguardados en las instalaciones altamente vulnerables son piezas históricas.

- Determinar el costo por daños en equipo como: computadoras, instrumentos y equipo de las Unidades de Salud y Escuelas.
- Determinar el costo por dejar operar en por lo menos un día la terminal marítima, el aeropuerto y la central de camiones. Asimismo el de los hoteles en la franja costera.
- Identificar las edificaciones que sean susceptibles a colapsar ante un sismo de gran magnitud por efecto de licuefacción.
- Identificar las edificaciones susceptibles a colapsar en un sismo de gran magnitud por un diseño estructural deficiente.
- Identificar zonas susceptibles a derrumbes, como laderas inestables próximas a la costa, debido a la energía que libera un sismo de gran magnitud.
- Implementar acciones de mitigación de la vulnerabilidad en la zona de estudio. La tendencia del uso de suelo actual en Puerto Vallarta requiere modificarse mediante ordenamientos que reduzcan la vulnerabilidad.
- Modelar el peligro por tsunami local categoría C, los menos frecuentes pero más devastadores. Estos se generan por un deslizamiento submarino en las plataformas marinas costeras de los deltas estuarios y generan altura de olas máximas entre 5 m o $\geq$ 10 m de altura. Después calcular la vulnerabilidad para este tipo de tsunami.

6.3 Investigaciones Futuras en la Región de Estudio.

- Calcular la extensión de inundación, con las características del tsunami que se analizó en esta tesis, de categoría B. Asimismo la vulnerabilidad en la franja costera para localidades $\leq$ 2500 habitantes, como en la costa de Jalisco y municipio de Bahía de Banderas, Nayarit, con un modelo del terreno digital a una escala que represente la altitud de la localidad (celdas < 10 m^2).
- Modelar el peligro y vulnerabilidad para un tsunami local tipo C para las localidades costeras de la región.

Bibliografía.

Bryant E. 2001. Tsunami: The Underrated Hazard. *Cambridge University Press*, United Kindom. 320 pp.

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (**CICESE**). 2013. Calendarios Mensuales Predicción de Mareas. predmar.cicese.mx/calmen.php (consulta para Puerto Vallarta Jal., para los años 2012 y 2013).

Centro Nacional de Prevención de desastres (**CENAPRED**), Dirección de Investigación, Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos. 2011. Resumen de los Efectos de los Desastres ocurridos en 2010. 9-18 p. In: García Arróliga N., Marín Cambranis R., Méndez Estrada K., Troncoso Arriaga N. (Eds.). Características e impacto socio-económico de los principales desastres ocurridos en la republica Mexicana en 2010. *CENAPRED*, México.

Centro Nacional de Prevención de desastres (**CENAPRED**). 2005. Tsunami Serie Fascículos. *CENAPRED, Secretaría de Gobernación*, México. 39 pp.

Consejo Nacional de Población (**CONAPO**). 2012. Proyecciones de la Población por Entidad Federativa 2010-2030. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos (consulta junio del 2013).

Consejo Nacional de Población (**CONAPO**). 2012. Proyecciones de la Población por Municipio 2010-2030. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos (consulta junio del 2013).

Courboulex F., Singh S. K., Pacheco J. F., Ammon C. J. 1997. The 1995 Colima Jalisco, Mexico, Earthquake (Mw8): A Study of the Rupture Process. *Geophys. Res. Lett., 24*:9 1019-1022.

Farreras S. 1997. Tsunamis en México. Monografía 3. In: Lavin M. F. (Ed.). Contribuciones a la Oceanografía Física en México. *Unión Geofísica Mexicana*, México, 78-98 p.

Farreras Sanz F., Ortiz Figueroa M. 2003. Riesgo de Maremotos en Ciudad Lázaro Cárdenas, Michoacán: Medidas de Prevención. *El Colegio de México, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, El colegio de Michoacán,* México. 100 pp.

Farreras Sanz S. F., Ortiz Figueroa M. 2002. Evaluación del Riesgo por Inundación por Tsunamis en el Puerto de Lázaro Cárdenas, México, Mediante Simulación Numérica. 277-285. In: Oñate E., Zárate F., Ayala G., Botello S., Moreles M. A., (Eds.). Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE),* Barcelona.

Federal Emergency Management Agency (**FEMA**). 2008. Vertical Evacuation Structure, Examples from Japan (Appendix A, femap646.pdf). 101-105. In: Rojahn C., Heintz J. A., Holmes T. W. (Eds.). Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis. *FEMA - NOOA*, Estados Unidos de América. http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1641-20490-9063/femap646.pdf.

Gómez Delgado M., Barredo Cano J. I. 2005. Evaluación Multicriterio y Multiobjetivo en el Entorno de los Sistemas de Información Geográfica. 70-90 p. In: Gómez Delgado M., Barredo Cano J. I. (Eds.). Sistemas de Información Geográfica y evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio. *RA-MA Editorial*, España.

Goto C., Ogawa Y., Shuto N., Imamura F. 1997. IUGG/IOC TIME Proyect: Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme. *Manual and Guides*, 35, 4, Intergovt. Oceanogr. Comm. of UNESCO, Paris.

Guzmán J. M, Silva A., Poulard S., Jovel R. 2003. Segunda Parte: Sectores Sociales, Población Afectada. 29-66 p. In: Zapata Martí R., Jovel R. (Eds.). Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres. *Comisión Económica para América latina y el Caribe* (**CEPAL**), México.

Hanks T. C., Kanamori H. 1979. A Moment Magnitude Scale, 1979. *J. Geophys. Res. SE.*, 84, B5: 2348-2350. DOI:10.1029/JB084iB05p02348.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (**INEGI**), 1994, Geo-Modelo de Altitud del Territorio Nacional (GEMA-1994). INEGI, Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (**INEGI**). 1998. Carta topográfica escala 1: 50,000, Datum ITRF92. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/default.aspx (consulta marzo del 2012).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (**INEGI**). 2002. Geografía, Temas, Topografía, Imagen Digital Carta Topográfica Escala 1:50 000, F13C69 Puerto Vallarta. http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/detalle2.aspx? (consulta en octubre del 2008).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (**INEGI**). 2002. Localidades Geoestadísticas: (**Archivo Histórico de localidades**). http:// http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/Datos.aspx (consulta septiembre del 2008).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (**INEGI**). 2010. Censo de Población y Vivienda 2010. http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx (consulta Principales resultados por AGEB y manzana urbana, junio del 2013).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (**INEGI**). 2012. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mapa/denue/default.aspx (consulta junio del 2013).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (**INEGI**). 2012. Inventario Nacional de Viviendas. http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mapa/inv/default.aspx (consulta en junio del 2013).

International Tsunami Informatión Center (**ITIC**). 2014. General Info, Visual Gallery. http://itic.ioc-unesco.org/index.php (consulta para photos/evacuation & safety. Photo courtesy of River Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan. febrero 2014.)

Juárez García Hugón, Witney R. A., Guerrero J. J., Gama A., Vera R., Hurtado F. 1997. The October 9, 1995 Manzanillo, Mexico Earthquake. *Seis. Res. Lett.*, 68, 3: 413-425.

Kowalik Z., Horrillo J., Knight W., Logan T. 2008. Kuril Island Tsunami of November 2006: 1. Impact at Crescent City by Distant Scattering. *J. Geophys. Res.*, 113, C01020:1-13, DOI10.1029/2007JC004402, 2008.

Levin B., Nosov M. 2009. General Information on Tsunami, Waves, Seaquakes and other Catastrophic Phenomena in the Ocean. 1-27 p. In Levin B., Nosov M. (Eds.). Physics of Tsunamis. *Springer*. USA.

Lind D. A., Marchal W. G., Wathen S. 2012. Distribuciones de Probabilidad Continua. 221-263 p. Estadística Aplicada a los Negocios y la Economía. *McGraw Hill Educación*, México.

Luhr J., Nelson S., Allan J., Carmichael I. 1985. Active Rifting in Southwestern Mexico: Manifestations of an Incipient Eastward Spreading-ridge jump. *Geology*, 13: 54-57.

Mansinha L., Smylie E., 1971, The Displacement Field of Inclined Faults. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61: 1433-1440.

Massam B., Everit J., Andrade E., Chávez R. M., Cortés M., Cupul A., Espinoza R., González L., García de Quevedo R., Hernández L., Navarro M., Raymundo A. 2003. Quality of Life in Puerto Vallarta Region of Jalisco State, Mexico. *Rural Development Institute*, Brandon University, Canada, 50 pp.

National Oceanic and Administration (**NOOA),** y National Geophysical Data Center **(NGDC)**. 2014. Natural Hazards, Image Database. http://www.ngdc.noaa.gov/hazardimages/ (consulta para Samoa Islands event on 29 September 2009, febrero 2014).

National Oceanic and Administration (**NOOA**). 2014. Tsunami. http://www.tsunami.noaa.gov/basics.html#indonesian (consulta para Indonesian Tsunami event on 26 Dec 2004, Sumatra Tsunami, febrero 2014).

Núñez-Cornú F. J. 2011. Peligro Sísmico en el Bloque Jalisco. *Física de la Tierra*, 23: 199-299.

Núñez-Cornú F. J., Ortiz Figueroa M., Sánchez Aguilar J. J. 2008. The Great 1787 Mexican Tsunami. *Nat. Haz.*, 47: 569-576. DOI:10.1007/s11069-008-9239-1.

Núñez-Cornú F. J., Reyes-Dávila G.A., Rutz-López M., Trejo-Gómez E., Camarena-García M.A., Ramírez-Vázquez C. A. 2004. The 2003 Armería, Mexico Earthquake (Mw7.4): Mainshock and Early Aftershocks. *Seis. Res. Lett.*, 75, 6: 734-743.

Núñez-Cornú F. J., Suárez-Plascencia C., Cháves-Dagostino R.M. 2006. Caracterización y Análisis del Subsistema Natural de Puerto Vallarta: Atlas de Peligros Naturales y Programa de Ordenamiento Ecológico, Informe Técnico. *Ayuntamiento de Puerto Vallarta y Secretaría de Desarrollo Social (programa HABITAT)*, DOP-068/2006.

Núñez-Cornú F.J., Rutz López M., Márquez Ramírez V., Suárez-Plascencia C., Trejo Gómez E., 2010, Using an Enhaced Dataset for Reassessing the Source Region of the 2003 Armería, México Earthquake. *Pure and App Geoph*., 168, 1293-1302. DOI 10.1007/s00024-010-0178-x.

Ortiz M., González J. I., Reyes J., Nava C., Torres E., Saenz G., Arrieta J. 1995. Efectos Costeros del Tsunami del 9 de Octubre de 1995 en la Costa de Colima y Jalisco, Informe Técnico. *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)*, Baja California, México. 19 pp.

Ortiz M., Kostoglodov V., Singh S.K., Pacheco J. 2000. New Constraints on the Uplift of October 9, 1995 Jalisco-Colima Earthquake (Mw8) Based on the Analysis of Tsunami Records at Manzanillo and Navidad, Mexico. *Geofísica Internacional*, 39: 349-357.

Ortiz M., Singh S. K., Pacheco J., Kostoglodov V., 1998, Rupture Length of the October 9, 1995 Colima-Jalisco earthquake (Mw8) estimated from Tsunami Data. *Geophys. Res.*, 25: 2857-2860.

Pacheco J., Singh S. K., Domínguez J., Hurtado A., Quintanar L., Jiménez Z., Yamamoto J., Gutiérrez C., Santoyo S., Bandy W., Guzmán M., Kostoglodov V. 1997. The October 9, 1995 Colima-Jalisco Mexico Earthquake (Mw8): and Aftershock Study and Comparison of this Earthquake with those of 1932. *Geophys. Res. Lett*, 24, 17: 2223-2226.

Pedlosky J. 1979. Geophysical Fluid Dynamics. *Springer-Verlag*, New York. 664 pp.

Red Sísmica de Puerto Rico. 2012. Desalojo Vertical en Caso de Tsunami: Una Guía para Oficiales Comunitarios (FEMA 646 A en español) http://redsismica.uprm.edu/Spanish/desalojovertical/docs/FEMA%20P646A_ESP.pdf (consulta para desalojo vertical, junio 2013)

Rodríguez-Gutiérrez F., Trejo-Gómez E., y Chávez-Dagostino R.M. 2012. Integración de Fichas de Paisaje. 173-220 p. In: Núñez-Cornú F. J., Rodríguez-Gutiérrez F. y Chávez-Dagostino R. M. (Eds.). Gestión Integrada de Paisajes Litorales: Hacia Una Metodología Comparativa. Caso Asturias, España y Bahía de Banderas, México. *Editorial Plaza y Valdés*, México.

Russian Academy of Science. 2014. Tsunami Laboratory. http://tsun.sscc.ru/tsulab/20041226.htm#%22 (consulta febrero 2014)

Rutz López M., Núñez Cornú F. J., Suárez Plascencia C. 2013. Study of Seismic Clusters at Bahía de Banderas Region, Mexico. *Geofísica Internacional*, 52, 1: 59-72.

Sánchez A. J., Farreras S. 1993. Catalog of Tsunamis on the Western Coast of Mexico, World Data Center A for Solid Earth Geophysics. Publication SE-50, *National Geophysical Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, Washington. 94 pp.

Sánchez Aguilar J. J., Clavijo Ramírez J. E. 2011. Aspectos Científicos y Lecciones para Colombia luego del Sismo de Tohoku, Japón, en marzo 11, 2011 (Mw 9.0). *Geología Colombiana*, 36, 1: 23-36.

Secretaría de Desarrollo Social **(SEDESOL)**. 2012. Métodos, Evidencias e Indicadores de Vulnerabilidad de Fenómenos Geológicos. 15-44. In: Soto Álvarez A. (Ed.). Bases para la Estandarización en la elaboración de Atlas de Riesgo y Catalogo de Datos Geográficos para representar el Riesgo. *SEDESOL*, México.

Simioni D. M, Faciolince M., Bascuñan R, Griguolo S. 2003. Segunda Parte Sectores Sociales, Vivienda y Asentamientos Humanos. 67-84 p. In: Zapata Martí R., Jovel R. (Eds.). Manual para la Evaluación del Impacto Socioeconómico y Ambiental de los Desastres. *Comisión Económica para América latina y el Caribe CEPAL*, México.

Singh S. K., Bazan E., Estevas L. 1980. Expected Earthquake Magnitude from a Fault. *Bull. Seism. Soc. Am*., 70: 903-914.

Singh S. K., Ponce L., Nishenko S. P. 1985. The Great Jalisco, México, Earthquakes of 1932: Subductión of the Rivera plate. *Bull. Seism. Soc. Am*., 75: 1301-1313.

Smith W. H. F., Sandwell D. T. 1997. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science, 277*: 1956-1962.

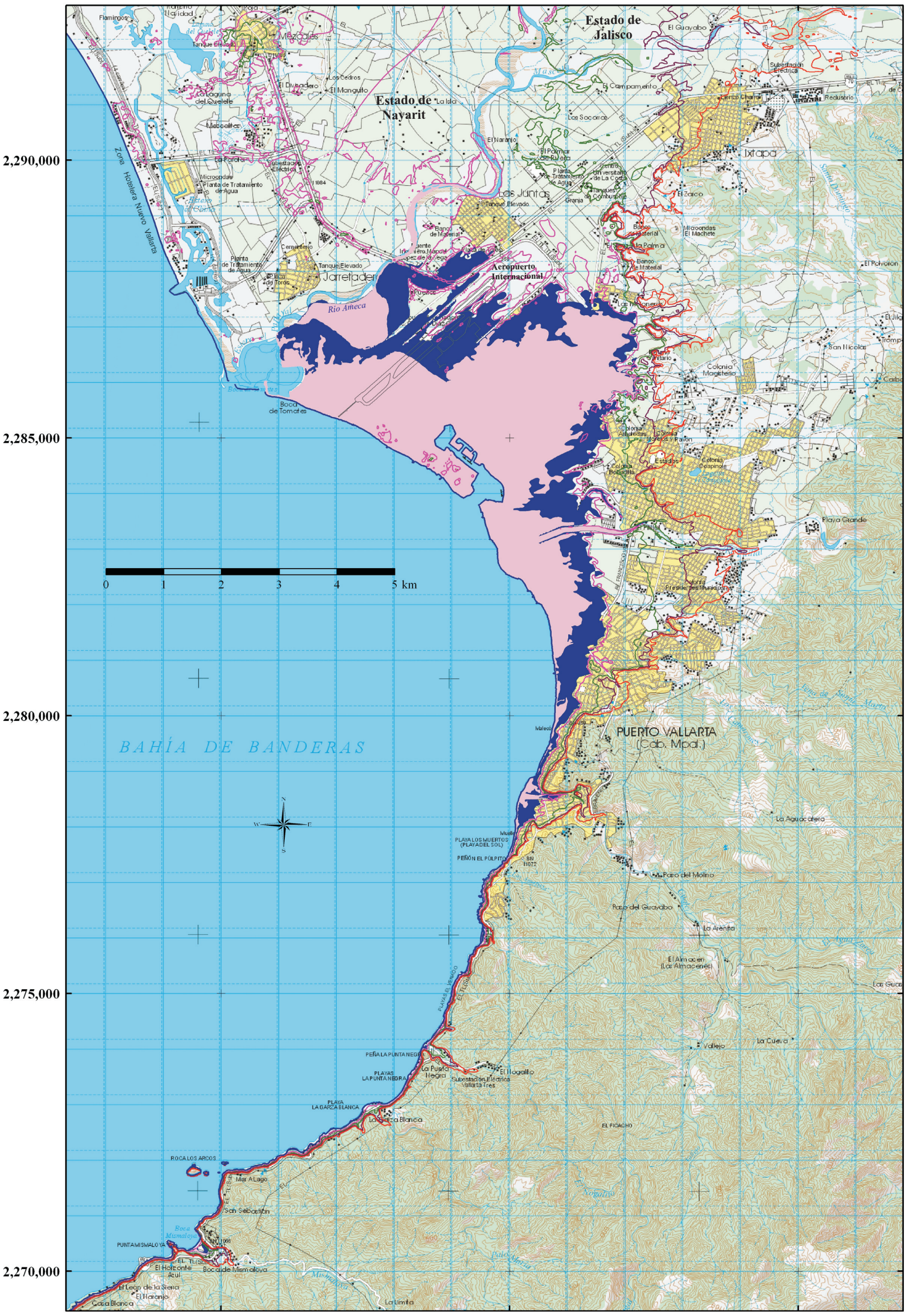
Suárez-Plascencia C., Guillen-Patiño K., Núñez-Cornú F. J. 2008. Riesgo por Inundaciones en el Sector sur del Municipio de Guadalajara. *GEOS*, 28, 2:254

Trejo Gómez E., Ortiz M., Núñez Cornú F. J. 2015. Source Model of the October 9, 1995 Jalisco-Colima Tsunami as constrained by field survey reports, and on the numerical simulation of the tsunami. *Geofísica Internacional,* 54, 2:149-159.

Udías Vallina A., Mezcua Rodríguez J. 1997. Parámetros Focales De los Terremotos. Fundamentos de Geofísica. *Editorial Alianza Editorial S.A.,* Madrid, 179-200 p.

Utsu T., Seki A. 1954. A Relation Between the Area of Aftershock Region and the Energy of Main Shock (in Japanese). *J. Seism. Soc. Jap*., 7: 233-240.

Wyss M. 1979. Estimation Maximum Expectable Magnitude of Earthquakes from Fault Dimensions. *Geology*, 7: 336-340.



LEYENDA

Carta Topográfica F13C69, Escala 1:50000, INEGI

- Extensión urbana 1996, INEGI
- Autopista
- Camino

INUNDACIÓN POR TSUNAMI LOCAL, SEGÚN LA CONDICIÓN DE MAREA

MDT CELDAS DE 6.25 m^2

- Inundación en marea baja
- Inundación en marea alta

CURVA DE NIVEL GENERADAS CON MDT, CELDAS DE 6.25 m^2

- 0 m
- 5 m
- 10 m
- 15 m
- 20 m

Carta Topográfica F13C69, ESCALA 1:50000, INEGI

- 40 > 20 m

REFERENCIA GEOGRÁFICA

Proyección: Universal transversa de Mercator, Zona 13 Norte

Datum se referencia: WGS84

Modelo Digital del Terreno **(MDT)**, a partir de la restitución a escala gráfica 1: 20,000 por Cartodata S.A. de C.V., vuelo del año 2000.

Impresión
Septiembre del 2013

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

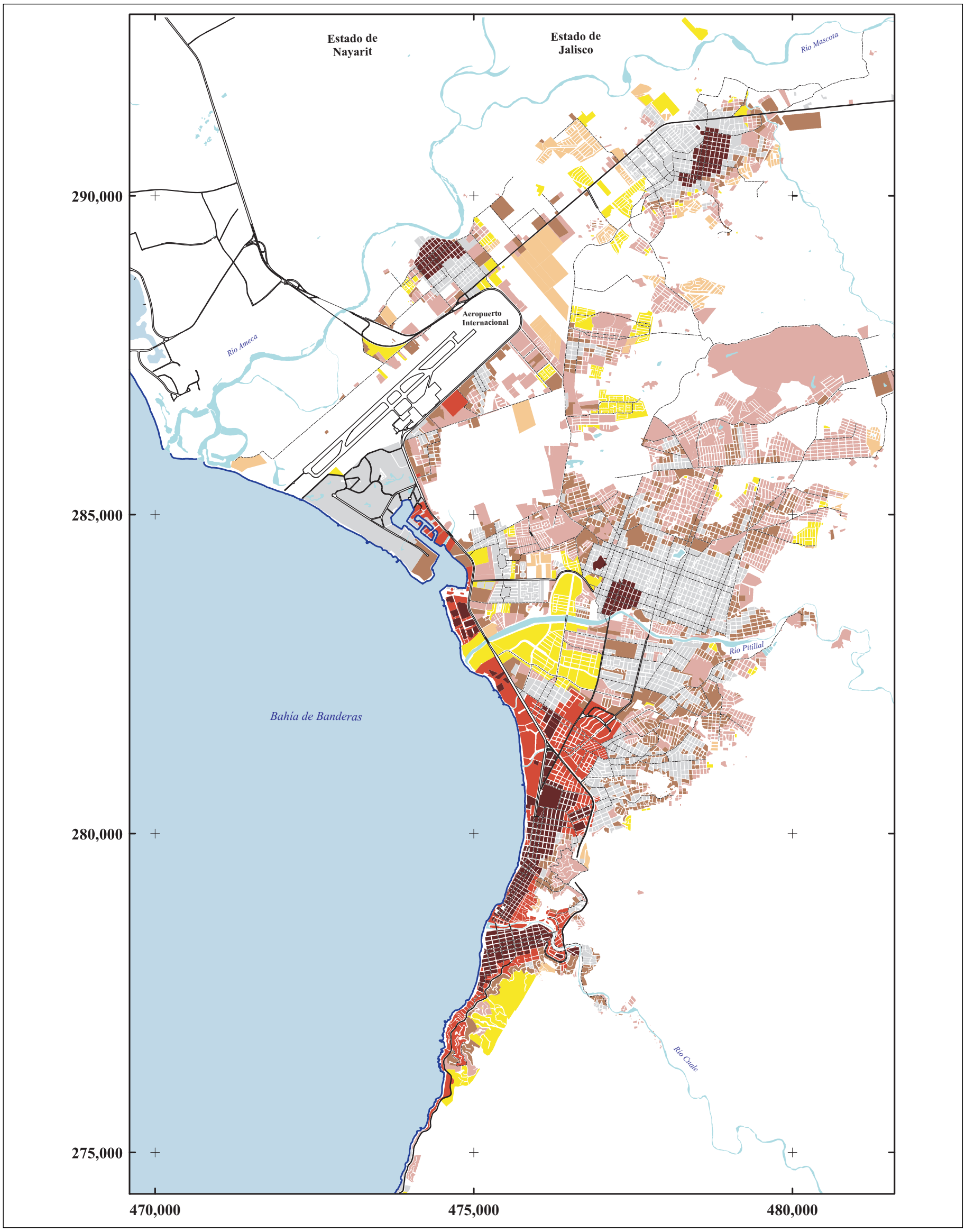
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS

ORIENTACIÓN EN INVESTIGACIONES COSTERAS

Tesis: Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco
Presenta: Elizabeth Trejo Gómez **Director:** Dr. Francisco Javier Núñez Cornú

PELIGRO DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI LOCAL **MAPA 1**



LEYENDA

Autopista

Camino

CURVA DE NIVEL
MDT CELDAS DE 6.25 m^2

0 m

PERÍODOS DE LA EXTENSIÓN URBANA EN PUERTO VALLARTA

1970
1980
1990
1995
2000
2005
2013

REFERENCIA GEOGRÁFICA

Proyección: Universal transversa de Mercator, Zona 13 Norte

Datum se referencia: WGS84

Modelo Digital del Terreno (MDT), a partir de la restitución a escala gráfica 1: 20,000 por Cartodata S.A. de C.V., vuelo del año 2000.

Impresión
Septiembre del 2013

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

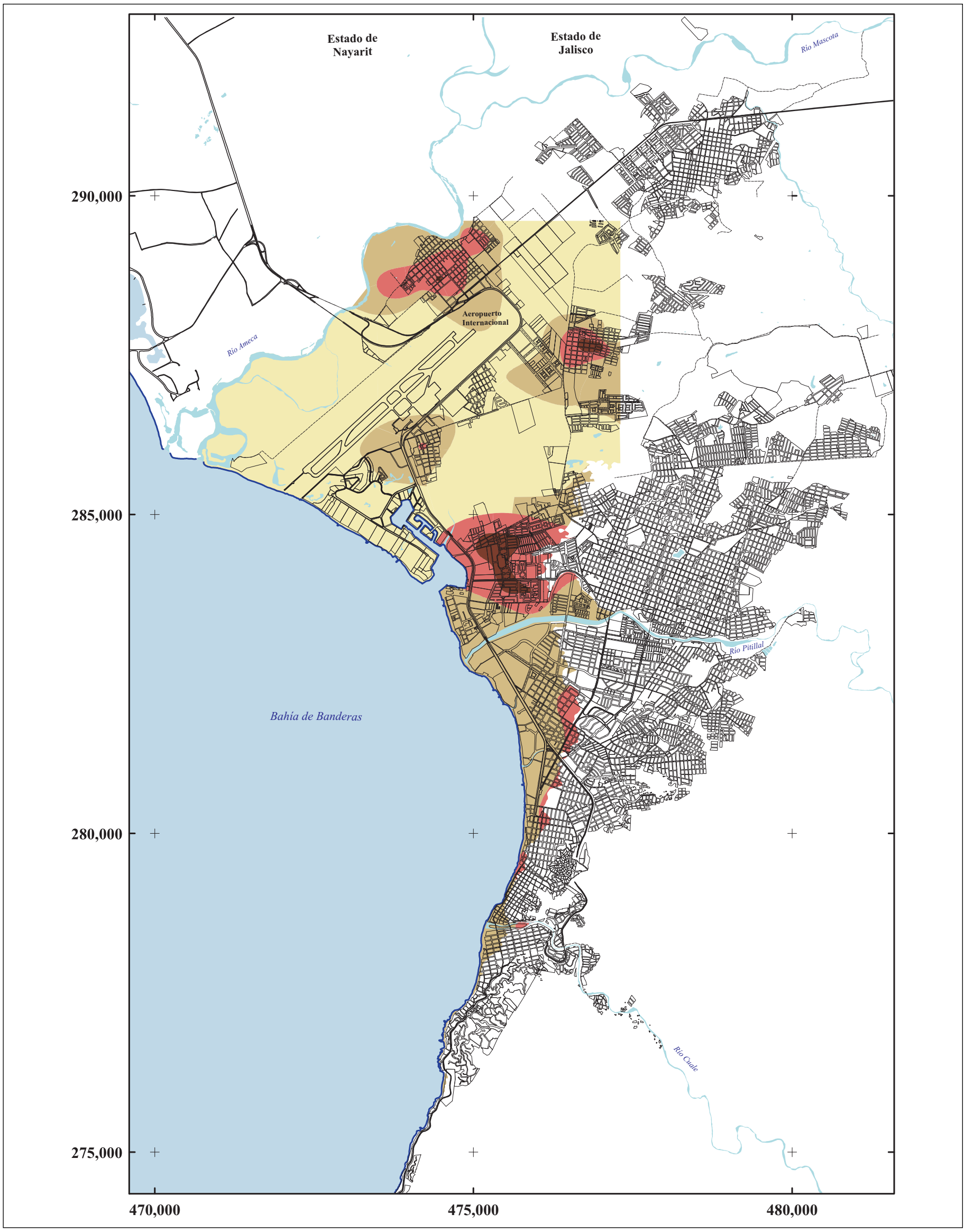
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS

ORIENTACIÓN EN INVESTIGACIONES COSTERAS

Tesis: Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco
Presenta: Elizabeth Trejo Gómez **Director:** Dr. Francisco Javier Núñez Cornú

EXTENSIÓN URBANA **MAPA 2**



LEYENDA

- Extensión Urbana 2013
- Autopista
- Camino

CURVA DE NIVEL
MDT CELDAS DE 6.25 m^2
0 m

POBLACIÓN VULNERABLE EN PUERTO VALLARTA

- Baja
- Media
- Alta
- Muy alta

REFERENCIA GEOGRÁFICA

Proyección: Universal transversa de Mercator, Zona 13 Norte

Datum se referencia: WGS84

Modelo Digital del Terreno (MDT), a partir de la restitución a escala gráfica 1: 20,000 por Cartodata S.A. de C.V., vuelo del año 2000.

Impresión
Septiembre del 2013

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

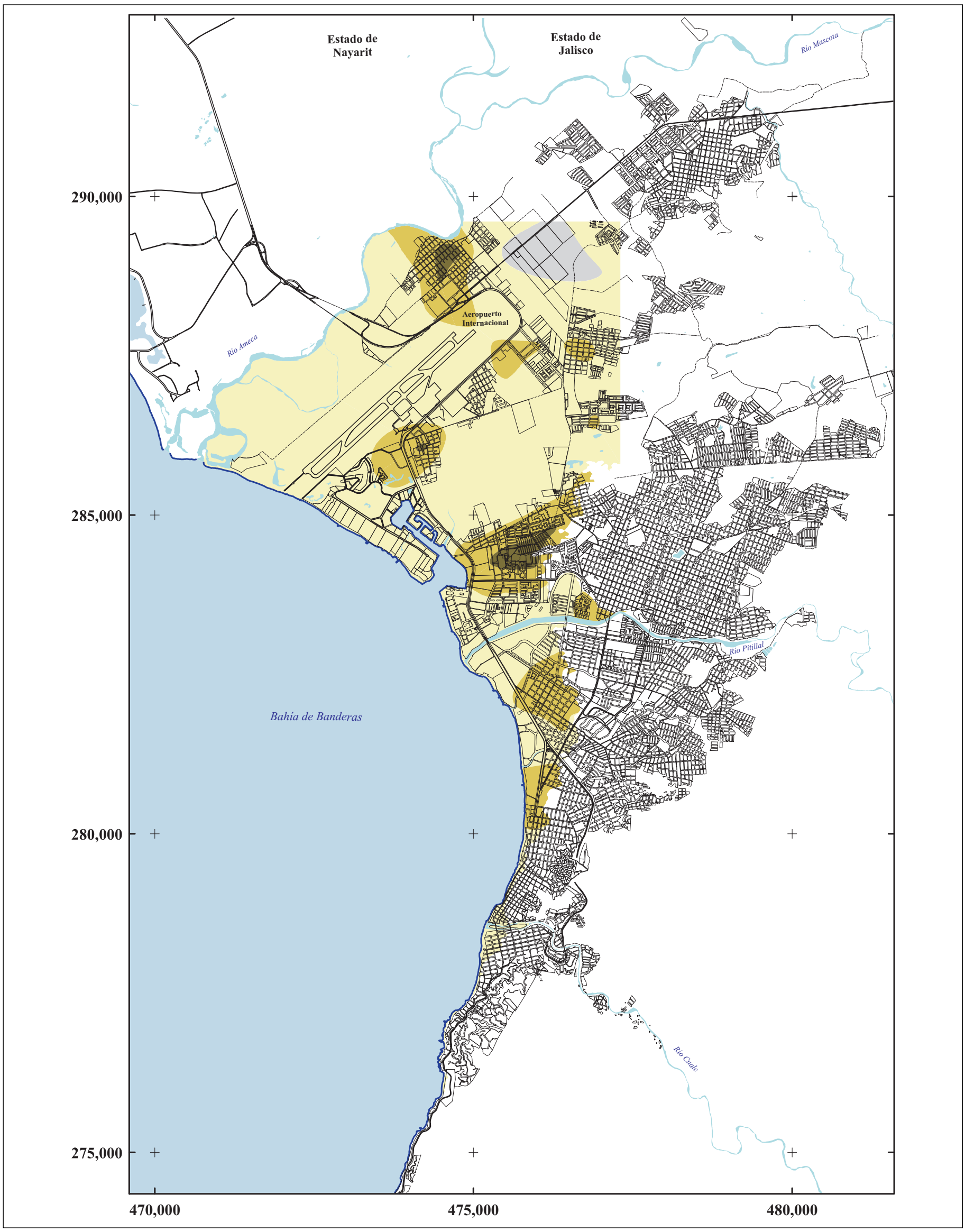
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS

ORIENTACIÓN EN INVESTIGACIONES COSTERAS

Tesis: Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco
Presenta: Elizabeth Trejo Gómez **Director:** Dr. Francisco Javier Núñez Cornú

DISTRIBUCIÓN DE LA DENSIDAD DE POBLACIÓN **MAPA 3**



LEYENDA

- Extensión Urbana 2013
- Autopista
- Camino

CURVA DE NIVEL MDT CELDAS DE 6.25 m^2
0 m

POBLACIÓN VULNERABLE POR EDAD O LÍMITACIÓN FÍSICA EN PUERTO VALLARTA

- No disponible
- Baja
- Media
- Alta

REFERENCIA GEOGRÁFICA

Proyección: Universal transversa de Mercator, Zona 13 Norte

Datum se referencia: WGS84

Modelo Digital del Terreno (MDT), a partir de la restitución a escala gráfica 1: 20,000 por Cartodata S.A. de C.V., vuelo del año 2000.

Impresión
Septiembre del 2013

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

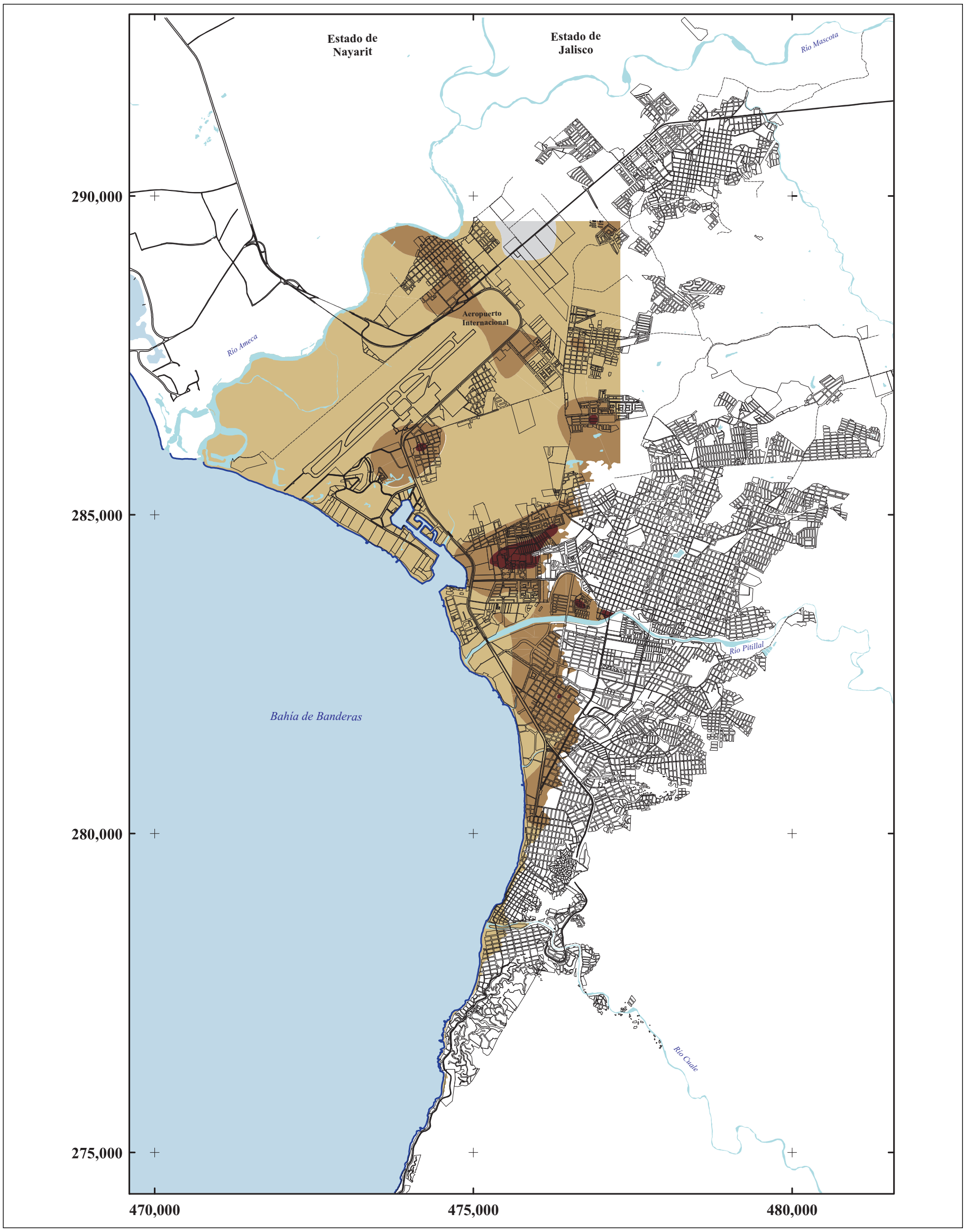
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS

ORIENTACIÓN EN INVESTIGACIONES COSTERAS

Tesis: Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco
Presenta: Elizabeth Trejo Gómez **Director:** Dr. Francisco Javier Núñez Cornú

EDAD O LIMITACIÓN FÍSICA **MAPA 4**



LEYENDA

- Extensión Urbana 2013
- Autopista
- Camino

CURVA DE NIVEL MDT CELDAS DE 6.25 m^2
0 m

POBLACIÓN OCUPADA Y VULNERABLE EN PUERTO VALLARTA

- No disponible
- Baja
- Media
- Alta

REFERENCIA GEOGRÁFICA

Proyección: Universal transversa de Mercator, Zona 13 Norte

Datum se referencia: WGS84

Modelo Digital del Terreno (MDT), a partir de la restitución a escala gráfica 1: 20,000 por Cartodata S.A. de C.V., vuelo del año 2000.

Impresión
Septiembre del 2013

N

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

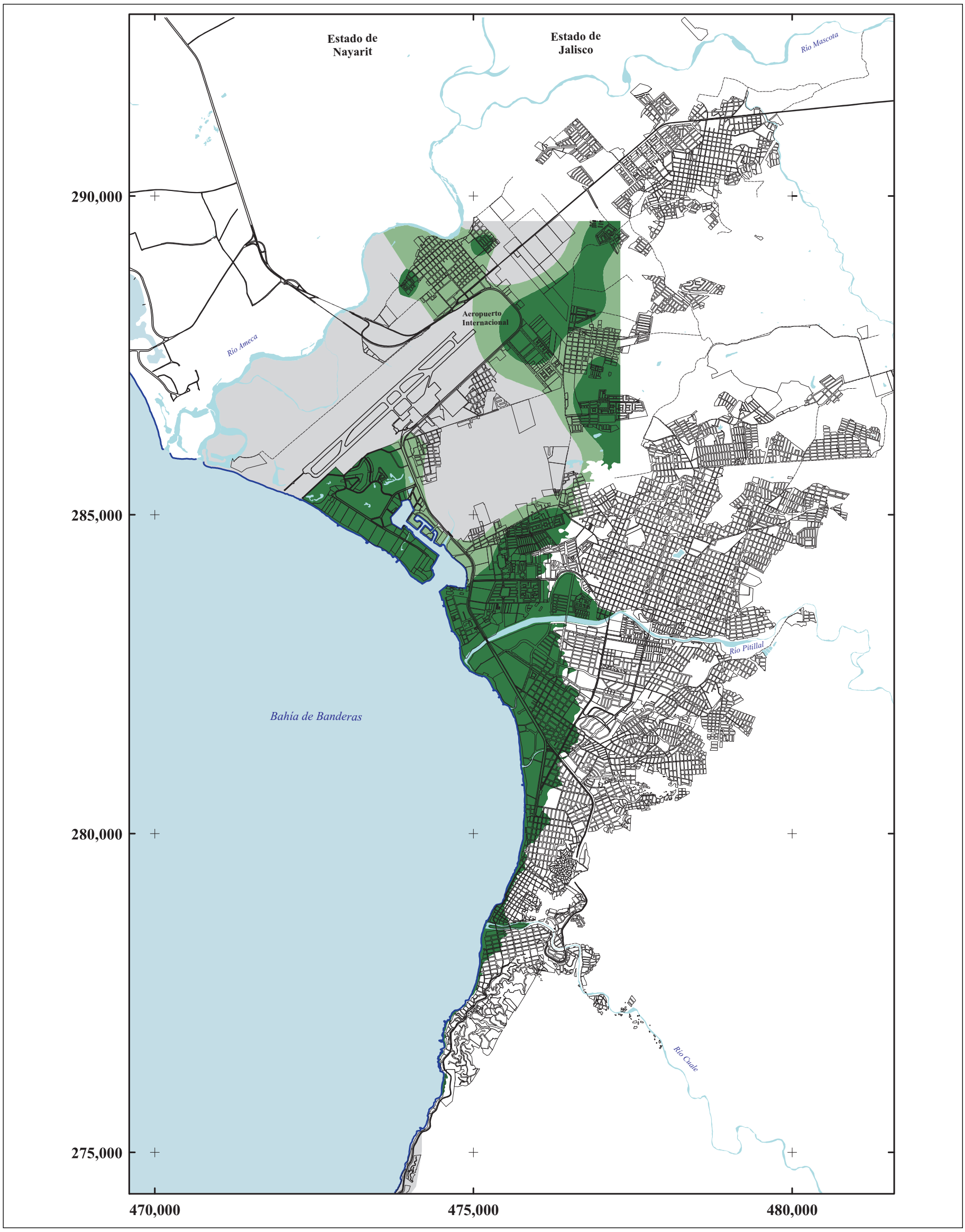
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS

ORIENTACIÓN EN INVESTIGACIONES COSTERAS

Tesis: Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco
Presenta: Elizabeth Trejo Gómez **Director:** Dr. Francisco Javier Núñez Cornú

POBLACIÓN OCUPADA | **MAPA 5**



LEYENDA

- Extensión urbana 2013
- Autopista
- Camino

CURVA DE NIVEL
MDT CELDAS DE 6.25 m^2
0 m

VIVIENDA HABITADA Y VULNERABLE DE LA POBLACIÓN DE CLASE MEDIA EN PUERTO VALLARTA

- Baja
- Media
- Alta

REFERENCIA GEOGRÁFICA

Proyección: Universal transversa de Mercator, Zona 13 Norte

Datum se referencia: WGS84

Modelo Digital del Terreno (MDT), a partir de la restitución a escala gráfica 1: 20,000 por Cartodata S.A. de C.V., vuelo del año 2000.

Impresión
Septiembre del 2013

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

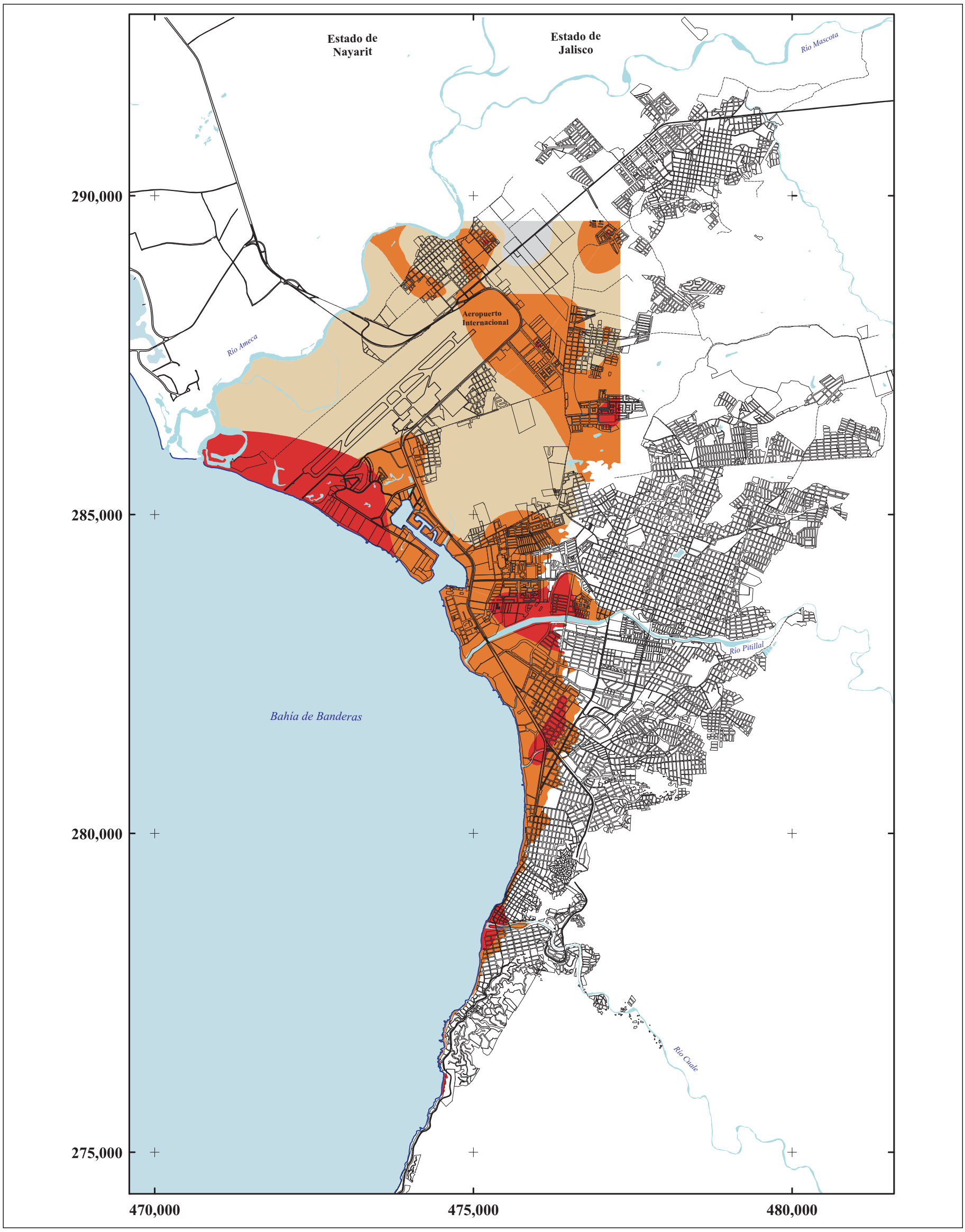
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS

ORIENTACIÓN EN INVESTIGACIONES COSTERAS

Tesis: Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco
Presenta: Elizabeth Trejo Gómez **Director:** Dr. Francisco Javier Núñez Cornú

VIVIENDA VULNERABLE **MAPA 6**



LEYENDA

Extensión urbana 2013

Autopista

Camino

CURVA DE NIVEL
MDT CELDAS DE 6.25 m^2

0 m

POBLACIÓN VULNERABLE MAYOR A 18 AÑOS Y EDUCACIÓN POS-BÁSICA EN PUERTO VALLARTA

- No disponible
- Baja
- Media
- Alta

REFERENCIA GEOGRÁFICA

Proyección: Universal transversa de Mercator, Zona 13 Norte

Datum se referencia: WGS84

Modelo Digital del Terreno (MDT), a partir de la restitución a escala gráfica 1: 20,000 por Cartodata S.A. de C.V., vuelo del año 2000.

Impresión
Septiembre del 2013

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

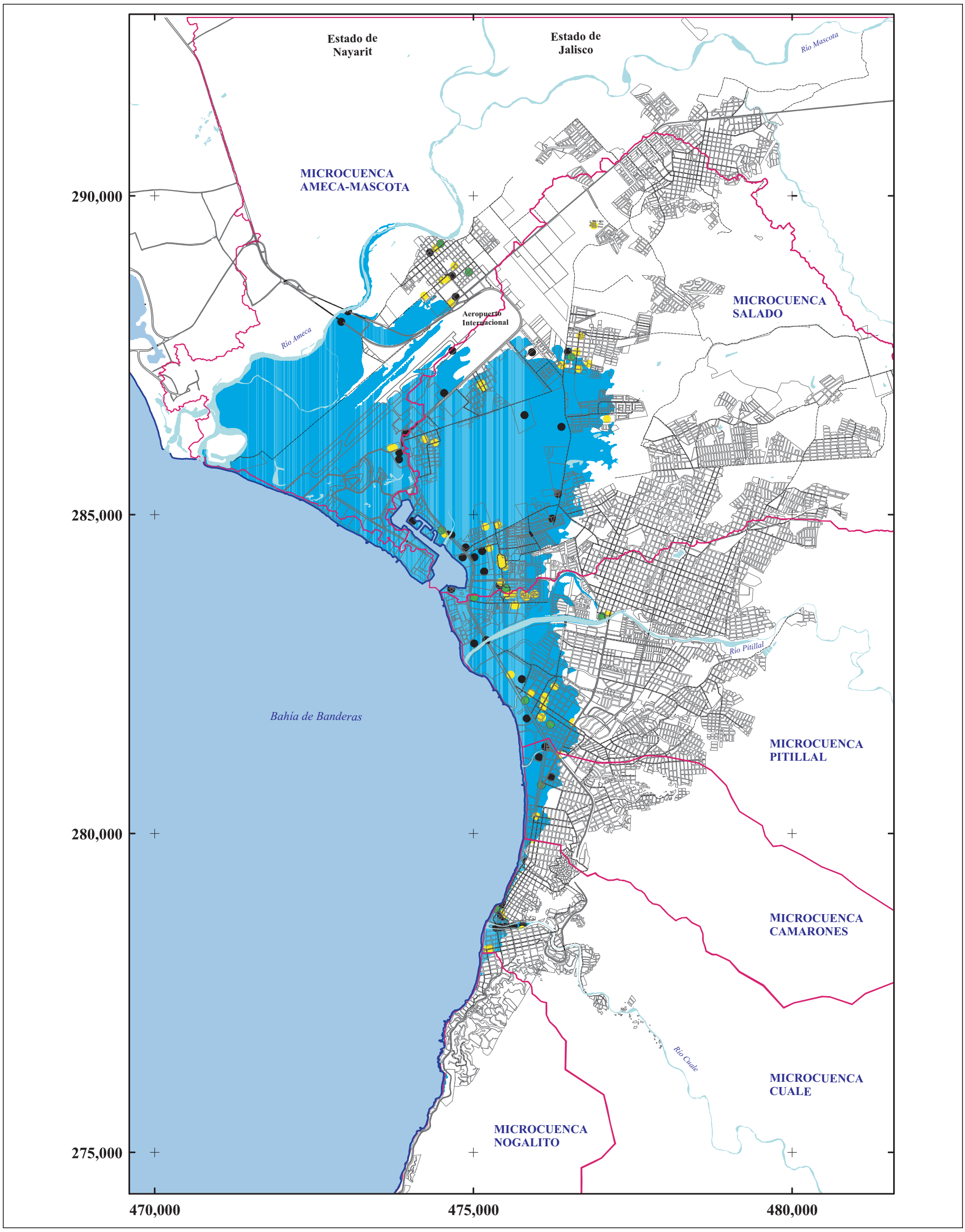
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS

ORIENTACIÓN EN INVESTIGACIONES COSTERAS

Tesis: Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco
Presenta: Elizabeth Trejo Gómez **Director:** Dr. Francisco Javier Núñez Cornú

DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN DE CLASE MEDIA **MAPA 7**



LEYENDA

- Extensión urbana 2013
- Autopista
- Camino

CURVA DE NIVEL
MDT CELDAS DE 6.25 m^2

- 0 m
- Microcuenca
- Extensión máxima del tsunami hipotético

INSTALACIONES ALTAMENTE VULNERABLES EN PUERTO VALLARTA

- Atención a emergencias, centro comercial, comunicación, entretenimiento, gobierno, museo y transporte.
- Escuela
- Unidad de Salud

REFERENCIA GEOGRÁFICA

Proyección: Universal transversa de Mercator, Zona 13 Norte

Datum se referencia: WGS84

Modelo Digital del Terreno (MDT), a partir de la restitución a escala gráfica 1: 20,000 por Cartodata S.A. de C.V., vuelo del año 2000.

Impresión
Septiembre del 2013

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

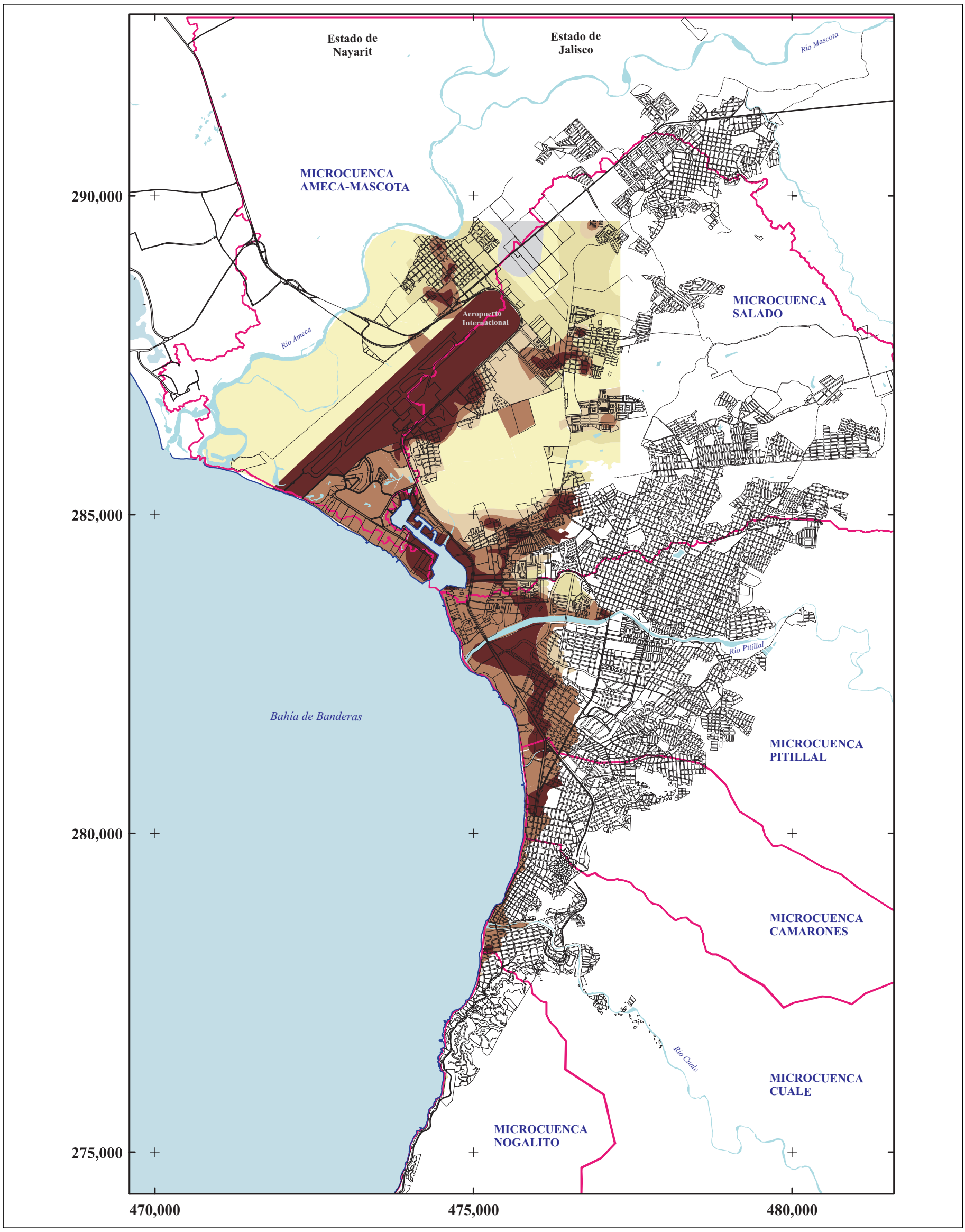
CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS

ORIENTACIÓN EN INVESTIGACIONES COSTERAS

Tesis: Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco
Presenta: Elizabeth Trejo Gómez **Director:** Dr. Francisco Javier Núñez Cornú

INSTALACIONES ALTAMENTE VULNERABLES | **MAPA 8**



LEYENDA

- Extensión urbana 2013
- Autopista
- Camino

CURVA DE NIVEL
MDT CELDAS DE 6.25 m^2

- 0 m
- Microcuenca

VULNERABILIDAD POR TSUNAMI LOCAL EN PUERTO VALLARTA

- No disponible
- Baja
- Media baja
- Media alta
- Alta
- Muy alta

REFERENCIA GEOGRÁFICA

Proyección: Universal transversa de Mercator, Zona 13 Norte

Datum se referencia: WGS84

Modelo Digital del Terreno (MDT), a partir de la restitución a escala gráfica 1: 20,000 por Cartodata S.A. de C.V., vuelo del año 2000.

Impresión
Septiembre del 2013

N

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

CENTRO UNIVERSITARIO DE LA COSTA

DOCTORADO EN CIENCIAS EN BIOSISTEMÁTICA, ECOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES Y AGRÍCOLAS

ORIENTACIÓN EN INVESTIGACIONES COSTERAS

Tesis: Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco
Presenta: Elizabeth Trejo Gómez **Director:** Dr. Francisco Javier Núñez Cornú

VULNERABILIDAD **MAPA 9**