



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

**EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD A TSUNAMIS EN
CUYUTLÁN, COLIMA.**

TESIS:
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
NÉSTOR CORONA MORALES

TUTOR:
MARÍA TERESA RAMÍREZ HERRERA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COMITÉ TUTOR:
MARCELO LAGOS LÓPEZ
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

JOSÉ LUIS MACÍAS VÁZQUEZ
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

MÉXICO, D. F. DICIEMBRE 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por proporcionar la beca para estudios de doctorado con clave de registro CVU 24068.

A PAPPIT-UNAM por su contribución con fondos para este estudio mediante el apoyo número IN123609 y a la SEP-CONACYT Ciencia Básica apoyo número 129456.

Al Posgrado UNAM, al Centro de Investigaciones en Geografía Humana por aceptarme en el programa de Doctorado en Geografía.

A la Dra. María Teresa Ramírez Herrera por guiarme en este proceso de formación académica.

A los miembros del comité de tutores, Marcelo Lagos López y al José Luis Macías Vázquez por sus atinados comentarios en las evaluaciones semestrales y la revisión final del documento de tesis. Así como a los miembros del sínodo: José Antonio Vieyra y Avto.

Agradecimiento a Pedro Urquijo por la asesoría y capacitación y participación en el levantamiento de entrevistas a sobrevivientes. A GTT Imagining por facilitar las imágenes WorldView 2 de alta resolución, particularmente a la Geógrafo Sedna Monter.

A la comunidad de Cuyutlán, por su apoyo al brindar información de los sobrevivientes y descendientes de sobrevivientes del maremoto. Especialmente a: Doña Pachita Gaspar, el Sr. Ramón Cortez, al Sr. Vidal Mojarro Vázquez, Sra. María de Jesús Morales, Ignacio de la Madrid, al Sr. José Solórzano, y al cronista de municipio de Armería, Lic. Miguel Chávez Michel.

ÍNDICE TEMÁTICO

INTRODUCCIÓN	
RESUMEN GENERAL	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
OBJETIVOS	
General	
Específicos	
JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	
ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	

CAPÍTULO I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

TSUNAMIS EN EL CONTEXTO DE LOS DESASTRES NATURALES	I-3
CONDICIONES GENERALES RESPECTO A LA GENERACIÓN DE TSUNAMIS	I-4
CONTEXTO SISMO-TECTÓNICO Y PRESENCIA DE TSUNAMIS EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MÉXCANO	I-5
Contexto tectónico	I-5
Contexto sísmico	I-6
Tsunamis en México	I-7
Tsunamis en Cuyutlán	I-9
CONCLUSIONES	I-10
REFERENCIAS	I-11

CAPÍTULO II. MAPEO Y RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DEL GRAN TSUNAMI DEL 22 DE JUNIO 1932 EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MEXICANO

INTRODUCCIÓN	II-2
Historial de tsunamis en el área de estudio	II-3
MÉTODOS	II-6
RESULTADOS	II-9
Revisión de las características de Cuyutlán previas al Tsunami	II-9
<i>Sociedad y economía</i>	II-9
<i>Construcciones</i>	II-9
Características físicas del tsunami	II-10

<i>Origen y Tiempo de arribo</i>	II-10
<i>Nivel medio del mar y retroceso del mar</i>	II-12
<i>Altura de la inundación</i>	II-12
<i>Profundidad de Inundación</i>	II-13
<i>Materiales arrastrados por el tsunami</i>	II-15
<i>Otros</i>	II-15
<i>Efectos directos del tsunami</i>	II-15
<i>Efectos indirectos</i>	II-17
<i>Intensidad del tsunami</i>	II-18
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	II-17
AGRADECIMIENTOS	II-20
REFERENCIAS	II-20

CAPÍTULO III. REVELANDO EL ORIGEN DEL GRAN TSUNAMI DEL 22 DE JUNIO DE 1932 EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MEXICANO

INTRODUCCIÓN	III-3
MÉTODOS	III-4
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	III-5
Tiempo reportado de arribo del tsunami y localización del deslizamiento	III-5
Modelo de generación del tsunami a causa de un deslizamiento submarino	II-6
<i>Tiempo de arribo del tsunami</i>	III-11
<i>Directividad</i>	III-11
CONCLUSIONES	III-11
AGRADECIMIENTOS	III-12
REFERENCIAS	III-12

CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DEL GRADO DE VULNERABILIDAD A LA AMENAZA DE TSUNAMIS: EL CASO DE CUYUTLÁN, COLIMA

INTRODUCCIÓN	IV-3
Amenaza de tsunami	IV-4
Vulnerabilidad	IV-4
Evaluación de vulnerabilidad a tsunamis	IV-5
El área de estudio y la amenaza de tsunamis	IV-6

MÉTODOS	IV-7
Definición de la amenaza por tsunamis	IV-7
Determinación de elementos para la evaluación de vulnerabilidad a tsunamis	
<hr/>	
IV-8	
Evaluación de Vulnerabilidad a tsunamis	IV-8
<i>Evaluación de la vulnerabilidad de la población a tsunamis</i>	IV-9
<i>Evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones (equipamiento e infraestructura)</i>	IV-12
<i>Evaluación de vulnerabilidad de los medios y formas de subsistencia (actividades económicas, sociales y culturales)</i>	IV-14
RESULTADOS	IV-14
El peor escenario de tsunamis en Cuyutlán	IV-14
Componentes de la amenaza de tsunami	IV-15
Perfil general del asentamiento poblacional de Cuyutlán	IV-18
<i>Dinámica poblacional</i>	IV-19
Vulnerabilidad de la población	IV-21
Vulnerabilidad de las edificaciones (Equipamiento e infraestructura)	IV-25
Vulnerabilidad las actividades económicas, sociales y culturales	IV-26
<i>Actividades sociales y culturales</i>	IV-27
DISCUSION Y CONCLUSIONES	IV-28
Definición de la amenaza de tsunamis y sus componentes	IV-28
Evaluación de vulnerabilidad a tsunamis en Cuyutlán	IV-29
BIBLIOGRAFÍA	IV-32

CONCLUSIONES GENERALES

ANEXOS

ANEXO I. MAPPING AND HISTORICAL RECONSTRUCTION OF THE GREAT MEXICAN 22 JUNE 1932 TSUNAMI

ANEXO II. TÉCNICAS HISTÓRICO-ETNOGRÁFICAS EN LA RECONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE TSUNAMIS: EL EJEMPLO DEL GRAN TSUNAMI DEL 22 DE JUNIO DE 1932, EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MEXICANO.

ANEXO III. REVEALING THE ORIGIN OF THE GREAT TSUNAMI OF JUNE 22, 1932 OFF THE PACÍFIC COAST OF MÉXICO.

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura I. 1 Cantidad de muertes provocadas por desastres naturales. _____ II-3
- Figura I. 2. A) Actividad sísmica en la costa del Pacífico Mexicano 17320-2012; B) Distribución de los epicentros de los sismos generadores de tsunamis en el periodo de 1732-2003 _____ II-6
- Figura I.3. Cantidad de sismos de acuerdo a su magnitud (M_s) _____ II-6
- Figura I. 4. Profundidad focal de los sismos generados en la zona de subducción del Pacífico Mexicano _____ II-9
- Figura I.5. A) Localidades afectadas en el tsunami de 1816; B) Detalle topográfico del pueblo de Cuyutlán _____ II-10

CAPÍTULO II

- Figura II. 1. Línea de costa afectada por tsunamis que han alcanzado a Cuyutlán. _____ II-4
- Figura II. 2. Localización del área de estudio. _____ II-5
- Figura II.3. Diagrama de flujo de la metodología. _____ II-6
- Figura II. 4. Método de interpolación de las alturas y profundidades de inundación. ____ II-9
- Figura II. 5. Mapa planimétrico de Cuyutlán en 1932. _____ II-10
- Figura II. 6. Probable localización de la zona de generación del tsunami del 22 de Junio de 1932 y dirección de propagación. _____ II-11
- Figura II. 7. Modelo de distribución de la altura de la inundación del tsunami del 22 de Junio de 1932. _____ II-12
- Figura II. 8. Modelo de profundidades del tsunami del 2 de Junio de 1932. _____ II-14
- Figura II. 9. Efectos directos y nivel de daños de las construcciones. _____ II-17
- Figura II. 10. Mapa de efectos indirectos del tsunami. _____ II-18

CAPÍTULO III

- Figura III.1. A) Tectónica Regional; B) Sismo-tectónica local y serie de sismos y tsunamis ocurridos en Junio de 1932. _____ III-3
- Figura III.2. Diagrama de flujo del modelo BPTM. _____ III-4
- Figura III.3 Modelo BPTM con isócronas a intervalos de 0.5 min. _____ III-5

Figura III.4. Modelos de deformación máxima de la superficie oceánica.	III-8
Figura III.5. Modelo M12, Altura máxima del tsunami, directividad y tiempo de arribo.	III-10

CAPÍTULO IV

Figura IV. 1. Localización del área de estudio.	IV-7
Figura IV. 2. Diagrama de flujo del Índice de Acceso a Zonas Seguras.	IV-9
Figura IV. 3. Comparación de alturas máximas de tsunami de escenarios sintéticos.	IV-15
Figura IV. 4. Tiempo de arribo del tsunami.	IV-16
Figura IV. 5. Profundidad máxima de inundación con base a la modelación del tsunami generado por un deslizamiento submarino igual al del 22 de Junio de 1932.	IV-16
Figura IV. 6. Velocidad del flujo del tsunami.	IV-17
Figura IV. 7. Fuerza hidrodinámica del tsunami.	IV-18
Figura IV. 8. Dinámica poblacional y sucesos que impactaron el desarrollo de Cuyutlán de 1554-2010.	IV-19
Figura IV. 9. Mapa de uso de suelo.	IV-20
Figura IV. 10. Dinámica de ocupación del territorio a lo largo del año.	IV-20
Figura IV. 11. Modelo de tiempo disponible para evacuar a zonas seguras (TDE).	IV-22
Figura IV. 12. Modelo de índice de acceso a zonas seguras.	IV-23
Figura IV. 13. Distribución de la población de acuerdo su grado de vulnerabilidad en el periodo de menor ocupación.	IV-24
Figura IV. 14. Distribución de la población de acuerdo su grado de vulnerabilidad en el periodo de máxima ocupación.	IV-24
Figura IV. 15. A) Esquema de generación Índice de Daños de la Construcción (IDC), indicador de vulnerabilidad de las edificaciones, B) Mapa de vulnerabilidad de las edificaciones.	IV-25

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla I.1. Promedio anual de desastres ocasionados por fenómenos naturales. _____ II-4

Tabla I.2. Estadísticas de tsunamis por causa _____ II-4

Tabla I.3.1 Relación de tsunamis de origen local que se generaron por sismos con epicentro en la zona de subducción de las placas Rivera-Cocos-Norteamericana. (Parte 1) _____ II-8

Tabla I.3.2 Relación de tsunamis de origen local que se generaron por sismos con epicentro en la zona de subducción de las placas Rivera-Cocos-Norteamericana. (Parte 2) _____ II-9

CAPÍTULO II

Tabla II.1. Parámetros físicos del tsunami del 22 de junio de 1932 en la selección de informantes se restringió a testigos oculares o descendientes de sobrevivientes. _____ II-7

Tabla II.2. Lista de puntos de control y valores correspondientes de los modelos digitales del terreno. _____ II-12

Tabla II.3. Características de un tsunami de intensidad VIII según la escala de Papadopolous & Imamura (2001). _____ II-19

CAPÍTULO III

Tabla III.1. Parámetros de generación del tsunami por causa sísmica. _____ III-6

Tabla III.2. Parámetros de los escenarios de modelación de tsunamis generados por deslizamientos submarinos. _____ III-7

CAPÍTULO IV

Tabla IV.1. Interpretación de los valores de IAZS para definir el grado de vulnerabilidad de la población. _____ IV-9

Tabla IV.2. Velocidad promedio por grupo poblacional. _____ IV-10

Tabla IV.3. Factores de fricción. _____ IV-11

Tabla IV.4. Relación de daños en función de la fuerza hidrodinámica y el material de construcción de las edificaciones. _____ IV-12

Tabla IV.5. Categorías de la población y velocidad promedio por grupo. _____ IV-20

Tabla IV.6. Vulnerabilidad de las actividades económicas de Cuyutlán. _____ IV-25

Tabla IV.7. Vulnerabilidad de las actividades sociales y culturales de Cuyutlán. _____ IV-27

INTRODUCCIÓN

RESUMEN GENERAL

Después del devastador tsunami en el Océano Índico en Diciembre del 2004, se reconoció el gran poder destructivo de estos fenómenos en las comunidades costeras. Eventos posteriores como el de Chile en 2010 y Tohoku, Japón del 2011, han evidenciado la necesidad de conocer sus características, causas, antecedentes, así como los niveles de vulnerabilidad que se presentan en las zonas costeras amenazadas por tsunamis.

En el presente trabajo se diseñó un modelo de evaluación de vulnerabilidad a la amenaza por tsunamis a partir del análisis de un caso de estudio, Cuyutlán, Colima. En el desarrollo de esta investigación se revisaron archivos y catálogos de tsunamis para determinar la ocurrencia y recurrencia de tsunamis en el área de estudio. A partir de tal revisión se encontró un tsunami que devastó el asentamiento poblacional el 22 de Junio de 1932. Con la combinación de métodos de investigación historiográficos, etnográficos y geográficos, se realizó la reconstrucción histórica y el mapeo de las características y efectos de este tsunami. Como resultado se determinó la extensión de afectación del tsunami, alturas máximas de inundación, el tiempo de arribo a la costa y los daños ocasionados en Cuyutlán y sus alrededores.

En el proceso de reconstrucción se encontró que la causa del tsunami del 22 de junio de 1932 no había sido definida, habiendo dos hipótesis de sus mecanismos de generación: por causa sísmica y por un deslizamiento submarino. La revisión detallada de los datos históricos, las crónicas de los sobrevivientes, así como la comparación de los patrones de generación y propagación de tsunamis originados por ambos mecanismos, ayudaron a inferir que el tsunami había sido provocado por un deslizamiento submarino. A partir de estas observaciones se realizaron una serie de modelaciones numéricas infiriendo los parámetros morfológicos y la localización del deslizamiento submarino. Lo anterior condujo a determinar que el tsunami del 22 de Junio de 1932 fue ocasionado por un deslizamiento submarino localizado a 15 km. al Sureste de Cuyutlán.

En los métodos de evaluación de vulnerabilidad por tsunamis, generalmente se parte de la definición del peor escenario posible de tsunami en determinada región. Así mismo, se toman algunos atributos del fenómeno como elementos que amenazan a los sistemas vulnerables, *i.e.*, altura máxima del tsunami, cota máxima de inundación, entre otros. En el estudio de caso que se abordó en esta investigación, la selección del peor escenario posible de tsunami se efectuó a partir de la comparación modelos de tsunamis propuestos por varios autores, que como síntesis presentan la distribución de alturas máximas del tsunami en varias localidades de la costa. La comparación de estos datos ratificó la hegemonía del tsunami del 22 de Junio de 1932 como peor escenario posible de amenaza de tsunami en la costa de Cuyutlán.

Finalmente, para determinar el grado de vulnerabilidad, se desarrolló un método de evaluación que incorpora la experiencia de desastres ocasionados por tsunamis en otras regiones del planeta. El enfoque incorpora los tres aspectos fundamentales a evaluar como estrategia en los procesos de reducción de las dimensiones de los desastres: la potencial pérdida de vidas, los daños potenciales a las edificaciones y la desarticulación de los medios de subsistencia. El modelo de evaluación de vulnerabilidad fue aplicado a la localidad de Cuyutlán. Los resultados describen las características y las circunstancias que la hacen susceptible a los efectos dañinos de la amenaza de tsunami.

SISTEMA DE PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

La cadena de razonamientos que condujeron a cuestionar el grado de vulnerabilidad a tsunamis en Cuyutlán se construyó a partir de una serie de preguntas articuladas que se mencionan a continuación:

- En Cuyutlán, dada su localización geográfica en el Cinturón de Fuego del Pacífico, región altamente tsunamigénica, ¿se han presentado tsunamis?
- ¿Cuáles de estos tsunamis ha causado daños severos?
- En caso de haber sido afectado por un tsunami de dimensiones desastrosas ¿cuáles fueron las características del tsunami?, ¿qué daños causó?
- ¿Qué originó el tsunami?, ¿qué probabilidades hay de que ocurra de nuevo?
- ¿Cuál es el peor escenario posible de destrucción con un tsunami de mayor intensidad?
- En caso de que se presentara un tsunami de dimensiones desastrosas ¿cuál es el grado de vulnerabilidad de Cuyutlán?

OBJETIVOS

General

- Evaluar el grado de vulnerabilidad a los efectos del peor escenario posible de tsunami en Cuyutlán, México.

Específicos

- Describir los antecedentes de tsunamis en Cuyutlán, México.
- Identificar al tsunami que mayores daños ha causado en Cuyutlán, México.
- Caracterizar y mapear los efectos del tsunami en la localidad de estudio.
- Definir el origen y la causa del tsunami.
- Definir el peor escenario posible de amenaza por tsunamis en Cuyutlán, México.
- Formular un método de evaluación de vulnerabilidad a los efectos del peor escenario de generación de tsunami en Cuyutlán, México.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación aporta nuevos datos respecto al tsunami del 22 de Junio de 1932: su extensión, alturas máximas, grado de afectación, mapeo de los niveles de inundación, mapeo y caracterización de los daños causados y la determinación del nivel de intensidad del tsunami en base a una escala internacional. De igual forma, este estudio revela que la causa del tsunami del 22 de junio de 1932 fue un deslizamiento submarino. A nivel de las estadísticas globales de las fuentes de generación de tsunamis, esta investigación contribuye a reducir el número de tsunamis que se atribuyen a causas dudosas o desconocidas. En el campo de estudios en la caracterización de tsunamis históricos, presenta una estrategia metodológica multidisciplinar con potencial de réplica en casos similares, no sólo del fenómeno de tsunamis, sino, de eventos naturales extraordinarios que no fueron registrados con datos instrumentales. Es fundamental tomar en cuenta a los deslizamientos submarinos

INTRODUCCIÓN

en los sistemas de alerta temprana, ya que actualmente sólo se consideran parámetros sísmicos para estimar la probabilidad de ocurrencia de un tsunami.

En la fase de selección del peor escenario posible de tsunami en la zona de estudio, se estableció y ratificó que el tsunami del 22 de junio de 1932 es el caso extraordinario que sirvió de base para la evaluación del grado de vulnerabilidad de Cuyutlán a esta amenaza.

En el campo del desarrollo de herramientas metodológicas para la evaluación de vulnerabilidad a tsunamis, se propone un modelo que tiende a ajustarse a los requerimientos de los organismos internacionales orientados a la reducción de la magnitud de los desastres ocasionados por tsunamis.

Para la evaluación de vulnerabilidad, se presenta un modelo que denota la importancia de determinar el fenómeno natural, sus propiedades y sus efectos diferenciados en cada componente de los sistemas bajo amenaza. La reflexión en torno a los vínculos entre el medio físico y los sistemas de asentamientos humanos, su población, las edificaciones y los medios y formas de subsistencia, tiende a ser definida en el planteamiento aquí expuesto.

A nivel local, el resultado de esta investigación servirá como insumo a las autoridades para formular políticas y acciones encaminadas a reducir los niveles de vulnerabilidad y por consiguiente disminuir las dimensiones de un potencial desastre.

A nivel nacional, el modelo de evaluación de vulnerabilidad desarrollado en el presente trabajo, podría ser aplicado a las 23 ciudades y 772 asentamientos rurales en la línea de costa del Pacífico Mexicano: en los estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas; zona en la cual existe alguna categoría de peligro de tsunamis asociadas a la zona de subducción del Pacífico Mexicano.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La organización capitular de esta investigación se estructuró en formato de artículo. Cada pregunta de investigación se enlaza con los objetivos generales y tienen una secuencia lógica en la que al cierre de un capítulo-artículo se conduce al siguiente. El fundamento de esta organización se enlaza con el proceso de formación y fomento del desarrollo de habilidades de investigación, tanto en los procesos de realización como en la generación de productos científicos sometidos a la crítica de pares de la comunidad científica.

Como resultado de esta estrategia de trabajo y estructuración de la investigación, a la fecha se han sometido tres artículos, de los cuales uno ya se publicó (1), uno ha sido aceptado y se encuentra en prensa (2) y el tercero no fue aceptado (3), mismos que se anexan como Anexos I, II y III.

- (1) Corona, N., & Ramírez-Herrera, M. T. (2012). Mapping and historical reconstruction of the great Mexican 22 June tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12 (5), 1337-1352.

INTRODUCCIÓN

- (2) Corona, N., & Ramírez-Herrera, M. T. (201?). Técnicas histórico-etnográficas en la reconstrucción y caracterización de tsunamis: El ejemplo del gran tsunami del 22 de junio de 1932, en las costas del Pacífico Mexicano. *Revista Geográfica Norte Grande*, (En prensa).
- (3) Corona, N., & Ramírez-Herrera, M.-T. (2012a). Revealing the origin of the great tsunami of June 22, 1932 off the Pacific Coast of Mexico. *Geology*, (*No aceptado*), ¿?.

CAPÍTULO I

TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

Corona, N.¹, Ramírez-Herrera, M.T.^{1,2}

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México. corona@pmip.unam.unam.mx.

² Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Michoacán, México. mtramirez@ciga.unam.mx.

ABSTRACT

Natural disasters have played a crucial role in the history of the humanity. Its devastating effects have taken the lives of over 30 million people. In the last decade the tsunamis have been protagonists of the worst disasters. The multiple underlying causes, the uncertain return periods and lack of historical and instrumental data to assess tsunami threat maximize their potential to generate disasters. The coasts bordering the Pacific Ring of Fire are most susceptible to be affected by tsunamis.

Seismic and tsunamic records in the Pacific Coast of Mexico were reviewed in this study. Results show that this region presents an intense tsunamigenic activity. In spite of count with a wide 250 year historical records of tsunamis; data are not sufficiently detailed to understand the dynamics and effects of tsunamis at local scale. The seismo-tsunamigenic region along the Mesoamerican Trench was identified. The two larger tsunamis were identified: Zihuatanejo (November 16, 1925) and Cuyutlán (June 22, 1932). This second, in despite of being the second most destructive tsunami that has occurred in the Pacific Coast of Mexico, maintains a set of questions about their absolute size, local and regional behavior and origin.

Keyword: Tsunami, Tsunami Threat, Pacific Ocean

RESUMEN

Los desastres naturales han jugado un papel fundamental en la historia de la humanidad. Sus efectos devastadores han cobrado la vida de más de 30 millones personas. En la última década los tsunamis han sido protagonistas de los peores desastres. Las múltiples causas que los originan, los inciertos periodos de retorno y la falta de datos históricos e instrumentales para evaluar la amenaza de tsunamis, maximizan su potencial de generar desastres. Las costas aledañas al Cinturón de Fuego del Pacífico son las zonas más susceptibles a ser afectadas por tsunamis.

En este estudio se revisaron los datos sísmicos y registros de tsunamis en las costas del Pacífico Mexicano. Los resultados muestran que la actividad tsunamigénica es intensa. A pesar de contar con un registro de tsunamis que abarca un periodo de más de 250 años, los datos no son lo suficientemente detallados para entender la dinámica y sus efectos a escala local. Se identificó la región sismo-tsunamigénica de la zona de subducción de la Trincheras Mesoamericana. Se detectaron los dos tsunamis de mayores dimensiones: Zihuatanejo (16 de noviembre de 1925) y Cuyutlán (22 de junio de 1932). Este último, a pesar de ser el segundo tsunami más destructivo que se ha presentado en las costas del Pacífico

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

Mexicano, mantiene una serie de cuestionamientos respecto a sus dimensiones absolutas, su comportamiento y su origen.

Palabras clave: Tsunami, Peligro de tsunamis, Pacífico Mexicano

TSUNAMIS EN EL CONTEXTO DE LOS DESASTRES NATURALES

Los desastres naturales han cobrado la vida de más 30 millones de personas (Figura I.1). Los tsunamis se sitúan el sexto lugar, con más de 500,000 víctimas (National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012). El mayor volumen de esta cifra corresponde a un solo evento, el del 24 de diciembre de 2004, donde produjo la muerte de más de 226,000 personas (EM-DAT, 2011).

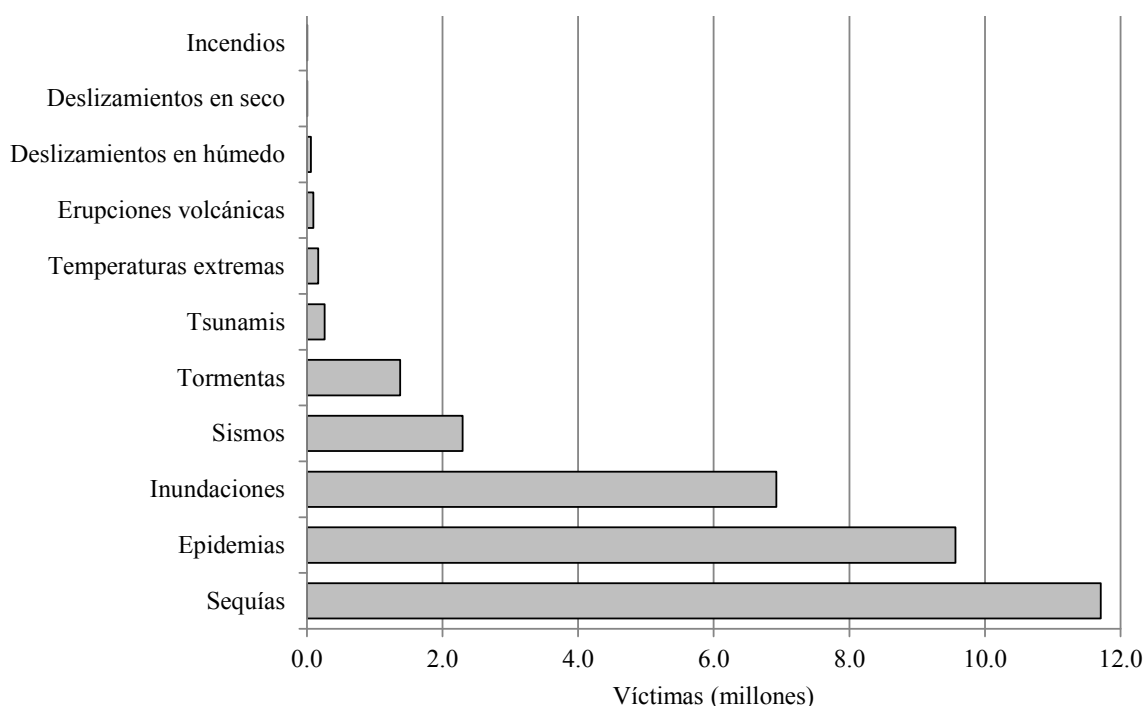


Figura I.1 Cantidad de muertes provocadas por desastres naturales (EM-DAT, 2011).

En términos de costos económicos, el sismo y tsunami del 11 de Marzo de Tohoku, Japón, es considerado el desastre más costoso de la historia, provocó daños por más de 210 billones de dólares (Guha-Sapir, *et al.*, 2012). Por otro lado, los tsunamis son los fenómenos naturales que menor presentan los periodos de recurrencias más amplios. Tienen la menor frecuencia anual respecto al resto de los fenómenos naturales desastrosos (Ver Tabla I.1).

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

Tabla I.1. Promedio anual de desastres ocasionados por fenómenos naturales.

Desastres Naturales	Promedio de desastres por año
Inundaciones	34.92
Tormentas	30.67
Epidemias	11.45
Sismos	10.14
Sequías	5.43
Deslizamientos en húmedo	5.23
Temperaturas extremas	3.76
Incendios	3.24
Erupciones volcánicas	1.99
Deslizamientos en seco	0.48
Tsunamis	0.46

Fuente: EM-DAT (2011)

CONDICIONES GENERALES RESPECTO A LA GENERACIÓN DE TSUNAMIS

La mayoría de los tsunamis se producen por sismos, aunque también pueden ser originados por deslizamientos submarinos, erupciones volcánicas en el fondo marino o por el impacto de meteoritos en el océano (Levin & Nosov, 2009). Las estadísticas globales de tsunamis, muestran que más del 75% son generados por causas sísmicas (Iida, 1963; Finn, 2003; Wright & Rathje, 2003; Bryant, 2008; Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011). Más del 60 % de los grandes tsunamis se han presentado en el Océano Pacífico (Suppasri, *et al.*, 2012). En su mayoría están asociados a sismos de subducción (Kanamori, 2006; Stein, 2006; Satake & Atwater, 2007), que se producen en profundidades inferiores a 200 km y con magnitudes mayores a 6.5 en la escala de Richter (Iida, 1963). Las zonas de subducción tienen mayor potencial para generar sismos tsunamigénicos (Kanamori, 2006; Stein, 2006; Satake & Atwater, 2007; Stein & Okal, 2007).

Tabla I.2. Estadísticas de tsunamis por causa

Causa del tsunami	Número de eventos	Porcentaje
Tectónica	1854	75.70%
Desconocida	272	11.11%
Volcánica	107	4.37%
Deslizamiento	78	3.18%
Meteorológicas	55	2.25%
Tectónica-Deslizamiento	55	2.25%
Explosión	8	0.33%
Tectónica-Vulcanismo	7	0.29%
Tectónica-Meteorológica	6	0.24%
Volcánico-Deslizamiento	6	0.24%
Volcánica-Meteorológica	1	0.04%

Fuente: National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration (2012)

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

Metodológicamente, las evaluaciones de peligro de tsunamis parten de evaluaciones probabilísticas de peligro sísmico (Geist & Parsons, 2006). Modelos más complejos emplean análisis de las tasas de convergencia de placas tectónicas en zonas de subducción para determinar la cantidad de energía que se puede acumular en la interfaz de los bloques y derivar la magnitud del sismo resultante, la deformación del fondo oceánico y por tanto la probabilidad de que un tsunami se presente (Moss & Travararou, 2006; Chacón-Barrantes & Protti, 2011; Løvholt, *et al.*, 2012). Un tercer enfoque, consiste en determinar el periodo de retornos de tsunamis de determinada magnitud a partir de las estadísticas de run-up, o alturas máximas del tsunami provenientes de catálogos históricos (Løvholt, *et al.*, 2012). Finalmente, se emplean enfoques cualitativos que recurren a eventos históricos extremos como práctica alternativa para definir el peor escenario probable de desastre originado por tsunamis (Papathoma & Dominey-Howes, 2003).

CONTEXTO SISMO-TECTÓNICO Y PRESENCIA DE TSUNAMIS EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MÉXCANO

Contexto tectónico

La costa del Pacífico Mexicano se ubica en la zona limítrofe y de convergencia de las placas Norteamericana, Cocos y Rivera (PR). Los rasgos morfotectónicos asociados a la subducción son: La Trinchera Mesoamericana (TMA), La Dorsal del Pacífico-Rivera (DPR) y la Zona de Fracturas de Rivera (ZFR), ver Figura I.2.

La TMA es una formación continua del margen del Océano Pacífico de 3,000 km de longitud que se extiende desde el Golfo de California hasta la Península de Osa, en Costa Rica. En esta subducen las placas de Rivera y Cocos bajo la PNA (Singh, *et al.*, 1981; Nixon, 1982; Eissler & McNally, 1984; Luhr, *et al.*, 1985; Singh, *et al.*, 1985), ver Figura I.2.

La PR limita al noreste con la PNA por debajo de la cual subduce con rumbo N-NE (DeMets, *et al.*, 1994; Bandy, *et al.*, 1997). En la zona de subducción entre la PR y la PNA se presentan tasas de convergencia de entre 2.0 y 3.3 cm/año (DeMets, *et al.*, 1994; Bandy, *et al.*, 1997). El límite sur está definido por la Zona de Fracturas de Rivera y marca la frontera con las placas del Pacífico y la de Cocos. El límite oeste está definido por la Dorsal del Pacífico Este y el límite norte por la Zona de Fractura de Tamayo (Singh, *et al.*, 1981; DeMets, *et al.*, 1987; DeMets & Stein, 1990; Kostoglodov & Bandy, 1995; Pardo & Suárez, 1995; Núñez-Cornú, *et al.*, 2002). La subducción de la placa de Rivera está caracterizada por un pronunciado ángulo que se incrementa a profundidades de alrededor de 100 km (Yang, *et al.*, 2009), ver Figura I.2.

La placa de Cocos subduce bajo la TMA desde las costas de Jalisco hasta Centroamérica (Minster & Jordan, 1978; Singh, *et al.*, 1981; DeMets, *et al.*, 1987; Pardo & Suárez, 1995) en dirección N-NE y con tasas de convergencia de 4.8 cm/año en los 104.5° W y a 7.5 cm/año en 94°W (DeMets, *et al.*, 1994), ver Figura I.2.

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

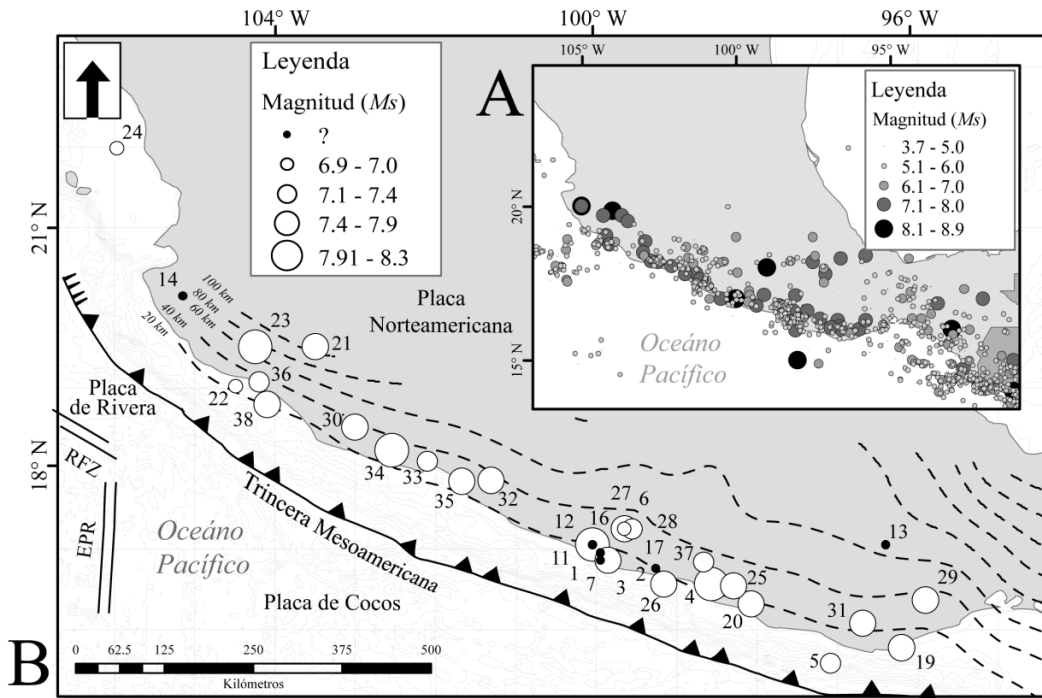


Figura I.2. A) Actividad sísmica en la costa del Pacífico Mexicano 1732-2012 (Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2011; U. S. Geological Survey/National Earthquake Information Center, 2012), B) Distribución de los epicentros de los sismos generadores de tsunamis en el periodo de 1732-2003 (Sánchez & Farreras, 1993; Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011; National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012). Los números junto a los epicentros corresponden a los tsunamis de la Tabla I.3.

Contexto sísmico

En el segmento mexicano de la zona de subducción de TMA se tienen registros de más de 900 sismos de magnitud (M_s) mayor a 5 en el periodo de 1874-2011 (Figura I.2). Los sismos de magnitudes tsunamigénicas, mayores a 6.5 M_s (Iida, 1963) constituyen el 8%. Estos sismos se han presentado con menor frecuencia y a profundidades inferiores a los 100 km (Figura I.3)

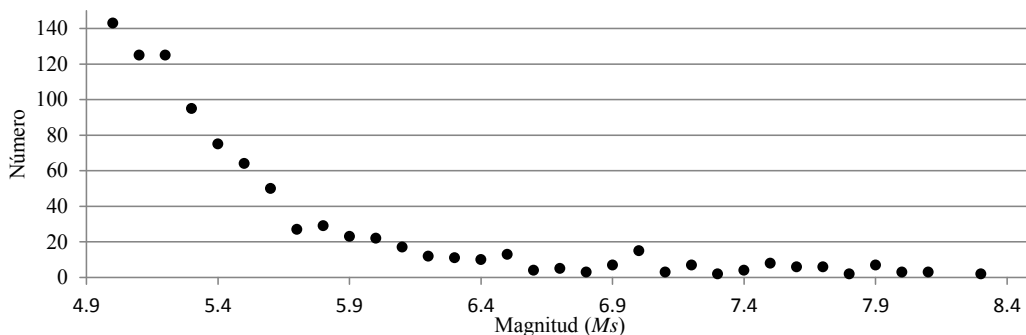


Figura I.3. Cantidad de sismos de acuerdo a su magnitud (M_s) (Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2011; U. S. Geological Survey/National Earthquake Information Center, 2012).

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

La mayor cantidad de estos sismos se han generado a profundidades someras, inferiores a 50 km (Figura I.4).

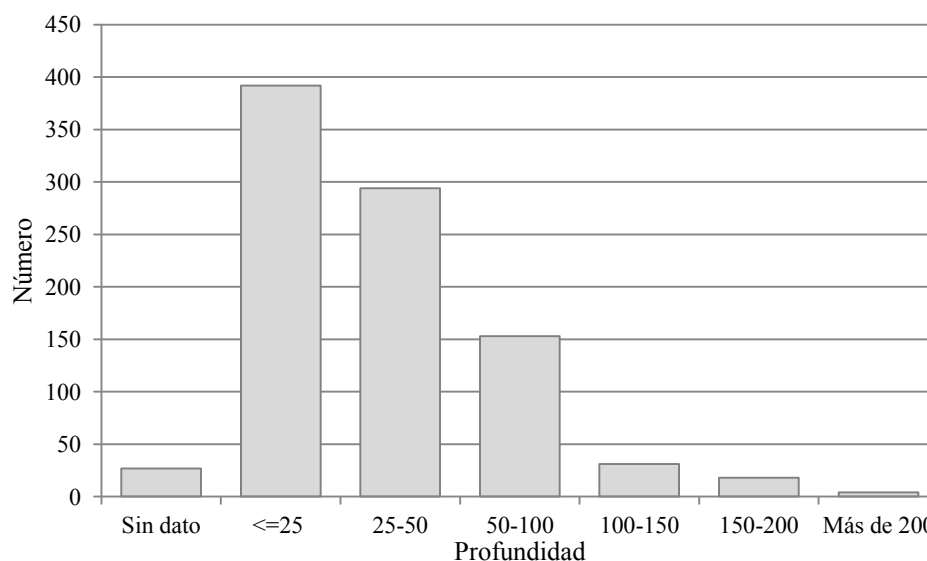


Figura I.4. Profundidad focal de los sismos generados en la zona de subducción del Pacífico Mexicano. (Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2011; U. S. Geological Survey/National Earthquake Information Center, 2012).

Los sismos de magnitudes mayores a $7.5 M_w$, han ocurrido a poca profundidad en la Zona de Subducción Mexicana, en donde las placas rompen en ángulos de entre $10-15^\circ$ en un plano de penetración con orientación N-NE (Ramírez-Herrera, *et al.*, 2010). Las áreas de mayor actividad sismogénica asociadas al movimiento de subducción se presentan a profundidades ~ 25 km y longitudes de ruptura mayores a ~ 60 km. En el área de subducción de la costa de Jalisco se ubicaba una de las cuatro zonas de clama (*gap*) sísmica del Pacífico Mexicano (Astiz & Kanamori, 1984). En Jalisco ocurrió el terremoto de mayor magnitud registrado en el último siglo en México, el 3 de junio de 1932 ($M_w=8.2$; $M_s=8.3$). Fue seguido por réplicas más pequeñas y una mayor el 18 de junio de 1932 con $M_w=7.8$, (Singh, *et al.*, 1981; Astiz & Kanamori, 1984; Singh, *et al.*, 1985). El 9 de octubre de 1995 ocurrió un terremoto de $7.8 M_w$ cerca de Manzanillo y rompió en la frontera de las placas de Rivera-Norteamericana (Bandy, *et al.*, 1997; Melbourne, *et al.*, 1997). Esto indica que sismos de magnitud de $7.5 M_w$ podrían tener un periodo de recurrencia es de 77 años (Singh, *et al.*, 1985). No han ocurrido sismos de magnitudes superiores a $8.0 M_w$ desde 1932 para los cuáles se desconoce el periodo de recurrencia (Ver Figura I.2A).

Tsunamis en México

Los registros históricos de tsunamis en las costas del Pacífico Mexicano abarcan un periodo de 272 años (Farreras & Sanchez, 1991; Sánchez & Farreras, 1993; Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011; National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012). Incluye el registro de 70 tsunamis; 42 de origen cercano (ver Tabla I.2), y regional y 28 tele-tsunamis (transoceánicos).

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

Tabla I.3.1 Relación de tsunamis de origen local que se generaron por sismos con epicentro en la zona de subducción de las placas Rivera-Cocos-Norteamericana. (Parte 1)

Id	Fecha	NLRT	Localidades afectadas por el tsunami
1	1732-02-25	1	Acapulco
2	1754-09-01	1	Acapulco
3	1784-03-28	1	Acapulco
4	1787-03-28	3	Tehuantepec, Pochutla, Acapulco
5	1787-04-03	3	Tehuantepec, Pochutla, Acapulco
6	1820-05-04	1	Acapulco
7	1833-03-10	1	Acapulco
8	1834-03-14	1	Acapulco
9	1845-04-07	1	Acapulco
10	1852-11-29	1	Boca del Río Colorado
11	1852-12-04	1	Acapulco
12	1868-05-25	1	Acapulco
13	1870-05-11	1	Puerto Ángel
14	1875-02-23	1	Manzanillo
15	1887-05-03	1	Cabo Haro
16	1907-04-14	2	Acapulco, San Marcos
17	1909-07-30	1	Acapulco
18	1925-11-16	1	Zihuatanejo
19	1928-03-22	1	Puerto Ángel
20	1928-06-16	3	Huatulco, Puerto Ángel, Chacalma, Chacahua
21	1932-06-18	1	Manzanillo, Cuyutlán
22	1932-06-22	5	Salinas del Guasango, El Real, Cuyutlán, Manzanillo, Tenancingo
22	1932-06-29	1	Cuyutlán
23	1932-06-03	5	San Blas, Cuyutlán, Barra de Navidad, Manzanillo, Bahía de San Pedrito
24	1948-12-04	1	Islas Tres Marias
25	1950-12-14	1	Acapulco
26	1957-07-28	3	Manzanillo, Salina Cruz, Acapulco

Fuente: Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL) (2011).

Notas: NLRT = Número de localidades que reportaron el tsunami.

La mayoría de estos eventos se asocian a causas directamente sísmicas, salvo los tsunamis del 16 noviembre de 1925, evento 18 en la Tabla I.3.1 (Singh, *et al.*, 1998) y el del 22 de junio de 1932, cuyos mecanismos de generación no han sido definidos (Singh, *et al.*, 1985). Los anteriores son considerados los más destructivos: presentaron olas de más de 10 m de altura. Para estos dos eventos extremos los periodos de recurrencia no han podido ser determinados (Farreras, *et al.*, 2007).

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

Tabla I.3.2 Relación de tsunamis de origen local que se generaron por sismos con epicentro en la zona de subducción de las placas Rivera-Cocos-Norteamericana. (Parte 2)

Id	Fecha	NLRT	Localidades afectadas por el tsunami
27	1962-05-11	1	Acapulco
28	1962-05-19	1	Acapulco
29	1965-08-23	1	Acapulco
30	1973-01-30	5	La Paz, Salina Cruz, Mazatlán, Acapulco, Manzanillo
31	1978-11-29	1	Puerto Escondido
32	1979-03-14	2	Manzanillo, Acapulco
33	1981-10-25	1	Acapulco
34	1985-09-19	9	Acapulco, Manzanillo, Cuyutlán, Boca de Apiza, Zihuatanejo, Ixtapa, Bucerías, Lázaro Cárdenas, Playa Azul
35	1985-09-21	2	Acapulco, Zihuatanejo
36	1995-10-09	21	Cabo San Lucas, Isla Socorro, Puerto Vallarta, San Mateo, Chamela, El Tecuán, La Manzanilla, Melaque, Cuastecomate, Boca de Iguanas, Barra de Navidad, Playa de Oro, Bahía Santiago, Cuyutlán, Centro de la Bahía de Santiago, Manzanillo, Sur de la Bahía de Santiago, Paraíso, Punta Careyes, Punta Perula, Punta Chalacatepe
37	1995-09-14	3	Puerto Vallarta, Manzanillo, Acapulco
38	2003-01-22	3	Zihuatanejo, Lázaro Cárdenas, Manzanillo

Fuente: Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL) (2011).

Notas: NLRT = Número de localidades que reportaron el tsunami.

Tsunamis en Cuyutlán

Explícitamente, Cuyutlán sólo cuenta con cuatro registros: el 3 y 22 de Junio de 1932, el 19 de Septiembre de 1985 y el 9 de Octubre de 1995. Sin embargo es posible que haya eventos que fueron registrados en la localidad debido a que presentaron alturas de ola mínima y por no haber provocado daños. Bajo este supuesto, por lo menos 27 tsunamis se han presentado en la costa de Cuyutlán.

Los periodos de ocurrencia entre tsunamis no se han definido para esta región (Farreras, *et al.*, 2007). Sin embargo se han presentado periodos de gran actividad tsunamigénica. El año 1932, con tres eventos en intervalos de 15 y 4 días, correspondientes a los eventos del 3, 18 y 22 de junio, y un posible tsunami el día 29 del mismo mes (Sánchez & Farreras, 1993).

La revisión de archivo histórico de la localidad de Cuyutlán cubrió el periodo de 1554 - 2011, un total de 457 años. El 13 de Noviembre de 1816, que según las descripciones causó afectaciones en las salinas de Cuyutlán y en las salinas de San Pantaleón en donde alcanzó una altura de 60 codos (Galindo, 1923; Marquina, 1931; Guzmán-Nava, 1954; Oseguera-Velázquez, 1967; Ortoll, 1988; Romero & Romero de Solís, 1994; Sanmiguel, 2001;

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

Vázquez, 2001), entre 25 m, si estuviese referida a el codo común o ó 34 m, de tratarse del codo real (Suárez, 2009).

De los pocos relatos de este evento resaltan una serie de particularidades que lleva a inferir que las alturas de ola que provocó en Cuyutlán pudieron ser ligeramente inferiores a las presentadas el 22 de Junio, debido a: 1) se afirma que el tsunami afectó a las salinas de Cuyutlán, los terrenos en dónde históricamente se realiza esta actividad se localizan a más de 800 metros de la línea de costa; 2) si el tsunami hubiera tenido una dirección de propagación perpendicular a la línea de costa, debió atravesar el cordón de dunas, ubicado a c.a. 150 m de la línea de costa y con alturas de hasta 10 m; ó 3) haber penetrado hasta las salinas por la boca del estero hasta llegar a los márgenes de la Laguna de Cuyutlán, aumentar su nivel y provocar algún nivel de inundación en las salinas localizadas en los márgenes de la laguna (Figura I.5).

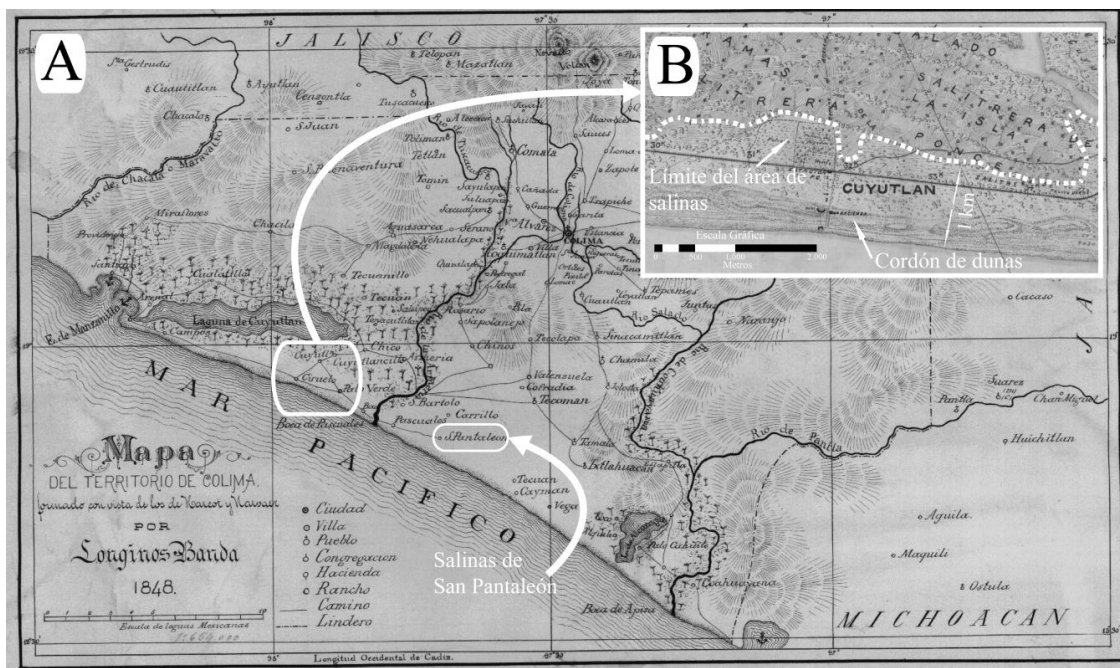


Figura I.5. Localidades afectadas en el tsunami de 1816. A) Localización de los dos lugares afectados, mapa de Banda (1848), B) Detalle topográfico del pueblo de Cuyutlán, sección del mapa tomado de Castell-Blanch (1900).

CONCLUSIONES

Una revisión general de los tsunamis, sus características y su potencial destructivo fue efectuada. Las condiciones sismotectónicas de las costas del Pacífico Mexicano evidencian la susceptibilidad de las comunidades costeras a ser afectadas por tsunamis de origen local, debido a que la zona de subducción presenta las condiciones propicias para su generación. Al graficar la localización de los sismos que históricamente han generado tsunamis se encontró un claro patrón de distribución que así lo confirma.

Los registros de tsunamis en las costas del Pacífico Mexicano cuentan con una cobertura temporal reducida. En la revisión de los datos históricos se identificó el tsunami que mayores alturas de ola ha presentado en Cuyutlán, correspondiente al del 22 de junio de

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

1932. Al complementar la información con datos históricos de mayor cobertura temporal se identificó otro evento de grandes dimensiones (13 de noviembre de 1816), pero sin datos suficientes referidos a la localidad de Cuyutlán, por lo que este evento no fue considerado.

Sin embargo, los datos de este evento extremo son sumamente limitados y difícilmente pueden ser empleados en la determinación de amenaza por tsunami. Se requiere de estudios más detallados que permitan caracterizar este evento extraordinario.

REFERENCIAS

- Astiz, L., & Kanamori, H. (1984). An earthquake doublet in Ometepec, Guerrero, Mexico. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 34, 24-45.
- Banda, L. (1848). Mapa del territorio de Colima In.
- Bandy, W., Kostoglodov, V., Singh, S., Pardo, M., Pacheco, J., & Urrutia-Fucugauchi, J. (1997). Implications of the October 1995 Colima-Jalisco Mexico earthquakes on the Rivera-North America Euler Vector. *Geophysical Research Letters*, 24 (4), 485-488.
- Bryant, E. (2008). Tsunami: The Underrated Hazard. In (2nd ed.). Springer-Praxis Publishing Ltd, Germany.
- Castell-Blanch, L. B. (1900). Plano topográfico de los terrenos salitreras y anexos de la hacienda de Cuyutlán pertenecientes al Sr. Coronel Francisco Santa Cruz. In, Manzanillo, México.
- Chacón-Barrantes, S. E., & Protti, M. (2011). Modeling a tsunami from the Nicoya, Costa Rica, seismic gap and its potential impact in Puntarenas. *Journal of South American Earth Sciences*, 31 (4), 372-382.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1994). Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions. *Geophysical Research Letters*, 21 (20), 2191-2194.
- DeMets, C., Gordon, R., Stein, S., & Argus, D. (1987). A Revised Estimate of Pacific-North America Motion and Implications for Western North America Plate Boundary Zone Tectonics. *Geophysical Research Letters*, 14 (9), 911-914.
- DeMets, C., & Stein, S. (1990). Present-day Kinematics of the Rivera Plate and Implications for Tectonics in Southwestern Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B13), 21931-21948.
- Eissler, H. K., & McNally, K. C. (1984). Seismicity and Tectonics of the Rivera Plate and Implications For the 1932 Jalisco, Mexico, Earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 89 (B6), 4520-4530.
- EM-DAT. (2011). Disaster Profiles. In.
- Farreras, S., Ortiz, M., & Gonzalez, J. I. (2007). Steps Towards the Implementation of a Tsunami Detection, Warning, Mitigation and Preparedness Program for Southwestern Coastal Areas of Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 164 (2-3), 605-616.
- Farreras, S. F., & Sanchez, A. J. (1991). The tsunami threat on the Mexican west coast: A historical analysis and recommendations for hazard mitigation. *Natural Hazards*, 4 (2), 301-316.
- Finn, W. D. L. (2003). Landslide-generated Tsunamis: Geotechnical Considerations. *Pure and Applied Geophysics*, 160 (10), 1879-1894.
- Galindo, M. (1923). *Elementos de geografía de Colima*. Imprenta de "El Dragón", Colima, México.
- Geist, E. L., & Parsons, T. (2006). Probabilistic Analysis of Tsunami Hazards*. *Natural Hazards*, 37 (3), 277-314.
- Guha-Sapir, D., F., V., R., B., & S., P. (2012). *Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends*. CRED, Brussels.
- Guzmán-Nava, R. (1954). *Geografía del estado de Colima: para uso de las escuelas primarias* (Vol. 5). Comisión Editora de El Nacional, Colima, México.

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

- Iida, K. (1963). Magnitude, energy and generation mechanism of tsunamis and catalogue of earthquakes associated with tsunamis. *Proceedings of the Tsunami Meeting, 10th Pacific Scientific Congress 1961, IUGG Monograph, 24*, 7-18.
- Kanamori, H. (2006). Lessons from the 2004 Sumatra–Andaman earthquake. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 364 (1845), 1927-1945.
- Kostoglodov, V., & Bandy, W. (1995). Seismotectonic constraints on the convergence rate between the Rivera and North American plates. *Journal of Geophysical Research*, 100 (B9), 17977-17989.
- Levin, B., & Nosov, M. (2009). *Physics of Tsunamis*. Springer, Russia.
- Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., Zamora, N., Nadim, F., Peduzzi, P., Dao, H., & Smebye, H. (2012). Tsunami hazard and exposure on the global scale. *Earth-Science Reviews*, 110, 58-73.
- Luhr, J. F., Nelson, S. A., Allan, J. F., & Carmichael, I. S. E. (1985). Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology*, 13 (1), 54-57.
- Marquina, I. (1931). *Estudio comparativo entre los principales edificios prehispánicos en México*. Impr. Mundial.
- Melbourne, T., Carmichael, I., DeMets, C., Hudnut, K., Sanchez, O., Stock, J., Suarez, G., & Webb, F. (1997). The Geodetic Signature of the M8.0 Oct. 9, 1995, Jalisco Subduction Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 24 (6), 715-718.
- Minster, J. B., & Jordan, T. H. (1978). Present-day plate motions. *Journal of Geophysical Research*, 83 (B11), 5331–5354.
- Moss, R. E. S., & Travararou, T. (2006). Tsunamigenic Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis for Subduction Zones. In *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA.
- National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration. (2012). NOAA/WTC Tsunami Event Database. In (Vol. 2011), Boulder, CO, USA.
- Nixon, G., T. (1982). The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 93 (6), 514-523.
- Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL). (2011). Historical Tsunami Database for the World Ocean (HTDB/WLD). In (2011 ed.). Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia.
- Núñez-Cornú, F. J., Marta, R. L., Nava P, F. A., Reyes-Dávila, G., & Suárez-Plascencia, C. (2002). Characteristics of seismicity in the coast and north of Jalisco Block, Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 132 (1-3), 141-155.
- Ortoll, S. (1988). *Colima: textos de su historia*. Secretaría de Educación Pública, Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora.
- Oseguera-Velázquez, J. O. (1967). *Colima en panorama: monografía histórica, geográfica, política y sociológica*. Impr. Al libro mayor, Colima, México.
- Papathoma, M., & Dominey-Howes, D. (2003). Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 733-747.
- Pardo, M., & Suárez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 100 (B7), 12357-12373.
- Ramírez-Herrera, M. T., Kostoglodov, V., & Urrutia-Fucugauchi, J. (2010). Overview of Recent Coastal Tectonic Deformation in the Mexican Subduction Zone. *Pure and Applied Geophysics, Manuscript Number PAAG-320*.
- Romero, J. M., & Romero de Solís, J. M. R. (1994). *Breve historia de Colima*. Fondo de cultura económica.

I. TSUNAMIS EN EL MARCO DE LOS DESASTRES NATURALES EN EL CONTEXTO GLOBAL Y LOCAL

- Sánchez, A. J., & Farreras, S. F. (1993). *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México*. National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.
- Sanmiguel, R. H. (2001). *Estaciones ferroviarias de la ruta Guadalajara-Manzanillo*. Gobierno del Estado de Colima, Secretaría de Cultura, Colima, México.
- Satake, K., & Atwater, B. F. (2007). Long-Term Perspectives on Giant Earthquakes and Tsunamis at Subduction Zones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 349-374.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN). (2011). Catálogo de sismos. In. Servicio Sismológico Nacional (SSN), México.
- Singh, S. K., Astiz, L., & Havskov, J. (1981). Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: A reexamination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71 (3), 827-843.
- Singh, S. K., Pacheco, J. F., & Shapiro, N. (1998). The earthquake of 16 November, 1925 (Ms=7.0) and the reported tsunami in Zihuatanejo, Mexico. *Geofísica Internacional*, 37 (001), Short Note.
- Singh, S. K., Ponce, L., & Nishenko, S. P. (1985). The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera plate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75 (5), 1301-1313.
- Stein, S. (2006). Limitations of a Young Science. *Seismological Research Letters*, 77 (3), 351-353.
- Stein, S., & Okal, E. A. (2007). Ultralong Period Seismic Study of the December 2004 Indian Ocean Earthquake and Implications for Regional Tectonics and the Subduction Process. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (1A), S279-S295.
- Suárez, C. M. (2009). *Métrica en Arquitectura* (1a ed.). Universidad Iberoamericana, México.
- Suppasri, A., Imamura, F., & Koshimura, S. (2012). Tsunamigenic Ratio of the Pacific Ocean earthquakes and a proposal for a Tsunami Index. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12 (1), 175.
- U. S. Geological Survey/National Earthquake Information Center. (2012). Earthquake Data Base. In.
- Vázquez, J. L. (2001). *Los terremotos de 1932*. Gobierno del Estado De Colima, Secretaría de Cultura, México.
- Wright, S. G., & Rathje, E. M. (2003). Triggering Mechanisms of Slope Instability and their Relationship to Earthquakes and Tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, 160 (10), 1865-1877.
- Yang, T., Grand, S. P., Wilson, D., Guzman-Speziale, M., Gomez-Gonzalez, J. M., Dominguez-Reyes, T., & Ni, J. (2009). Seismic structure beneath the Rivera subduction zone from finite-frequency seismic tomography. *Journal of Geophysical Research*, 114 (B1), 1-12.

CAPÍTULO II

MAPEO Y RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DEL GRAN TSUNAMI DEL 22 DE JUNIO 1932 EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MEXICANO

MAPEO Y RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DEL GRAN TSUNAMI DEL 22 DE JUNIO 1932 EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MEXICANO

ABSTRACT

At 7:00 hours (UTC-6) on June 22nd 1932, a 6.9 Ms earthquake shocked the coasts of Colima and Jalisco. Five minutes later a tsunami arrived to the coast. It almost completely destroyed the town of Cuyutlán, Colima, causing the deaths of 50 people and leaving about 1,200 injured. In this study, newspapers reports and technical reports are reviewed, as well as survivors' testimonials. The physical characteristics (mean sea level at the time, time of arrival, sea retreat, and inundation distribution) and the tsunami effects (number of victims, injuries, affected buildings) have been reconstructed and mapped. The interpretation of historical data allowed us to determine the intensity of the tsunami and to reveal the tsunamigenic source. This study emphasizes the relevance of historical analysis, including survivor's testimonies, in the reconstruction of tsunamis that lack instrumental data. The results of this study are relevant to paleotsunami studies and tsunami related hazard planning.

RESUMEN

A las 7:00 (UTC-6) del 22 de junio de 1932 se produjo un sismo de $M_s=6.9$ en las costas de Colima y Jalisco. Cinco minutos después un tsunami arribó a las costas. Destruyó casi por completo el poblado de Cuyutlán, Colima, ocasionó la muerte de 50 personas y dejó cerca de 1,200 damnificados. En este estudio se revisaron artículos de periódicos, informes técnicos y testimonios de sobrevivientes. Las características físicas (nivel medio del mar, tiempo de arribo, retroceso del mar, y la distribución de la inundación) y los efectos del tsunami (número de víctimas, heridos, damnificados y edificios afectados) fueron mapeados y reconstruidos. La interpretación de los datos históricos ayudó a determinar la intensidad del tsunami y a revelar la probable fuente tsunamigénica. Este estudio hace énfasis en la relevancia de los análisis históricos, incluidos los testimonios de los sobrevivientes, para reconstruir tsunamis cuyos registros instrumentales son inexistentes. Los resultados de este estudio son relevantes para estudios de paleo-tsunamis y planeación referente a la amenaza de tsunamis.

INTRODUCCIÓN

En la historia de la humanidad los fenómenos naturales han ocasionados daños devastadores. Uno de los fenómenos más catastróficos por sus efectos son los tsunamis, *i.e.*, el tsunami del Océano Índico en 2004, que cobró la vida de más de 226,000 personas y daños que superan los 10 billones de dólares, y el reciente tsunami del 11 de Marzo de 2011, en Tohoku, Japón, que junto con el sismo causó mas de 24,000 muertes (Mimura, *et al.*, 2011). Una lista de 11,939 registros de desastres naturales muestra que 51 fueron ocasionados por tsunamis (EM-DAT, 2011). El tsunami del Océano Índico alentó el progreso de nuevas investigaciones orientadas a entender mejor el origen y comportamiento de los tsunamis (Kanamori, 2006; Stein, 2006; Satake, *et al.*, 2007; Lagos & Cisternas, 2008). Este tsunami mostró el elevado costo de desconocer el pasado de los territorios que han sido afectados por tsunamis (Lagos & Cisternas, 2008). Los estudios históricos y geológicos pueden aportar información para entender la

frecuencia y recurrencia de grandes terremotos y tsunamis (Orfanogiannaki & Papadopoulos, 2007; Satake & Atwater, 2007; Yanagisawa, *et al.*, 2007).

La mayoría de los tsunamis que son causados por terremotos se producen en las zonas de subducción (Kanamori, 2006; Stein, 2006; Satake & Atwater, 2007; Stein & Okal, 2007). Los países localizados en el Océano Pacífico son susceptibles a tsunamis asociados a la actividad sísmica del Cinturón de Fuego del Pacífico (Goff, 2011). Las costas del Pacífico Mexicano (PMC) tienen registros de 70 tsunamis en el periodo de 1732 a 2011 (Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011). Los tsunamis más destructivos ocurrieron el 16 de Noviembre de 1925, en Zihuatanejo, y el 22 del 22 de Junio de 1932, en Cuyutlán (Sánchez & Farreras, 1993; Okal & Borrero, 2011).

Los estudios de fenómenos naturales con instrumentos de medición es una práctica moderna que apenas se extiende hasta la segunda mitad del siglo XVIII (Barriendos, *et al.*, 2003; Llasat, *et al.*, 2005). Antes de esto la información estaba basada en piezas de información cualitativa (Fliri, 1998). La incorporación de técnicas de investigación históricas en los estudios de peligros naturales han demostrado ser una herramienta útil debido a la gran cantidad de tipos de fuentes de información que pueden ser incluidas: pinturas, fotografías, grabados, leyendas, sagas, cartas, informes municipales, etc. (Wang & Zhang, 1988; Pfister, 1999; Naulet, *et al.*, 2001; Wagner & Suda, 2004). A pesar de que estas fuentes de información pueden ser subjetivas, esta cuestión puede ser resuelta con evaluaciones críticas de la información (Pfister, 1999).

Numerosos autores han propuesto que el análisis de los datos históricos son una herramientas invaluable en los estudios de peligros naturales (Ambraseys, 1979; Ambraseys, 1995; Ambraseys & Adams, 1996; Glade, *et al.*, 2001; Calcaterra, *et al.*, 2003; Barnikel, 2004; Lübken & Mauch, 2011).

Considerando la importancia de reconocer el historial de tsunamis en los territorios costeros y el papel de los datos históricos en la construcción de este conocimiento, este estudio se enfoca en la interpretación y mapeo de las características físicas y los efectos del gran tsunami del 22 de junio de 1932, un evento que no cuenta con registros instrumentales y que causó daños significativos en la cosya de Colima. El onjetivo de este estudio es mapear las características físicas y los efectos del tsunami de 1932 en Cuyutlán a escala local, y determinar la intensidad del tsunami usando técnicas etnográficas, geograficas y modelación en sistemas de información geográfica.

Este estudio contribuye al conocimiento de la distribución espacial y los efectos del tsunami del 22 de junio de 1932 en la Cuyutlán. Es el primer trabajo en el que se asigna un valor de intensidad a un tsunami en México. La información resultante provee información útil para la evaluación de amenazad de tsunami, planeaciónificación del territorio, así como para estudios de paleotsunamis. El dato de la intensidad del tsunami es útil para estimar parámetros, como la magnitud de la inundación y la velocidad a la que el tsunami penetró en a costa. Finalmente, esta investigación demuestra que el uso de datos históricos documentales, el testimonio de la población y el empleo de técnicas de mapeo (georrefenciación de elementos descriptivos, modelado en SIG) son fuentes de información importantes y herramientas en la descripción de fenómenos naturales y desastres que no cuentan con mediciones instrumentales.

Historial de tsunamis en el área de estudio

El área de estudio se localiza entre los estados de Jalisco y Colima, a lo largo de Costa del Pacífico Mexicano. Esta región es influenciada por la actividad tectónica de la zona

II. MAPEO Y RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DEL GRAN TSUNAMI DEL 22 DE JUNIO DE 1932, EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MEXICANO

de subducción entre las placas de Cocos y Rivera que se sumergen por debajo de la placa Norteamericana a los largo de la Trinchera Mesoamericana (Singh, *et al.*, 1981; Nixon, 1982; Eissler & McNally, 1984; Luhr, *et al.*, 1985; Singh, *et al.*, 1985; Ramírez-Herrera, *et al.*, 1999; Ramírez-Herrera, *et al.*, 2010).

Históricamente, la costa de Cuyutlán tiene registros de seis tsunamis: 3, 18, 22 and 29 de Junio de 1932, 19 de Septiembre de 1985 y el 9 de Octubre de 1995 (Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011; National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012). Sin embargo, basados en una interpretación de los dos históricos del National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration (2012) y del Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL) (2011), se infirió que la costa de Cuyutlán pudo haber sido afectado por 27 tsunamis en el periodo de 1875 a 2011 (Figura II.1).

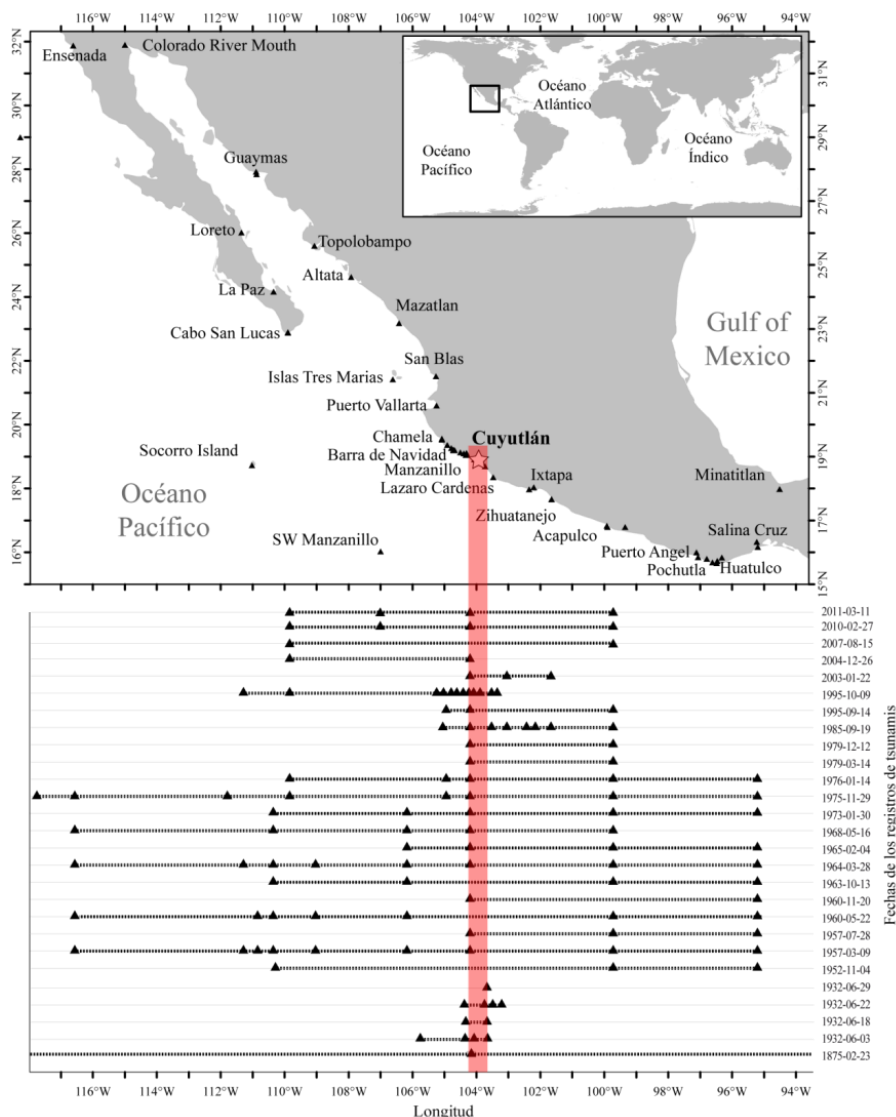


Figura II.1. Línea de costa afectada por tsunamis que han alcanzado a Cuyutlán. Triángulos negros, localidades que reportaron tsunamis en el periodo de 1875 - 2011 (Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011; National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012); línea discontinuas, probable longitud de afectación en cada evento, Banda roja vertical, área de estudio, costa de Cuyutlán.

Registros históricos mencionan otro tsunami ocurrido el 13 de noviembre de 1816, el cual inundó las salinas de San Pantaleón (actual poblado de El Real), penetrando 600 pasos (~400 m.) en el continente (Oseguera-Velázquez, 1967).

El 3 de Junio de 1932 se presentó el sismo de mayor magnitud registrado en esta región ($M_s = 8.2$), seguido por réplicas el 18 de Junio ($M_s = 7.8$) y el 22 de Junio ($M_s = 6.9$) (Singh, *et al.*, 1981; Astiz & Kanamori, 1984; Singh, *et al.*, 1985). Estos eventos prosujeron tsunamis (Cumming, 1933; Singh, *et al.*, 1998; Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011; National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012). El tsunami más grande se produjo el 22 de Junio (Cumming, 1933; Sánchez & Farreras, 1993; Okal & Borrero, 2011). Los mecanismos de generación y la fuente de origen de este tsunami aún no han sido definidos (Singh, *et al.*, 1998). Se han planteado dos hipótesis en torno a su generación : (1) por fuente sísmica (Singh, *et al.*, 1998; Okal & Borrero, 2011; National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012), y (2) por un deslizamiento submarino (Cumming, 1933).

El tsunami del 22 de Junio de 1932 afectó cerca de 75 km de la costa de Colima, entre los 19.06° N, 104.31° W, Bahía de Manzanillo, a los 18.68 ° N, 103.74 W, Boca de Apiza (National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012). Este estudio se enfocó solo en la costa de Cuyutlán debido en un segmento de cerca de 6 km (Figura II.2).

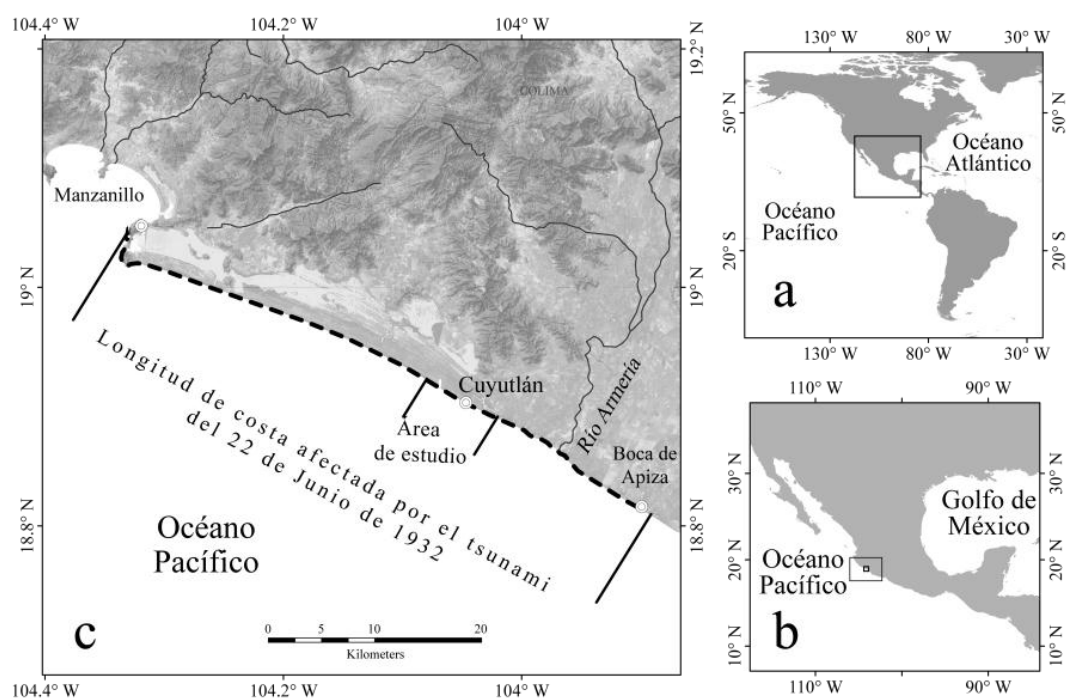


Figura II.2. Localización del área de estudio, (a) Continente Americano, (b) México y (c) Localización de la línea de costa afectada por el gran tsunami de 1932 (línea discontinua) y área de estudio.

La morfología costera está compuesta por playas arenosas, cordones de dunas paralelas a la línea costa que se alzan en rangos de entre 6 y 15 sobre el nivel del mar. Tierra a dentro se extiende una franja de llanura costera que limita al noreste con franjas de marisma de mangle y de salina, mismas que bordean la Laguna de Cuyutlán. Este asentamiento humano tiene vocación turística y salinera, por la extracción sal. Cuenta

con una población de 1038 habitantes y 845 viviendas (Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), 2010).

MÉTODOS

La investigación fue realizada mediante el uso de enfoques etnográficos y geográficos (Figura II.3). Las técnicas etnográficas consistieron en análisis de contenido y entrevistas.

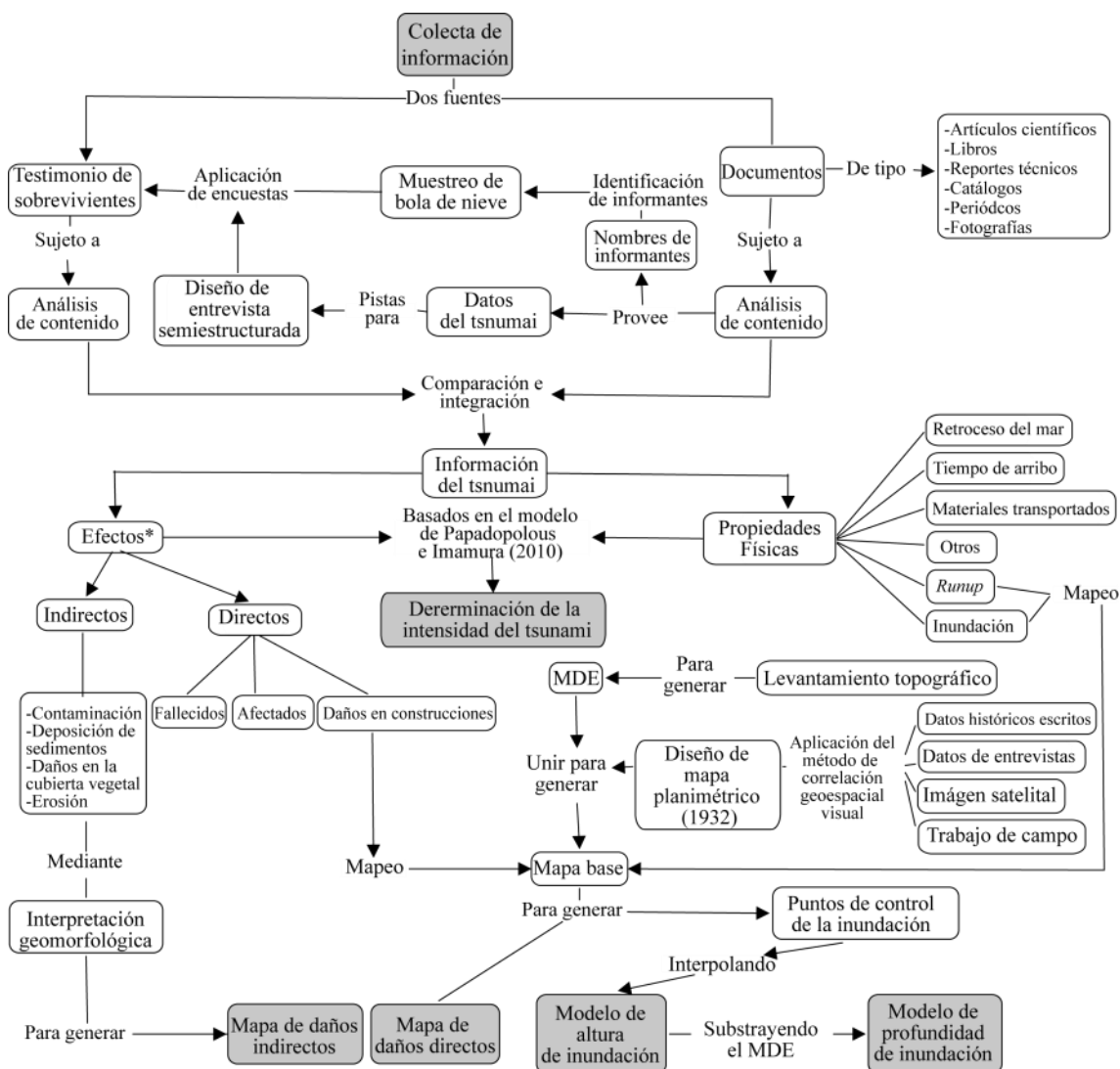


Figura II.3. Diagrama de flujo de la metodología

*Nota: Los efectos del tsunami fueron de acuerdo con el esquema propuesto por (Intergovernmental Oceanographic Commission, 2008).

Durante la primera fase, *i.e.*, acopio de datos, se tomaron dos fuentes principales de información: documentos escritos (periódicos, reportes técnicos, catálogos y fotografías) y el testimonio de sobrevivientes. Las fuentes escritas fueron revisadas con el método de análisis de contenido (Murchison, 2010; Secor, 2010). Se prestó especial atención en identificar nombres de informantes, datos del tsunami y palabras clave (Tabla II.1). Basados en esta información, se diseñó un listado de tópicos que se emplearon como guía para el diseño del guion de una entrevista semi-estructurada (Denscombe, 2003). Por otro lado, se creó un listado de potenciales informantes. La

aplicación de la encuesta se realizó bajo el formato de bola de nieve (Walliman, 2006; Murchison, 2010).

Tabla II.1. Parámetros físicos del tsunami del 22 de junio de 1932 en Cuyutlán, Colima.

Parámetro	Especificaciones
Fecha del tsunami	22 de junio de 1932
Magnitud del sismo	6.9 Ms
Hora del sismo	07:00 (UTC-6)
Hora de arribo	07:05 (UTC-6)
Retroceso del mar	200 - 300 m
Tiempo de arribo	5 minutos
Extensión de afectación del tsunami	De cuyutlán a 25 Km al sureste.
Runup máximo	12 m
Distribución del Runup	Entre 12 y 5 m
Distancia horizontal de la inundación	Entre 500 y ~2000 m
Profundidad de la inundación	12 a 0.5 m.
Tiempo de la inundación	3 minutos
Velocidad aproximada del flujo	5 -5.5 m/s
Duración de la inundación	3 horas
Materiales transportados	Arenas, fauna marina, fauna terrestre, vegetación nativa, restos de las construcciones y por lo

La selección de informantes se restringió a testigos oculares o descendientes de sobrevivientes: Doña Pachita Gaspar (92 años), a hijos de testigos oculares: el Sr. Ramón Cortez (70 años), al Sr. Vidal Mojarro Vázquez (76), Sra. María de Jesús Morales (50 años), Ignacio de la Madrid (78 años) y esposa (76 años), al Sr. José Solórzano (52 años) y al cronista de municipio de Armería, Lic. Miguel Chávez Michel (62 años).

Uno de los más importantes referentes en este estudio lo constituye el reporte técnico de Cumming (1933), quien visitó el área afectada algunos días después del impacto del tsunami. Este documento proveyó de información significativa debido a que contiene gran cantidad de elementos descriptivos que no son mencionados en otras fuentes, este trabajo resalta la importancia de los trabajos de campo post-tsunamis, además puede ser considerado el primer trabajo de esta naturaleza en México.

Una vez colectados los datos documentales y los testimonios de los sobrevivientes, se aplicó un análisis de contenido para interpretar y recrear el escenario de desastre. La información fue disgregada y clasificada para obtener una descripción completa de las características del tsunami, las cuales fueron divididas en dos grupos de datos: efectos y propiedades físicas del tsunami. Los efectos fueron clasificados en impactos directos e indirectos, de acuerdo al esquema propuesto por la Intergovernmental Oceanographic Commission (2008).

Para definir la intensidad del tsunami, los datos del tsunami fueron comparados con el cuadro de características de intensidades propuesto por Papadopoulos & Imamura (2001)

Para el mapeo de los efectos y propiedades físicas del tsunami se generó un modelo digital de elevación del terreno (MDE) y un mapa planimétrico que representa la distribución de las edificaciones y traza de las calles de Cuyutlán en 1932. Para generar el MDE se realizó un levantamiento topográfico con un teodolito marca Keuffel & Esser modelo S50. Estos datos fueron colectados usando el método de coordenadas polares y mediante un levantamiento de una red puntos ortogonales equidistantes. Para la generación de las curvas de nivel se aplicó el Método de Gráfico (Casanova, 2002). Para generar el DEM se usó el método de triangulación de superficies Delauniano (Liseikin, 2010). La reconstrucción de este escenario pre-tsunami fue realizada mediante la digitalización (Gregory & Ell, 2007) de polígonos sobre una imagen pancromática Worldview 2 (WV2) a 0.6 m de resolución espacial (con fecha de adquisición del mes de abril de 2011). La identificación y localización (mapeo) de cada edificio, sus afectaciones y las propiedades físicas del tsunami fue realizada mediante el Método de Correlación Visual Geoespacial (MCVG), usando el mapa base, las fuentes documentales escritas, las fotografías, las descripciones de los entrevistados y trabajo de campo (Kovalerchuk, 2004). Adicionalmente, el mapeo de los efectos indirectos, se realizó con base en la interpretación geomorfológica del MDE, las imágenes WV 2 y trabajo de observación en campo.

El mapeo de la distribución de las alturas máximas y profundidades de la inundación fueron generados a partir de un modelo de interpolación simple. El objetivo fue crear un modelo hipotético de la distribución espacial de la inundación en el área afectada usando como insumo las pocas descripciones puntuales de profundidad de inundación y el modelo topográfico. Usando las marcas de agua dejadas por el tsunami, detectadas en fotografías del desastre y relatos de los sobrevivientes, se desarrolló un modelo simple de la distribución de la inundación. El patrón de distribución de los valores de inundación fue mapeado mediante la interpolación de los valores georreferenciados de altura de inundación, respecto al nivel medio del mar. En esta investigación el concepto de altura de inundación se refiere al movimiento de la línea de costa tierra adentro y es medido como el nivel máximo de altura de la inundación respecto al nivel medio del mar (Pedersen, 2008). El perfil de los componentes del tsunami se presenta en la Figura II.4, nótese la esquematización del movimiento del nivel mar y la interpretación de la altura máxima de la inundación que fue empleada en este trabajo con propósitos de modelación. La definición de la ecuación de mejor ajuste se generó a partir del Método Regresión Linear Simple (O'Sullivan & Unwin, 2003). Como variable independiente se emplearon los valores de un modelo de path-distance, PDM (Zhan, *et al.*, 1993) y como variable dependiente el valor de altura máxima de inundación de los puntos referidos en las fuentes consultadas. El PDM fue creado bajo la consideración de que la distribución de las alturas de inundación guarda una relación directa con la distancia que recorrió la columna de agua al penetrar en la costa. El PDM representa la distancia (en metros) desde la línea de costa hacia el interior del continente en dirección perpendicular a esta, tomando en cuenta la distancia diagonal de los pixeles y los efectos acumulativos derivados de las condiciones topográficas (MDE), interpretadas como un factor de fricción en el avance de la inundación. El mapa de la profundidad de inundación fue generado usando un método aritmético simple de archivos raster en *software* tipo SIG, substrayendo los valores de altura máxima de inundación (msnm) del MDE (Figura II.4).

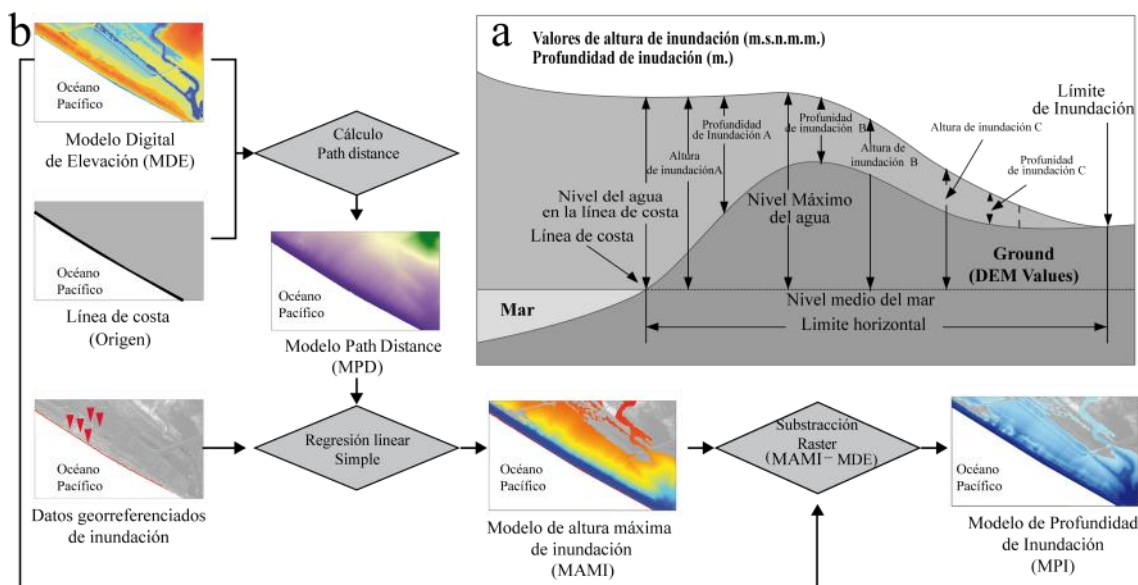


Figura II.4. Método de interpolación de las alturas y profundidades de inundación, donde (a) muestra el perfil de tsunami, modificado de Levin & Nosov (2009) para efectos de la modelación, y (b) diagrama de flujo para la modelación de la inundación.

RESULTADOS

Revisión de las características de Cuyutlán previas al tsunami

Sociedad y economía

Las principales actividades económicas que se desarrollaban en la zona en la década de los 30's consistían en el cultivo y la extracción de productos derivados del coco, la extracción de sal, que data de finales del siglo XVI (Reyes-Garza & Leytón-Ovando, 1992; Reyes, 2004), y la actividad turística, fomentada por la construcción de la vía ancha del ferrocarril de Colima a Manzanillo (Chávez, 2010). La extracción de sal y el cultivo y extracción de derivados de la palma de coco se distribuían en Cuyutlán de la misma forma que en la actualidad, salvo algunas zonas al suroeste del poblado, en los alrededores del rancho Palo Verde (Reyes, 2004), hoy El Tortugario.

En la década de los 30's el número de turistas que visitaban Cuyutlán llegó a ser de 3,000 personas en los días de Semana Santa, a mediados de abril (Salazar, 1989). La Cooperativa de Salineros de Cuyutlán, señala que en aquella época las salinas llegaba a emplear hasta 2,000 hombres en los periodos de zafra, entre los meses de Marzo y Junio (Reyes, 2004). La actividad agrícola se desarrollaba todo el año y los encargados de los cultivos eran habitantes de la localidad.

Construcciones

Las áreas de playa estaban cubiertas por pequeñas construcciones de madera y hoja de palma (palapas y baños públicos). En algunos sectores cercanos a la playa, y de menor pendiente, comenzaba la zona hotelera y las fincas privadas de mayor tamaño. Estas construcciones estaban hechas de madera e incorporaban estructuras más resistentes que las chozas y construcciones de uso habitacional (Salazar, 1989; Hernández, 2009). En las laderas del cordón de dunas, con orientación hacia el mar, se localizaban hoteles de mayor tamaño, El Hotel Madrid era el de mayores dimensiones, ubicado a una altura de

~10 msnmm. En la franja de llanura costera, se asentaban la mayor parte de las viviendas, construidas de tejamanil, palma y bajareque (Gaspar, 2010; Madrid, 2010; Mojarro, 2010). Se estima que en total había entre 80 y 100 viviendas de estas características (Figura II.5).

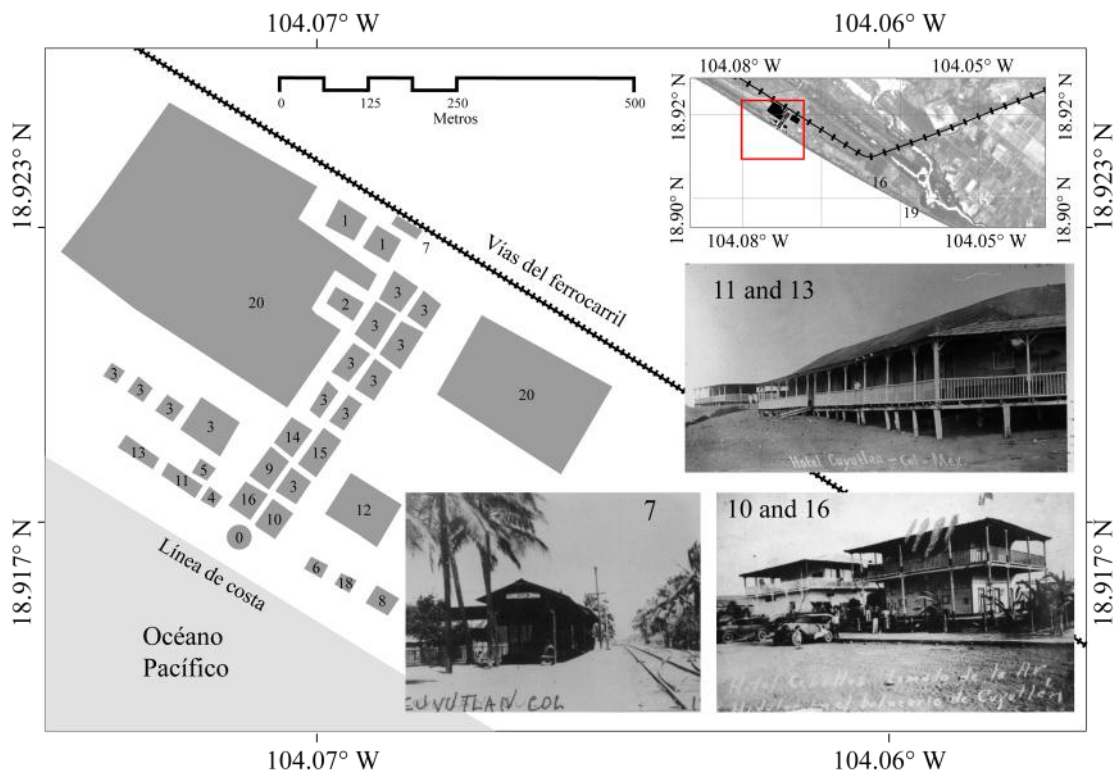


Figura II.5. Mapa planimétrico de Cuyutlán en 1932. (0) glorieta de piedra, (1) bodegas de sal, (2) iglesia, (3) pequeñas casas privadas, (4) Chalet Aguayo, (5) Chalet Solorzano, (6) palapas, (7) Estación del ferrocarril, (8-9) Hoteles sin nombre, (10) Hotel Ceballos, (11) Hotel Cuyutlán, (12) Hotel Madrid, (13) Hotel Palacio, (14) Hotel Santa Cruz #1, (15) Hotel Santa Cruz #2, (16) Hotel Zapotlan, (17) Ordeña Anguiano, (18) Hostal, (19) Rancho Palo Verde, y (20) zona habitacional.

La infraestructura de transportes más importante la constituían las vías del ferrocarril que conectaba a Cuyutlán con los poblados de Colima y Manzanillo. La estación del ferrocarril, construida de madera, se localizaba en el mismo sitio que en la actualidad, a ~500 m de la línea de costa. En sus alrededores se situaban, y aún en la actualidad, las bodegas de sal pertenecientes a la Cooperativa de Salineros, y una serie de construcciones de uso habitacional en donde residían temporalmente los salineros. Finalmente, la capilla, construida de madera se localizada sobre la llanura costera, en las inmediaciones de la zona habitacional (Salazar, 1989; Gaspar, 2010).

Características físicas del tsunami

Origen y Tiempo de arribo

Los datos que expliquen los mecanismos de generación del gran tsunami de 1932 aún no han sido definidos (Singh, *et al.*, 1998). Hasta el momento se han propuesto dos hipótesis origen del tsunami: sísmico (Singh, *et al.*, 1998; Okal & Borrero, 2011; National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration,

2012) y por deslizamiento submarino (Cumming, 1933). Cumming (1933) señala que las palmeras y la infraestructura derribadas por el tsunami estaban orientadas hacia el noroeste. A partir de esta observación supuso que el origen del tsunami se localizó en dirección opuesta, Sureste. Tomado en cuenta la localización del epicentro del sismo, localizado al noroeste de la zona de estudio (Cumming, 1933; Cruz & Wyss, 1983); podemos inferir que la fuente del tsunami se localizó en algún lugar al suroeste de Cuyutlán, localización que coincide con un cañón submarino frente a la desembocadura del Río Armería, como lo infirió Cumming (1933). El tiempo transcurrido entre el sismo y la llegada del tsunami a la costa fue de cinco minutos (Salazar, 1985; Chávez, 2010; Gaspar, 2010; Mojarro, 2010).

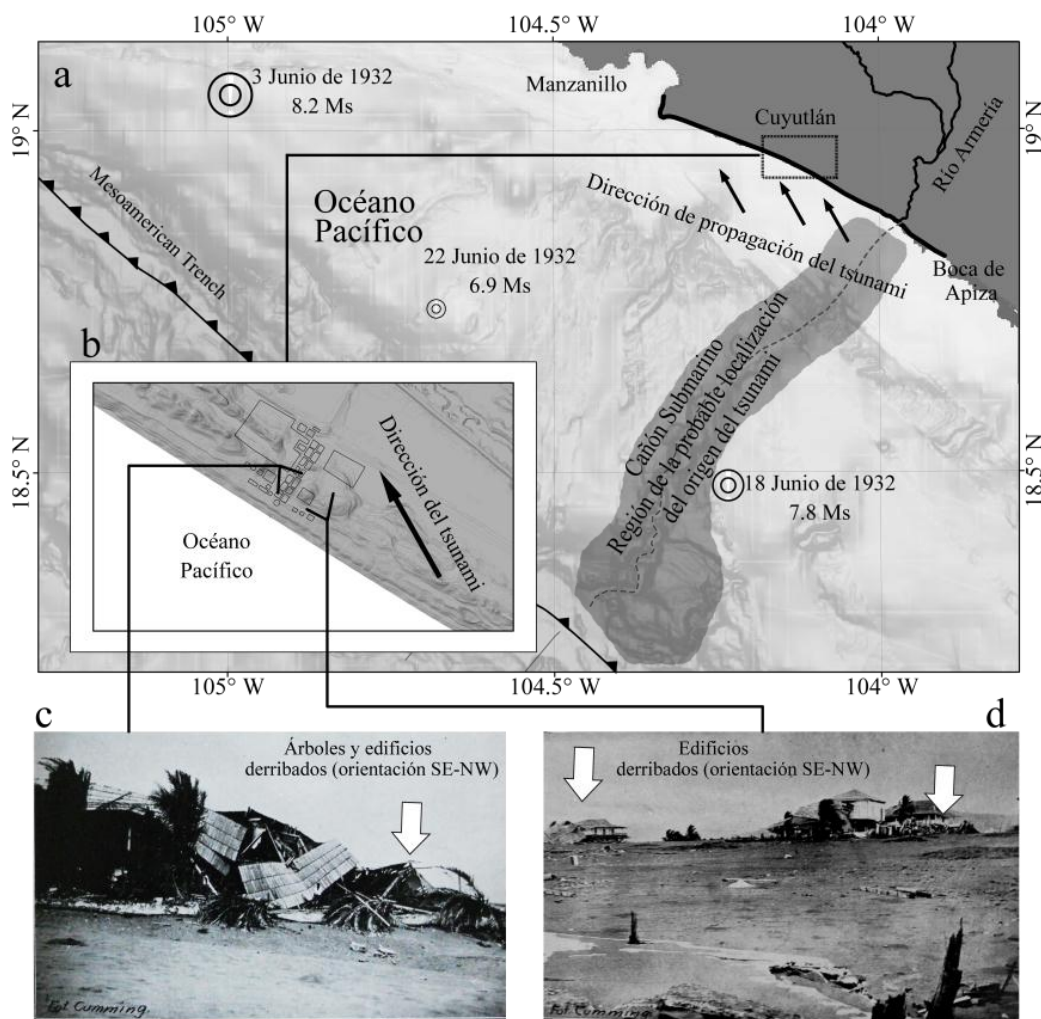


Figura II.6. Probable localización de la zona de generación del tsunami del 22 de Junio de 1932 y dirección de propagación. (a) Epicentros de los principales sismos del mes Junio de 1932 (Cumming, 1933; Cruz & Wyss, 1983; Servicio Sismológico Nacional, 2010), Polígono gris, cañón submarino localizado frente a río Armería, probable zona de generación del tsunami de acuerdo a Cumming (1933), flechar negras muestran la dirección de propagación del tsunami; (b) Detalle de Cuyutlán y localización de las fotografías de los cuadros (c) y (d), fotografías de Cumming (1933) en donde se señala la orientación de árboles y edificaciones destruidas por el tsunami, con orientación SE-NW.

Nivel medio del mar y retroceso del mar

Un cambio relativo del nivel mar fue reportado el 3 de Junio de 1932, como resultado del sismo de Ms=8.2 (Cumming, 1933). El testimonio del presidente municipal en turno de Cuyutlán en 1932 lo confirma: “El nivel del mar quedó alto después de los sismos...la glorieta de piedra no estaba tan cerca, habiéndose acercado a una distancia de aproximadamente 50 metros” (Cumming, 1933:81), también sugiere un probable hundimiento (subsistencia) de la costa de aproximadamente un metro. Por otro lado, la marea calculada para las 7:00 (UTC-6) del 22 de Junio de 1932 fue de -329 mm bajo el nivel medio del mar (Gonzalez, 2010). Considerando los datos mareográficos y el desnivel generado por el sismo del 3 de junio, se infirió que el nivel del mar al momento del tsunami se encontraba cerca de los 671 mm por encima del nivel medio del mar. Previo al tsunami, el mar retrocedió aproximadamente 200 m de la línea de costa (Excélsior, 1932a). Se infirió que el retroceso del mar se pudo presentar de forma diferenciada en distintos sectores de la costa en un rango de entre 150 y 300 metros de la línea de costa de Cuyutlán, ya que al noroeste, en la bahía de Manzanillo, sólo se reportaron 30 pies (~9 m) en el descenso del nivel del mar (El Informador, 1932b)

Altura de la inundación

El registro de la máxima altura de la columna de agua, 2 m, se localizó en donde se ubica el Hotel Madrid, emplazado a una altura de 10 msnm (El Informador, 1932c; Salazar, 1989; Madrid, 2010). Por lo tanto se calcula que el nivel máximo de la inundación del tsunami fue alcanzado en este punto, llegando a 12 msnmm (Tabla II.2).

Tabla II.2. Lista de puntos de control y valores correspondientes de los modelos digitales del terreno.

Referencia	PDM* (metros)	Puntos de control		
		Profundidad de la inundación (metros)	MDE** (msnmm)	Altura de la inundación (msnmm)
Línea de costa	0.00	12.00	0.00	12.00***
Hotel Madrid	1394	2	10	12.00****
Calle principal	1559	2.50	5	7.5
Estación del ferrocarril	3000	1.50	3.5	5

Notas: * Modelo *Path-Distance*, ** Modelo Digital de Elevación, ***Nivel del agua en la línea de costa, **** Máximo nivel del agua.

Otra marca de agua fue identificada por la avenida principal, en la planicie costera, a 450 m de la línea de costa y a una altura de 5 msnm, alcanzando 2.5 m. Por lo que en este punto se estimó que la inundación alcanzó una altura de 7.5 msnmm. En la estación del ferrocarril, localizada a 3.5 msnmm y a 720 m de distancia de la línea de costa, de acuerdo a la descripción de la Sra. Pachita Gaspar: “...cuando corrieron a treparse como gatos a los vagones del tren, la altura del agua en la estación del ferrocarril, alcanzaba aproximadamente metro y medio” (Gaspar, 2010), indicando que la inundación alcanzó una altura de 5 m en la estación del ferrocarril (Figura II.7).

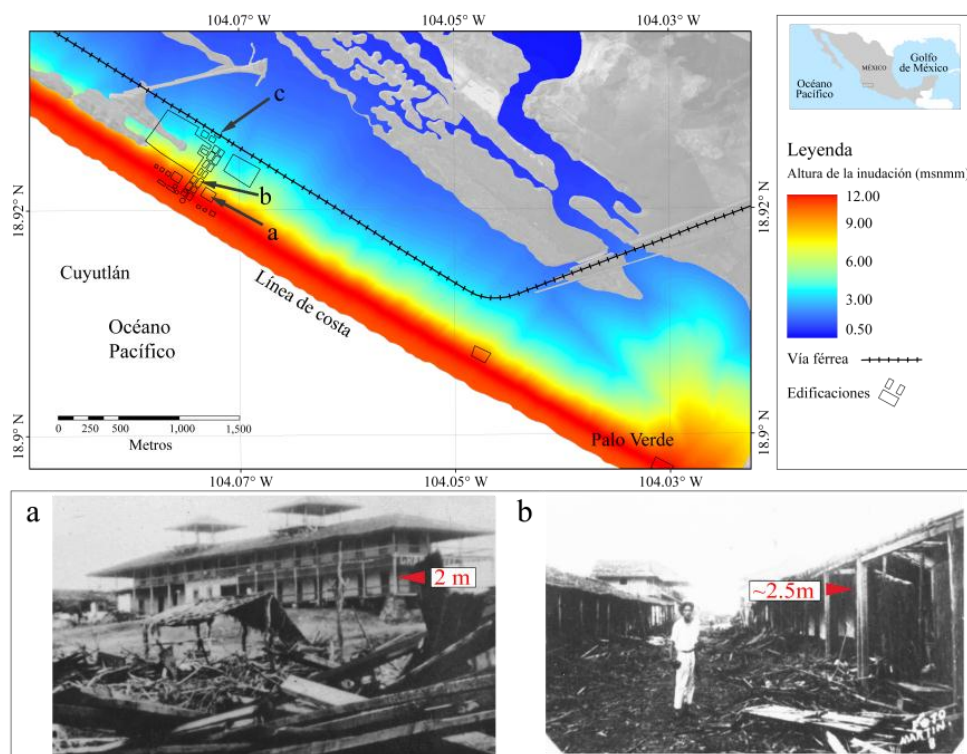


Figura II.7. Modelo de distribución de la altura de la inundación del tsunami del 22 de Junio de 1932, (a) Hotel Madrid, y (b) calle principal (El Informador, 1932c), (c) estación del ferrocarril.

Identificados el nivel de la columna en la línea de costa, el nivel máximo de la columna de agua y la altura de la inundación en algunos puntos de la zona afectada, se realizó un análisis de correlación entre estos y los valores del modelo de *path distance* (PDM) para generar una modelo de interpolación. El coeficiente de correlación resultante de la ecuación de mejor ajuste resultante fue de 0.999 (Ecuaciones 1 y 2), donde y es la altura máxima de inundación interpolada (en metros snmm) y x corresponde a los valores del PDM (en metros).

$$y^{-1} = a + bx^{1.5} + cx^2 \quad (1)$$

Despejando la ecuación 1 tenemos:

$$y = \frac{1}{a + bx^{1.5} + cx^2}, \quad (2)$$

Donde los valores constantes de las ecuaciones 1 y 2 son:

$$a = 0.0833 \quad (3)$$

$$b = -1.45 \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$c = 4.32 \times 10^{-8}, \quad (5)$$

Sustituyendo los valores de x con los valores del PDM fue generado el modelo de distribución de la altura máxima de la inundación (Figura II.7).

Profundidad de la Inundación

La profundidad máxima de inundación durante el tsunami del 22 de junio fue de 12 metros en la línea de costa. En el Hotel Madrid, localizado en la cima de una duna

arenosa a 10 msnm, la profundidad de la inundación alcanzó los 2 m (Farreras & Sanchez, 1991). Respecto a la inundación a una distancia más alejada de la línea de costa, a 750 m, donde se localiza la estación del ferrocarril, la profundidad de la inundación alcanzó 1.5 m (Gaspar, 2010). La inundación se produjo de forma diferenciada en el área de estudio debido a las características del relieve y la altura de las dunas, que en algunos sitios fungió como barrera impidiendo la penetración del frente de agua. Al sureste del pueblo, la altura de las dunas decrece gradualmente hasta llegar a el entonces Rancho de Palo Verde, localizado cerca de la boca del estero de Cuyutlán (Reyes, 2004), Estas variaciones del relieve originaron variaciones en la extensión horizontal de la inundación. Como mínimo la inundación se extendió a una distancia de 500 m de la línea de costa, en los alrededores de la estación de ferrocarril (Salazar, 1985, 1989), y como máximo a una distancia de 3,000 m (Chávez, 1932) de la línea de costa hacia el este del Pueblo (Figura II.8).

El pueblo de Cuyutlán fue inundado totalmente en un lapso de dos minutos, tiempo en que el tsunami alcanzó una distancia de 500 m tierra adentro. Al sureste del pueblo, a 2.5 km de la línea de costa, cerca de una sección de las vías del ferrocarril, la inundación se produjo en un lapso de tres minutos (El Nacional, 1932; Excélsior, 1932c). Considerando estos dos datos, se estima que la velocidad promedio del flujo de agua fue de entre 5 y 5.5 m/s, valores que son consistentes con las velocidades promedio de otros tsunamis, e.g., (Camfield, 1994; Nott, 1997; Titov & Synolakis, 1997; Earthquake Engineering Research Institute, 2011). El modelo continuo de profundidad de la inundación fue generado a partir de la substracción de valores del modelo de altura de inundación respecto a los valores de altura de la superficie, contenidos en el MDE (Figura II.8).

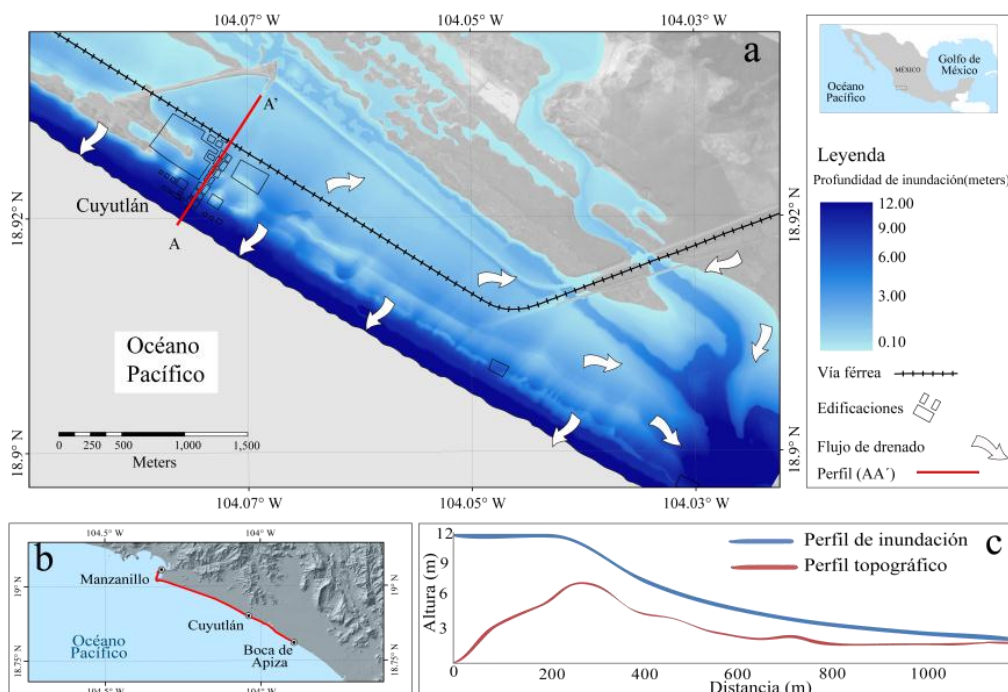


Figura II.8. Modelo de profundidades del tsunami del 2 de Junio de 1932. (a) Mapa de la estimación de los valores de profundidad de la inundación, (b) Extensión de la costa afectada por el tsunami del 2 de Junio de 1932 (National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012), (c) Perfiles topográfico y de inundación (A-A') de la calle principal de Cuyutlán. Flechas blancas, dirección del drenado del tsunami.

La inundación no quedó estancada en la zona, debido que el agua drenó en aproximadamente tres horas. La dirección de drenado tuvo dos direcciones, una por el retorno de la masa de agua que no alcanzó a rebasar las dunas, se reincorporó al océano en poco tiempo, y la otra, se canalizó a través del estero y sus ramificaciones hasta unirse a la desembocadura del río Armería (Farreras & Sanchez, 1991).

Materiales arrastrados por el tsunami

Diferentes materiales fueron transportados por el tsunami, predominantemente arenas, restos de las construcciones y vegetación que cubría el médano, árboles de mezquite y palmeras de coco (Salazar, 1985, 1989; Gaspar, 2010). También se menciona que gran cantidad de fauna marina, peces, fueron arrastrados del fondo del océano y proyectados en todo el pueblo y tan lejos como a las vías del ferrocarril, como lo señala la Señora de la Madrid: “Dice mi papá que venía del pozo... que venía por la vía y el montón de pescados... Mira cuanto pescado vale...” (Madrid, 2010). En menor medida, se arrastraron animales domésticos y ganado vacuno de mayor tamaño. Entre otros, se detalla el arrastre de una camioneta que fue proyectada hasta las vías del tren (Salazar, 1985).

Otros

Muchas fuentes reportan que las personas escucharon un estruendo, un sonido que fue seguido por el retroceso del mar y el consiguiente arribo del tsunami a la costa (Salazar, 1985, 1989; Chávez, 2010; Madrid, 2010; Mojarro, 2010).

Otros datos se refieren a los efectos de los sismos que antecedieron al tsunami, principalmente a los daños en las construcciones. Se menciona que los sismos del 3 y 18 de Junio no ocasionaron daños en las construcciones (Cumming, 1933), por lo tanto se atribuye la destrucción a los efectos del tsunami. Inclusive se menciona que el sismo del 22 de junio no fue percibido por los pobladores de Cuyutlán (Salazar, 1985; Chávez, 2010; Madrid, 2010; Mojarro, 2010). Los entrevistados y las fuentes escritas indican que el movimiento producido por el sismo del 22 de Junio no fue sentido por los residentes (Salazar, 1985; Gaspar, 2010; Madrid, 2010; Mojarro, 2010).

Efectos directos del tsunami

La cantidad de víctimas fue de 50 personas (El Informador, 1932c). La gran mayoría de las muertes ocurrieron a menores de edad (Salazar, 1985). En principio se creía que hubo más víctimas pero como lo comenta el Sr. Vidal Mojarro Vázquez: “...había gente que los daban por ahogados, pero enseguida fueron saliendo, entonces no, no fue mucha la que se ahogó, nooo... se fueron y por el momento decían que se habían ahogado entonces, pero fueron apareciendo después...” (Mojarro, 2010). La cantidad de heridos fue de 67, las causas principales fueron el impacto de los restos de las construcciones y despojos que arrastró el tsunami (El Informador, 1932a). La cantidad total de damnificados, individuos que residían en el pueblo y cuyos bienes fueron afectados, fue el total de habitantes, 1181 personas (Excélsior, 1932b; Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), 2010).

La infraestructura turística localizada entre la playa y las dunas paralelas a la costa fueron las más dañadas. De los siete hoteles, seis fueron destruidos: Ceballos, Santa Cruz # 1, Santa Cruz # 2, Palacio, Zapotlan, Gran Hotel (Figura II.9). Cuatro de las fincas de mayor tamaño construidas de madera fueron destruidas: Finca Chávez, Chalet Aguayo y la Finca Solórzano (Excélsior, 1932c; Salazar, 1989).

II. MAPEO Y RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DEL GRAN TSUNAMI DEL 22 DE JUNIO DE 1932, EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MEXICANO

En general todos los baños de enramada junto a la playa fueron destruidos, no se cuenta con dato exacto. Además el resto de las construcciones de menor tamaño, construidas en su mayoría de tejamanil, tablas de palma con barro y techo de hoja de palma, fueron totalmente destruidas (El Universal Gráfico, 1932; Excélsior, 1932c, 1932b; Salazar, 1989). Aproximadamente 80 viviendas fueron destruidas (Figura II.9).

Las calles que estaban revestidas con empedrado fueron totalmente erosionadas, el tsunami arrancó este recubrimiento y las rocas fueron proyectadas hasta las vías del ferrocarril. Las vías del ferrocarril fueron parcialmente afectadas y bloqueadas con depósitos de arena, y despojos de vegetación. El tramo de las vías del ferrocarril entre el kilómetro 580 y 581 entre Cuyutlán y Colima quedó bloqueado por depósitos de lodo, arena, árboles, peces y desechos de las fincas, (El Informador, 1932e; El Universal Gráfico, 1932; Excélsior, 1932c).

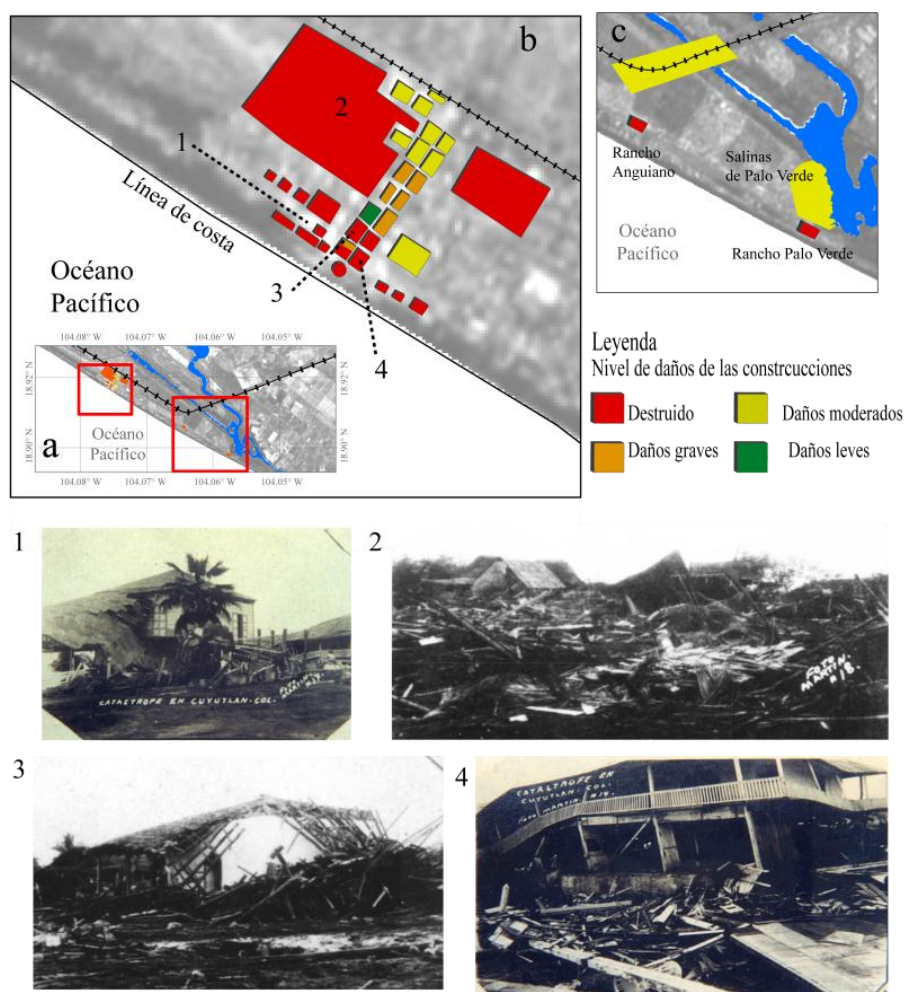


Figura II.9. Efectos directos y nivel de daños de las construcciones. (a) Cuyutlán, los rectángulos corresponden a las áreas de las edificaciones, (b) zona de mayor afectación y nivel de daños de cada edificación. (1) Chalet Aguayo, (2) vista de algunas construcciones destruidas, (3) Hotel Santa Cruz # 1 (El Informador, 1932c), y (4) Hotel Ceballos. (c) Asentamiento cercanos al pueblo de Cuyutlán, Rancho Anguiano y Rancho Palo Verde fueron arrasados, sección del ferrocarril que fue bloqueada con arenas y desechos, pero son daño estructural.

No fue posible calcular el monto y el tipo de bienes materiales que se perdieron. Sin embargo, fue posible rescatar algunos datos referentes a las principales actividades

económicas: turismo e industria de la sal. Los daños en el sector turístico fueron totales, salvo las reparaciones al hotel Madrid, el resto de las edificaciones fueron totalmente destruidas o con daños graves que imposibilitan su restauración. La industria salinera también fue afectada, de las 2,000 toneladas de sal que estaban almacenadas en las bodegas, sólo se pudieron recuperar 300 toneladas (El Informador, 1932d, 1932c; Madrid, 2010; Mojarro, 2010). En la Figura II.9 se presenta el mapa de la distribución de las construcciones y los niveles de daño de cada una de estas.

Efectos indirectos

Uno de los efectos indirectos fue la contaminación de pozos salineros en el rancho Palo Verde. Al respecto uno de los entrevistados menciona: —...Si, pos ta' ese el mentado Palo Verde,...ahí eran suelos salineros, de miembros de éstas Cooperativa, pero como se salió el mar... le metió arena... los mismos dueños de los pozos, si querían; tenían que sacar arena para poder trabajar la sal...” (Mojarro, 2010). En Palo Verde, según las descripciones de (Reyes, 2004), —Antiguamente la laguna se comunicaba con el océano en su extremo sudoriental, a través del estero Palo Verde; esa comunicación se perdió en 1932 a consecuencia del maremoto que tapó definitivamente la boca del estero” (Figura II.10).

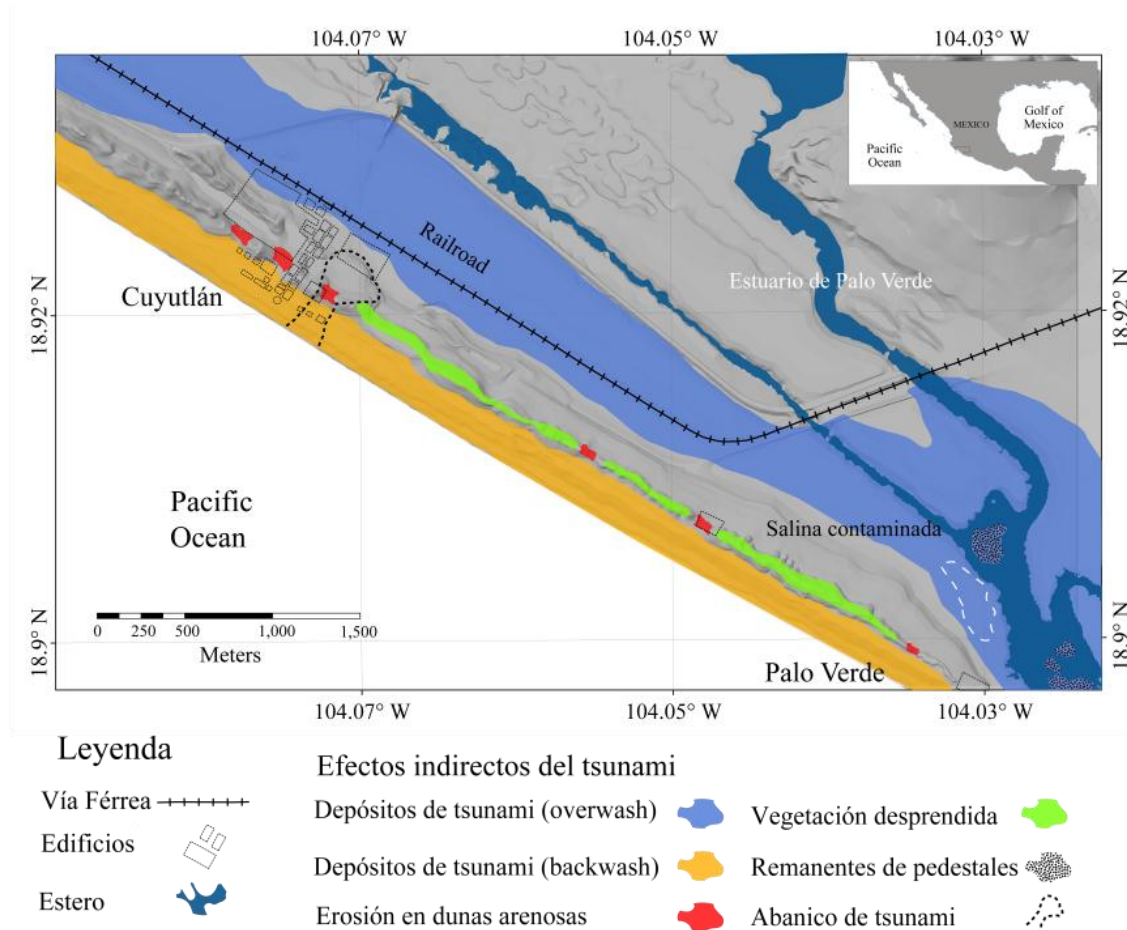


Figura II.10. Mapa de efectos indirectos del tsunami

Las principales zonas donde se identificaron procesos erosivos de remoción de partículas fueron los cordones de dunas costeras (El Informador, 1932f; Salazar, 1989; Chávez, 2010; Mojarro, 2010). Al comparar las descripciones de los entrevistados y los relatos de prensa con los rasgos geomorfológicos de la zona de estudio, se identificaron

segmentos del cordón de dunas que fueron erosionados. Las arenas y los materiales lavados por el tsunami se depositaron en las zonas de menor pendiente, correspondientes a las llanuras costeras y el margen exterior del estuario, en las zonas de marisma, (El Informador, 1932a; Excélsior, 1932a; Salazar, 1985, 1989; Chávez, 2010; Madrid, 2010). Por otro lado, en el proceso de retorno del tsunami al océano en las secciones de playa, se depositaron gran cantidad escombros de las construcciones que fueron destruidas, así como, árboles, peces y cuerpos de personas y animales (Figura II.10).

Intensidad del tsunami

Para asignar el valor de intensidad del tsunami del 22 de junio de 1932 se usó la escala de intensidades Papadopoulos & Imamura (2001). Consiste en una escala de valoración cualitativa de los efectos del tsunami en la población, los objetos y las construcciones. Al comparar las características de cada nivel de intensidad se encontró que el tsunami del 22 de junio de 1932 tuvo una intensidad VIII. En la Tabla II.3 se presenta el listado de las características de un tsunami de esta intensidad, el texto subrayado indica los rasgos que se presentaron en Cuyutlán.

Tabla II.3. Características de un tsunami de intensidad VIII según la escala de Papadopolous & Imamura (2001).

Elementos considerados	Descripción
Efectos en la población	<u>Todas las personas escapan a lugares altos, pocos son arrastrados.</u>
Efectos en objetos	La mayoría de las embarcaciones pequeñas son dañadas, muchas son arrastradas. Las embarcaciones medianas son movidas mar adentro y chocan entre ellas. <u>Grandes objetos son proyectados. Erosión y deposición de materiales en la playa. Inundaciones extensivas. Ligeros daños en bosques, semáforos. Mucha fauna marina es arrasada,</u> e infraestructura acuícola parcialmente dañada.
Daño en las construcciones	<u>La mayoría de las construcciones de madera son arrastradas o demolidas.</u> Daños de 2do. grado en pocas construcciones de ladrillo. La mayor parte de las construcciones de concreto reforzado soportan los daños, en menor medida se presentan daños de grado 1 y <u>se observan inundaciones.</u>

Notas: En la descripción se subrayan los efectos reportados en Cuyutlán a causa del tsunami del 22 de junio de 1932.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La reconstrucción del tsunami del gran tsunami de 1932 mediante el análisis de datos históricos ayudó a determinar que el 22 de Junio de 1932 el nivel de mar se encontraba en su nivel más alto debido a la subsidencia producida por el sismo de $M_s=8.2$ del 3 de Junio; previo al tsunami se presentó el fenómeno de retroceso del nivel del mar. Las alturas de inundación fueron de por lo menos 12 m, la inundación producida por el

tsunami presentó variaciones en el terreno debido a las condiciones topográficas locales. Estas variaciones fueron estimadas a partir de la lectura e interpretación de elementos observados en fotografías del desastre, y pueden acarrear un error de estimación de +/- 10 cm, debido a la nitidez de las imágenes.

Los modelos empleados para extrapolar la distribución de la inundación se basó en cuatro puntos de control bien definidos (Tabla II.2), y la selección de la mejor ecuación de ajuste permitieron generar un mapa de la distribución de los niveles de altura y profundidad de la inundación. El tsunami invadió una franja de la costa de espesor variable, de entre 450 y 3,000 m en un periodo de entre 2 y 3 minutos, produciendo una inundación que cedió en tres horas. Se construyó un modelo simple para determinar los patrones de distribución de la inundación que se basa en los pocos datos disponibles. Este modelo no contempla las condiciones topográficas previas al tsunami ni los cambios morfológicos que se produjeron después de este, simplemente debido a que no existen datos topográficos detallados para esta zona en particular, previos al 22 de Junio de 1932. El modelo propuesto no pretende sustituir a los complejos modelos hidrodinámicos, sólo ofrecer una alternativa relativamente simple que ayude a inferir los patrones de distribución de inundación en lugares y situaciones en donde no se cuenten con los datos, recursos o información requerida para efectuar modelos más complejos.

La reconstrucción de las características físicas del tsunami hizo posible rescatar y elucidar la probable zona de origen y mecanismos de generación del tsunami. Más probablemente asociada a un deslizamiento submarino que fue detonado por la intensa actividad sísmica del mes de Junio de 1932. El hecho de que los sismos de mayor magnitud de esa serie, el 3 y 18 de junio, no produjeron un tsunami de la magnitud del 22 junio. Estos sismos pudieron contribuir a desestabilizar paquetes de sedimentos depositados en las laderas de cañones submarinos (Figura II.6) los cuales pudieron ser detonados por el sismo del 22 de Junio. En este sentido, dada la localización del Cañón submarino y las observaciones respecto a la dirección de propagación del tsunami de Cumming (1933) cobran sentido al ubicar la fuente del tsunami en el interior del cañón submarino del frente al río Armería. Sin embargo, estos argumentos no son suficientes explicar los mecanismos de generación del tsunami. El mecanismo de generación del tsunami de 22 de Junio permanece indefinido, se requiere mucho más trabajo para determinarlo y la aplicación de otras técnicas.

En materia de prevención de desastres, demostrar que el mecanismo de generación estuvo asociado a procesos de remoción en masa implica que el peligro de tsunamis no se limita a la actividad sísmica, que los modelos probabilísticos de generación de tsunamis basados en datos sísmicos no son suficientes para prospectar la ocurrencia de tsunamis, que sismos no tsunamigénicos podrían detonar tsunami-deslizamientos; que los esquemas de evaluación de peligro escapan a los alcances de los sistemas de alerta contra tsunamis. Como los datos histórico-etnográficos sugieren, el sismo no fue percibido por los habitantes de Cuyutlán, esto menguó considerablemente sus posibilidades para responder oportunamente a la amenaza de tsunami. Por otro lado, los tsunamis originados por deslizamientos submarinos pueden generar con alturas de ola mayores que aquellos generados por causas sísmicas y los tiempos de arribo llegan a reducirse drásticamente; ambas condiciones amplifican las dimensiones del desastre.

Las características del tsunamis se ajustan a un tsunami de intensidad VIII en la escala de Papadopoulos & Imamura (2001). En esta investigación fue posible determinar parte de los daños económicos y los daños en la infraestructura, determinar el número de muertos y heridos, y los cambios producidos por el tsunami en el paisaje. Además de

determinar, mediante un modelo relativamente simple dos de los principales elementos que se emplean en la evaluación de peligro por tsunamis, la altura y profundidad de la inundación.

Los graduales cambios producidos por las actividades antropogénicas después del tsunami de 1932 (e.g. plantaciones de coco, nueva infraestructura y edificaciones) dificultaron la caracterización geomorfológica de los efectos del tsunami (Goff, *et al.*, 2008). Sin embargo, en la interpretación se identificaron algunas geoformas características de los ambientes afectados por tsunamis. Se identificaron abanicos de tsunami asociados a procesos erosivos de remoción-depositación al ingreso del flujo del tsunami, varios segmentos rotos del cordón dunas paralelo a la costa, algunos probables remanentes de pedestales en el interior del estero una distancia de entre 400 850 m de la línea de costa, detrás del Rancho de Palo Verde. En las llanuras costeras localizadas tierra adentro, hacia las vías del ferrocarril una topografía rugosa (*hummocky topography*) en una probable zona de deposición de sedimentos marinos (Goff, *et al.*, 2007; Goff, *et al.*, 2008; Goff, *et al.*, 2009; Goff, 2011), estos elementos se presentan en la Figura II.10. A grandes rasgos, el gran tsunami de Cuyutlán de 1932 presenta rasgos característicos de un evento gran magnitud, con 10 m de altura de tsunami (Goff, *et al.*, 2007).

Las aproximaciones históricas han probado su potencia en la reconstrucción de diferentes tipos de fenómenos naturales (Gianfreda, *et al.*, 2001; Glade, *et al.*, 2001; Pelinovsky, *et al.*, 2001; Kates, *et al.*, 2006; Ribera, *et al.*, 2011), las aproximaciones etnográficas no son suficientes cuando no se dispone de fuentes escritas y cuando la mayoría de los testigos oculares no viven más; en estos casos, otras técnicas tienen que ser aplicadas. En este sentido, son claras las limitaciones en la reconstrucción histórica de tsunamis dados que los largos periodos de ocurrencia de estos fenómenos que a menudo trascienden los registros históricos.

La importancia del rescate del testimonio de los sobrevivientes y la tradición oral, a menudo olvidada, combinada con la revisión de archivos y el uso de SIG han probado ser una combinación de herramientas útiles en la interpretación de las características físicas y el comportamiento del gran tsunami de 1932. Esta información es fundamental en los programas de planeación para la prevención de peligros naturales, regulación de uso de suelo, códigos de construcción, programas de evacuación y estrategias de prevención.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a Pedro Urquijo por la asesoría y capacitación y participación en el levantamiento de entrevistas a sobrevivientes. A GTT Imagining por facilitar las imágenes WorldView 2 de alta resolución, particularmente a la Geógrafo Sedna Monter.

REFERENCIAS

- Ambraseys, N. N. (1979). A test case of historical seismicity: Is-fahan and Chahar Mahal, Iran. *The Geographical Journal*, 145 (1), 56-71.
- Ambraseys, N. N. (1995). Magnitudes of Central American earthquakes 1898–1930. *Geophysical Journal International*, 121 (2), 545-556.
- Ambraseys, N. N., & Adams, R. D. (1996). Large-magnitude Central American earthquakes, 1898–1994. *Geophysical Journal International*, 127 (3), 665-692.

- Astiz, L., & Kanamori, H. (1984). An earthquake doublet in Ometepec, Guerrero, Mexico. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 34, 24-45.
- Barnikel, F. (2004). The value of historical documents for hazard zone mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 599-613.
- Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llasat, M.-C., Naulet, R., Lemaitre, F., & Barrera, A. (2003). Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 583-592.
- Calcaterra, D., Parise, M., & Palma, B. (2003). Combining historical and geological data for the assessment of the landslide hazard: a case study from Campania, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 3-16.
- Camfield, F. E. (1994). Tsunami effects on coastal structures. *Journal of Coastal Research*, 12 (Special Issue), 177-187.
- Casanova, L. (2002). *Topografía Plana*. Taller de Publicaciones de Ingeniería-ULA, Mérida.
- Cruz, G., & Wyss, M. (1983). Large earthquakes, mean sea level, and tsunamis along the Pacific Coast of Mexico and Central America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73 (2), 553-570.
- Cumming, J. L. (1933). Los terremotos de Junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco. *Universidad de México*, 31-32, 68-104.
- Chávez, L. (1932). Dramático relato de la reciente catástrofe del balneario de Cuyutlán. In *El Nuevo Mexicano* (pp. 2). El Nuevo Mexicano, Santa Fe, Nuevo Mexico.
- Chávez, M. (2010). *Entrevista de su vivencia del día que el mar se salió*. 10 de Noviembre de 2010, Conducida por: Corona, N., Colima, Colima.
- Denscombe, M. (2003). *The Good Research Guide: for small-scale social research projects*. Open University Press, Maidenhead/Philadelphia.
- Earthquake Engineering Research Institute. (2011). The Tohoku, Japan, Tsunami of March 11, 2011: Effects on Structures. In *Special Earthquake Report* (pp. 1-14). Earthquake Engineering Research Institute.
- Eissler, H. K., & McNally, K. C. (1984). Seismicity and Tectonics of the Rivera Plate and Implications For the 1932 Jalisco, Mexico, Earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 89 (B6), 4520-4530.
- El Informador. (1932a). Cuyutlán a punto de desaparecer bajo las aguas del Océano Pacífico. In *El Informador* (5314 ed., Vol. XV-XL, pp. 1-2). El Informador, México.
- El Informador. (1932b). Cuyutlán a punto de desaparecer bajo las aguas del Océano Pacífico. In *El Informador* (5314 ed., Vol. XV/XL, pp. 1-2). El Informador, México.
- El Informador. (1932c). Gráficos del estado en que quedo el famoso balneario de Cuyutlán, Col. In *El Informador* (5317 ed., Vol. XV/LV, pp. 1). El Informador, México.
- El Informador. (1932d). Han sido formidables los recientes terremotos. In *El Informador* (5319 ed., Vol. XV/LV, pp. 4). El Informador, México.

- El Informador. (1932e). La catástrofe ocurrida anteayer en Cuyutlán no tiene precedente. In *El Informador* (5315 ed., Vol. XV/LV, pp. 1-2). El Informador, México.
- El Informador. (1932f). Las victimas de Cuyutlán arrojan un saldo de doce muertos In *El Informador* (5319 ed., Vol. XV/LV, pp. 6). El Informador, México.
- El Nacional. (1932). Todo cuanto encontró a su paso arrasó furiosamente el mar. In *El Nacional* (pp. 1).
- El Universal Gráfico. (1932). En Cuyutlán no quedó piedra sobre piedra. In *El Universal Gráfico* (3578 ed., Vol. XI, pp. 15). El Universal Gráfico, México.
- EM-DAT. (2011). Disaster Profiles. In.
- Excélsior. (1932a). Cuyutlán arrasado por la invasión del océano: gigantescas olas arrasaron las casas y la gente. In *Excélsior* (5560 ed., Vol. XVI, pp. 1, 4). Excélsior, México.
- Excélsior. (1932b). Mil doscientos huyen hacia Colima. In *Excélsior* (5561 ed., Vol. III, pp. 3). Excélsior, México.
- Excélsior. (1932c). Tres minutos fueron suficientes para arrasar el balneario de Cuyutlán. In *Excélsior* (5562 ed., Vol. III, pp. 1,3). Excélsior, México.
- Farreras, S. F., & Sanchez, A. J. (1991). The tsunami threat on the Mexican west coast: A historical analysis and recommendations for hazard mitigation. *Natural Hazards*, 4 (2), 301-316.
- Fliri, F. (1998). *Naturchronik von Tirol*. Universit tsve rlag Wagner, nnsbruck.
- Gaspar, P. (2010). *Entrevista de su vivencia del día que el mar se salió*. 10 de Noviembre de 2010, Conducida por: Corona, N., Cuyutlán, Colima.
- Gianfreda, F., Mastronuzzi, G., & Sansò, P. (2001). Impact of historical tsunami on a sandy coastal barrier: an example from the northern Gargano coast, southern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1, 213-219.
- Glade, T., Albin, P., & Frances, F. (2001). The use of historical data in natural hazards assessment. In. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Goff, J., McFadgen, B., Wells, A., & Hicks, M. D. (2008). Seismic signal in coastal dune systems. *Earth Science Review*, 89, 73-77.
- Goff, J. A. (2011). Evidence of previously unrecorded local tsunami, 13 April, 2010, Cook Islands: implications for Pacific Island Countries. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1371-1379.
- Goff, J. R., Hicks, M. D., & Hurren, H. (2007). Tsunami geomorphology in New Zealand: a new method for exploring the evidence of past tsunamis. In *NIWA technical report* (Vol. 18, pp. 69). NIWA Wellington.
- Goff, J. R., Lane, E., & Arnold, J. (2009). The tsunami geomorphology of coastal dunes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 847-854.
- Gonzalez, J. I. (2010). MAR V0.9 2010. In. CICESE, Ensenada, Mexico.
- Gregory, I., & Ell, P. (2007). *Historical GIS: Technologies, Methodologies and Scholarship*. Cambridge University Press, New York.
- Hernández, F. (2009). *El Colima de ayer* (4th. ed.). Universidad de Colima, Colima.

- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. In. INEGI, Mexico.
- Intergovernmental Oceanographic Commission. (2008). *Tsunami, The Great Waves*. UNESCO, Paris.
- Kanamori, H. (2006). Lessons from the 2004 Sumatra–Andaman earthquake. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 364 (1845), 1927-1945.
- Kates, R. W., Colten, C. E., Laska, S., & Leatherman, S. P. (2006). Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: A research perspective. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103 (40), 14653-14660
- Kovalerchuk, B. (2004). Visual Correlation Methods and Models. In B. Kovalerchuk & J. Schwing (Eds.), *Visual and Spatial Analysis: Advances in Data Mining, Reasoning, and problem Solving* (pp. 175-207). Springer, Netherlands.
- Lagos, M., & Cisternas, M. (2008). El Nuevo Riesgo de Tsunami Considerando el Peor Escenario. In *Actas del X Coloquio Internacional de Geografía: Diez años de cambios en el mundo, en la geografía y en las ciencias sociales, 1999-2008*, Barcelona.
- Levin, B., & Nosov, M. (2009). *Physics of Tsunamis*. Springer, Russia.
- Liseikin, V. D. (2010). *Grid Generation Methods*. Springer, Russia.
- Lübken, U., & Mauch, C. (2011). Uncertain Environments: Natural Hazards, Risk and Insurance in Historical Perspective. *Environment and History*, 17 (1), 1-12.
- Luhr, J. F., Nelson, S. A., Allan, J. F., & Carmichael, I. S. E. (1985). Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology*, 13 (1), 54-57.
- Llasat, M.-C., Barriendos, M., Barrera, A., & Rigo, T. (2005). Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology*, 313 (1-2), 32-47.
- Madrid, I. (2010). *Entrevista de su vivencia del día que el mar se salió*. 10 de Noviembre de 2010, Conducida por: Corona, N., Cuyutlán, Colima.
- Mimura, N., Yasuhara, K., Kawagoe, S., Yokoki, H., & Kazama, S. (2011). Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami - A quick report. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16 (7), 803-818.
- Mojarro, V. (2010). *Entrevista de su vivencia del día que el mar se salió*. 10 de Noviembre de 2010, Conducida por: Corona, N., Cuyutlán, Colima.
- Murchison, J. M. (2010). *Ethnography Essentials: Designing, conducting, and presenting your research*. Jossey-Bass, San Francisco, United States of America.
- National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration. (2012). NOAA/WTC Tsunami Event Database. In (Vol. 2011), Boulder, CO, USA.
- Naulet, R., Lang, M., Coeur, D., & Gigon, C. (2001). Collaboration between historians and hydrologists on the Ardeche River (France). In T. Glade, P. Albini & F.

- Frances (Eds.), *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments* (pp. 113-129). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Nixon, G., T. (1982). The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 93 (6), 514-523.
- Nott, J. (1997). Extremely high-energy wave deposits inside the Great Barrier Reef, Australia: determining the cause—tsunami or tropical cyclone. *Marine Geology*, 141 (1-4), 193-207.
- Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL). (2011). Historical Tsunami Database for the World Ocean (HTDB/WLD). In (2011 ed.). Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia.
- O'Sullivan, D., & Unwin, D. (2003). *Geographic Information Analysis*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Okal, E. A., & Borrero, J. C. (2011). The 'tsunami earthquake' of 1932 June 22 in Manzanillo, Mexico: seismological study and tsunami simulations. *Geophysical Journal International*, 187 (3), 1443-1459.
- Orfanogiannaki, K., & Papadopoulos, G. A. (2007). Conditional probability approach of the assessment of tsunami potential: Application in three tsunamigenic regions of the Pacific Ocean. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 593-603.
- Oseguera-Velázquez, J. O. (1967). *Colima en panorama: monografía histórica, geográfica, política y sociológica*. Impr. Al libro mayor, Colima, México.
- Papadopoulos, G. A., & Imamura, F. (2001). A proposal for a new tsunami intensity scale. In *ITS* (pp. 569-577), Seattle.
- Pedersen, G. (2008). Modeling Runup with Depth Integrated Equation Models. In P. L. F. Liu, H. Yeh & C. Synolakis (Eds.), *Advances numerical models for simulating tsunami waves and runup* (pp. 3-42). World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- Pelinovsky, E., Kharif, C., Riabov, I., & Francuis, M. (2001). Study of tsunami propagation in the Ligurian Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1, 195-201.
- Pfister, C. (1999). *Wetternachhersage, 500 jahre Klimavarioationen und Naturkatastrophen*. Haupt, Bern.
- Ramírez-Herrera, M. T., Kostoglodov, V., Summerfield, M., Urrutia-Fucugauchi, J., & Zamorano, J. (1999). A reconnaissance study of the morphotectonics of the Mexican subduction zone. *Annals of Geomorphology*, 118, 207-226.
- Ramírez-Herrera, M. T., Kostoglodov, V., & Urrutia-Fucugauchi, J. (2010). Overview of Recent Coastal Tectonic Deformation in the Mexican Subduction Zone. *Pure and Applied Geophysics, Manuscript Number PAAG-320*.
- Reyes-Garza, J. C., & Leytón-Ovando, R. (1992). Cuyutlán : una cultura salinera. In U. Veracruzana (Ed.), *La Palabra y el Hombre* (Vol. 81, pp. 121-146). Universidad Veracruzana, Veracruz, México.
- Reyes, J. C. (2004). *Sal, el oro blanco de Colima*. Gobierno del Estado de Colima/Secretaría de Cultura, Colima, México.

- Ribera, P., Gallego, D., Pena-Ortiz, C., Del Rio, L., Plomaritis, T. A., & Benavente, J. (2011). Reconstruction of Atlantic historical winter coastal storms in the Spanish coasts of the Gulf of Cadiz, 1929–2005. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1715-1722.
- Salazar, J. (1985). Una Montaña de Agua. In *Diario de Colima* (941 ed., Vol. 941, pp. 2-3). Diario de Colima, Colima.
- Salazar, J. (1989). *El maremoto de Cuyutlán, 1932*. Sociedad Colimense de Estudios Históricos, Colima, México.
- Sánchez, A. J., & Farreras, S. F. (1993). *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México*. National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.
- Satake, K., & Atwater, B. F. (2007). Long-Term Perspectives on Giant Earthquakes and Tsunamis at Subduction Zones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 349-374.
- Satake, K., Okal, E. A., & Borrero, J. C. (2007). Tsunami and its Hazard in the Indian and Pacific Oceans: Introduction. *Pure and Applied Geophysics*, 164 (2), 249-259.
- Secor, A. J. (2010). Social surveys, interviews, and focus groups. In B. Gomez & J. P. Jones III (Eds.), *Research methods in geography: a critical Introduction* (pp. 194-205). Wiley-Blackwell, Singapore.
- Singh, S. K., Astiz, L., & Havskov, J. (1981). Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: A reexamination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71 (3), 827-843.
- Singh, S. K., Pacheco, J. F., & Shapiro, N. (1998). The earthquake of 16 November, 1925 ($M_s=7.0$) and the reported tsunami in Zihuatanejo, Mexico. *Geofísica Internacional*, 37 (001), Short Note.
- Singh, S. K., Ponce, L., & Nishenko, S. P. (1985). The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera plate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75 (5), 1301-1313.
- Stein, S. (2006). Limitations of a Young Science. *Seismological Research Letters*, 77 (3), 351-353.
- Stein, S., & Okal, E. A. (2007). Ultralong Period Seismic Study of the December 2004 Indian Ocean Earthquake and Implications for Regional Tectonics and the Subduction Process. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (1A), S279-S295.
- Titov, V. V., & Synolakis, C. E. (1997). Extreme Inundation Flows During the Hokkaido-Nansei-Oki Tsunami. *Geophysical Research Letters*, 24 (11), 1315-1318.
- Wagner, K., & Suda, M. (2004). Natural hazards in the perspective of the public: A big black box. In *Internationales Symposium zum Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser* (Vol. 4 pp. 285–296). Lawinen und Hangbewegungen, Muren.
- Walliman, N. (2006). *Social Research Methods*. GAGE Publications, London.

- Wang, P., & Zhang, D. (1988). An introduction to some historical governmental weather records of China. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 69, 753-758.
- Yanagisawa, K., Imamura, F., Sakakiyama, T., Annaka, T., Takeda, T., & Shuto, N. (2007). Tsunami assessment for risk management at nuclear power facilities in Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 565–576.
- Zhan, C., Menon, S., & Gao, P. (1993). A directional path distance model for raster distance mapping. *Lecture Notes in Computer Science*, 716, 434-443.

CAPÍTULO III

REVELANDO EL ORIGEN DEL GRAN TSUNAMI DEL 22 DE JUNIO DE 1932 EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MEXICANO

REVELANDO EL ORIGEN DEL GRAN TSUNAMI DEL 22 DE JUNIO DE 1932 EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO MEXICANO.

Corona, N.¹, Ramírez-Herrera, M.T.^{1,2},

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México. ncorona@pmip.unam.mx

²Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México. mtramirez@ciga.unam.mx

ABSTRACT

On June 22, 1932 a tsunami with wave height >10 m struck ~60 km of the Pacific Mexican coast. Its origin and causal mechanisms were previously unclear. Historic documents, survivor testimony, tsunami catalogs, post-tsunami survey and modeling aid in identifying the cause and mechanism of the event. Several scenarios of tsunami generation and propagation were modeled based on a rotational submarine landslide to identify a behavioral pattern similar to what was observed and recorded with this tsunami event. We determined the elapsed time between the seismic event and the arrival of the tsunami wave to be approximately 5-9 min, the direction from which the wave train originated SSE-NNW, the mayor affected area ~26km, and the maximum height of the tsunami ~11.6 m. The determined maximum tsunami wave height, tsunami arrival time and affected land area suggest that the causal mechanism was, in fact, a rotational submarine landslide, that originated several kilometers to the east of the epicenter of the June 22 event and no more than 20km southeast of Cuyutlán, in the submarine canyon facing the Armería River.

RESUMEN

El 22 de Junio de 1932 un tsunami golpeó cerca de 60 km de la costa del Pacífico Mexicano, en algunos lugares arribó con olas de más de 10 m de altura. Su origen y los mecanismos que lo desataron habían sido poco claros. Mediante la revisión de archivos históricos, testimonios de sobrevivientes, catálogos de tsunamis, trabajo de campo y modelación numérica se definieron sus mecanismos de generación y su probable localización. Algunos escenarios de generación y propagación de este tsunami fueron modelados usando como mecanismo de generación las características de un deslizamiento submarino rotacional con la intención de comparar el patrón de comportamiento de estos modelos respecto a lo que fue observado y registrado. Se determino que el tiempo transcurrido entre el sismo del 22 de junio de 1932 y el tiempo de arribo de la primera ola del tsunami fue de entre 5 y 9 min, la dirección de propagación de tren de ondas fue con rumbo SSE-NNW, en Cuyutlán, el área de mayor afectación fue de cerca de 26 km, y la altura máxima del tsunami de 11.6 m, en Cuyutlán. La determinación de la altura máxima, el tiempo de arribo y la superficie afectada sugieren que el mecanismo de generación del tsunami estuvo más probablemente asociado a un deslizamiento submarino rotacional. El análisis también sugiere que el tsunami se originó a algunos kilómetros al este del epicentro del sismo y a no más de 20 km al sureste de Cuyutlán, en el interior del cañón submarino localizado frente al Río Armería.

INTRODUCCIÓN

El tsunami del 22 de Junio de 1932 ocurrió en un periodo de fuerte actividad sísmica (Ordoñez, 1933), y tsunamigénica (Farreras & Sanchez, 1991; Sánchez & Farreras, 1993), ver Figura III.1. El 22 de Junio de 1932, a las 7:00 (UTC-6) se produjo un sismo de magnitud $M_s = 6.9$ cuyo epicentro se localizó a 86 km de la Bahía de Manzanillo (Soloviev & Go, 1975; Singh, *et al.*, 1981; Cruz & Wyss, 1983; Singh, *et al.*, 1985; Farreras & Sánchez, 1991; Sánchez & Farreras, 1993; Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2011). Posterior al sismo, un tsunami golpeó la costa del estado de Colima, desde la Bahía de Manzanillo hasta por lo menos las Salinas del Guasango (Sánchez & Farreras, 1993), penetrando hasta 2 km en algunos segmentos de la costa, y en algunos puntos de la costa alcanzó una altura máxima de entre 10 -12 m, registrado en Cuyutlán (El Universal Gráfico, 1932b; Excélsior, 1932a; Soloviev & Go, 1975; Salazar, 1985; Sánchez & Farreras, 1993). El tsunami dejó un saldo de 50 muertes, cerca de 1,500 personas afectadas (El Informador, 1932b; El Universal Gráfico, 1932a; Excélsior, 1932c; Ordoñez, 1933) y la destrucción total de varias comunidades costeras (Chávez, 1932; Cumming, 1933).

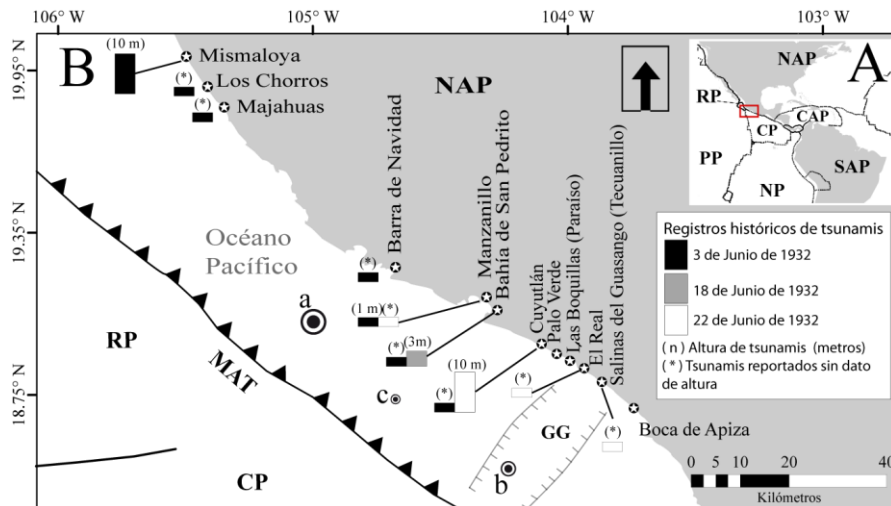


Figura III.1. A) Tectónica Regional; B) Sismo-tectónica local y serie de sismos y tsunamis ocurridos en Junio de 1932. MAT, Trinchera Mesoamericana, Placa de Rivera; CP, Placa de Cocos; GG, Graben el Gordo; NAP, Placa Norteamericana; PP, Placa del Pacífico; CAP, Placa del Caribe; SAP, Placa Sudamericana; NP, Placa de Nazca. a) y b) Epicentros de los sismos del del 3 y 18 de junio (Cumming, 1933), c) Epicentro del sismo del 22 de junio (Servicio Sismológico Nacional, 2011). Los gráficos de barras junto a los nombres de las localidades indican la altura máxima registrada del tsunamis (National Geophysical Data Center, 2011).

El mecanismo de generación del tsunami del 22 de junio aún no ha sido definido (Singh, *et al.*, 1985). Parte de las incógnitas se refieren al hecho de que a pesar de que la magnitud del sismo del 22 de junio fue relativamente pequeña, (Okal & Borrero, 2011) haya generado olas con alturas máximas 10-12 m (Farreras & Sanchez, 1991). Hasta la fecha se han propuesto dos hipótesis del mecanismo de generación: 1) sísmica (Sánchez & Farreras, 1993; Singh, *et al.*, 1998; Okal & Borrero, 2011; National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012), y 2) por deslizamiento submarino (El Informador, 1932a; Excélsior, 1932b; Cumming, 1933).

Hasta ahora, estas dos hipótesis asociadas a este tsunami no habían sido probadas o desaprobadas. El presente estudio ofrece argumentos que prueban la hipótesis del deslizamiento submarino basados en observaciones que fueron registradas en documentos históricos, patrones de comportamiento de tsunamis generados por este mecanismo y la utilización de dos niveles de modelación numérica, el primero para establecer la zona de generación del deslizamiento y el segundo incorpora aspectos detallados de la dinámica de generación de tsunamis por deslizamiento y como este explica el comportamiento del tsunami del 22 de Junio de 1932.

MÉTODOS

Con el fin de deducir la localización de probable deslizamiento submarino que desencadenó el tsunami del 22 de junio de 1932, se revisaron registros históricos, para detectar información referente al tiempo de arribo del tsunami (TAT) y se realizaron observaciones en campo (Murty, 1979; Kulikov, *et al.*, 1996; Tappin, *et al.*, 1999; Tappin, *et al.*, 2001). A partir de esta información, se diseñó el modelo de propagación inversa del tsunami (BPTM) considerando a Cuyutlán como el centro de propagación la fuente del tsunami. La velocidad de propagación del tsunami fue definida como la raíz cuadrada de la constante gravitacional multiplicada por la profundidad del océano (Levin & Nosov, 2009). Los datos batimétricos fueron tomados del modelo de Ryan, *et al.* (2009) mediante el software *GeoMapApp 3.0.1* con una resolución espacial de $\sim 200 \times 200$ m. El BPTM se completó utilizando el comando de cost-distance con el software de *ArcGis* (Figura III.2).

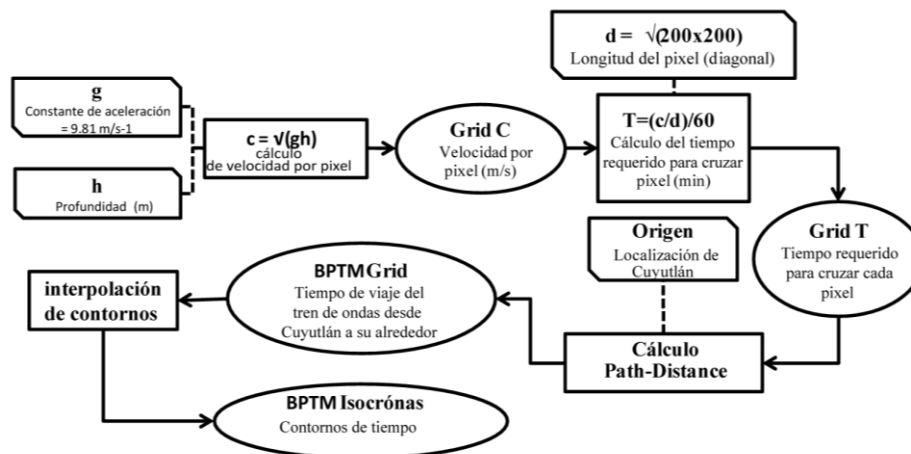


Figura III.2. Diagrama de flujo del modelo BPTM.

Basados en el reporte técnico post-tsunami de Cumming (1933), se escogió el cuadrante sureste (SE) del modelo BPTM para inferir la localización del foco generador del tsunami. En esta región desemboca el Río Armería, formando un cañón submarino que se desarrolla a partir de la plataforma continental, en donde predomina un ambiente dinámico de depositación de sedimentos terrígenos (Ramírez-Herrera *et al.*, 1999). Litológicamente el interior del cañón submarino está definido por lodos, arcillas y pequeñas cantidades de arenas y areniscas (Coulbourn *et al.*, 1982) que forman paquetes de sedimentos de entre 400 y 500 m de espesor (Divins, 2003). Este conjunto de factores posibilitan la generación de deslizamientos submarinos rotacionales (*slumps*) al ocurrir un evento

detonante, i.e., sismos, tormentas, perturbaciones en las corrientes marinas, entre otros (Einsele, 1992; Lee *et al.*, 2009; Yamada *et al.*, 2012).

Para estimar la altura máxima del tsunami en la costa, el tiempo de arribo y la superficie de costa con mayor afectación, se emplearon los códigos de modelación *GEOWAVE* y *FUNWAVE*, debido a sus probadas capacidades para modelar tsunamis generados por deslizamiento submarinos (Watts, *et al.*, 2003). El tsunami del 22 de junio fue modelado usando varias combinaciones de fuentes tsunamigénica desencadenadas por dos eventos consecutivos: 1) El sismo de 6.9 Ms (Singh, *et al.*, 1985); ver la Tabla 1, y 2) un hipotético deslizamiento submarino que fue detonado 10 segundos después del sismo, tiempo inferido de a cuerdo a los datos recabados en la estación de Manzanillo (Singh, *et al.*, 1985).

La masa de los deslizamientos y sus dimensiones geométricas no fueron directamente medidas debido a la baja resolución de los datos batimétricos junto con la escasez de datos detallados de geología marina en la zona de estudio. De cualquier forma, las variables de distancia, extensión y pendientes (Tabla 2) empleados en los escenarios modelados se encuentran dentro de los rangos numéricos observados por Grilli & Watts (2005), Watts *et al.* (2005) en sus modelos predictivos de generación de tsunamis por deslizamientos rotacionales submarinos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tiempo reportado de arribo del tsunami y localización del deslizamiento

Cuyutlán es la única localidad con registros de TAT, se señala que el tiempo transcurrido entre la ocurrencia del sismo y el arribo del tsunami a la costa fue de 5 min (Salazar, 1985, 1989; Pachita Gaspar, sobreviviente del tsunami del 22 de junio de 1932). En el modelo BPTM, los cálculos indican que desde el epicentro del sismo y la costa de Cuyutlán se presenta un intervalo de 17 min (Figura III.3). Por otro lado, el radio de 5 min del modelo BPTM indica que el fuente se debió localizar a una distancia no mayor a 20 km. (Figura III.3).

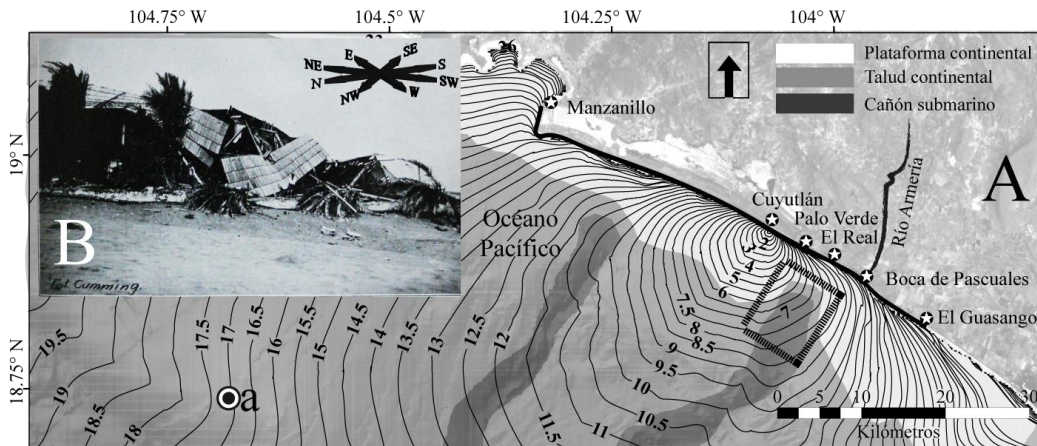


Figura III.3 A) Modelo BPTM con isocrónas a intervalos de 0.5 min., Se incluye el perfil morfológico regional modificado de Lugo-Hubp and Córdova (1990), las localidades afectadas por el tsunamis (círculos con estrella al centro); a) epicentro del sismo del 22 junio de 1932 (Singh et al., 1984; Servicio Sismológico Nacional, 2011) y la extensión de costa afectada por el tsunami (línea negra). El rectángulo con línea discontinua indica la región de probable generación del tsunami (~5 min). B) Corresponde a una fotografía de Cumming (1933), aquí indica la dirección en que fueron derribadas algunas palmeras y construcciones.

Modelo de generación del tsunami a causa de un deslizamiento submarino

Se realizaron varios modelos de generación de tsunamis por deslizamiento submarinos con variaciones en la geometría del cuerpo del deslizamiento y localización en distintas secciones del interior del Cañón Submarino del Río Armería (CSRA). La Tabla III.1 presenta los datos sísmicos que fueron empleados como condiciones iniciales para todos los modelos de deslizamientos (Figura III.3). Estos parámetros se emplearon para generar el modelo M1, correspondiente a un tsunami generado sólo por causas sísmicas (Figura III.3).

Tabla III.1. Parámetros de generación del tsunami por causa sísmica.

X^*	Y^*	d^{**} (km)	Φ^{**} (grad.)	λ^{***} (grad.)	δ^{**} (grad.)	M_s^{**}	L^{***} (km)	W^{***} (km)	M^{***} (Pa)
533,732	2,071,979	30	310°	90°	14°	6.9	80	40	4.00E+10

Notas: The longitude of the earthquake centroid X , the latitude of the earthquake centroid Y , the centroid depth d , the fault strike ϕ , the fault rake λ , the fault dip δ , earthquake magnitude M_s , the fault length along rupture L , the fault width across rupture W , and the shear modulus μ , seismic moment M_o , the characteristic wavelength λ_o , and the characteristic tsunami amplitude η_o .

*Taken from Singh *et al.* (1984) and Servicio Sismológico Nacional (2011).

** Singh *et al.* (1985) *** Okal & Borrero (2011).

Los parámetros de la modelación de tsunamis originados por deslizamientos se presentan en la Tabla III.2. Se pueden apreciar las variaciones en la localización, profundidad del piso oceánico, densidad del paquete de sedimentos, y dimensiones geométricas del deslizamiento. Los datos se fueron ajustando gradualmente hasta encontrar un patrón de propagación y afectación de los efectos del tsunami en la costa de Colima hasta encontrar un modelo que se asemejara a las descripciones de encontradas en las fuentes históricas y los relatos de los sobrevivientes.

En los resultados de la modelación, los valores de deformación máxima de la superficie oceánica se emplearon como principal elemento para identificar la combinación de parámetros de mejor ajuste con las descripciones del tsunami del 22 de junio de 1932. Los resultados muestran una amplia variabilidad en el comportamiento de la superficie oceánica. En la Figura III.3, se presentan los 14 modelos más representativos, dado que entre algunos casos las variaciones son mínimas.

El modelo M1, que sólo considera la generación del tsunami por causas sísmicas, presenta valores de deformación de la superficie oceánica de entre 0.1 a 0.45 m que se concentran en la hipotética zona de ruptura del sismo, y la deformación es mínima al propagarse lejos de la zona de generación. A partir del modelo M2, se incorporan las hipótesis de los deslizamientos submarinos en las regiones próximas al cañón submarino del Río Armería (Figura III.3).

Tabla III.2. Parámetros de los escenarios de modelación de tsunamis generados por deslizamientos submarinos.

Modelo	d (m)	θ (Grados)	b (km)	T (m)	ω (km)	γ
M2	2,495	5.5	12,106	400	11,000	2,200
M3	490	4.5	4,270	200	3,500	2,200
M4	250	12.0	2,000	450	1,000	2,500
M5	460	8.0	2,200	450	1,400	1,826
M6	460	12.0	3,200	450	2,400	3,000
M7	350	12.0	3,000	350	1,600	2,500
M8	460	12.0	3,200	450	2,400	1,826
M9	400	12.0	1,900	450	1,500	1,906
M10	460	3.9	3,200	450	2,400	1,906
M11	460	5.0	3,500	450	3,000	2,500
M12	460	3.0	3,500	600	2,600	1,906
M13	460	6.0	3,500	450	3,000	1,906
M14	2,415	15.0	9,000	800	8,000	2,200
M15	180	8.0	2,500	200	1,200	2,200
M16	180	8.0	2,500	350	1,600	2,200
M17	180	8.0	2,500	400	1,300	2,200
M18	180	12.0	2,500	400	1,300	2,200
M19	180	9.0	2,500	400	1,200	1,780
M20	180	9.0	2,500	600	1,200	2,500
M21	400	6.0	3,500	2,500	300	3,000
M22	405	9.0	3,500	2,300	350	3,000

Notas: d (m) = Profundidad inicial del deslizamiento*** θ (degrees) = Pendiente inicial*** b (km) = Sección longitudinal***, T (m) = Máximo espesor del deslizamiento****, ω (km) = Sección transversal***, γ = Densidad específica **

A partir del modelo M6, se empieza a observar la concentración de alturas máximas en la línea costa desde Cuyutlán hacia el SE, hacia El Tecuanillo (un área de ~ 26 km). Fuera de este segmento los valores máximos de altura se reducen drásticamente.

De acuerdo a las descripciones y crónicas de los efectos del tsunami del 22 de junio de 1932, este segmento de la costa fue el más afectado (Cumming, 1933; El Informador, 1932g; Excélsior, 1932a, g; Farreras & Sánchez, 1991; National Geophysical Data Center/World Data Center (NGDC/WDC), 2011; Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011; Sánchez & Farreras, 1993; Soloviev & Go, 1975).

El gradual ajuste en los datos de entrada de la modelación condujo a seleccionar al modelo M12 (Figura III.4) como escenario de mejor ajuste, dado que los valores de deformación de la superficie oceánica, en la zona de contacto con la línea de costa en Cuyutlán, presentó valores de entre 10 y 12 m.

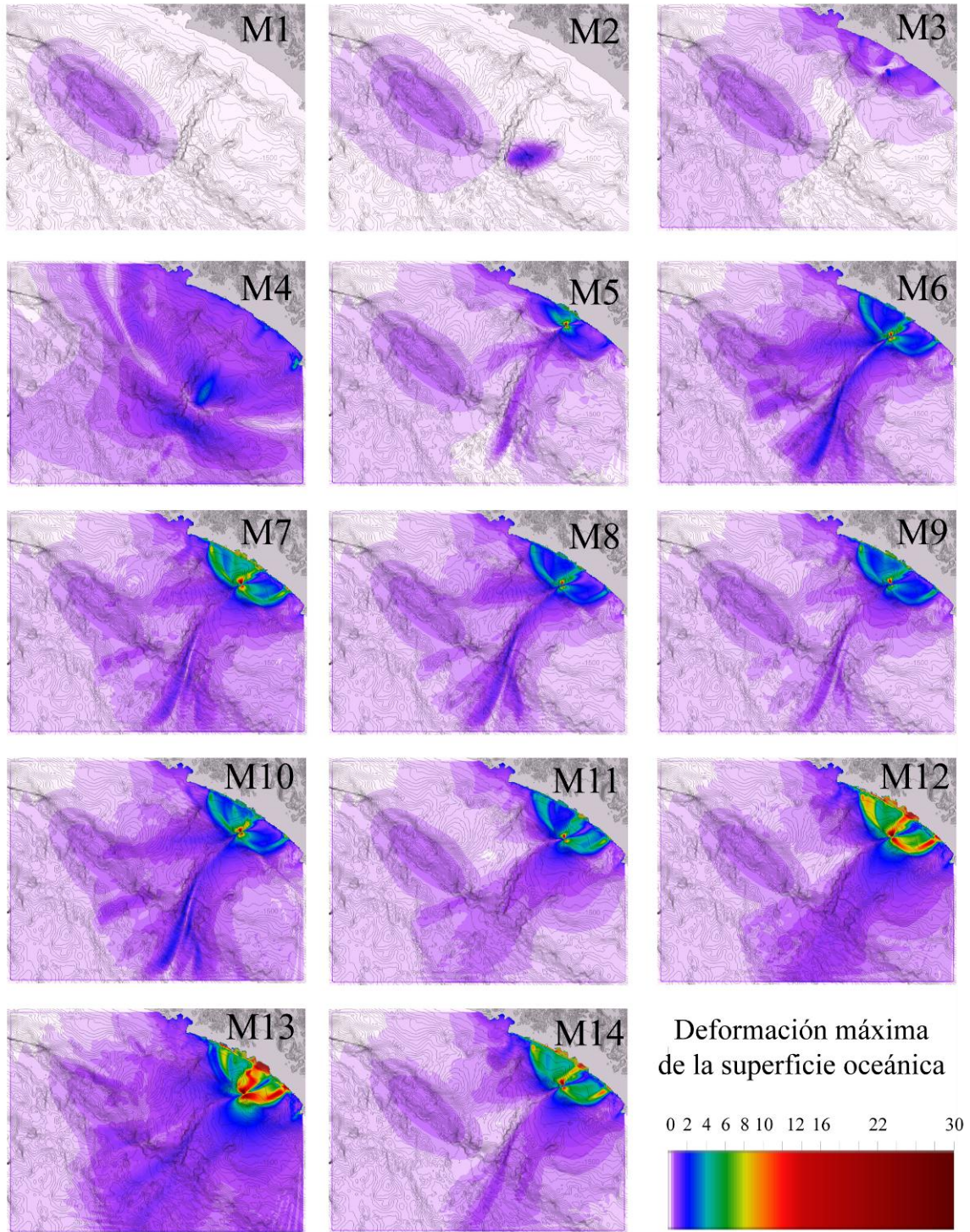


Figura III.4. Modelos de deformación máxima de la superficie oceánica.

La Figura III.5 muestra la concentración de las alturas máximas de Cuyutlán hacia el SE, hasta El Tecuanillo (un área de ~ 26 km). El resto de la línea de costa muestra valores máximos de altura entre 0.5-2 m- valores que no representan una inundación significativa

en la zona de costa afectada representativa de ese rango. Los valores para el interior de la Bahía de Manzanillo están entre 0.9 y 2.3m, los valores máximos presentados en el modelo C4 son de 2.3. Las variaciones máximas para esta zona que se encuentran en los modelos, están en el rango de +/-0.4. (Figura III. 5).

Los datos de altura máxima para el tsunami del 22 de junio de 1932 son escasos, el Global Historical Tsunami Database/NOAA, tiene registros de cinco localidades afectadas: Manzanillo, el Real, Salinas del Guasango, Tenancingo y Cuyutlán; solamente para el último sitio reporta el valor de altura máxima del tsunami (10 m). Reportes posteriores indican que la altura máxima del tsunami pudo haber sido mayor a los 10 m, (Farreras & Sánchez, 1991; Salazar, 1985, 1989) posiblemente fue mayor de 12 m (Corona & Ramírez-Herrera, 2012) lo cual concuerda con los valores dados para M12, 8.4-11.6 m.

En el caso de Palo Verde, no se encontraron registros de la altura del tsunami, sin embargo, las referencias históricas indican que fue una destrucción total, lo cual coincide con el valor de 8 m del modelo M12 (Figura III.5) que explicaría tal grado de destrucción. Por otro lado, el trabajo postsunami de Cumming (1933), sugiere que el tsunami afectó de manera proporcional tanto a Palo Verde como el Guasango, localizados a 3 y 21 km hacia el SE de Cuyutlán. Esto es corroborado por reportes de prensa en los que se indican que Tecuanillo (que en ese entonces se localizaba alrededor de los bordes de las salinas de Guasango) sufrió daños (El Universal Gráfico, 1932c).

Los valores de altura máximas del modelo M12 de 8 m en Palo Verde y 6.4 m en el Guasango, concuerdan con las dimensiones sugeridas por Cumming (1933) y los reportes de periódicos de la época. Salazar (1989) indica que en la zona conocida como “Las Boquillas” (lo que ahora se conoce como El Paraíso) ubicada a 18 km al SE de Cuyutlán, el océano se juntó con el estero. Los valores máximos de altura que resultan del modelo M12 (8.7m) comprueban este comportamiento (Figura III.5).

Los datos de altura máxima que se observan en el modelo M12 (entre 1 y 2.3 m) reflejan que el comportamiento del tsunami en la zona que no resultó afectada (El Universal Gráfico, 1932b, c; Excélsior, 1932a), ver Figura III.5. El área ubicada hacia el extremo sur, Boca de Apiza (que no cuenta con datos históricos) fue mencionada solamente como parte de la probable zona afectada por el tsunami. Como se muestra en los modelos, estas dos regiones costeras ubicadas hacia ambos extremos, casi no registraron alturas máximas por arriba de los 2 m, lo cual no representa una destrucción significativa en esas comunidades.

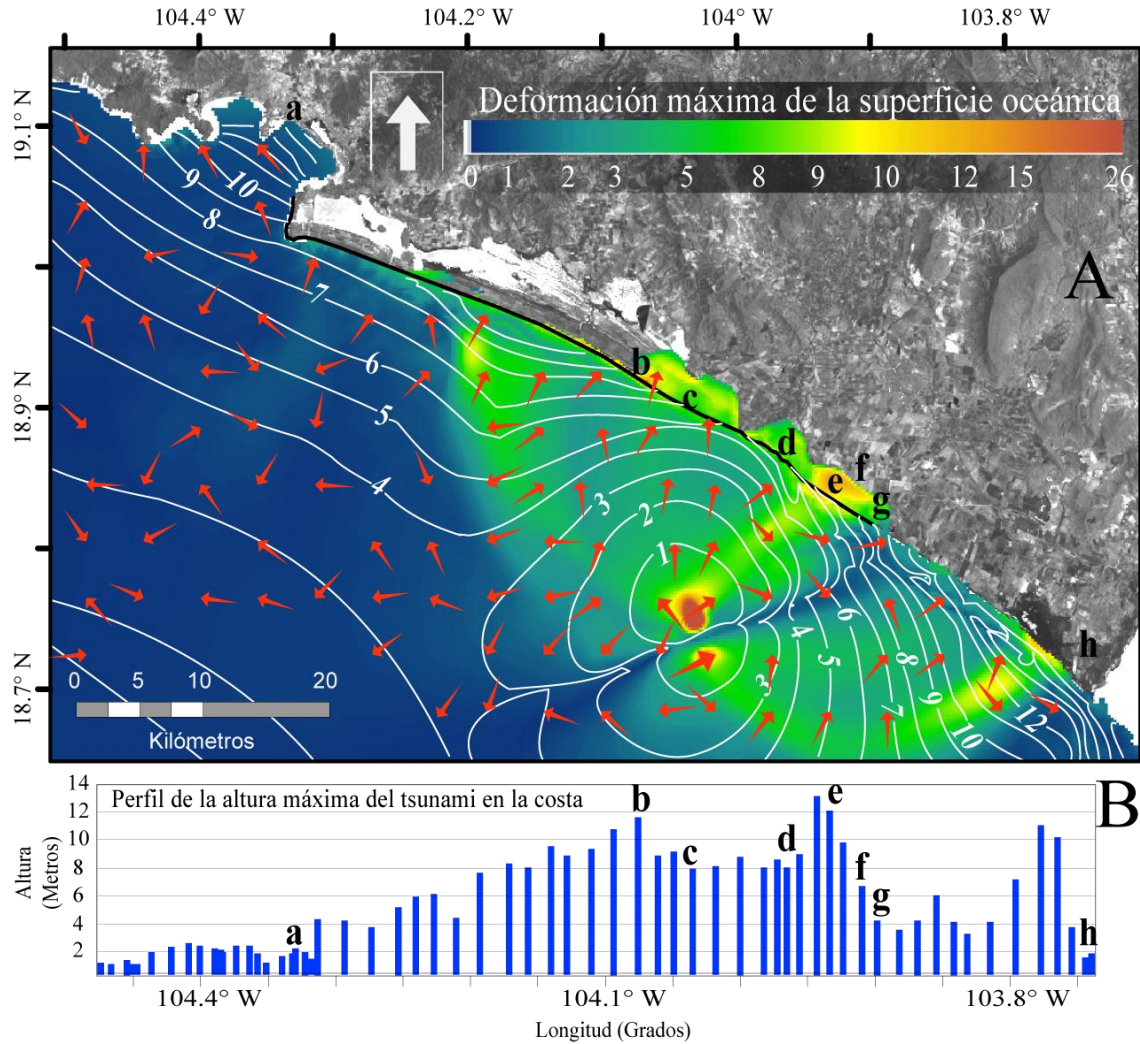


Figura III.5. A) Modelo M12, Altura máxima del tsunami, directividad y tiempo de arribo. a) Manzanillo, b) Cuyutlán, c) Palo Verde, d) Las Boquillas (El Paraíso), e) El Real y f) Salinas del Guasango, g) Tecuanillo, y h) Boca de Apiza. Líneas blancas, isocrónas a intervalos de 1 minuto, Flechas rojas, Dirección de propagación del tsunami, B) Gráfico de barras en la parte inferior del mapa, corresponden con la altura máxima del tsunami en la línea de costa.

Okal & Borrero (2011) propusieron que el tsunami fue generado como un “tsunami sísmico”, en lo cual concuerdan con el modelo empleado por Fukao (1979). Sin embargo, en su mejor modelo de ajuste, reportaron que los valores de altura de 7 m en la Bahía de Manzanillo y Cuyutlán no son consistentes con los reportes de datos históricos: en Manzanillo no existe dato alguno del daño, mientras que en Cuyutlán las alturas máximas de ola fueron mayores a 10 m (El Universal Gráfico, 1932c; Excélsior, 1932b; Farreras & Sánchez, 1991; Salazar, 1985; Sánchez & Farreras, 1993; Soloviev & Go, 1975). Significativamente, los tsunamis originados por deslizamiento representados en el modelo M12, reflejan los valores de altura de ola reportados.

Tiempo de arribo del tsunami

Cuyutlán es la única localidad con el registro de tiempo de arribo del tsunami, de cinco minutos. Los valores resultantes de la modelación fueron muy similares a partir del modelo M6, en todos los escenarios, entre ocho y nueve minutos. En el modelo M12 el tiempo de arribo fue de 8.5 minutos. Dado que la diferencia entre los tiempos modelados y los registrados es de 3.5 minutos, podemos inferir que es probable que estos valores sean acertados, dado que en 1932 los registros del tiempo pudieron tener un margen de error de este orden.

Directividad

La dirección de propagación del flujo del tsunami es perpendicular al eje de ruptura del deslizamiento y presenta un fuerte componente SSE-NNW a partir del modelo M6 (Figura III.4). También se observó que los flujos se concentraron en un perímetro de 30 de Km y disminuyen drásticamente al alejarse del foco de generación. En Cuyutlán y Palo Verde el ángulo de ataque presentó un ligero componente SSE-NNW en todos los escenarios modelados. En Las Boquillas (El Paraíso), El Real y las Salinas del Guasango, la dirección del flujo se propagó en dirección SW-NE. En el Tecuanillo la dirección de los flujos fue perpendicular a la línea de costa. En Boca de Apiza los flujos se disiparon drásticamente pero con se extendieron con sentido NW-SE, de forma paralela al eje de la costa (Figura III.5).

La dirección de propagación del tren de ondas parece ajustarse a las descripciones de Cumming (1933): “Por la dirección en que quedaron derribadas las palmeras y postes en Palo Verde y el Guasango, parece que el centro de propagación se localizó aproximadamente a 10 km al S-SW de Boca de Pascuales (ca. 3 km al SE de Las Boquillas), en la boca del río Armería”. Por lo tanto, asumimos que el componente de directividad es consistente con el comportamiento observado (Figura III.5).

CONCLUSIONES

La información obtenida en varias fuentes históricas (tiempo de arribo, longitud de la costa que resultó afectada, valores máximos de altura del tsunami, daños, directividad de propagación y probable localización del lugar de origen del tsunami) parece ajustarse al patrón de comportamiento característico de un tsunami generado por un deslizamiento submarino. Los resultados la modelación numérica del comportamiento de tsunamis empleando parámetros correspondientes a un deslizamiento rotacional submarino (*slump*) se ajustan bien con los datos cualitativos provenientes de archivos históricos. Esto confirma que el mecanismo de generación del tsunami del 22 de Junio de 1932 fue originado por un deslizamiento rotacional submarino que se produjo en el cañón submarino localizado frente a la boca del río Armería.

Al determinar la causa y los mecanismos de generación del tsunami de Cuyutlán de 1932, se contribuye a disminuir el porcentaje de tsunamis atribuidos a causas desconocidas. Más aún, se reduce el nivel de incertidumbre con respecto a tsunamis con alto potencial destructivo que se han suscitado en las Costas del Océano Pacífico, proveyendo sólidos argumentos para el diseño de sistemas de alerta anti-tsunamis y evaluaciones de peligro por tsunamis.

AGRADECIMIENTOS

N. Corona agradece a CONACYT por proporcionar la beca para estudios de doctorado. M.T. Ramírez-Herrera agradece a PAPPIT-UNAM por su contribución con fondos para este estudio mediante el apoyo número IN123609 y a la SEP-CONACYT Ciencia Básica apoyo número 129456.

REFERENCIAS

- Cruz, G., & Wyss, M. (1983). Large earthquakes, mean sea level, and tsunamis along the Pacific Coast of Mexico and Central America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73 (2), 553-570.
- Cumming, J. L. (1933). Los terremotos de Junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco. *Universidad de México*, 31-32, 68-104.
- Chávez, L. (1932). Dramático relato de la reciente catástrofe del balneario de Cuyutlán. In *El Nuevo Mexicano* (pp. 2). El Nuevo Mexicano, Santa Fe, Nuevo Mexico.
- El Informador. (1932a). Han sido formidables los recientes terremotos. In *El Informador* (5319 ed., Vol. XV/LV, pp. 4). El Informador, México.
- El Informador. (1932b). La catástrofe ocurrida anteayer en Cuyutlán no tiene precedente. In *El Informador* (5315 ed., Vol. XV/LV, pp. 1-2). El Informador, México.
- El Universal Gráfico. (1932a). En Cuyutlán no quedó piedra sobre piedra. In *El Universal Gráfico* (3578 ed., Vol. XI, pp. 15). El Universal Gráfico, México.
- El Universal Gráfico. (1932b). En el risueño balneario no queda ahora sino una media docena de personas. In *El Universal Gráfico* (3578 ed., Vol. XI, pp. 2). El Universal Gráfico, México.
- Excélsior. (1932a). Dos veces más Cuyutlán ha sido barrido por las olas. In *Excélsior* (5561 ed., Vol. XVI, pp. 1). Excélsior, México.
- Excélsior. (1932b). Gigantesco derrumbe submarino a causa de los sismos en Colima. In *Excélsior* (5562 ed., Vol. III, pp. 4-5). Excélsior, México.
- Excélsior. (1932c). Mil doscientos huyen hacia Colima. In *Excélsior* (5561 ed., Vol. III, pp. 3). Excélsior, México.
- Farreras, S. F., & Sanchez, A. J. (1991). The tsunami threat on the Mexican west coast: A historical analysis and recommendations for hazard mitigation. *Natural Hazards*, 4 (2), 301-316.
- Kulikov, E. A., Rabinovich, A. B., Thomson, R. E., & Bornhold, B. D. (1996). The landslide tsunami of November 3, 1994, Skagway harbor, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 101 (3), 6609-6615.
- Levin, B., & Nosov, M. (2009). *Physics of Tsunamis*. Springer, Russia.
- Murty, T. S. (1979). Submarine Slide-Generated Water Waves in Kitimat Inlet, British Columbia. *Journal of Geophysical Research*, 84 (C12), 7777-7779.
- National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration. (2012). NOAA/WTC Tsunami Event Database. In (Vol. 2011), Boulder, CO, USA.
- Okal, E. A., & Borrero, J. C. (2011). The 'tsunami earthquake' of 1932 June 22 in Manzanillo, Mexico: seismological study and tsunami simulations. *Geophysical Journal International*, 187 (3), 1443-1459.
- Ordoñez, E. (1933). Seismic activity in Mexico during June, 1932. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 23 (2), 80-82.

- Ryan, W. B. F., Carbotte, S. M., Coplan, J. O., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., Weissel, R. A., Ferrini, V., Goodwillie, A., Nitsche, F., Bonczkowski, J., & Zemsky, R. (2009). Global Multi-Resolution Topography synthesis. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10 (Q03014).
- Salazar, J. (1985). Una Montaña de Agua. In *Diario de Colima* (941 ed., Vol. 941, pp. 2-3). Diario de Colima, Colima.
- Sánchez, A. J., & Farreras, S. F. (1993). *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México*. National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN). (2011). Catalogo de sismos. In. Servicio Sismológico Nacional (SSN), México.
- Singh, S. K., Astiz, L., & Havskov, J. (1981). Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: A reexamination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71 (3), 827-843.
- Singh, S. K., Pacheco, J. F., & Shapiro, N. (1998). The earthquake of 16 November, 1925 ($M_s=7.0$) and the reported tsunami in Zihuatanejo, Mexico. *Geofísica Internacional*, 37 (001), Short Note.
- Singh, S. K., Ponce, L., & Nishenko, S. P. (1985). The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera plate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75 (5), 1301-1313.
- Soloviev, S. L., & Go, C. N. (1975). *Catalogue of tsunamis on the eastern shore of the Pacific Ocean, Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences No. 5078* (Vol. 192). Nauka Publishing House, Moscow.
- Tappin, D. R., Matsumoto, T., Watts, P., Satake, K., McMurtry, G. M., Matsuyama, M., Lafoy, Y., Tsuji, Y., Kanamatsu, T., Lus, W., Iwabuchi, Y., Yeh, H., Matsumoto, Y., Nakamura, M., Mahoi, M., Hill, P., Crook, K., Anton, L., & Walsh, J. P. (1999). Sediment slump likely caused 1998 Papua New Guinea tsunami. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 80 (30), 329.
- Tappin, D. R., Watts, P., McMurtry, G. M., Lafoy, Y., & Matsumoto, T. (2001). The Sissano, Papua New Guinea tsunami of July 1998 — offshore evidence on the source mechanism. *Marine Geology*, 175 (1-4), 1-23.
- Watts, P., Grilli, S. T., Kirby, T. J., Fryer, G. J., & Tappin, D. R. (2003). Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 391-402.

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DEL GRADO DE VULNERABILIDAD A LA AMENAZA DE TSUNAMIS: EL CASO DE CUYUTLÁN, COLIMA

EVALUACIÓN DEL GRADO DE VULNERABILIDAD A LA AMENAZA DE TSUNAMIS: EL CASO DE CUYUTLÁN, COLIMA

Corona, Néstor.^{1,2}, Ramírez-Herrera, María-Teresa.^{1,3},

¹Centro de Estudios en Geografía Humana, Colegio de Michoacán, Sede la Piedad, Nahuatzen 85, Fracc. Jardines del Cerro Grande, Postal Code 59300, Morelia Michoacán, México. Corresponce to corona@colmich.edu.mx, Tel.: +52 352 83 41 ext. 2410.

²Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro # 871, Col. ExHacienda de San José de la Huerta, Postal Code 58190, Morelia Michoacán, México.

³ Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro # 871, Col. ExHacienda de San José de la Huerta, Postal Code 58190, Morelia Michoacán, México. Correspondence to: mtramirez@ciga.unam.mx, Tel.: +52 443 322-3846 ext. 32846.

ABSTRACT

In the last decade tsunamis have claimed the lives of hundreds of thousands of people and caused damage of several billion dollars. From the perspective of disaster management, these events can be mitigated to the extent that it the probability and magnitude of potentially destructive tsunamis can be identified, and most importantly, the levels of vulnerability of affected systems reduced. Therefore, the challenge is to design tools to understand and gauge the tsunami hazard and how they affect exposed systems, that is to say, their levels of vulnerability. In this research a model for assessing the vulnerability to tsunami hazard for the town of Cuyutlán, Mexico was developed. After determining the worst case tsunami scenario, subsequent numerical modeling indicated that there are two properties of tsunamis that are largely responsible for the destruction and loss of life: hydrodynamic force, exerted on the buildings (infrastructure and equipment), and the arrival time of the tsunami, which determines ability of people to evacuate to safe areas. Additionally, from the distribution and potential levels of impact of these two components, an analysis tool was designed that can assess the degree of vulnerability of the economic, social and cultural activities that shape the livelihoods of the community.

Results show that this method allows us to define the way their major components interact and specifically affect the elements of the community: its people, infrastructure, and the vulnerability level of the activities taking place in the area. The application of the model in this case study allowed us to identify: 1) Cuyutlán can be threatened by a potentially highly destructive tsunami, 2) the level of vulnerability of the population is extremely high, an over 50% would not have the time needed to evacuate to safe areas, and 3) the high degree of building vulnerability critically affects the realization of economic, social and cultural activities, therefore jeopardizing livelihoods.

Keywords: Tsunami, Vulnerability, GIS, population, buildings, livelihood.

RESUMEN

En la última década los tsunamis han cobrado la vida de cientos de miles de personas y causado daños de varios billones de dólares. Desde la perspectiva de la gestión de los desastres, estos escenarios pueden ser mitigados en la medida en que se identifique la probabilidad de ocurrencia y magnitud de tsunamis con potencial destructivo, y más importante, reduciendo los niveles de vulnerabilidad de los sistemas afectados. Por tanto, el reto consiste en diseñar herramientas que permitan conocer y dimensionar la amenaza de tsunamis y la forma en que afectan a los sistemas expuestos, es decir, sus niveles de vulnerabilidad. En esta investigación se desarrolló un modelo de evaluación de vulnerabilidad a la amenaza de tsunami que fue aplicado a la localidad de Cuyutlán, México. A partir de la determinación del peor escenario de amenaza por tsunamis, la modelación numérica en sistemas de información geográfica, y observaciones de desastres ocasionados por tsunamis en otras partes del mundo, se definieron dos propiedades del tsunami que son mayormente responsables de la destrucción y de la pérdida de vidas: la fuerza hidrodinámica, que se ejerce sobre las construcciones (infraestructura y equipamiento), y el tiempo de arribo del tsunami, que determina las posibilidades que tiene la población de evacuar a zonas seguras. Adicionalmente, a partir de la distribución y niveles potenciales de afectación de estos dos componentes, se diseñó una herramienta de análisis que permite valorar el grado de vulnerabilidad de las actividades económicas, sociales y culturales que articulan el funcionamiento del asentamiento poblacional.

Los resultados muestran que la propuesta metodológica posibilita definir el peor escenario probable de tsunamis, la forma en que los principales componentes del tsunami interactúan y afectan puntualmente a los elementos del asentamiento humano: su población, equipamiento y la infraestructura, y en su conjunto, el nivel de vulnerabilidad de las actividades que se realizan en ese territorio. La aplicación del modelo en el caso de estudio, permitió identificar: 1) que Cuyutlán puede estar amenazado por un tsunami con alto potencial destructivo, 2) el nivel de vulnerabilidad de la población es muy alto, en temporada alta más 50% de las personas no contaría con el tiempo necesario para evacuar a zonas seguras, 3) El alto grado de vulnerabilidad de las edificaciones y la potencial destrucción de varios de ellos repercute de forma crítica la realización de las actividades económicas, sociales y culturales, comprometiendo sus medios y formas de subsistencia.

Palabras clave: tsunami, vulnerabilidad, SIG, población, edificaciones, medios de subsistencia.

INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales ocasionados por tsunamis en la última década revelan la urgente necesidad de desarrollar herramientas diagnósticas orientadas a disminuir los niveles de vulnerabilidad de las comunidades costeras a los efectos de este fenómeno (Birkmann & Fernando, 2008). En este sentido, uno de los grandes retos en la evaluación de riesgo, peligro y vulnerabilidad a los efectos de estos fenómenos los constituye su naturaleza temporal y espacial, ya que se trata de eventos de baja frecuencia y alto potencial destructivo (Birkmann & Fernando, 2008).

Amenaza de tsunami

El concepto de amenaza se refiere a un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, daños a la propiedad, pérdida de los medios de subsistencia, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UN/ISDR, 2009). Cada tipo de amenaza presenta una serie de características muy específicas en cuanto a el tiempo de gestación, periodo de retorno, tiempo de inicio, duración, extensión y tipos de daños ocasionados a la población y a los elementos expuestos (Kappes, *et al.*, 2012).

El tsunami, se refiere a la incursión de olas en las costas (Levin & Nosov, 2009). Se producen debido a la deformación del fondo oceánico, lo cual ocasiona perturbaciones en forma de ondas superficiales que se propagan a través del océano hasta llegar a las costas. En su mayoría, las deformaciones del fondo marino se producen directa o indirectamente por la actividad sísmica; directamente cuando la liberación de energía de un sismo produce una deformación en el fondo oceánico (Kajiura, 1981), e indirectamente cuando la aceleración del terreno desestabiliza paquetes de depósitos sedimentarios y estos generan movimientos en masa (Levin & Nosov, 2009).

Dada la mecánica de generación de los tsunamis, puede ser descrita como un ciclo de tres fases: 1) generación de la onda, 2) propagación en el océano, y 3) arribo a la costa (Levin & Nosov, 2009; Jin & Lin, 2011). El comportamiento del tsunami en estas tres fases es controlado por la magnitud del fenómeno que lo induce, la dimensión y el periodo de las olas, las características batimétricas, la configuración de la costa y la situación de la marea; factores que combinados con la morfología de la topografía en superficie terrestre, la pendiente del terreno y el grado de rugosidad; condicionan los efectos de la inundación (Lagos, 2000).

Las evaluaciones de la amenaza por tsunami se efectúan con base a tres factores principales: La súbita inundación que producen en las costas, el impacto de las olas contra las construcciones y la erosión que producen (Levin & Nosov, 2009; Usha, *et al.*, 2012). Generalmente, la variable más importante es la profundidad de la inundación, en segundo término se considera la cota máxima de inundación (*runup*) y en tercera instancia, la velocidad del flujo al penetrar en la costa. Algunas investigaciones incluyen el indicador compuesto de fuerza de hidrodinámica, fuerza de arrastre o presión hidrodinámica (Koshimura, *et al.*, 2009).

Vulnerabilidad

El concepto de vulnerabilidad es sujeto de múltiples debates y en la actualidad no hay consenso de sus alcances, ya que ha sido instrumento conceptual y metodológico de una amplia variedad de aproximaciones disciplinares (Dall'Osso, *et al.*, 2009), revisiones como la de Füssel (2005) y Birkmann (2006) exponen sistemáticamente los alcances de la vulnerabilidad desde distintas perspectivas, así como, los esfuerzos por diseñar métodos de evaluación. En la búsqueda de una base epistemológica de la vulnerabilidad, la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, a partir de la realización de foros de discusión entre especialistas en el área, llega a definir a la vulnerabilidad como “Las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos

dañinos de una amenaza” UN/ISDR (2009). Puede ser medida en función de las características de las personas o grupos sociales en términos de sus capacidades de anticipar, enfrentar, resistir y recuperarse de los impactos de un fenómeno perturbador (Vogel, 1998; Bohle & Kasperson, 2001). Los alcances deseables del concepto deben partir de análisis sistemáticos de objetos y áreas específicas que permitan a los gestores de desastres estar mejor preparados para situaciones de emergencia (Schneiderbauer & Ehrlich, 2004).

En términos metodológicos, las evaluaciones de vulnerabilidad se apoyan en el uso de indicadores para generar argumentos que permitan entender las dimensiones del objeto vulnerable con respecto a la amenaza. Por lo tanto, los indicadores deben ser capaces de proveer información referente a la susceptibilidad, capacidades de enfrentar de un sistema al impacto de un fenómeno natural (Birkmann, 2006). Esta información debe ser útil en el diseño de políticas y en la toma de decisiones, ya que constituyen uno de los principales retos en los estudios de evaluación de vulnerabilidad (Schneiderbauer & Ehrlich, 2004; Birkmann, 2006). Estos elementos han sido considerados aspectos prioritarios en los procesos de rehabilitación de zonas afectadas por tsunamis (United Nations/Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UN/ESCAP), 2006). Las evaluaciones de vulnerabilidad pueden ser altamente representativas cuando se evalúan por separado las potenciales pérdida de vidas, construcciones y la desarticulación de los medios de subsistencia. Bajo este enfoque resulta esencial identificar las áreas, grupos e infraestructuras que son más vulnerables (Birkmann & Fernando, 2008).

Evaluación de vulnerabilidad a tsunamis

Los modelos de evaluación de vulnerabilidad a tsunamis presentan una amplia variedad de enfoques y técnicas, que a su vez incorporan elementos específicos del fenómeno de tsunamis como componente principal de la amenaza. Tienden a seleccionar ciertos componentes del asentamiento humano como objetos de estudio: la población, las edificaciones, la infraestructura, entre otros. Como elemento constante en los modelos de evaluación de vulnerabilidad a tsunamis se encuentra la determinación del peor escenario posible de destrucción, definido a partir de registros históricos y/o modelación numérica, empleando los valores de inundación máxima como indicador de la amenaza de tsunami *i.e.*, Papathoma & Dominey-Howes (2003), Papathoma & Dominey-Howes (2003), Dominey-Howes & Papathoma (2007), Birkmann, *et al.* (2010), Dominey-Howes, *et al.* (2010), Omira, *et al.* (2010), Leone, *et al.* (2011), Strunz (2011), Eckert, *et al.* (2012), Flouri, *et al.* (2012), Løvholt, *et al.* (2012), Tinti, *et al.* (2012), Usha, *et al.* (2012).

Un primer grupo de modelos de evaluación de vulnerabilidad a tsunami lo constituyen aquellos que se enfocan en determinar el potencial de daños en las construcciones. El mayor exponente de este grupo lo encabezan los trabajos que se basan en el Índice Relativo de Vulnerabilidad (Dominey-Howes & Papathoma, 2007; Dall’Osso, *et al.*, 2009; Koshimura, *et al.*, 2009; Dall’Osso, *et al.*, 2010; Leone, *et al.*, 2011; Reese, *et al.*, 2011; Eckert, *et al.*, 2012; Flouri, *et al.*, 2012). Los cuales incorporan una gran cantidad de variables referentes a los materiales de construcción, localización geográfica, existencia de barreras naturales que amortiguan los efectos de la inundación, entre otros. Este tipo de modelos requieren de la incorporación de un gran volumen de información detallada de cada edificación para su elaboración.

Por otro lado, se encuentran los modelos que evalúan las potenciales pérdidas de vidas mediante modelos de evacuación y tiempos de respuesta de la población. En estos modelos, se toma el tiempo de arribo del tsunami como el componente crítico de amenaza del tsunami. El objeto de estudio lo constituye la población y sus capacidades de alcanzar zonas seguras. Adicionalmente incorporan nociones de eficiencia de los sistemas de alerta contra tsunamis (componentes institucionales y flujos de información), *i.e.*, Charnkol & Tanaboriboon (2006), Post, *et al.* (2009) y Dominey-Howes, *et al.* (2010).

Existen algunos estudios que parten de una evaluación post-desastre. Tienden a identificar los componentes de la vulnerabilidad desde enfoques y modelos conceptuales más complejos y de carácter multidisciplinar, como lo es el estudio de Kaplan, *et al.* (2009), donde al evaluar la vulnerabilidad considera características de los grupos poblacionales afectados, materiales de construcción de la vivienda y aspectos gubernamentales; vinculándolos con el papel de la cobertura vegetal. Dentro de este grupo también hay evaluaciones de carácter retrospectivo, en donde se tratan de identificar las variables que determinaron el nivel de vulnerabilidad de las comunidades afectadas por tsunamis, *i.e.*, Nishikiori, *et al.* (2006), Dominey-Howes & Papatoma (2007), Dominey-Howes, *et al.* (2010), Dudley, *et al.* (2011), Leone, *et al.* (2011), Reese, *et al.* (2011), Fauci, *et al.* (2012), entre otros.

En la presente investigación se incorpora el concepto de vulnerabilidad planteado por la UN/ISDR (2009). Y se retoman los ejes de análisis planteados por la International Strategy for Disaster Reduction (2004). Se determina el peor escenario posible de amenaza de tsunamis con base a modelos de generación y propagación de tsunamis en la región de estudio. En la evaluación de vulnerabilidad propuesta en esta investigación, a diferencia de los planteamientos antes expuestos, los componentes de la amenaza de tsunami son disgregados en cuatro componentes: tiempo de arribo, profundidad máxima de inundación, velocidad del flujo y fuerza hidrodinámica; y se trata de determinar la relación que guardan estas variables físicas con cada elemento del asentamiento humano: la población, el equipamiento e infraestructura, y las actividades económicas, culturales y sociales. Para efectuar una lectura del grado de vulnerabilidad del asentamiento población en su conjunto y los potenciales efectos de un tsunami de dimensiones desastrosas con un modelo de evaluación relativamente simple y con potencial de réplica en otros contextos expuestos a la amenaza de tsunami. Como estudio de caso se seleccionó la localidad de Cuyutlán, en la costa del Pacífico Mexicano.

El área de estudio y la amenaza de tsunamis

El poblado de Cuyutlán se localiza en la parte central de las costas del Pacífico mexicano, en el suroeste de la capital del estado de Colima, en las coordenadas 18.92° N y 104.07° W (Figura IV.1). El asentamiento poblacional está ubicado en contexto tectónico con procesos de subducción, entre las Placas de Rivera y de Cocos bajo la Placa Norteamericana, zona con alto potencial de generación de sismos tsunamigénicos (Løvholt, *et al.*, 2012).

Los registros históricos y catálogos de tsunamis a nivel global y local, mencionan que se han presentado 27 eventos en Cuyutlán (Farreras & Sanchez, 1991; Sánchez & Farreras, 1993; Farreras, *et al.*, 2007; Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011; Corona & Ramírez-Herrera, 2012b; National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012), los más importantes ocurrieron el 3 y el 22 de junio de

1932. Este último, destruyó gran parte del poblado (Cumming, 1933), es catalogado como el segundo tsunami más destructivo que se ha presentado en México (Sánchez & Farreras, 1993). Adicionalmente, en archivos históricos locales se hace mención de un probable tsunami que se presentó el 13 de noviembre de 1816 (Oseguera-Velázquez, 1967), sin embargo, este caso no está bien documentado ni ha sido objeto de estudio de otros investigadores.

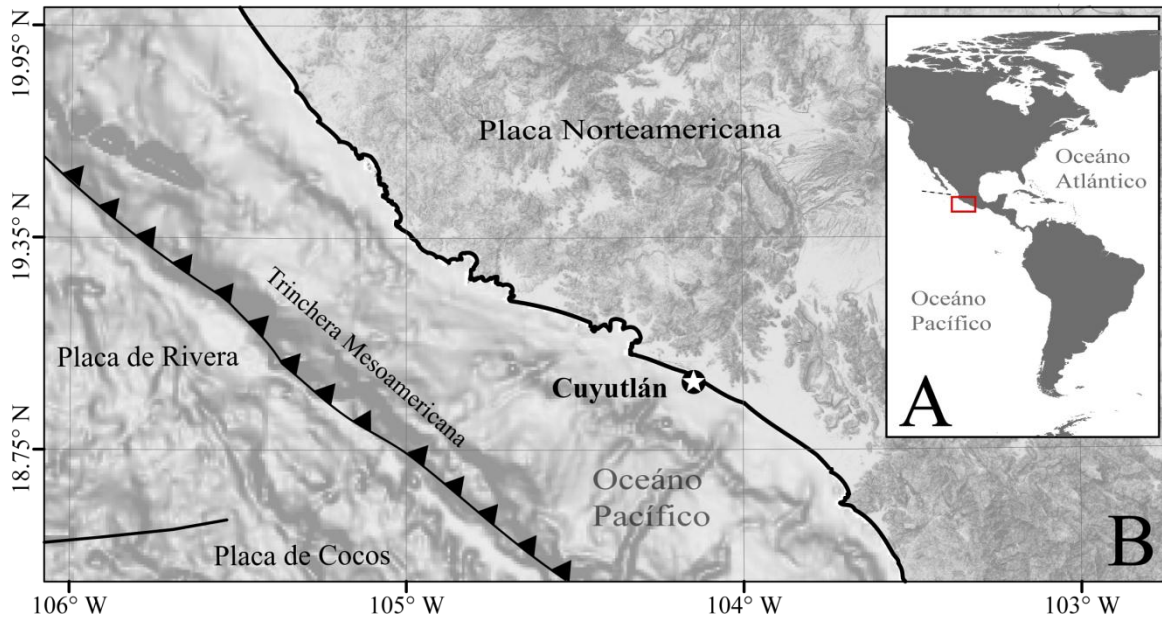


Figura IV. 1. Localización del área de estudio.

MÉTODOS

Definición de la amenaza por tsunamis

La amenaza de tsunami fue definida en dos etapas: a) la identificación del peor escenario posible de generación de alturas de ola de tsunamis en la costa de Cuyutlán con base a modelos probabilísticos e históricos, b), debido a que los modelos usados como referencia se realizaron a un detalle grueso, se efectuó una modelación numérica semi-detallada con los parámetros del peor caso de tsunami, con la finalidad de determinar cuatro variables del tsunami una escala más detallada: 1) tiempo estimado de arribo (TEA), 2) profundidad máxima de inundación, 3) velocidad promedio del flujo de agua y 4) fuerza hidrodinámica.

El peor escenario de generación de tsunamis fue determinado a partir de la comparación de modelos de generación y propagación planteados por varios autores, quienes han determinado alturas máximas de tsunami en las costas del Colima con base a un conjunto de condiciones que posibilitan la generación de tsunamis en la zona de estudio.

La modelación semi-dellada se realizó con los códigos de modelación GEOWAVE y FUNWAVE. Usando como datos de entrada los parámetros de generación del peor escenario posible. Los datos topo-batimétricos requeridos para la modelación fueron generados a partir de la digitalización e integración las curvas batimétricas de la carta náutica de Manzanillo, el levantamiento topográfico del área de estudio y las curvas de

nivel de INEGI, escala 1:50, 000; con lo que se generó un modelo digital topo-batimétrico con píxeles de 50 metros.

El cálculo de la velocidad promedio, v , se realizó con base al modelo de Hatori (1964) definido en la Ecuación 1.

Ecuación 1)

$$v = \frac{1}{n} \cdot h^{0.7} \cdot i^{1/2}$$

Dónde h corresponde al nivel máximo de la inundación (en metros), i , la pendiente de la superficie del agua (1/1000 m), y n , el coeficiente de rugosidad, asumiendo el valor constante de 0.023, de acuerdo a las observaciones de Hatori (1964).

La máxima fuerza hidrodinámica, F (Ecuación 2), fue determinada empleando el modelo de Koshimura, *et al.* (2009).

Ecuación 2)

$$F = \frac{1}{2} C_{Dp} \max\{v^2 d\} \times 10^{-3}$$

Donde C_D es el coeficiente de dragado (valor constante de 1), p es la densidad del agua (1000 kg/m³), v velocidad promedio, y d profundidad de la inundación.

Determinación de elementos para la evaluación de vulnerabilidad a tsunamis

Buscando la representatividad del modelo de evaluación de vulnerabilidad de acuerdo a los requerimientos del International Strategy for Disaster Reduction (2004), se efectuó una caracterización de las actividades económicas que se realizan en el asentamiento poblacional a partir de la revisión de archivos históricos y datos censales, con la finalidad de identificar las características de la población y sus medios de subsistencia.

Dichos componentes fueron definidos espacialmente y subdivididos en tres grupos: la población, su distribución y característica, las edificaciones (equipamiento e infraestructura), y el uso de suelo que se les asigna, bajo la premisa de que dichos usos constituyen las actividades económicas, sociales y culturales; que definen los medios y formas de subsistencia (Newman, *et al.*, 1996; Newton & Bai, 2008).

La cartográfica se generó mediante digitalización fotogramétrica en imágenes satelitales *WorldView 2* y fotografía aérea con fecha de toma 2012. Los datos de la cantidad de habitantes por vivienda, características y usos de las edificaciones se obtuvieron directamente en campo. Por otro lado, los datos demográficos del asentamiento en su conjunto fueron obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2010 (Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), 2010).

Evaluación de Vulnerabilidad a tsunamis

El enfoque de vulnerabilidad incorporó una combinación de factores físicos y sociales (Johnson, *et al.*, 2012) que fueron evaluados mediante indicadores que reflejan el grado de vulnerabilidad de la población y del equipamiento y la infraestructura. Y una evaluación de

la potencial desarticulación de los medios y formas de subsistencia basada en la valoración del grado de vulnerabilidad de las edificaciones que posibilitan que se realicen estas actividades.

Evaluación de la vulnerabilidad de la población a tsunamis

La identificación de las capacidades de respuesta inmediatas es un componente clave en los análisis de riesgo y vulnerabilidad frente a tsunamis. Esta capacidad es medida mediante modelos de evacuación, que en muchos casos han resultado ser la mejor alternativa para asegurar la seguridad de la población (Charnkol & Tanaboriboon, 2006; Zheng, *et al.*, 2012). Por lo tanto, el tiempo de arribo del tsunami fue considerado como el principal elemento de amenaza para la población (Post, *et al.*, 2009). Para su evaluación se diseñó el Índice de Acceso a Zonas Seguras (IAZS) que representa el tiempo necesario para evacuar a zonas seguras (Figura IV. 2).

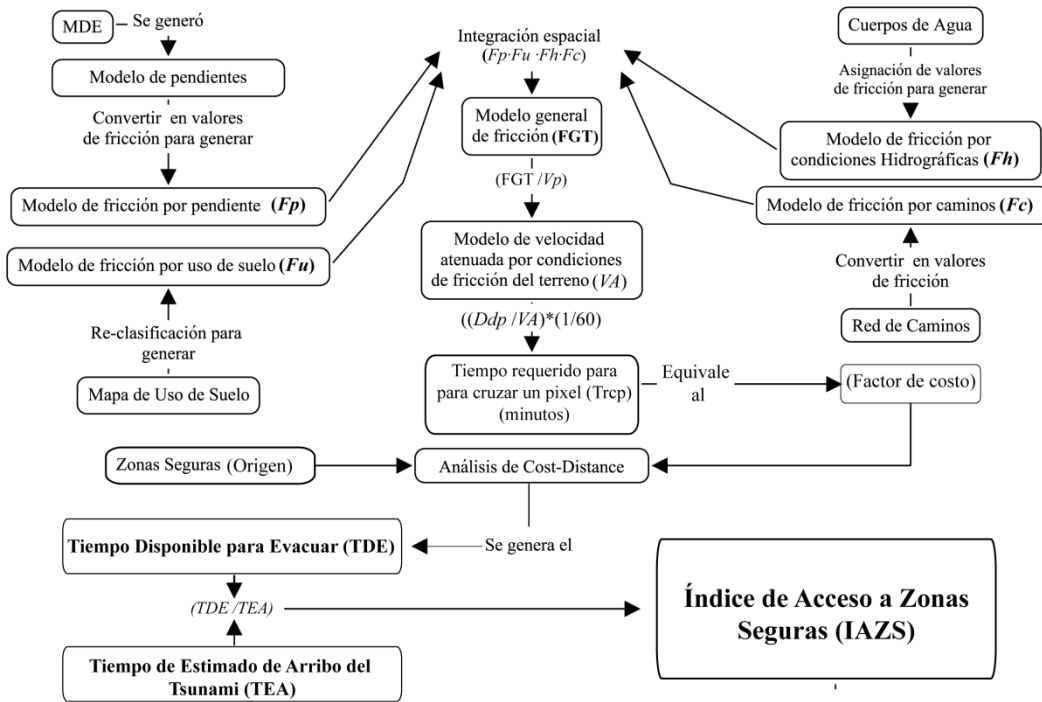


Figura IV. 2. Diagrama de flujo del Índice de Acceso a Zonas Seguras.

El IAZS es el cociente del tiempo de estimado de arribo del tsunami, TEA; respecto al tiempo disponible para evacuar, TDE (ver Ecuación 3). Este valor fue empleado como indicador para medir el nivel de vulnerabilidad de la población (Nvp), por tanto:

Ecuación 3)

$$Nvp = IAZS = \frac{TDE}{TEA}$$

La lectura del Nvp correspondió a las consideraciones de la Tabla IV.1.

El TDE es definido como la suma del tiempo de que le toma a un individuo desplazarse al interior de una unidad de análisis, pixel, definido como el tiempo requerido para cruzar un

pixel (T_{rcp}) desde cualquier punto de la zona inundada hasta las zonas seguras. Este valor fue calculado con el comando de *cost-distance* en el software *ArcGIS*.

Tabla IV.1. Interpretación de los valores de IAZS para definir el grado de vulnerabilidad de la población.

Rango de valores del IAZS	Interpretación	Nivel de vulnerabilidad de la población (N _{vp})
0- 0.5	La población es capaz de llegar a zonas seguras a la primera señal del tsunami*	Muy Bajo
0.5-0.75	La población puede llegar a sitios seguros después de la primera señal del tsunami*	Bajo
0.75 - 1	La población puede estar cerca del tiempo límite o justo para la evacuación, al reaccionar a la primera señal del tsunami*. Cualquier dificultad que genere un retraso puede costarles la vida.	Medio
1-1.5	Los habitantes de esta categoría no disponen del tiempo mínimo para llegar a zonas seguras después de la primera señal de amenaza de tsunami*. Sólo con la implementación de rutas de evacuación podrían llegar a estar en zonas seguras.	Alto
> 1.5	La población no tiene ninguna oportunidad de alcanzar zonas seguras después de la primera señal de tsunami*. La implementación de rutas de escape están fuera de las posibilidades de los habitantes de estas zonas, la única alternativa viable la puede constituir la construcción de albergues verticales capaces de resistir sismos y el flujo del tsunami.	Muy Alto

Fuente: Elaboración propia. *La primera señal de tsunami puede estar por una serie de fenómenos previos al arribo de las primeras olas a la costa, *i.e.*, la aceleración del terreno a causa de un sismo, el retroceso del mar o un fuerte estruendo, estos últimos son un patrón constante pero han llegado a presentarse; ó la emisión de alguna señal de alarma, activada por un sistema de alerta temprana.

El T_{rcp}, en su dimensión de tiempo, es un valor dependiente de la distancia y la velocidad (Ecuación 4). Donde *Ddp*, representa la distancia diagonal del de cada pixel (7.07 m, para pixeles de tamaño 5x5 m), y *VA*, velocidad atenuada por condiciones de fricción.

Ecuación 4)

$$T_{rcp} = \frac{Ddp}{VA} * \left(\frac{1}{60}\right)$$

Para el cálculo de *VA* se consideraron dos aspectos: 1) La velocidad promedio de la población para desplazarse a través del terreno, *Vp*, y 2) Las características del terreno que condicionan el libre desplazamiento a través de él, que hemos denominado fricción general del terreno, *FGT* (Ecuación 5).

Ecuación 5)

$$VA = \frac{Vp}{FGT}$$

Para el cálculo de la velocidad promedio de la población (Vp) se tomaron los valores observados en casos de desastres ocasionados por tsunamis propuestos por Post, *et al.* (2009), presentados en la Tabla IV.2. Ya que evidencian la forma en que los aspectos de género y edad influyen de forma determinante en el grado de vulnerabilidad de la población al momento de evacuar a sitios seguros (Nishikiori, *et al.*, 2006; Birkmann & Fernando, 2008).

Tabla IV. 2. Velocidad promedio por grupo poblacional

Categorías de población	Velocidad de evacuación (m/s)**
Población de 14 y menos años de edad (P_1)	2.1 (V_1)
Población Masculina de 15 a 60 años de edad (P_2)	2.8 (V_2)
Población Femenina de 15 a 60 años de edad (P_3)	2.7 (V_3)
Población de más de 60 años de edad (P_4)	1.7 (V_4)
Población Total (P_t)	

Fuente: Modificada de Post, *et al.* (2009).

A partir de los valores de la Tabla IV.2 se realizó una suma ponderada de los valores de velocidad i (V_i) características de cada categoría de la población i (P_i) y fue promediada respecto al total de la población (P_t), ver Ecuación 6.

Ecuación 6)

$$Vp = \frac{1}{P_t} \sum_{n=1}^{i=n} (P_i V_i)$$

Por otro lado, las características del terreno que se emplearon para determinar la FGT fueron: la pendiente (Fp), la hidrografía (Fh), el uso de suelo (Fu) y existencia de caminos (Fc). Estos elementos fueron combinados de forma acumulativa (Ecuación 7) de acuerdo a los criterios presentados en la tabla IV.3.

Ecuación 7)

$$FGT = Fp \cdot Fu \cdot Fh \cdot Fc$$

Tabla IV.3. Factores de fricción

Factor	Clase	Valor de Fricción	Grado de Dificultad
<u>Pendientes</u> (<i>Fp</i>)	0° a 3°	1	Nula
	3° a 10°	2	Escasa
	10° a 25°	4	Media
	25° a 45°	8	Elevada
	> 45°	16	Extrema
<u>Hidrografía</u> (<i>Fh</i>)	Ríos	99999	Absoluta
	Lagos	99999	Absoluta
	No ríos Ni lagos	1	Nula
<u>Uso de Suelo</u> (<i>Fu</i>)	Edificaciones	99999	Absoluta
	Sin edificaciones	1	Nula
	Terreno agrícola	2	Escasa
	Vegetación densa	4	Media
<u>Caminos</u> (<i>Fc</i>)	Con algún tipo de camino	1	Nula
	Sin caminos	2	Escasa

Fuente: Modificada de Rodríguez, *et al.* (2000)

Para la determinación del grado de vulnerabilidad de la población se empleó el método de sobre-posición espacial, intersecando la información del mapa de IAZS con el mapa de distribución de la población. Basados en un pre-diagnóstico de la dinámica de ocupación del territorio, se generaron dos escenarios de ocupación del territorio: mínima y máxima, debido a que la condición de temporalidad en la ocupación del territorio es un aspecto determinante en la evaluación del grado de vulnerabilidad de la población (Papathoma, *et al.*, 2003; Dominey-Howes & Papathoma, 2007). La ocupación mínima representa a la población concentrada en todas las edificaciones de uso habitacional. Mientras que el modelo de ocupación máxima, supone que todos edificios con usos que impliquen una ocupación temporal o permanente se encuentren habitados. Esto ocurre cuando las actividades económicas se realizan a su máxima capacidad, para zonas turísticas en temporadas vacacionales.

El mapa de ocupación máxima fue determinado mediante los datos de la Secretaría de Turismo del Estado de Colima y bajo el supuesto de que todos los espacios de uso habitacional o de infraestructura turística, así como, las casa de playa, las zonas de camping y el cordón de playa se encuentran en su nivel de ocupación máxima. Esto con la finalidad de determinar el volumen máximo de la población y evaluar su nivel de vulnerabilidad.

Evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones (equipamiento e infraestructura)

Para evaluar el grado de vulnerabilidad de las edificaciones (V_c) se empleó un indicador de la capacidad de resistencia de las construcciones *i.e.*, Leone, *et al.* (2011) respecto a la máxima fuerza hidrodinámica (Hatori, 1964), producida por el tsunami.

Se asumió que el daño en las construcciones es causado directa o indirectamente por la fuerza hidrodinámica que se ejerce sobre ellas. Se tomó como base el modelo de curvas de

fragilidad de Koshimura, *et al.* (2009). Los parámetros de los daños estructurales fueron tomados de observaciones colectadas en trabajos post-desastre de tsunami, *i.e.*, Maheshwari, *et al.* (2005), Suppasri, *et al.* (2012) y Reese, *et al.* (2011), entre otros, quienes presentan curvas de fragilidad para estimar los daños a construcciones, tomando como indicadores el tipo de materiales de construcción respecto a la profundidad de la inundación. Sin embargo, la mayoría de estos modelos no contemplan el total de los tipos de materiales de construcción empleados en la zona de estudio de esta investigación, de cualquier forma, aportan datos para calibrar otras estimaciones. Por otro lado, Yasuda & Hiraish (2004) propone un modelo de cinco rangos de fragilidad en el cual incluye más tipologías de materiales de las construcciones, ver Tabla IV.4, y sus respectivos daños potenciales de acuerdo a la fuerza hidrodinámica, este modelo será empleado en esta investigación.

A partir de estas observaciones, se propone un método de evaluación en función de los umbrales de F para cada tipo de construcción. Proponemos el uso del concepto de Límite de Resistencia (Lr), dado a partir del límite superior de los rangos presentados en la Tabla IV.4, y de un ponderador que dimensione su valor en función del estado de conservación del edificio (Ec), para generar un valor aproximado del porcentaje de daños de las edificaciones mediante un índice de daños de la construcción (IDC), de la forma planteada en la Ecuación 8.

Ecuación 8)

$$V_c = IDC = \frac{F_i}{E_c \cdot Lr_i} \cdot 100$$

Tabla IV.4. Relación de daños en función de la fuerza hidrodinámica y el material de construcción de las edificaciones

Nivel	F (kN/m)	Potenciales daños	Porcentaje de daños
1	$0 < F < 27.4$	Daños menores en construcciones de madera.	0 – 30%
2	$27.4 \leq F < 49.0$	Daños intermedios en construcciones de madera.	30 – 50%
3	$49.0 \leq F < 111$	Daños menores en construcciones de ladrillo.	0 – 30 %
		Destrucción de casas de madera.	50 – 100%
		Daños intermedios en construcciones de ladrillo.	30 - 50 %
4	$111 \leq F < 603$	Daños menores en construcciones de concreto.	0 – 30%
		Destrucción en construcciones de ladrillo.	50 - 100%
5	$603 \leq F$	Daños intermedios en construcciones de concreto.	30 – 50%
		Destrucción de construcciones de concreto.	50 – 100%
		Daños en estructuras de concreto reforzado.	0 – 30%

Fuente: Tomada de Yasuda and Hiraish (2004).

Evaluación de vulnerabilidad los medios y formas de subsistencia (actividades económicas, sociales y culturales)

El análisis parte de la identificación y clasificación de las edificaciones que se emplean en el desarrollo de cada actividad, económica, social y/o cultural, *i.e.*, Papathoma & Dominey-Howes (2003). Se partió del supuesto de que la cantidad y características de las edificaciones existentes permiten que las actividades económicas, sociales y culturales se desarrollen de manera óptima, y representan las formas y modos de subsistencia del asentamiento humano, y que la actividad pierde sus capacidades de operar en la medida en que las edificaciones requeridas para ser realización sean dañadas (Ver Ecuación 9).

Ecuación 9)

$$Va_i = \frac{1}{TI_i} \sum_{n=1}^{i=n} (Ia_i IDC_i) \cdot 100$$

Donde Va_i es la vulnerabilidad de la actividad económica, social ó cultural i , Ia_i define al edificio requerido para la actividad económica, social o cultural i , IDC_i corresponde al índice de daños del edificio i requerido para la actividad económica, social ó cultural i , y TI_i es el Total de edificaciones requeridas para la realización de la actividad económica, social ó cultural i .

RESULTADOS

El peor escenario de tsunamis en Cuyutlán

Los modelos tomados en cuenta se basan en la combinación de factores que podrían o han desencadenado tsunamis con potencial destructivo en las costas de Cuyutlán. Se consideraron cuatro escenarios de generación de tsunamis por causas sísmicas [ver detalles en Borrero, *et al.* (1997), Okal & Borrero (2011), Corona & Ramírez-Herrera (2012a) y Gonzalez, *et al.* (2012)] y uno por deslizamiento submarino [ver detalles en (Corona & Ramírez-Herrera, 2012a)], que corresponde a las características del tsunami del 22 de junio de 1932.

De acuerdo a los modelos sísmicos las alturas máximas de ola se concentran en la Bahía de Manzanillo (Ver Figura IV.3). En Cuyutlán las alturas máximas de ola de los cuatro eventos con fuentes sísmicas no superan los 7 m. de altura, Okal & Borrero (2011), Figura IV.3. En el modelo de generación por deslizamiento submarino, los valores de altura máxima de ola se extienden desde Cuyutlán, donde presenta valores de 12 m, hacia el Sureste de la costa hasta Boca de Apiza.

Por lo tanto, el peor escenario de tsunami que fue tomado como base para evaluar la vulnerabilidad en Cuyutlán corresponde al tsunami del 22 de junio de 1932. El cual afectó 25 km. de la costa de Colima e invadió Cuyutlán con olas de hasta 12 m. de altura a una velocidad de entre 3 y 5 m/s. El tsunami se produjo después del sismo de 6.9 Ms (Singh, *et al.*, 1984; Singh, *et al.*, 1985; Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2011) que se originó a las 7:00 horas (UTC-6), el cual inmediatamente después desencadenó un deslizamiento

submarino a 15 km. de la costa, originando el tsunami que a las 7:05 horas (UTC-6) golpeó la playa de Cuyutlán (Corona & Ramírez-Herrera, 2012b).

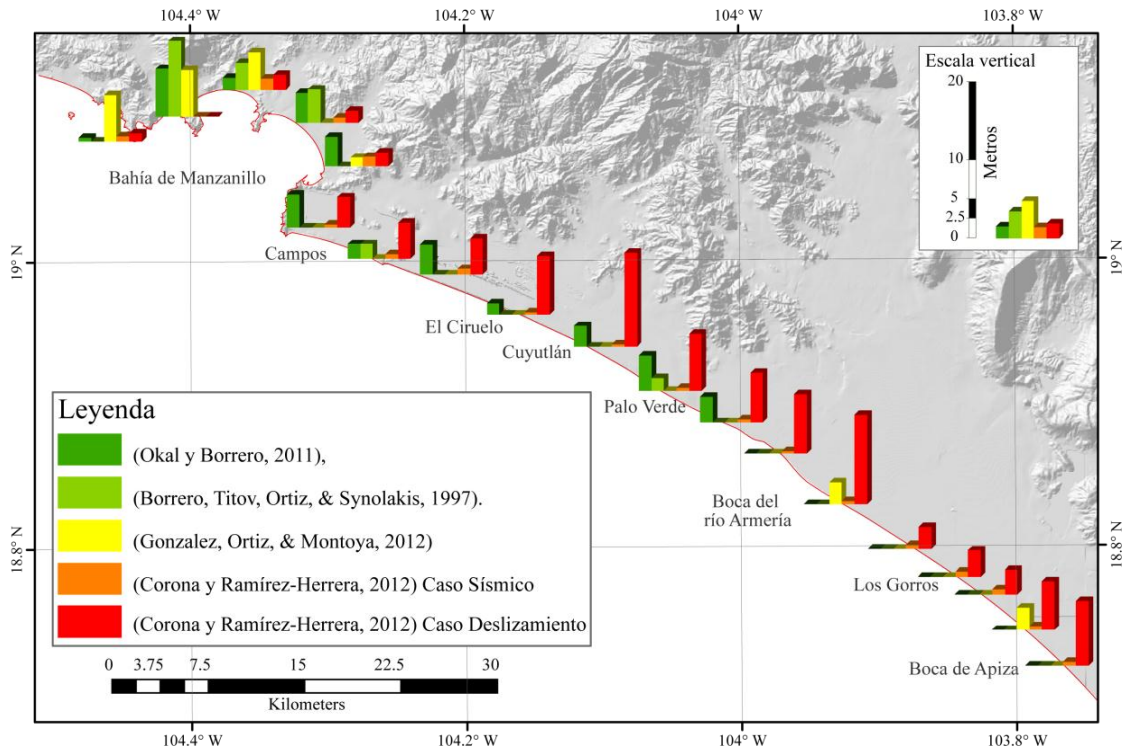


Figura IV. 3. Comparación de alturas máximas de tsunami de escenarios sintéticos.

Componentes de la amenaza de tsunami

La modelación semi-detallada con *GEOWAVE/FUNWAVE* usando los parámetros propuesto por Corona & Ramírez-Herrera (2012a) arrojó los primeros dos componentes de la amenaza: tiempo de arribo y profundidad de inundación.

Respecto al tiempo de arribo, el modelo mostró que el tsunami arriba a la costa cinco minutos después de la generación del deslizamiento, y tarda cerca de 3 minutos para llegar hasta el límite horizontal de la inundación, a una distancia de entre 300 y 3,000 m. de la línea de costa, exceptuando la laguna en donde presenta una mayor distancia de penetración (Figura IV.4).

Los valores máximos de profundidad de inundación oscilan entre 12 m en la playa, y pierden profundidad al entrar en contacto con la franja de dunas paralelas a la línea de costa, se propaga al interior del continente en donde alcanza valores de entre 0.5 y 6 m (Figura IV.5).

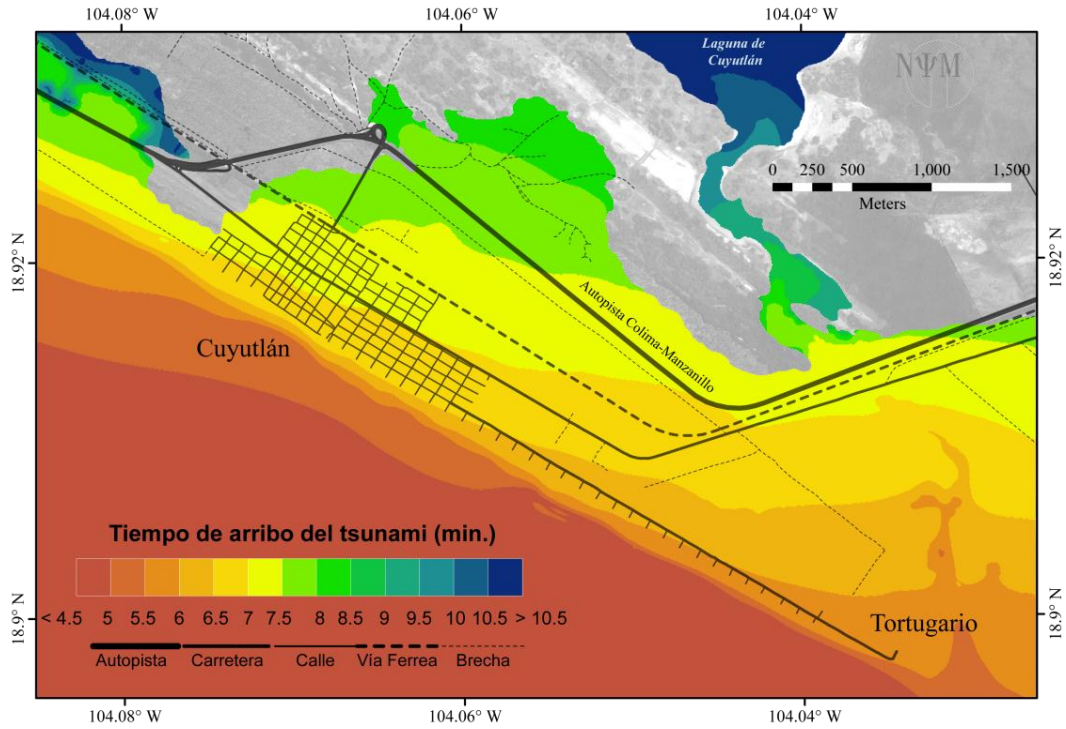


Figura IV.4. Tiempo de arribo del tsunami.

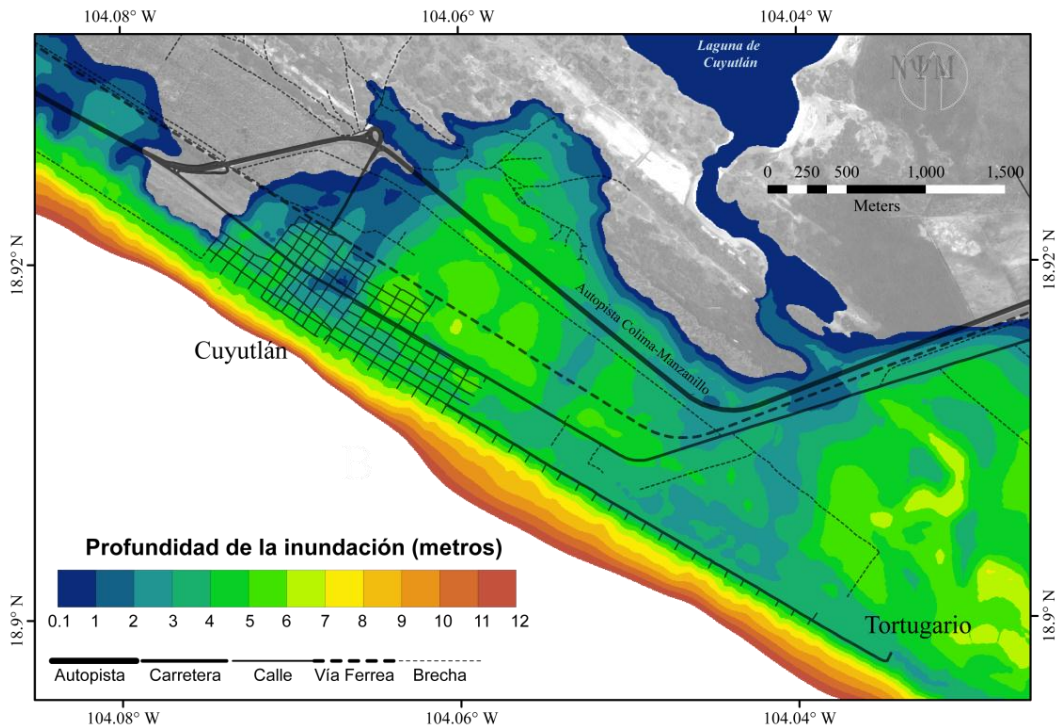


Figura IV.5. Profundidad máxima de inundación con base a la modelación del tsunami generado por un deslizamiento submarino igual al del 22 de Junio de 1932 según los parámetros modelados de Corona & Ramírez-Herrera (2012a).

La velocidad del flujo, generada con el modelo de Hatori (1964), presenta los valores máximos en los sectores de playa, > 6 m/seg. Cuando el tsunami penetra a la costa se

canalizan por las zonas más bajas del cordón de dunas y por las ramificaciones del estero, al Este del Tortugario, en donde alcanza velocidades superiores a los 6 m/seg. En el resto del terreno la velocidad oscila entre 1-3 m/seg. (Figura IV.6). De igual forma se observa que en la zona del asentamiento humano, definido como la trama reticular de calles (Figura IV.6), se presentan velocidades que alcanzan los 6 m/seg.

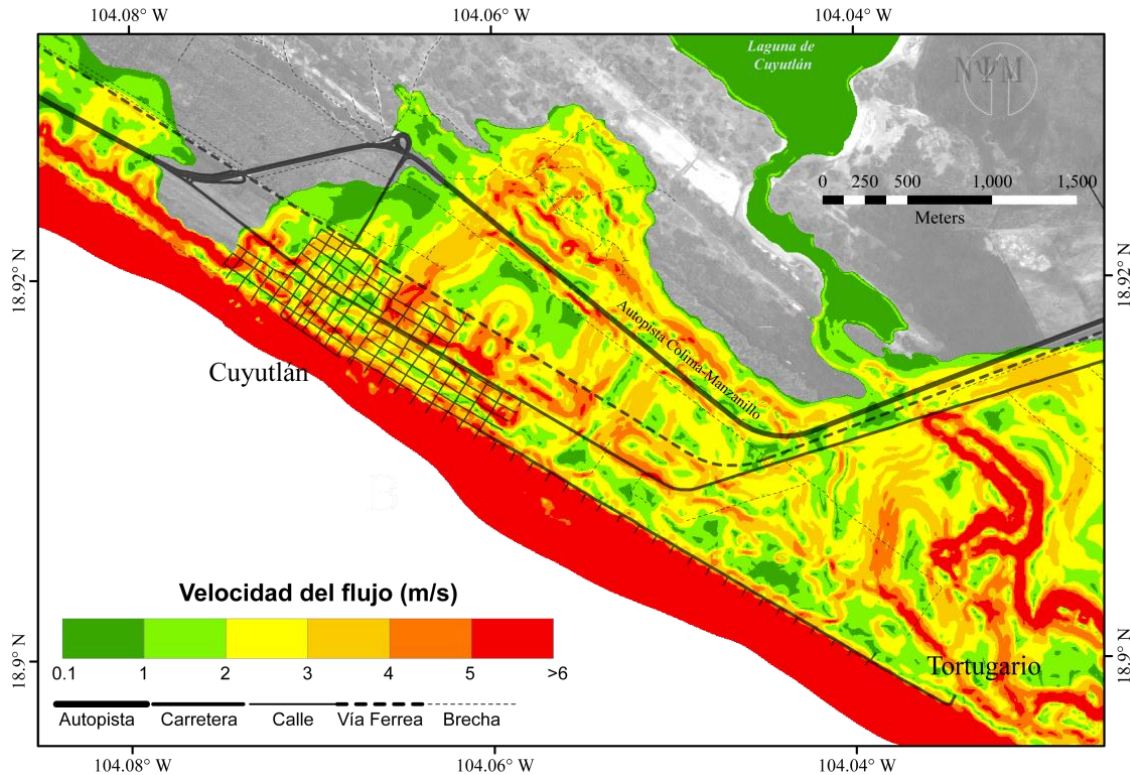


Figura IV.6. Velocidad del flujo del tsunami.

A partir de los modelos de inundación y velocidad del flujo se calcularon los valores de fuerza hidrodinámica con el modelo de Koshimura, *et al.* (2009). Los rangos en que fueron agrupados corresponden a las categorías presentadas en la tabla IV.4.

La distribución de la fuerza hidrodinámica presenta un gradiente de atenuación al entrar en contacto con la playa, de donde pasa de valores de 1,000 kN/m a 400 kN/m, y al entrar en contacto con las dunas se reduce a rangos de entre 100 y 50 kN/m. Este patrón es distinto en la zona del Tortugario, en donde la altura de las dunas es menor y los canales del estero favorecen la permanencia de la fuerza hidrodinámica, presentando valores de entre 111 y 200 kN/m (Figura IV.7).

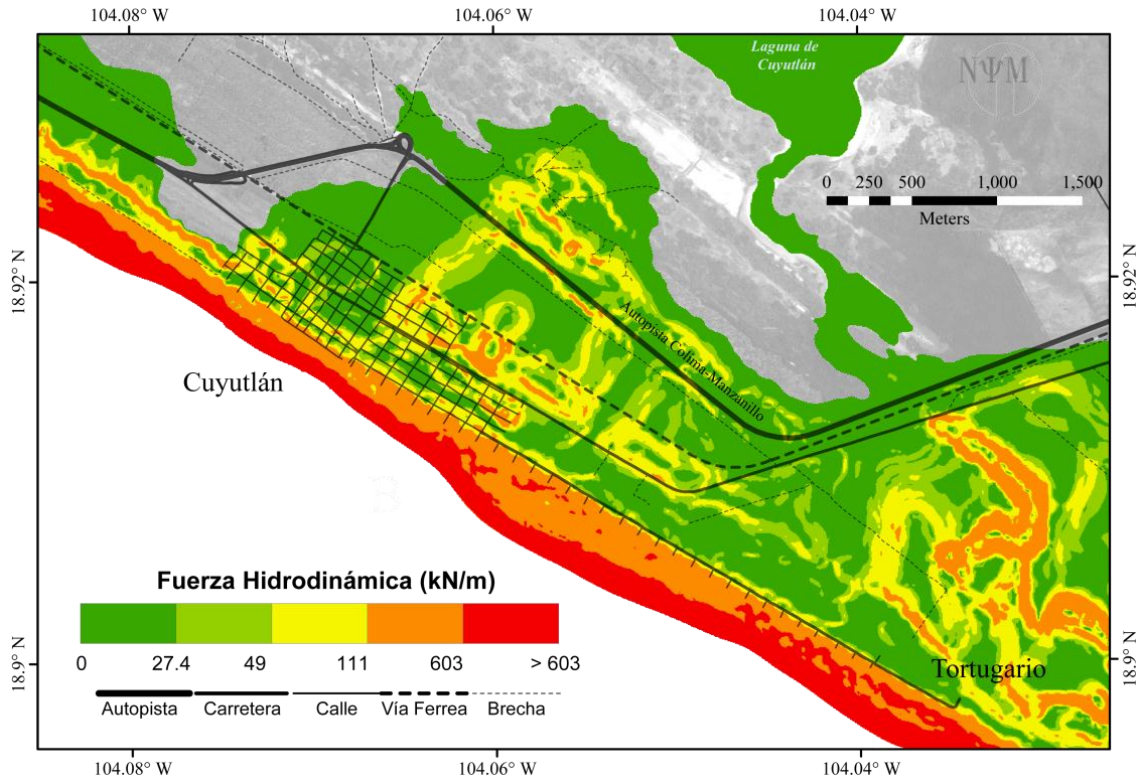


Figura IV.7. Fuerza hidrodinámica del tsunami.

Perfil general del asentamiento poblacional de Cuyutlán

Cuyutlán, históricamente se ha caracterizado por la extracción de sal, seguida por la actividad agrícola, plantación de cocoteros, que data de 1569. La actividad turística inicia en 1887, con la construcción del primer hotel, Hotel Pacífico. Se observó que todas las actividades fueron favorecidas por la gradual incorporación de infraestructura ferroviaria y vial a partir de 1908. Lo que detonó el crecimiento del asentamiento y la incorporación de más equipamiento turístico; la construcción de los Hoteles Santa Cruz 1 y 2, en 1908, la aplicación y cambio de nombre del Hotel Pacífico a Hotel Ceballos, en 1910, entre otros (Reyes-Garza & Leytón-Ovando, 1992), ver Figura IV.8.

El estímulo en las actividades económicas impactaron de forma significativa el crecimiento poblacional de Cuyutlán (Figura IV.4). Después de 1910, la actividad salinera, la siembra furtiva de palma de coco, el gradual incremento de la infraestructura turística y la construcción de la brecha de Colima a Cuyutlán, comienza a darse un crecimiento a razón del 400%, en 1921. Para 1930 la población ya era de 1,181 habitantes y con un patrón de crecimiento en constante desarrollo. Sin embargo después del Tsunami del 22 de junio de 1932 se presenta un éxodo hacia localidades más alejadas de la línea de costa, principalmente Armería (LVI Legislatura del H. Congreso del Estado de Colima, 2008). Mismo que no se ve reflejado para el Censo de 1940, dado que de inmediato se activó un plan de contingencia orientado a reactivar las actividades económicas y re-densificar el área.

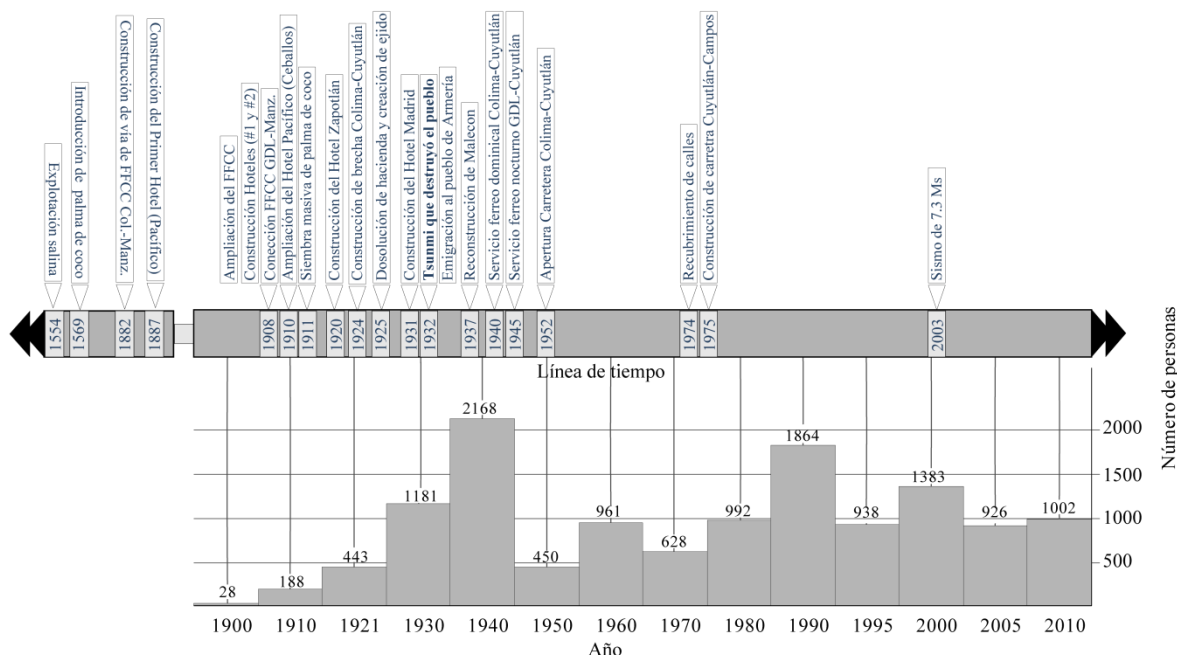


Figura IV.8. Dinámica poblacional y sucesos que impactaron el desarrollo de Cuyutlán de 1554-2010. Numero en la cima de cada columna, corresponde a la cantidad de habitantes (Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), 2010). Los eventos fueron tomados de (Reyes-Garza & Leytón-Ovando, 1992).

En la actualidad, las principales actividades económica son el turismo, de carácter regional y con patrones de máxima ocupación que se concentran en los periodos vacacionales en Semana Santa e invierno (Secretaría de Turismo del estado de Colima, 2011), la extracción de sal, la agricultura, y en menor medida la actividad inmobiliaria.

Sé identificaron tres componentes del asentamiento poblacional de Cuyutlán: la Población, edificaciones (equipamiento e infraestructura) y las actividades económicas, sociales y culturales, mismas que se ven reflejadas en los usos y destinos de territorio (Ver Figura IV.9).

Dinámica poblacional

La dinámica poblacional fue definida a partir de los patrones de ocupación del territorio en distintos momentos del año. Los habitantes que residen permanentemente en Cuyutlán son 1,038 habitantes (INEGI, 2011). Entre los meses de Marzo a Junio se presenta un proceso de ocupación semipermanente a causa de la temporada de extracción de sal, cerca de dos mil salineros se establecen en un sector del pueblo por cerca de 180 días. Finalmente, la población que sólo en temporada de vacaciones utiliza las casas de playa, o infraestructura turística de alojamiento, este bloque poblacional llega a ser de 12,000 personas que a lo largo del año pueden acumular estancias de entre 15 y 30 días (Secretaría de Turismo del estado de Colima, 2011). La densidad mínima de población se presenta en los mese de Enero, Febrero, y en el periodo de Julio a Noviembre, y la máxima entre los meses de Abril y Mayo, que es cuando está en pleno desarrollo la extracción de sal y las actividades turísticas se encuentran en su máximo (Ver Figura IV.10).

CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DEL GRADO DE VULNERABILIDAD A LA AMENAZA DE TSUNAMIS: EL CASO DE CUYUTLÁN, COLIMA.

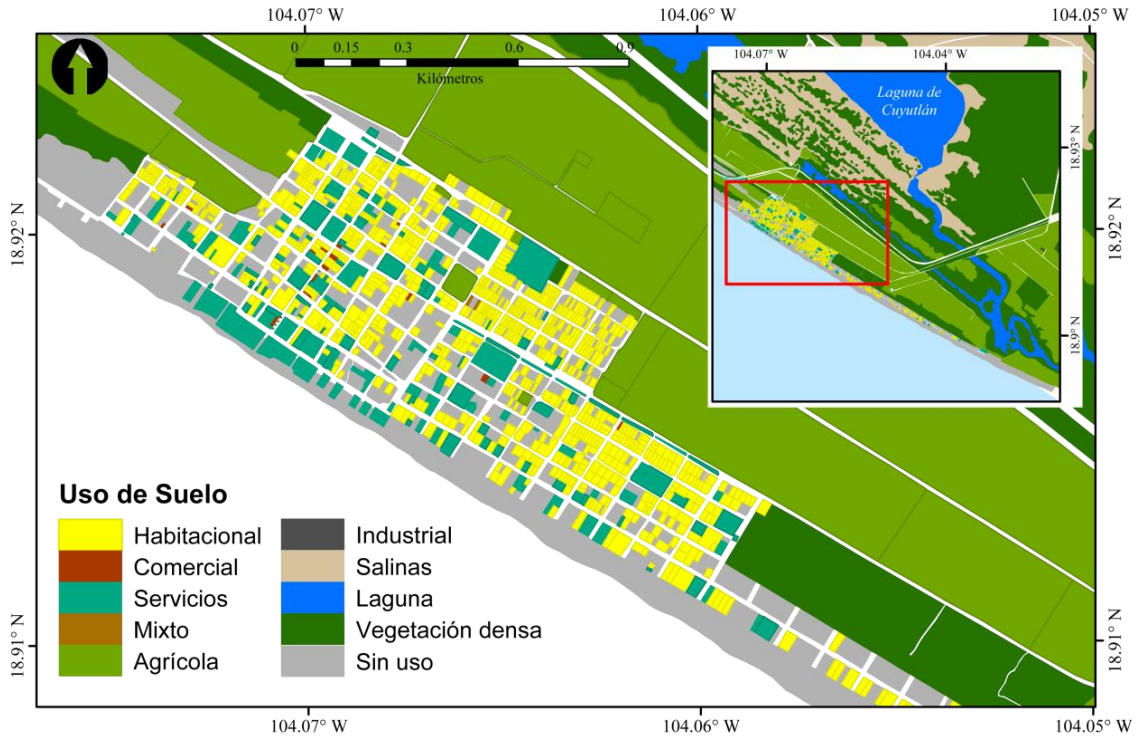


Figura IV.9. Mapa de uso de suelo

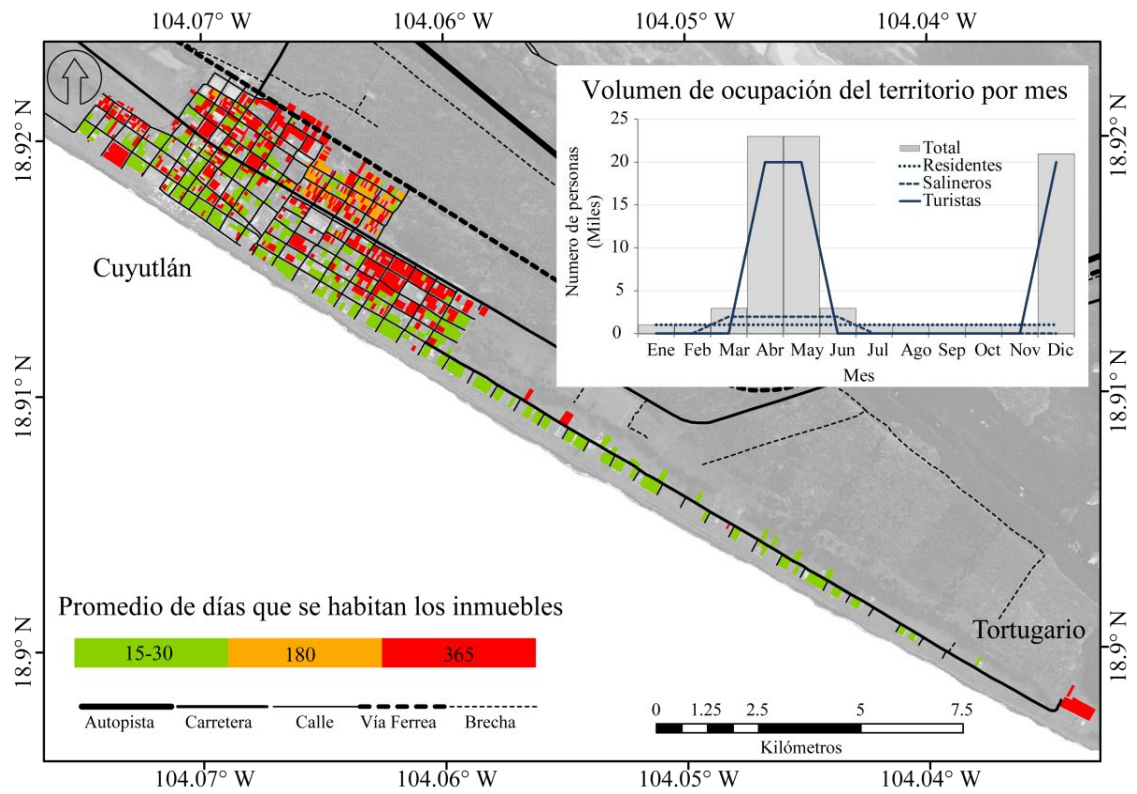


Figura IV.10. Dinámica de ocupación del territorio a lo largo del año.

Vulnerabilidad de la población

Para medir el grado de vulnerabilidad de la población, la primera fase fue obtener un perfil general de la estructura poblacional, considerando aspectos de género y edad. Cómo se plantea en la metodología, estas características se relacionan con la velocidad de evacuación. De acuerdo a estas consideraciones y con el uso de la Ecuación 6, se determinó que la velocidad promedio de los habitantes de Cuyutlán, es de 2.44 m/s (ver parámetros en Tabla IV.5).

Tabla IV.5. Categorías de la población y velocidad promedio por grupo

Categorías de población	Población*	Porcentaje de la población (Vi)	Velocidad de evacuación (m/s)**
Población de 14 y menos años de edad (P ₁)	280	27.94	2.1 (V ₁)
Población Masculina de 15 a 60 años de edad (P ₂)	291	29.04	2.8 (V ₂)
Población Femenina de 15 a 60 años de edad (P ₃)	305	30.44	2.7 (V ₃)
Población de más de 60 años de edad (P ₄)	126	12.57	1.7 (V ₄)
Población Total(Pt)	1002		

*(Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), 2010). **Ajusta de Post, *et al.* (2009).

Al desarrollar el modelo del tiempo disponible para evacuar (diagrama y mapa en la Figura IV.11), se encontró que el tiempo máximo para evacuar se presenta en el extremo suroeste del asentamiento, en el Tortugarío y sus alrededores. Dada la morfología de la traza urbana, la distribución de las vialidades, la barrera natural correspondiente al estero y sus ramificaciones, esta zona se encuentra a 35 minutos de las zonas seguras.

La zona que concentra la mayor densidad de las edificaciones, en torno a los principales caminos de acceso presentó rangos de entre 0 y 5 minutos (Figura IV.10).

Al combinar el mapa de TDE con el del tiempo de arribo del tsunami, TEA (Figura IV.4), mediante el planteamiento referido en la Ecuación 3, se generó el Índice de Acceso a Zonas Seguras, IAZS (Figura IV.12). Este fue dividido en 5 categorías de acuerdo a las posibilidades de la población de alcanzar zonas seguras (Ver Tabla IV.1).

Los resultados muestran que solo la mitad de la zona con mayor densidad de edificaciones se encuentra en un área con rutas de evacuación y cercana a las zonas seguras (rangos de 0 - 1). La mayor parte del terreno presenta índices de más de 1.5. Dadas las características de arribo del tsunami, la cercanía con las ramificaciones de la laguna de Cuyutlán y la orientación de la red de caminos, el sector sureste, presenta los valores más altos del índice (Figura IV.12).

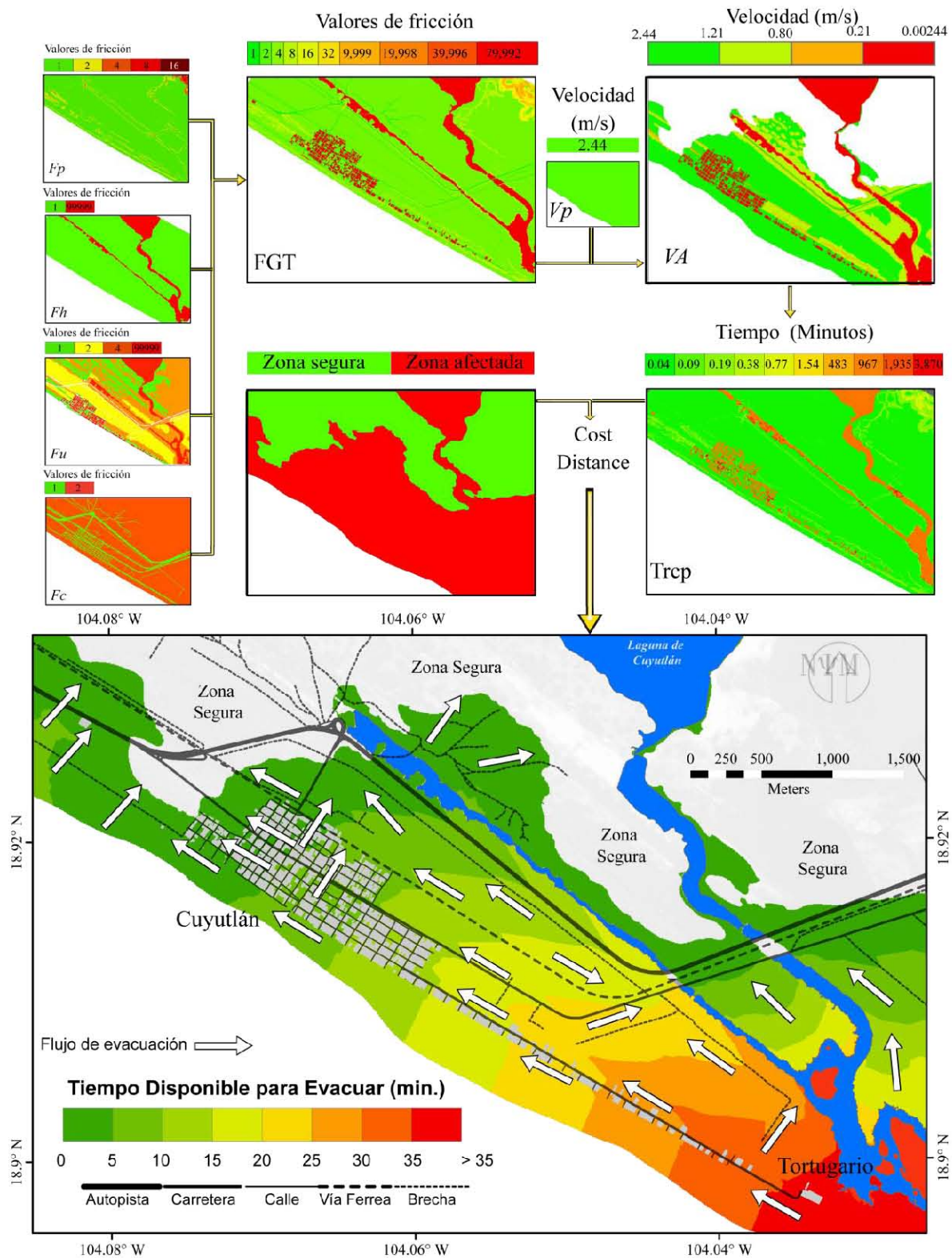


Figura IV.11. Modelo de tiempo disponible para evacuar a zonas seguras (TDE).

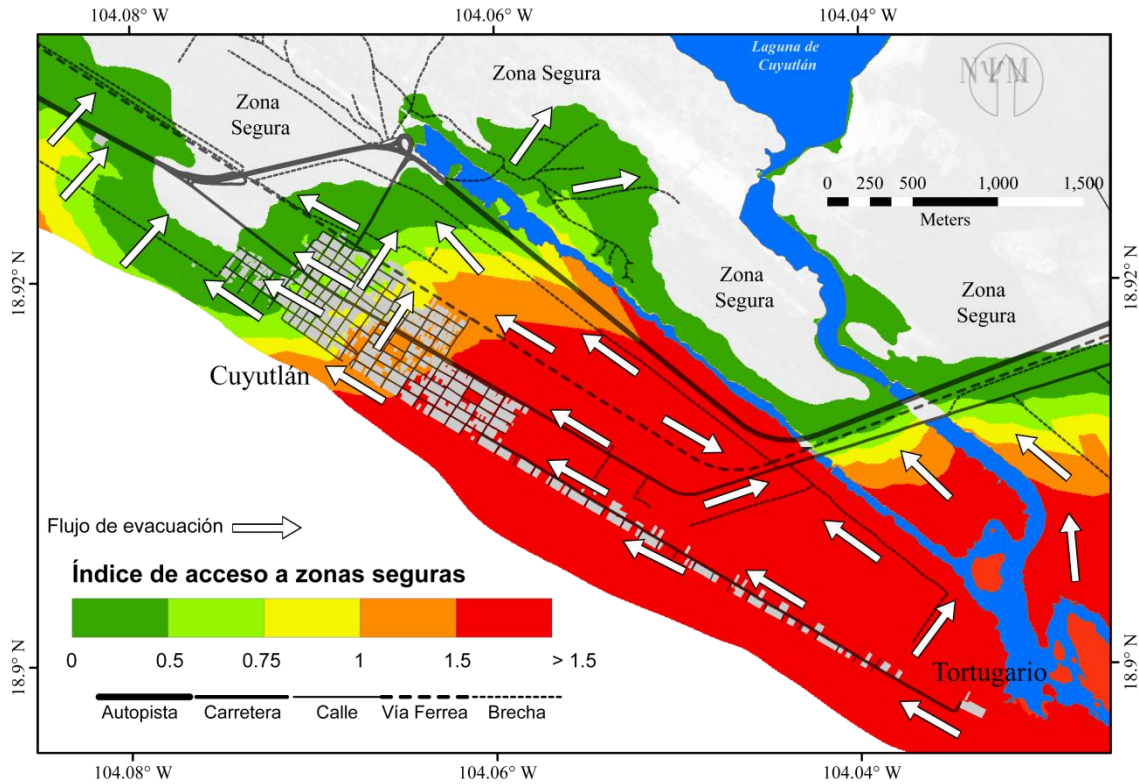


Figura IV.12. Modelo de índice de acceso a zonas seguras.

Al realizar la sobre-posición espacial del mapa de IAZS con el mapa de densidad poblacional se determinó el grado de vulnerabilidad de la población. En el periodo de ocupación mínima el total de viviendas habitadas es 473, en las cuales residen permanentemente 1,038 personas. Al cuantificar la cantidad de personas que se reside en cada zona del IAZS, se encontró que 607 personas presentan un grado de vulnerabilidad de muy bajo a medio. Esto implica que dada su condición de localización respecto al arribo del tsunami, cuentan con el tiempo necesario para alcanzar zonas seguras. Por otro lado, 158 habitantes presentan un grado de vulnerabilidad alto, y 271 un grado de vulnerabilidad muy alto; estos dos grupos constituyen el 41% de la población en este escenario. (Figura IV.13).

Por otro lado, en el periodo de máxima ocupación, el volumen poblacional se incrementa drásticamente a un total de 12,500 personas. El 22% presenta condiciones de vulnerabilidad muy alta, y el 11% vulnerabilidad Alta, juntos representan 4,147 personas, el lo que significa que el 30% de la población en este periodo de tiempo sería incapaz de evacuar a zonas seguras (Figura IV.14). El resto de los habitantes pueden tener oportunidad de alcanzar sitios seguros siempre y cuando la reacción sea inmediata y existiera una clara conciencia colectiva de las señales de alerta que indican la generación un tsunami.

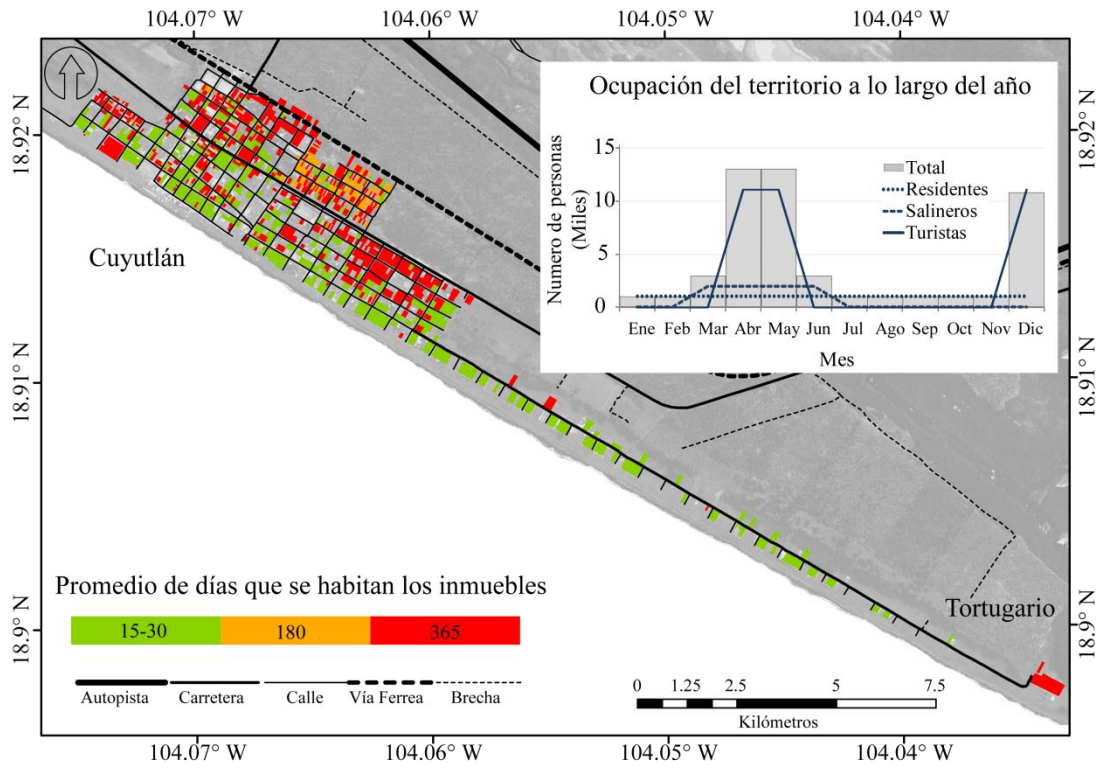


Figura IV.13. Distribución de la población de acuerdo su grado de vulnerabilidad en el periodo de menor ocupación.

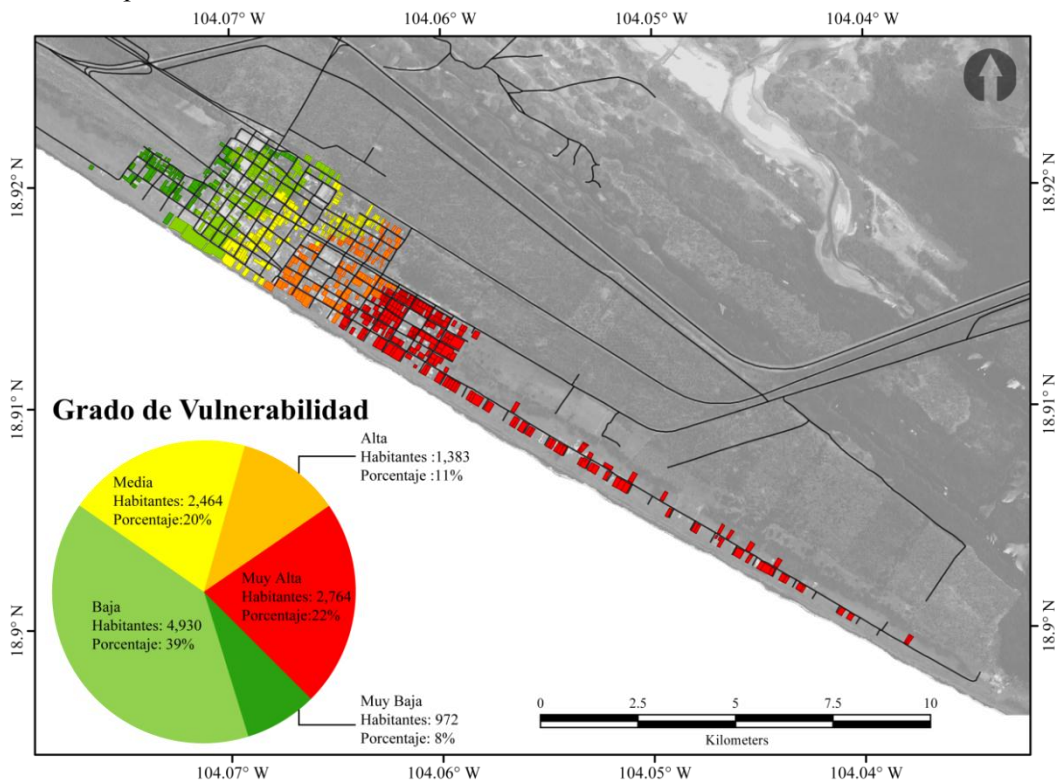


Figura IV.14. Distribución de la población de acuerdo su grado de vulnerabilidad en el periodo de máxima ocupación.

Vulnerabilidad de las edificaciones (Equipamiento e infraestructura).

Este apartado presenta el proceso de determinación de la evaluación de vulnerabilidad de las construcciones. El procedimiento consistió en efectuar la sobreposición espacial del mapa de fuerza hidrodinámica sobre el mapa de edificaciones. El resultado fue un mapa de fricción hidrodinámica sobre cada tipo de edificio. A partir de la asignación de estos valores a nivel de edificaciones y relacionarlos con las características de conservación de los edificios (E_c) y materiales de construcción, se estimó el índice de daños en las construcciones (IDC), de acuerdo a los lineamientos de la Ecuación 8. Este dato se empleó para determinar el grado de vulnerabilidad de las construcciones, V_c (ver Figura IV. 15A).

Los resultados muestran que el poblado cuenta con 1,305 edificaciones. El material de construcción que predomina es el ladrillo, 1,158 edificios. En términos de resistencia, la fuerza hidrodinámica que pueden soportar es del orden de los 603 kN/m. En menor medida hay edificaciones hechas de madera (187 construcciones), y muy pocas de concreto reforzado (Figura IV.15). El 78% de los edificios se encuentran en un nivel de vulnerabilidad muy bajo. En el otro extremo, 105 construcciones son altamente vulnerables, la mayoría de los cuales se localizan frente a la playa, en las laderas con orientación hacia el mar (Figura IV.15B).

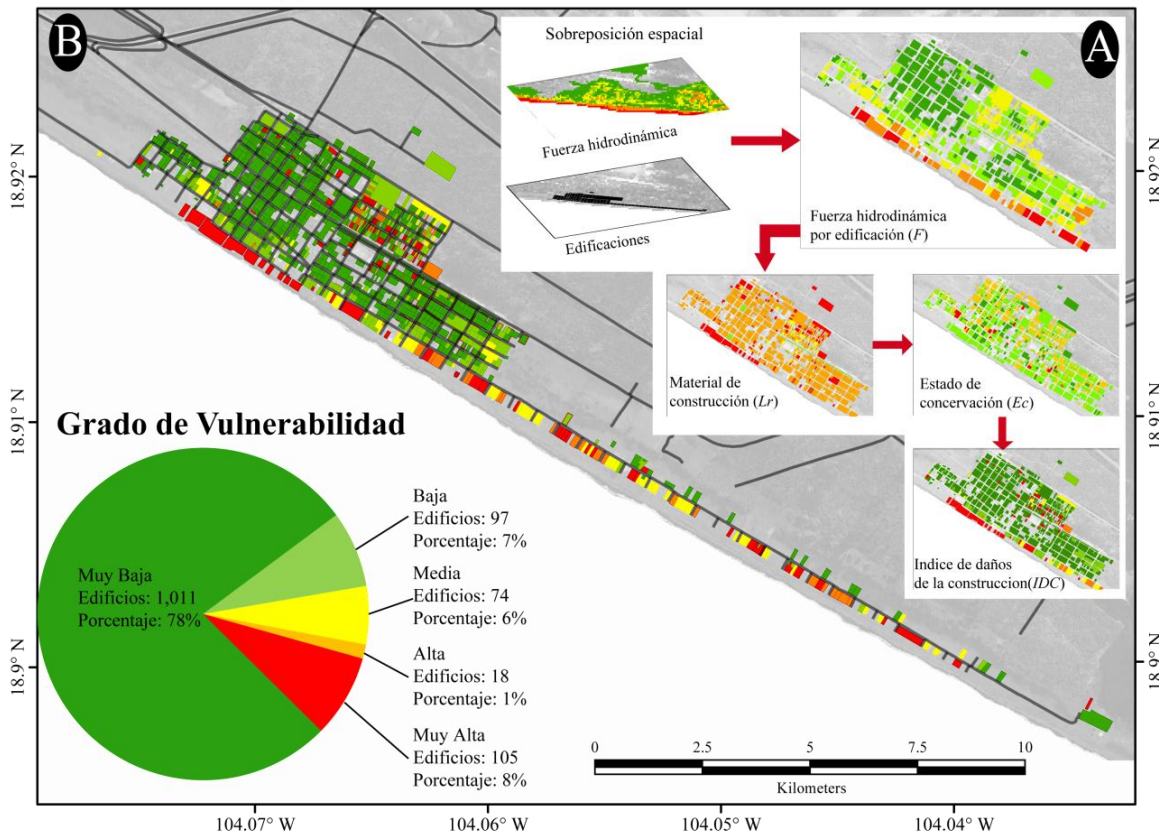


Figura IV.15. A) Esquema de generación Índice de Daños de la Construcción (IDC), indicador de vulnerabilidad de las edificaciones, B) Mapa de vulnerabilidad de las edificaciones.

Vulnerabilidad las actividades económicas, sociales y culturales

Actividades económicas

Las principales actividades económicas de Cuyutlán está definida en 4 sectores: turístico, agrícola, extracción de sal e inmobiliario, el resto de las edificaciones fueron agrupadas en la categoría de bienes y servicios, sitios que en donde se realizan el resto de las actividades sociales y culturales que dan dinámica al asentamiento humano.

La actividad turística está definida por cinco subsectores: servicios de aproximación (vías de comunicación), empresas hoteleras y de alojamiento (Equipamiento de hospedaje), Consumo de alimentos y bebidas (Edificaciones con uso comercial y de servicios), equipamiento de ocio (Edificaciones de ocio y esparcimiento, se incluye la playa como elemento de recreación), y empresas de intermediación (Vera & Marchena, 1988).

Los componentes de la actividad salinera se dividen en extracción, almacenamiento, empaque, distribución y alojamiento, este último rubro responde a la dinámica de temporal de esta actividad y los correspondientes flujos poblacionales que esta acarrea. Hay una sección de Cuyutlán en la que residen de forma provisional los trabajadores de las salinas. En el ramo de la agricultura sólo se definieron dos componentes, las áreas de cultivo, plantaciones, y los canales de distribución, definidos como en todos los casos por la red de comunicaciones terrestres. Para el ramo de la actividad inmobiliaria, se identificaron solamente aquellos predios y edificaciones que se encuentran en venta (ver Tabla IV.6).

Tabla IV.6. Vulnerabilidad de las actividades económicas de Cuyutlán.

Actividad económica	Subsector de actividad	Número de edificios empleados	Edificios afectados	Porcentaje de afectación	Nivel de vulnerabilidad del sector***
Turística	Alojamiento	381	68.83	18.1	Medio
	Consumo	17	3.62	21.3	Alto
	Ocio y esparcimiento	18	4.83	26.8	Alto
<u>Salinera</u>	Extracción*	1	0.11	11.64	Medio
	Almacenamiento	6	2.3	38.3	Muy Alto
	Empaque	1	0.049	4.9	Muy Bajo
	Alojamiento	107	89.18	83.4	Muy Alto
<u>Agricultura</u>	Plantación**	1	0.75	74.8	Muy Alto
<u>Inmobiliario</u>	Venta	46	18.4	40.05	Muy Alto
Afectación total de las actividades económicas		578	188.07	32.54	Muy Alto

* Referido a la superficie de suelos salinos, equivalente a 5.05 km², ** Referido a la superficie donde se cultiva unidad de este campo son 8.33 km², *** El nivel de vulnerabilidad fue definido en escala de 1-100% (0 – 5% = Muy Bajo; 5 – 10% Bajo; 10-20 % Medio; 20 – 30% Alto; Mas del 30% Muy Alto).

La actividad agrícola resultó ser la que mayor nivel de vulnerabilidad presentó, dado que 74.8 % de la superficie está expuesta a ser inundada (Tabla IV. 6).

En segundo lugar se encuentra la actividad de extracción de sal, particularmente el subsector referido al alojamiento, ya que del 83.4% de los edificios destinados a este uso presentan niveles de vulnerabilidad muy altos. En tercer lugar se encuentra la actividad inmobiliaria, el 40.05% de los amuebles en venta se encuentran con Muy Altos niveles de vulnerabilidad. Finalmente está la actividad turística, cuyo subsector más vulnerable se encuentra en el ramo del ocio y esparcimiento, ya que un promedio del 26.8% de los edificios que prestan este servicio presentan niveles Altos de vulnerabilidad (ver Tabla IV.6).

En resumen, las actividades económicas presentan un nivel de vulnerabilidad Muy Alto, ya que pueden sufrir una pérdida de sus capacidades de operar de hasta el 32.54%. Las afectaciones a las actividades económicas son de gran importancia en la medida que ofrecen los medios de subsistencia para el pueblo de Cuyutlán. Como se presentó en la sección introductoria, históricamente han marcado la pauta del crecimiento demográfico, y por tanto la gradual incorporación de bienes y servicios. En tanto que ofrece, además de la respectiva derrama económica a nivel local, las fuentes de empleo directas para los residentes permanentes y población flóate que temporalmente acude a Cuyutlán.

Actividades sociales y culturales

Los edificios y espacios que son utilizados para la realización de actividades sociales y culturales fueron divididos de acuerdo a la tipología de los usos y destinos detectados en campo, ya que pueden reflejar a un nivel general, los requerimientos de la población para realizar actividades sociales y culturales. Se encontró que el sector de la vivienda presenta un nivel de vulnerabilidad Medio, en términos de porcentaje de afectación presenta un 15.7%, indica que un 15 % de los residentes permanentes quedarían sin acceso a este servicio, lo que representaría 150 personas con potencial de perder sus viviendas. Los sectores religioso y de telecomunicaciones son los que presentan los más altos niveles de vulnerabilidad, Muy Alto, para los dos casos. Estos son servicios colectivos y de uso generalizado, por tanto, se puede asumir que las afectaciones en estos dos sectores influyen en toda la población (Ver Tabla IV.7).

Por otro lado, los servicios de salud, que a nivel local se satisfacen mediante un centro de salud, presentan un nivel de vulnerabilidad Muy Bajo, por lo que la permanencia de este garantiza la continuidad del servicio al nivel que actualmente funciona.

En términos generales, a partir de la tabla IV.7, se puede interpretar la pérdida de capacidades de operar de cada sector de servicios y por ende, generar una lectura de las dificultades que enfrentarían los habitantes de Cuyutlán, para llevar el estilo de vida que habitualmente siguen.

Tabla IV.7. Vulnerabilidad de las actividades sociales y culturales de Cuyutlán

Usos y servicios de las edificaciones	Número de edificios empleados en la actividad	Edificios afectados	Porcentaje de afectación	Nivel de vulnerabilidad*
Vivienda	473	74.2274	15.7	Medio
Salud	1	0.0444	4.4	Muy Bajo
Abasto primario	9	1.1026	12.3	Medio
Educativos	3	0.1962	6.5	Bajo
Sanitarios	6	0.9095	15.2	Medio
Sociales	7	0.3241	4.6	Muy Bajo
Telecomunicaciones	6	2.2605	37.7	Muy Alto
Religiosos	4	1.9134	47.8	Muy Alto
Seguridad	1	0.0565	5.7	Bajo
Ocio y Esparcimiento	11	1.5128	13.8	Medio
Deportivo	2	0.1027	5.1	Bajo
Administrativos	1	0.0794	7.9	Bajo
Cementerio	1	0.2445	24.5	Alto
Comerciales	2	0.1871	9.4	Bajo
Culturales	2	0.3468	17.3	Medio
Mantenimiento	2	0.2252	11.3	Medio
Bancarios	1	0.0286	2.9	Muy Bajo
Conservación	1	0.1205	12.1	Medio
Total	533	83.8822	15.7	Medio

Fuente: Elaboración propia.

* El nivel de vulnerabilidad fue definido en escala de 1-100% (0 – 5% = Muy Bajo; 5 – 10% Bajo; 10-20 % Medio; 20 – 30% Alto; Mas del 30% Muy Alto).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Definición de la amenaza de tsunami y sus componentes

El peor escenario de amenaza de tsunami en Cuyutlán fue definido a partir de la evaluación de modelos probabilísticos. Se aprovecharon los resultados de la modelación de otros probables tsunamis con diferentes mecanismos de generación propuestos por otros autores; lo que enriqueció los criterios de selección del peor escenario posible y ayudo a fortalecer el criterio de selección del tsunami del 22 de Junio de 1932 como escenario base para la evaluación de vulnerabilidad. Aunque es evidente que las condiciones para que se generará este tsunami fueron extraordinarias, se asume que existen las elementos para que se genere otro deslizamiento con potencial tsunamigénico de dimensiones similares, dado que la región presenta actividad sísmica permanente, condiciones geológicas marinas, dinámicas de acumulación de sedimentos, entidades morfológicas susceptibles, y propiedades litológicas (Corona & Ramírez-Herrera, 2012a).

Mediante la modelación semi-detallada se logró obtener dos de las características del tsunami y sus dimensiones temporales y espaciales a una escala suficientemente detallada para observar el comportamiento del tiempo de arribo del tsunami a la costa y el tiempo de propagación la inundación hasta el límite de afectación, así como, la magnitud y extensión de la inundación.

La definición del modelo de propagación del tiempo de arribo del tsunami al penetrar la línea de costa hasta el límite de la inundación, es una innovación en materia de conocimiento detallado de este componente del tsunami, ya que generalmente sólo se emplea el valor de tiempo de arribo a la línea de costa (Charnkol & Tanaboriboon, 2006; Zheng, *et al.*, 2012). En términos operativos esto permite hacer una diferenciación de las áreas que cuentan con menor tiempo para evacuar. En el caso de Cuyutlán (Figura IV.4) es posible determinar que las zonas localizadas junto a las ramificaciones del estero son zonas críticas en contra parte con el extremo Noroeste, en donde se disponen de dos minutos adicionales para evacuar.

El modelo de profundidad máxima de la inundación generado a escala semi-detallada refleja la complejidad del fenómeno al penetrar en la costa, este ofrece más probabilidades de análisis que los modelos que se basan en la determinación de cotas máximas de inundación en la zonificación de la amenaza, i.e., Flouri, *et al.* (2012), ya que en zonas con condiciones topográficas complejas, como en el área de estudio seleccionada, estos métodos resultan insuficientes para establecer dicha zonificación (Gardi, *et al.*, 2011). En el caso de Cuyutlán y del tsunami empleado como referencia, se observa un gradiente en la distribución de la inundación, y una clara diferenciación en la distancia que penetra el tsunami, presentando rangos de entre 500 y 3,000 metros (Figura IV. 5).

Por otro lado, a partir del modelo de distribución de la inundación se estimó la velocidad del flujo, y posteriormente, la fuerza hidrodinámica y sus patrones de comportamiento en la superficie afectada. La generación del modelo de fuerza hidrodinámica, es un componente de la amenaza de tsunami que se emplea en mucha menor medida que el dato de inundación, a pesar de ser un indicador compuesto que incorpora las variables de profundidad de la inundación y velocidad del flujo. La fuerza hidrodinámica presenta un margen de análisis más amplio que los valores de profundidad de inundación, en su papel de parámetro de evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones. En el mapa de fuerza hidrodinámica (Figura IV.7) y gracias a la graduación de colores seleccionados, que responde a los rangos de la Tabla IV.4 para determinar el grado de resistencia de edificaciones hechas con distintos tipos de materiales, se puede hacer una lectura de las zonas que resisten ciertos tipos de construcciones. En términos de planeación, este mapa ayuda a determinar las zonas en donde no es adecuado edificar, y en caso de hacerse los materiales de construcción recomendados para resistir la fuerza hidrodinámica.

Evaluación de vulnerabilidad a tsunamis en Cuyutlán

A partir de la diferenciación, determinación y cuantificación de los componentes del tsunami, se originó un proceso de reflexión acerca del sistema “vulnerable”, que condujo a efectuar una caracterización del sistema bajo amenaza y sus componentes.

La caracterización del asentamiento humano es una aproximación cuyo objetivo fue determinar los tipos de elementos expuestos a cada componente de la amenaza de tsunami,

requerimiento esencial en los estudios de vulnerabilidad de acuerdo al International Strategy for Disaster Reduction (2004). Si bien el enfoque en el caso de estudio excluye las redes de suministro de energía, de agua y servicios de redes; esta aproximación y su estructura posibilitan la inclusión de estos elementos de forma sistemática, es una plataforma conceptual y metodológica. Tampoco aborda estrictamente aspectos de sistema ambiental, y efectos ya que cada componente es afectado de forma diferenciada por cada componente de la amenaza de tsunami, *i.e.*, la salinización de los suelos y el nivel de estrés y tolerancia de los cultivos.

El poblado de Cuyutlán fue dividido en tres ejes de análisis de acuerdo a una serie de características que los vinculan con los componentes de la amenaza, la población, las edificaciones y las actividades económicas, sociales y culturales que determinan sus formas y medios de subsistencia.

En relación a la población, se determinó que la variable “tiempo” es el indicador crítico que determina su capacidad para enfrentar al tsunami, y por lo tanto el atributo del tsunami que refleja esta relación es el tiempo de arribo. Más allá de la profundidad de inundación, la velocidad del flujo o la fuerza hidrodinámica, en números estudios se ha demostrado que la mejor estrategia de la población para enfrentar y sobrevivir cuando un tsunami se presenta es evacuar a zonas seguras (Charnkol & Tanaboriboon, 2006; Perry, 2007; Post, *et al.*, 2009; Dominey-Howes, *et al.*, 2010). El índice de acceso de zonas seguras (IAZS) permitió hacer el análisis de esta capacidad de la población y determinar su grado de vulnerabilidad al tsunami, como se aprecia en los dos escenarios de ocupación del territorio (Figura IV.s 13 y 14). Adicionalmente, esta capacidad es ponderada por una serie de atributos de la población (edad y género), y atributos del medio físico e infraestructura (VA) que limitan o favorecen el desplazamiento hacia zonas seguras.

En términos de la operatividad, el IAZS permite identificar las zonas críticas para la evacuación en relación al tiempo de arribo del tsunami. A partir de esta propuesta metodológica se pueden identificar los componentes que afectan el desarrollo de una evacuación eficiente. En el caso de Cuyutlán es clara la condición de aislamiento que enfrenta la mayor parte la población, las limitantes físicas y la existencia de vialidades y rutas eficientes de evacuación. De igual forma se logró identificar que en la temporada de máxima ocupación poblacional, el número de personas sin posibilidades de evacuar se incrementa a diez veces más que en el periodo de ocupación mínima. Debido a que las edificaciones de usos asociados a la actividad turística se localizan en terrenos más cercanos a la costa y en zonas distantes y con dificultades para evacuar a zonas seguras.

Por otro lado, el modelo IAZS representa un potencial escenario de las condiciones actuales de la población frente a un tsunami de las características referidas, sin embargo, al presentarse variaciones en las condiciones de evacuación, o en las características del tsunami, los niveles de vulnerabilidad de la población pueden variar. Por ejemplo, el modelo TDE (Figura IV.11), presenta rangos de tiempo a intervalos de 5 minutos, en este caso el equivalente al tiempo de arribo del tsunami a la línea de costa. La lectura para los planificadores es que, espacialmente, cada porción del terreno con rangos de tiempo de evacuación iguales al TEA, en este caso cinco minutos, requiere una medida de mitigación, construcción de rutas de acceso, o para las zonas en donde no es suficiente el tiempo para alcanzar zonas seguras, la implementación de albergues tsunami-resistentes.

En la evaluación de vulnerabilidad de las edificaciones, el empleo de la fuerza hidrodinámica como el componente de la amenaza de tsunami resulta ser más fiable para valorar las potenciales afectaciones a las edificaciones (Hatori, 1964; Suppasri, *et al.*, 2012) que lo modelos estáticos que se sólo consideran la profundidad de la inundación como componente de amenaza de las edificaciones *i.e.*, Papatoma & Dominey-Howes (2003), Papatoma & Dominey-Howes (2003), Dominey-Howes & Papatoma (2007), Birkmann, *et al.* (2010), Dominey-Howes, *et al.* (2010), Omira, *et al.* (2010), Leone, *et al.* (2011), Strunz (2011), Eckert, *et al.* (2012), Flouri, *et al.* (2012), Løvholt, *et al.* (2012), Tinti, *et al.* (2012), Usha, *et al.* (2012); que recurren a una gran cantidad de variables para refinar sus diagnósticos. Bajo estos enfoques, el suministro de información de las construcciones expuestas a los efectos de tsunamis requiere un gran esfuerzo dado que requieren una caracterización exhaustiva de los edificios, lo cual consume tiempo, recursos humanos, materiales y monetarias, que muchas de las comunidades costeras susceptibles a tsunamis no son capaces de proveer. En cambio, al emplear la fuerza hidrodinámica (F) en la evaluación de vulnerabilidad de las construcciones, sólo se requiere una caracterización más general de las edificaciones: material de construcción, para determinar el propuesto umbral de resistencia (L_r), y el estado de conservación (E_c). Ya que aspectos como localización, distancia a la línea de costa niveles son variables implícitas en el patrón espacial de comportamiento del modelo de F (Figura IV.7).

Se reconoce que los componentes de la amenaza de tsunami son más extensos que los aquí planteados, que el flujo del tsunami está compuesto por partículas y cuerpos sólidos en suspensión que arrastra el tsunami, e involucra otros procesos como el arrastre y proyección de objetos sobre las construcciones y las personas; elementos que en términos de modelación aún presentan muchas limitantes, hacia ese rumbo es a donde apunta este planteamiento, disgregar, definir y establecer los componentes específicos de cada amenaza y establecer el papel que juegan como vulneradores de lo vulnerable.

La caracterización de Cuyutlán ayudó a identificar las principales actividades económicas que se proveen de los medios de subsistencia de la población. El levantamiento de información del uso de suelo y la clasificación de las edificaciones de acuerdo a las actividades que se realizan en ellas, contribuyó a conocer el papel que juega cada edificación como medios que posibilitan su realización y generar una noción de los servicios que articulan las formas de subsistencia de la población de Cuyutlán.

La interpretación empleada en este enfoque basada en que la pérdida de un inmueble complica o imposibilita que las funciones que realizan en él se sigan desarrollando. El método propuesto para evaluar la vulnerabilidad de las actividades económicas, sociales y culturales, entendiéndose medios de subsistencia, retoma la evaluación de la vulnerabilidad física de las edificaciones y evalúa el papel que desempeñan en las realización de cada actividad. Como resultado se generó una aproximación a las dificultades que podría enfrentar Cuyutlán para continuar proveyendo de los medios de subsistencia a la población.

El método de evaluación de vulnerabilidad a tsunamis propuesto en esta investigación refleja la interacción del fenómeno físico con circunstancias y dimensiones espaciales de la los elementos bajo amenaza, queda demostrado que los potenciales efectos dañinos afectan de forma diferenciada a una misma comunidad y a un mismo grupo poblacional (Tinti, *et al.*, 2012).

Los resultados indican que el nivel de vulnerabilidad a los efectos de un tsunami de las peores dimensiones posibles de la población y las edificaciones y lo que estas representan para desarrollarse económica, social y culturalmente es Muy Alto. En casos como este, donde los tiempos de arribo del tsunami son muy reducidos, las medidas de prevención y alerta temprana pueden ser insuficientes.

La aproximación metodológica propuesta en esta investigación ayudo a determinar el alto grado de vulnerabilidad a la amenaza de tsunami de Cuyutlán, estimar las potenciales pérdidas de vidas, los daños en las construcciones y la desarticulación de los medios de subsistencia, respondiendo a los requerimientos prioritarios en materia de reducción y prevención de desastres (Schneiderbauer & Ehrlich, 2004; Birkmann, 2006; United Nations/Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UN/ESCAP), 2006; Birkmann & Fernando, 2008).

BIBLIOGRAFÍA

- Birkmann, J. (2006). Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies. In (pp. 524). United Nations University, Tokyo/New York/Paris.
- Birkmann, J., & Fernando, N. (2008). Measuring revealed and emergent vulnerabilities of coastal communities to tsunami in Sri Lanka. *Disasters*, 32 (1), 82-105.
- Birkmann, J., Teichman, K. V., Welle, T., González, M., & Olabarrieta, M. (2010). The unperceived risk to Europe's coasts: tsunamis and the vulnerability of Cadiz, Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 2659-2675.
- Bohle, H.-G., & Kaspersen, R. (2001). Vulnerability and Criticality. *IHDDP Update*, 2, 1-8.
- Borrero, J. C., Titov, V., Ortiz, M., & Synolakis, C. (1997). Mexican Earthquake Generates Tsunami, New Data and Unusual Photos. *Eos Trans. AGU*, 78 (8), 1-6.
- Corona, N., & Ramírez-Herrera, M.-T. (2012a). Revealing the origin of the great tsunami of June 22, 1932 off the Pacific Coast of Mexico. *Geology*, (Sometido el 16 de Julio de 2012), ¿?.
- Corona, N., & Ramírez-Herrera, M. T. (2012b). Mapping and historical reconstruction of the great Mexican 22 June tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12 (5), 1337-1352.
- Cumming, J. L. (1933). Los terremotos de Junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco. *Universidad de México*, 31-32, 68-104.
- Charnkol, T., & Tanaboriboon, Y. (2006). Tsunami Evacuation Behavior Analysis: One Step of Transportation Disaster Response *IATSS Research*, 30 (2), 83-96.
- Dall'Osso, F., Gonella, M., Gabbianelli, G., Withycombe, G., & Dominey-Howes, D. (2009). Assesing the vulnerability of buildings to tsunami in Sidney. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 2015-2026.
- Dall'Osso, F., Maramai, A., Graziani, L., Brizuela, B., Cavalletti, A., Gonella, M., & Tinti, S. (2010). Applying and validating the PTVA-3 Model at the Aeolian Islands, Italy: assessment of the vulnerability of buildings to tsunamis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1547-1562.
- Dominey-Howes, D., Dunbar, P., Varner, J., & Papatoma-Köhle, M. (2010). Estimating probable maximum loss from a Cascadia tsunami. *Natural Hazards*, 53, 43-61.

- Dominey-Howes, D., & Papathoma, M. (2007). Validating a Tsunami Vulnerability Assessment Model (the PTVA Model) Using Field Data from the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Natural Hazards*, 40, 113-136.
- Dudley, W. C., Whitney, R., Faasisila, J., Fonolua, S., Jowitt, A., & Chan-Kau, M. (2011). Learning from the victims: New physical and social science information about tsunamis from victims of the September 29, 2009 event in Samoa and American Samoa. *Earth-Science Reviews*, 107, 201-206.
- Eckert, S., Jelinek, R., Zeug, G., & Krausmann, E. (2012). Remote sensing-based assessment of tsunami vulnerability and risk in Alexandria, Egypt. *Applied Geography*, 32 (2), 714-723.
- Farreras, S., Ortiz, M., & Gonzalez, J. I. (2007). Steps Towards the Implementation of a Tsunami Detection, Warning, Mitigation and Preparedness Program for Southwestern Coastal Areas of Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 164 (2-3), 605-616.
- Farreras, S. F., & Sanchez, A. J. (1991). The tsunami threat on the Mexican west coast: A historical analysis and recommendations for hazard mitigation. *Natural Hazards*, 4 (2), 301-316.
- Fauci, A. J., Bonciani, M., & Guerra, R. (2012). Quality of life, vulnerability and resilience: a qualitative study of the tsunami impact on the affected population of Sri Lanka. *Ann Ist Super Sanità*, 48 (2), 177-188.
- Flouri, E. T., Dimitrios, A., Chrysoulakis, N., & Synolakis, C. E. (2012). Tsunami Risk and Vulnerability Analysis for the City of Rhodes. In *Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), Rhodes, Greece.
- Füssel, H.-M. (2005). Vulnerability in Climate Change Research: A Comprehensive Conceptual Framework. In *Breslauer Symposium* (Vol. 6, pp. 34). University of California International and Area Studies/UC Berkeley, California.
- Gardi, A., Valencia, N., Guillaude, R., & André, C. (2011). Inventory of uncertainties associated with the process of tsunami damage assessment on buildings (SCHEMA FP6 EC co-funded project). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11 (3), 883-893.
- Gonzalez, R., Ortiz, M., & Montoya, J. M. (2012). Tsunami. un problema matemáticamente interesante. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 19 (1), 107-119.
- Hatori, T. (1964). A Study of the Damage to Houses due to a Tsunami. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 42, 181-191.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. In. INEGI, Mexico.
- International Strategy for Disaster Reduction. (2004). *Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives* (Vol. 1). United Nations Publications, Geneva, Switzerland.
- Jin, D., & Lin, J. (2011). Managing tsunamis through early warning systems: A multidisciplinary approach. *Ocean & Coastal Management*, 54, 189-199.
- Johnson, D. P., Stanforth, A., Lulla, V., & Luber, G. (2012). Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data. *Applied Geography*, 35, 23-31.
- Kajiura, K. (1981). Tsunami Energy in Relation to Parameters of the Earthquake Fault Model. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 56, 415-440.

- Kaplan, M., Renaud, F. G., & Lüchters, G. (2009). Vulnerability assessment and protective effects of coastal vegetation during the 2004 Tsunami in Sri Lanka. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1479-1494.
- Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M., & Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32 (2), 577-590.
- Koshimura, S., Namegaya, Y., & Yanagisawa, H. (2009). Tsunami Fragility: A New Measure to Identify Tsunami Damage. *Journal of Disaster Research*, 4 (6), 479-480.
- Lagos, M. (2000). Tsunamis de origen cercano en las costas de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 27, 93-102.
- Leone, F., Lavigne, F., Paris, R., Denain, J.-C., & Vinet, F. (2011). A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability. *Applied Geography*, 31 (1), 363-375.
- Levin, B., & Nosov, M. (2009). *Physics of Tsunamis*. Springer, Russia.
- Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., Zamora, N., Nadim, F., Peduzzi, P., Dao, H., & Smebye, H. (2012). Tsunami hazard and exposure on the global scale. *Earth-Science Reviews*, 110, 58-73.
- LVI Legislatura del H. Congreso del Estado de Colima. (2008). Sesión solemnre número dos. In Congreso del Estado de Colima (Ed.), (pp. 12), Colima, México.
- Maheshwari, B., Sharma, M., & Narayan, J. (2005). Structural damages on the coast of Tamil Nadu due to tsunami caused by December 26, 2004 Sumatra earthquake. *ISSET Journal of earthquake technology*, 42 (2-3), 63-78.
- National Geophysical Data Center-National Oceanic and Atmospheric Administration. (2012). NOAA/WTC Tsunami Event Database. In (Vol. 2011), Boulder, CO, USA.
- Newman, P., Birrell, B., Spessa, A., & Tait, D. (1996). Human settlements. *Transport*, 3, 6.
- Newton, P., & Bai, X. (2008). Transitioning to sustainable urban development. *Transitions: pathways towards sustainable urban development in Australia*, 3-19.
- Nishikiori, N., Abe, T., Costa, D., Dharmaratne, S., Kunii, O., & Moji, K. (2006). Who died as a result of the tsunami?—Risk factors of mortality among internally displaced persons in Sri Lanka: a retrospective cohort analysis. *BMC Public Health*, 6 (1), 73.
- Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL). (2011). Historical Tsunami Database for the World Ocean (HTDB/WLD). In (2011 ed.). Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia.
- Okal, E. A., & Borrero, J. C. (2011). The „tsunami earthquake“ of 1932 June 22 in Manzanillo, Mexico: seismological study and tsunami simulations. *Geophysical Journal International*, 187 (3), 1443-1459.
- Omira, R., Baptista, M. A., Miranda, J. M., Toto, E., & Catita, C. (2010). Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools. *Natural Hazards*, 54, 75-95.
- Oseguera-Velázquez, J. O. (1967). *Colima en panorama: monografía histórica, geográfica, política y sociológica*. Impr. Al libro mayor, Colima, México.
- Papathoma, M., & Dominey-Howes, D. (2003). Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 733-747.

- Papathoma, M., Dominey-Howes, D., Zong, Y., & Smith, D. (2003). Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 377-389.
- Perry, M. (2007). Natural disaster management planning: A study of logistics managers responding to the tsunami. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37 (5), 409-433.
- Post, J., Wegscheider, S., Mück, M., Zosseder, K., Kiefl, R., Steinmetz, T., & Strunz, G. (2009). Assessment of human immediate response capability related to tsunami threats in Indonesia at a sub-national scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9 (4), 1075-1086.
- Reese, S., Bradley, B. A., Bind, J., Smart, G., Power, W., & Sturman, J. (2011). Empirical building fragilities from observed damage in the 2009 South Pacific tsunami. *Earth-Science Reviews*, 107 (1-2), 156-173.
- Reyes-Garza, J. C., & Leytón-Ovando, R. (1992). Cuyutlán : una cultura salinera. In U. Veracruzana (Ed.), *La Palabra y el Hombre* (Vol. 81, pp. 121-146). Universidad Veracruzana, Veracruz, México.
- Rodríguez, F., Silió, F., & García, J. C. (2000). El abandono de andenes. Elaboración de un modelo de accesibilidad y cartografía en un entorno SIG: el caso del valle del Colca, Perú. In Asociación de Geógrafos Españoles (Ed.), *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible [Archivo de ordenador] : IX Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, Alcalá de Henares, septiembre de 2000* (pp. 481-497). Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares.
- Sánchez, A. J., & Farreras, S. F. (1993). *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México*. National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado.
- Schneiderbauer, S., & Ehrlich, D. (2004). *Risk, Hazard and People's Vulnerability to Natural Hazards: A Review of Definitions, Concepts and Data*. European Commission-Joint Research Centre (EC-JRC), Brussels.
- Secretaría de Turismo del estado de Colima. (2011). Programa Regional de Desarrollo Turístico de la Costa Sur del Estado Colima. In. Gonierno del Estado de Colima, Colima, México.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN). (2011). Catalogo de sismos. In. Servicio Sismológico Nacional (SSN), México.
- Singh, S. K., Ponce, L., & Nishenko, S. P. (1985). The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera plate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75 (5), 1301-1313.
- Singh, S. K., Rodríguez, M., & Espindola, J. M. (1984). A catalog of shallow earthquakes of Mexico from 1900 to 1981. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, 267-280.
- Strunz, G., Post, J., Zosseder, K., Wegscheider, S., Muck, M., Riedlinger, T., Mehl, H., Dech, S., Birkmann, J., Gebert, N., Harjono, H., Anwar, H. Z., Sumaryono, Khomarudin, R. M., and Muhari, A. . (2011). Tsunami risk assessment in Indonesia. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 11, 68-82.
- Suppasri, A., Mas, E., Koshimura, S., Imai, K., Harada, K., & Imamura, F. (2012). Developing tsunami fragility curves from the surveyed data of the 2011 Great East Japan tsunami in Sendai and Ishinomaki plains. *Coastal Engineering Journal*, 54 (1), 1250008.

- Tinti, S., Pagnoni, G., Armigliato, A., & Tonini, R. (2012). Tsunami inundation scenarios and tsunami vulnerability assessment for the town of Alexandria, Egypt. In (Vol. 14, pp. 10325).
- UN/ISDR. (2009). Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. In (pp. 38). Naciones Unidas.
- United Nations/Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UN/ESCAP). (2006). *Moving Forward Post-Tsunami: Voices of the Vulnerable*. United Nations Publication, Thailand.
- Usha, T., Murthy, M. V. R., Reddy, N. T., & Mishra, P. (2012). Tsunami vulnerability assessment in urban areas using numerical model and GIS. *Natural Hazards*, 60 (1), 135-147.
- Vera, J. F., & Marchena, M. (1988). Efectos del turismo en las estructuras regionales periféricas. *Millars Espai i historia*, 21, 109-144.
- Vogel, C. (1998). Vulnerability and Global Environmental Change. *LUCC Newsletter*, 3, 15-19.
- Yasuda, T., & Hiraish, T. (2004). Experimental Study of Tsunami Inundation in Coastal Urban Area. In *Proceedings of The Fourteenth (2004) International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineering, Toulon, France.
- Zheng, Y., Chen, J., Wei, J., & Guo, X. (2012). Modeling of pedestrian evacuation based on the particle swarm optimization algorithm. In *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* (pp. In press).

CONCLUSIONES GENERALES

I. CONCLUSIONES GENERALES

La evaluación de vulnerabilidad a tsunamis en Cuyutlán, Colima partió de una lectura general del fenómeno de tsunamis en el mundo, sus impactos, los elementos que potencializan su generación, los efectos en los asentamientos humanos, las personas, y las edificaciones.

La revisión de catálogos de sismos y tsunamis de las costas del Pacífico Mexicano mostró que estos fenómenos son recurrentes en esta región. A pesar de haberse presentado dos tsunamis altamente destructivos, los estudios detallados que engloben las dimensiones del tsunami y sus efectos son escasos. Se seleccionó el estudio de caso de Cuyutlán, el segundo más destructivo registrado en la costa para efectuar un estudio a escala local e identificar el peor escenario posible de amenaza de tsunamis y su grado de vulnerabilidad.

En el desarrollo de la investigación se encontró que el peor escenario posible de amenaza por tsunamis en Cuyutlán corresponde al evento del 22 de junio de 1932. Mediante el diseño e implementación de métodos para mapear sus efectos y recabar más información. Se logró acrecentar el volumen de los datos y los efectos del tsunami a escala local. Por otro lado, se encontró que las causas de este tsunami son inciertas.

Está incógnita fue resuelta mediante la una segunda revisión datos histórico-etnográficos combinada con modelación numérica. Como resultado se encontró que el tsunami del 22 de junio de 1932 fue muy probablemente generado por un deslizamiento submarino. Cabe señalar que esta hipótesis requiere corroborarse con estudios geológicos detallados. A pesar de que se encontró un modelo de generación, propagación y arribo a las costas, y que presentan un buen ajuste con los datos históricos, no se tienen las evidencias geológicas que muestren el cuerpo del deslizamiento.

Las implicaciones de este hallazgo son relevantes en materia de evaluación de peligro por tsunamis. Trascienden la importancia en el campo de la evaluación de peligro de tsunamis en la localidad de Cuyutlán. En caso de corroborarse la hipótesis planteada en esta investigación, el potencial de riesgo por tsunamis generados por deslizamientos submarinos en las costas del Pacífico Mexicano presenta serias deficiencias, debido a que los sistemas de alerta sólo contemplan tsunamis generados por causas sísmicas, los datos geológicos y batimétricos son escasos y de baja resolución, y los estudios de la dinámica de las laderas de los cañones submarinos frente a las costas son escasos.

Una vez identificado y caracterizado el tsunami que históricamente dejó más daños en la localidad de Cuyutlán, se procedió a diseñar un modelo de evaluación de vulnerabilidad a los efectos de tsunamis.

Mediante la comparación de modelos de generación de tsunamis en las costas de México propuestas por otros autores y las características del tsunami del 22 de junio de 1932, se definió que este último mantiene su hegemonía como peor escenario probable de amenaza, por lo que los parámetros de generación de este tsunami fueron empleados para efectuar una modelación semidetallada de su comportamiento.

Mediante una revisión profunda de estudios de caso de los efectos de los tsunamis a escala local, se determinó que el tiempo de arribo y la fuerza hidrodinámica son los parámetros de la amenaza de tsunamis que sintetizan los aspectos que vulnera a los asentamientos humanos.

I. CONCLUSIONES GENERALES

A partir de estos parámetros se diseñó un modelo de evaluación de vulnerabilidad que fue aplicado a Cuyutlán, Colima. Como conclusión, este modelo permitió definir que el grado de vulnerabilidad de Cuyutlán a amenaza de tsunami es muy Alto. Bajo las condiciones actuales, la dimensión de la amenaza y la cantidad de personas expuestas y sin posibilidades de responder de manera óptima es muy alta y la disrupción en el sistema económico-productivo, social y cultural presenta un panorama crítico.

El método de evaluación de vulnerabilidad a tsunamis propuesto en esta investigación refleja la interacción del fenómeno físico con circunstancias y dimensiones espaciales de los elementos bajo amenaza, queda demostrado que los potenciales efectos dañinos afectan de forma diferenciada a una misma comunidad y a un mismo grupo poblacional

Los resultados indican que el nivel de vulnerabilidad a los efectos de un tsunami de las peores dimensiones posibles de la población y las edificaciones y lo que estas representan para desarrollarse económica, social y culturalmente es muy Alto. En casos como éste, donde los tiempos de arribo del tsunami son muy reducidos, las medidas de prevención y alerta temprana pueden ser insuficientes.

La aproximación metodológica propuesta en esta investigación ayudó a determinar el alto grado de vulnerabilidad a la amenaza de tsunami de Cuyutlán, estimar las potenciales pérdidas de vidas, los daños en las construcciones y la desarticulación de los medios de subsistencia, respondiendo a los requerimientos prioritarios en materia de reducción y prevención de desastres

ANEXOS



Mapping and historical reconstruction of the great Mexican 22 June 1932 tsunami

N. Corona¹ and M. T. Ramírez-Herrera^{1,2}

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México

²Laboratorio de Geofísica Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México

Correspondence to: N. Corona (ncorona@pmip.unam.mx), M. T. Ramírez-Herrera (mtramirez@ciga.unam.mx)

Received: 4 November 2011 – Revised: 25 March 2012 – Accepted: 26 March 2012 – Published: 9 May 2012

Abstract. At 07:00 h (UTC-6) on 22 June 1932, a $M_s = 6.9$ earthquake shocked the coasts of Colima and Jalisco. Five minutes later a tsunami arrived at the coast. It almost completely destroyed the town of Cuyutlán, Colima, causing the deaths of 50 people and leaving about 1200 injured. In this study, newspaper reports and technical reports are reviewed, as well as survivors' testimonials. The physical characteristics (mean sea level at the time, time of arrival, sea retreat, and inundation distribution) and the tsunami effects (number of victims, injuries, affected buildings) have been reconstructed and mapped. The interpretation of historical data allowed us to determine the intensity of the tsunami and to reveal the tsunamigenic source. This study emphasizes the relevance of historical analysis, including survivor's testimonies, in the reconstruction of tsunamis that lack instrumental data. The results of this study are relevant to paleo-tsunami studies and tsunami related hazard planning.

1 Introduction

Natural phenomena have caused devastating damage throughout human history. Among the most catastrophic phenomena are tsunamis, e.g. the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami which led to the deaths of about 250 000 people and damage exceeding 10 billion dollars, and the recent 11 March 2011 Tohoku, Japan tsunami and earthquake which caused over 24 000 deaths and missing people (Mimura et al., 2011). A list of 11 939 records of natural disasters shows that 51 correspond to tsunamis (EM-DAT, 2011). The Indian Ocean tsunami of 2004 however killed over 226 000 people (CRED, 2005). This disaster led to the progress of new research aimed at better understanding of

the origin and behaviour of tsunamis (Kanamori, 2006; Stein, 2006; Satake and Atwater, 2007; Lagos and Cisternas, 2008). It demonstrated starkly the high cost of ignoring the past and history of territories that have been affected by tsunamis (Lagos and Cisternas, 2008). Historical and geological studies can provide information that may help understand the occurrence and recurrence of large earthquakes and tsunamis (Orfanogiannaki and Papadopoulos, 2007; Satake and Atwater, 2007; Yanagisawa et al., 2007).

Most tsunamis are caused by earthquakes produced in subduction zones (Stein, 2006; Kanamori, 2006; Satake and Atwater, 2007; Stein and Okal, 2007). All countries located on the Pacific Ocean are susceptible to tsunamis associated with seismic activity of the Pacific Ring of Fire (Goff, 2011). The Pacific Mexican Coast (PMC) has a record of 70 tsunamis in the period of 1732 to 2011 (HTDB/WLD, 2011). The most destructive tsunamis were those of 16 November 1925 in Zihutanejo and 22 June 1932 in Cuyutlán (Sánchez and Ferreras, 1993).

The study of natural phenomena with instrumental data is a modern practice that started only in the second half of eighteenth century (e.g. Barriendos et al., 2003; Llasat et al., 2005). Before this, information was based on qualitative pieces of information (Fliri, 1998). The incorporation of historical research techniques into the natural hazards studies has proven to be a useful tool, as there are many types of data sources that can be included: paintings, photographs, prints, legends, letters, government reports, etc. (Wang and Zhang, 1988; Pfister, 1999; Naulet et al., 2001; Wagner and Suda, 2004). These sources of information can be subjective, but the subjectivity can be resolved through critical evaluation of the information (Pfister, 1999).

Numerous authors have proposed that historical analysis is an invaluable tool for hazard studies (Ambraseys, 1979, 1995; Ambraseys and Adams, 1996; Glade et al., 2001; Calcaterra et al., 2003; Barnikel, 2004; Lübken and Mauch, 2011). Historical data has been used and complemented by other proxy data in the field to study floods (e.g. Barriendos et al., 2003; Benito and Thorndycraft, 2004; Llasat et al., 2005; Seidel et al., 2009; Balasch et al., 2010), landslides (e.g. Sigurdsson et al., 1985), storms and hurricanes (e.g. Pfister, 1999; Kates et al., 2006; Ribera et al., 2011), earthquakes (e.g. Ambraseys and Finkel, 1990; Glade et al., 2001; Fréchet et al., 2008) and tsunamis (e.g. Gianfreda et al., 2001; Pelinovsky et al., 2001; Strunz et al., 2011). Historical data have also been used in event reconstruction (e.g. Gianluca, 2005; Guidoboni, 2008; Seidel et al., 2009; Balasch et al., 2010) and modeling (e.g. Pelinovsky et al., 2001; Walsh et al., 2003).

Given the importance of recognizing the history of tsunamis in coastal territories and the role of historical data in the construction of this knowledge, this study focuses on historical data collection, and on interpreting and mapping the physical characteristics and the effects of the great 1932 Mexican tsunami, an event that has no instrumental records and that caused significant damage to the Colima coast. The aim of this study is to map the physical characteristics and effects of the 1932 Cuyutlán tsunami at the local scale, and to determine the tsunami intensity using ethnographic, geographic and modeling techniques.

The study provides new data on the spatial distribution and effects of the 1932 tsunami on the Cuyutlán, Mexico coast. This is the first study that assigns an intensity value to a tsunami in Mexico. The results provide useful information for tsunami hazard evaluation and planning, as well as for palaeotsunami research. The tsunami intensity allows the estimation of parameters, such as the magnitude of the inundation and water flow rate as it enters the coast, which are useful elements in vulnerability assessment and tsunami risk. Finally, the study demonstrates that the use of historical written data, the testimony of the population and the use of mapping techniques (georeferencing of descriptive elements and GIS modelling) are an important sources of information and tools in describing natural phenomena and disasters that lack instrumental data.

1.1 Tsunami history in the study area

The study area is located in the Jalisco–Colima area, along the Pacific Coast of Mexico. This region is influenced by tectonic activity related to the subduction of the Cocos and Rivera plates under the North American plate along the Mesoamerican Trench (Singh et al., 1981, 1985; Nixon, 1982; Eissler and McNally, 1984; Luhr et al., 1985; Ramírez-Herrera et al., 1999, 2011).

Historically, the Cuyutlán coast has a record of six tsunamis: 3, 18, 22 and 29 June 1932; 19 September 1985,

and 9 October 1995 (NGDC, 2011; HTDB/WLD, 2011). However, based on the interpretation of historical data by NGDC (2011) and HTDB/WLD (2011), it was inferred that at least 27 tsunamis reached the Cuyutlán coast from 1875 to 2011 (Fig. 1). Historical data indicate that another tsunami inundated the salinas of San Pantaleon (currently El Real town) and penetrated about 400 m inland on 13 November 1816 (Oseguera, 1967).

On 3 June 1932 the greatest earthquake ever registered in Mexico occurred in this region ($M_s = 8.2$), followed by aftershocks on 18 June ($M_s = 7.8$) and 22 June ($M_s = 6.9$) (Singh et al., 1981, 1985; Astiz and Kanamori, 1984). These events produced tsunamis (Cumming, 1933; Singh et al., 1998; NGDC, 2011; HTDB/WLD, 2011). The largest tsunami of these series was the 22 June (Cumming, 1933; Sánchez and Ferreras, 1993; Okal and Borrero, 2011). However, the answer to the source location and mechanism of the 22 June tsunami is still unsolved (Singh et al., 1998). Two hypotheses have been proposed to solve this problem: (1) a seismic source (Singh et al., 1998; NGDC, 2011; Okal and Borrero, 2011), and (2) a submarine landslide (Cumming, 1933).

The 22 June tsunami affected 75 km of the coast of Colima, between 19.06° N and 104.31° W near Manzanillo Bay, and 18.68° N, 103.74° W near Boca de Apiza (NGDC, 2011). This study is focused on the Cuyutlán coast, where most of the damage occurred along a segment about 6 km long (Fig. 2). The coastal morphology is characterized by sandy beaches and sand dunes parallel to the coastline, rising to heights between 6 and 15 m a.s.l. A strip of coastal plain extends inland and Laguna de Cuyutlán is bordered on the northeast by fringes of mangrove swamp and salt pans (salinas). Cuyutlán is a tourist town and has a tradition of salt extraction. It has a population of 926 inhabitants and 845 households (INEGI, 2010).

2 Methods

This study applied ethnographical and geographical approaches (Fig. 3). Ethnographic techniques used included content analysis and interviews. During the first phase, i.e. data collection, two main sources of information were obtained: written documents and eyewitness testimony. Written documents included journal articles, books, technical reports, catalogues, newspapers and pictures that were reviewed using a content analysis technique (Murchison, 2010; Secor, 2010). The focus was on the identification of informant names, tsunami data and key topics (Table 1). Based on this information, a list of topics was used as a guide in the construction of a semi-structured interview format (Denscombe, 2003). Also, a list of potential interviewees was created. Sampling was carried out using the snowball format in a field survey (Walliman, 2006; Murchison, 2010).

The selection of informants was limited to eyewitnesses and descendants of survivors. Informants included an

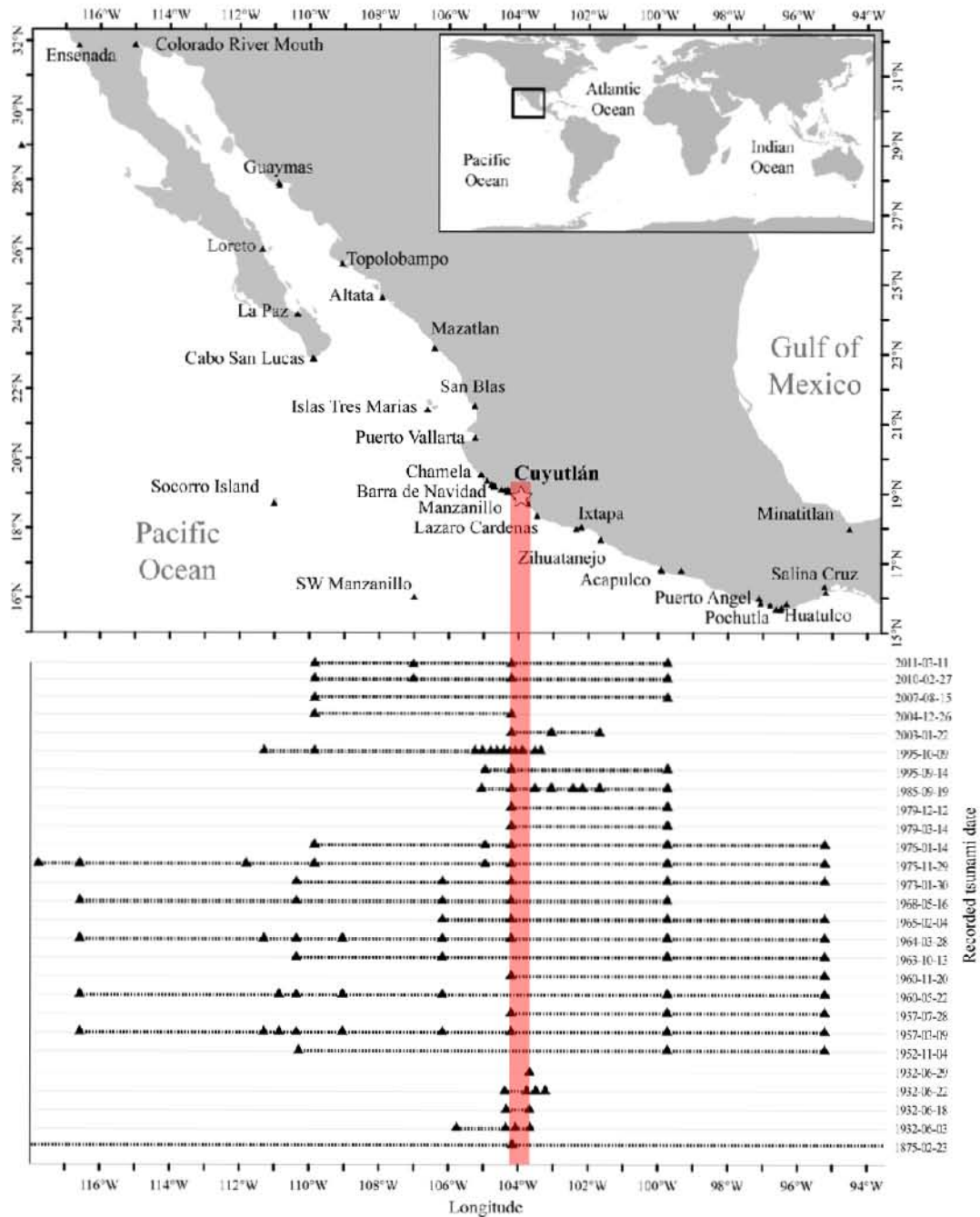


Fig. 1. Coastline affected by historical tsunamis that have reached Cuyutlán. Black triangles, location that reported tsunamis (HTDB/WLD, 2011; NGDC, 2011) from 1875–2011; dash lines, probable tsunami affected longitude on each date, but without record on corresponding locations. Red vertical band, study area, Cuyutlán coast.

eyewitness, Pachita Gaspar (92 yr), children of eyewitnesses: Ramón Cortez (70 yr), Vidal Vázquez Mojarro (76 yr), María de Jesús Morales (50 yr), Ignacio de la Madrid (78 yr) and wife (76 yr), José Solórzano (52 yr), and the chronicler of the city Miguel Chávez Michel (62 yr).

One of the most important references in this study is the technical report produced by Cumming (1933), who visited

the affected area a few days after the tsunami impact. This document provides a significant number of descriptive elements not mentioned in other sources, which underlines the importance of post-tsunami surveys.

Once the written data and the eyewitness testimonies had been collected, a content analysis was applied in order to interpret the whole disaster scenario. The data was analysed

Table 1. Data source references and derived interview topics.

Written document type	Reference	Tsunami data (interview topics)
Journal Paper	Ordóñez (1933) Flores (1934) Farreras and Sánchez (1991) Sánchez and Farreras (1993) Okal and Borrero (2011)	– Mean sea level – Arrival time – Sea retreat – Run-up – Inundations
Book	Salazar (1989)	– Number of victims (number and names)
Technical report	Cumming (1933)	– Injuries (number and names) – Affected buildings
Catalogue	Soloviev and Go (1984) Sánchez and Farreras (1993)	– Earthquake – Earthquake timing – Retreat timing – Inundation extension
National Newspaper	El Informador (1932a–f) El Nacional (1932) El Universal Gráfico (1932) Excélsior (1932a–e) Salazar (1985).	– Transported material – Cause of Death – Earthquake sensation – Safe places – Number of inhabitants – Activities
International Newspaper	El Nuevo Mexicano (1932)	– Evacuation – Safe zones – Epidemics
Online Catalogue	NGDC (2011) HTDB/WLD (2011)	

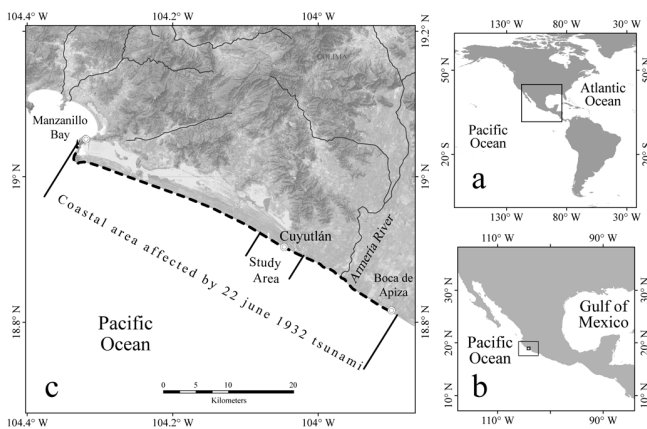


Fig. 2. Study area location. (a) Regional setting, (b) Mexico, and (c) study area. Dash line shows the tsunami area affected by the June 22, 1932 tsunami (NGDC, 2011).

to generate a complete tsunami description, divided in two groups: effects and physical properties of the tsunami. The effects were classified according to the scheme proposed by UNESCO-IOC (2006), which refers to direct and indirect impacts.

To determine the tsunami intensity level, data was analysed using the Papadopoulos and Imamura (2001) intensity scale (Table 2).

A Digital Elevation Model (DEM) and a 1932 planimetric map of the town were developed to map effects and physical tsunami properties. For the DEM generation a topographic survey was carried out using a theodolite Keuffel and Esser model S50. Data was collected through an orthogonal equidistant dot net using the Polar Coordinates Method, while the Graphical Method (Casanova, 2002) was used to draw the topographic contour lines. For the DEM generation the Surface Delaunay Triangulation Method was used (Liseikin, 2010). The planimetric map was drawn to define the location of each building in the town of Cuyutlán in 1932. The reconstruction of this pre-tsunami stage was done by digitising (Gregory and Ell, 2007) polygons over a panchromatic Worldview 2 (WV2) at 0.6 m spatial resolution (acquisition date April 2011). The identification and location (mapping) of each building, the tsunami effects and its physical properties on the base map was done by means of the Geospatial Visual Correlation Method (GVCM), using a base map (topo-planimetric map), written data, pictures, eye-witness descriptions and field survey (Kovalerchuk, 2004). Additionally, a geomorphological interpretation (Goff et al.,

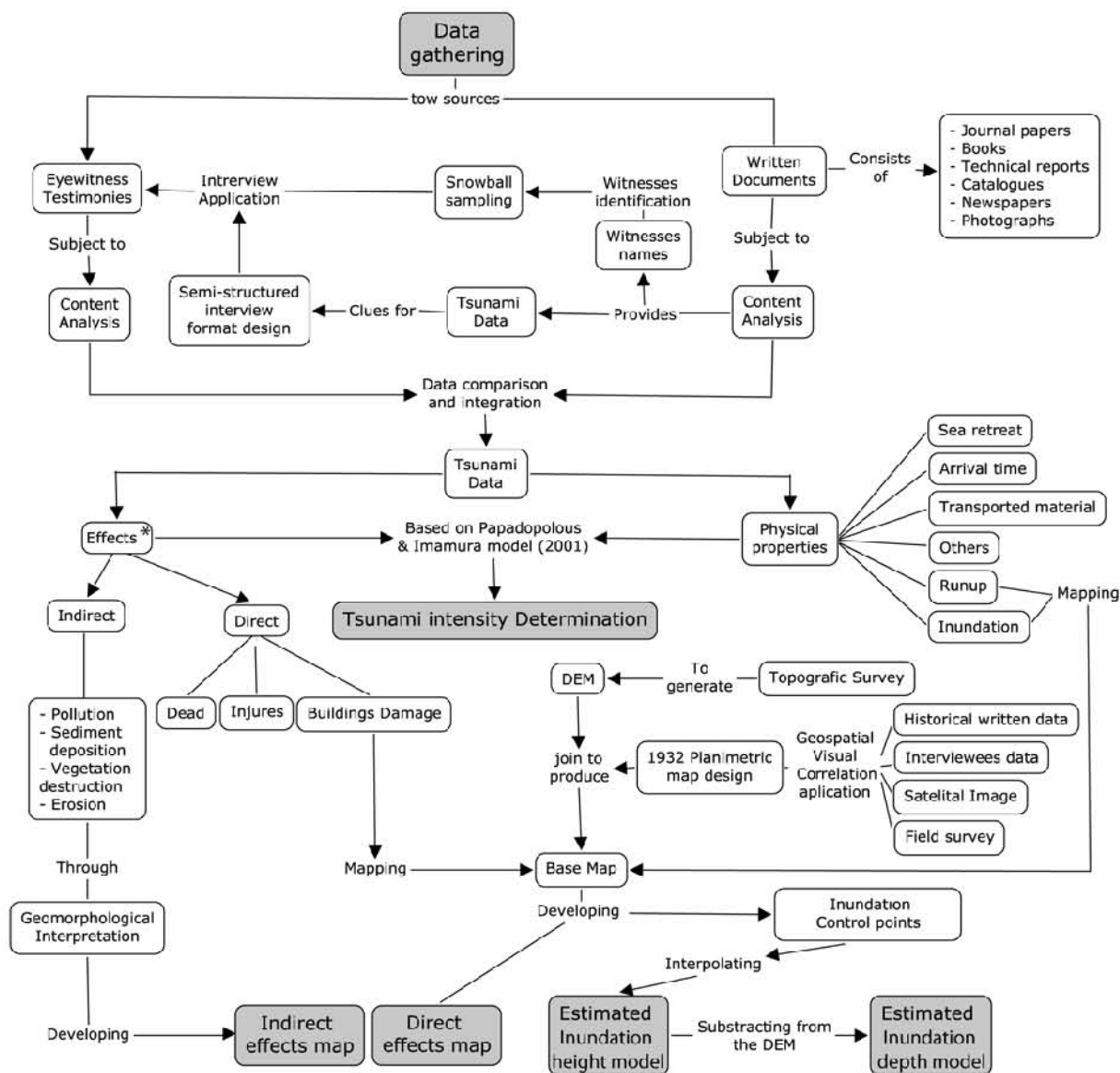


Fig. 3. Flow methodology chart. *Note: the tsunami effects were classified according to the scheme proposed by UNESCO-IOC (2006).

Table 2. Characteristics of a VIII intensity tsunami according to Papadopolous and Imamura (2001).

Intensity scale	VIII. Heavily damaging
Effects on humans	All people escaped to higher ground, a few were washed away.
Effects on objects	Most of the small vessels were damaged, much area washed away. Few large vessels were moved ashore or crashed into each other. Big objects were drifted away. Erosion and littering in the beach. Extensive flooding. Slight damage in tsunami control forest, stop drifts. Many aquaculture rafts washed away, few partially damaged.
Damage to buildings	Most wooden structures were washed away or demolished. Damage of grade 2 in a few masonry buildings. Most RC buildings sustain damage, in a few damage of grade 1 and flooding is observed

Note: recorded data of the 22 June 1932 Cuyutlán tsunami is highlighted.

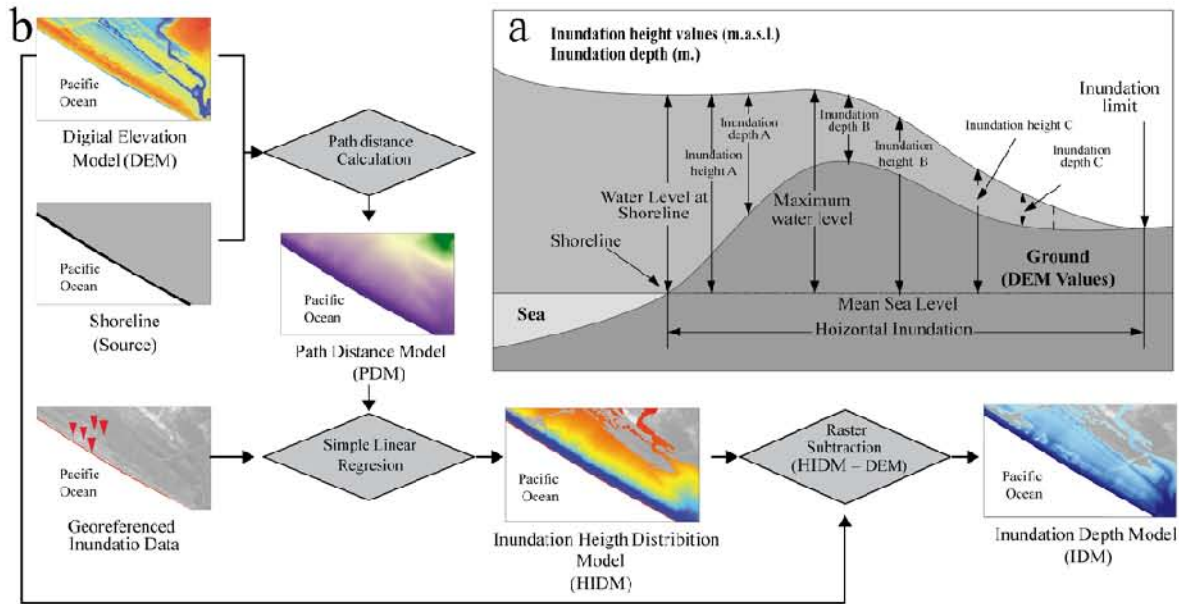


Fig. 4. Inundation height and Inundation depth interpolation method, where (a) shows the tsunami profile (Levin and Nosov, 2009) adapted for modelling purpose, and (b) the flow diagram for the inundations modelling.

2007, 2009) of the DEM model and image WV2 were applied to map the tsunami’s indirect effects.

An empirical and simple approach was applied for a maximum inundation height and inundation depth modelling. The main objective was to create a hypothetical continuous distribution model of the inundation height and depth over the affected area using the few available recorded data and topographic survey data. Using water marks left by the tsunami, observed on photographs and recorded by locals recounts, we developed a simple model of the inundation distribution, though a simple equation that reflects this inundation distribution pattern. Inundation height distribution was mapped interpolating the values of the georeferenced tsunami information about water level at shoreline, maximum water level and recorded inundation water marks heights (as points with height values). In this study inundation height was interpreted and represented as the shoreline motion inland, and represents water levels measured in meters above sea level (Pedersen, 2008). The schematic tsunami profile in Fig. 4 shows the water height motion applied for modelling purpose. The Simple Linear Regression Method was used to find the best-fit equation (O’ Sullivan and Unwin, 2003). A path distance model (PDM) (Zhan et al., 1993) was used as independent variable and a value for water mark heights, taken from the mapped tsunami physical properties, was used as dependent variable. The PDM was created considering that inundation height distribution is a direct function of the distance travelled by the tsunami water column. The PDM measures the distance (meters) from the shoreline inland in perpendicular to the shoreline (PDM origin), taking into account the diagonal pixel distance and the accumulative effects of

the topographic stage (DEM), interpreted as a simple friction factor. The inundation depth map was shaped using a simple raster arithmetic method, subtracting the values of the maximum inundation height model from the DEM model (Fig. 4).

3 Results

3.1 Pre-tsunami review of town characteristics

3.1.1 Society and economy

Cuyutlán’s main economic activities in the early 30’s consisted of cultivation and extraction of coconut products, salt extraction, an activity that dates back to the late sixteenth century, and tourism. Salt extraction, cultivation and coconut product activities were located in Cuyutlán in the same places as they are today, except for the fact that some areas southwest of the town, near Palo Verde Ranch (Reyes, 2004), have been cleared of such activities, as a turtle-nesting reserve (“El Tortugario”) has been created there.

In the early 30’s the number of tourists visiting Cuyutlán was about 3000 people, most of whom visited during Holy Week in April (Salazar, 1989). Cuyutlán’s Salters’ Cooperative claimed to have employed up to 2000 people at that time, in harvest periods between March and June (Reyes, 2004). Agricultural activity occurred throughout the year, and local farmers were in charge of the crops.

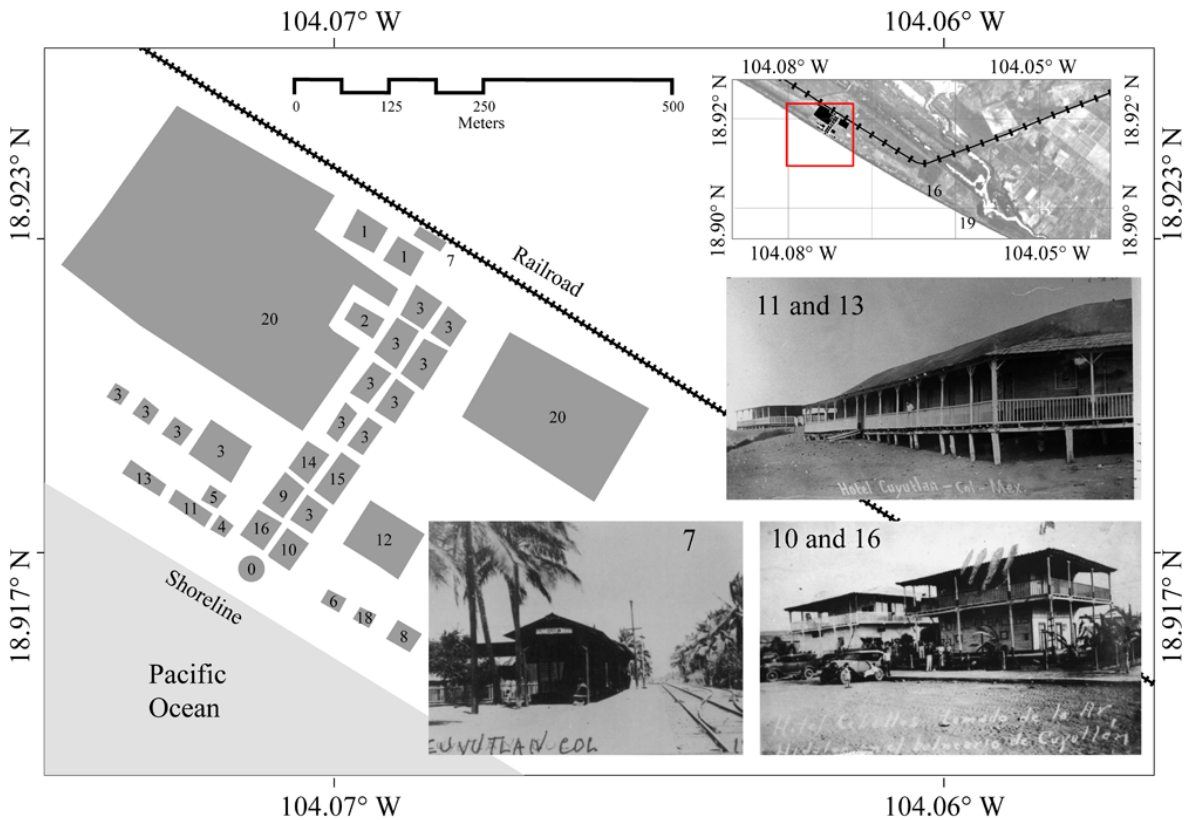


Fig. 5. Planimetric map of Cuyutlán in 1932. (0) Old stone roundabout, (1) Salt warehouse, (2) Little church, (3) private little houses, (4) Aguayos’s Chalet, (5) Solorzano’s Chalet, (6) Wattles, (7) Train station, (8–9) Hotels nameless, (10) Hotel Ceballos, (11) Hotel Cuyutlán, (12) Hotel Madrid, (13) Hotel Palacios, (14) Hotel Santa Cruz #1, (15) Hotel Santa Cruz #2, (16) Hotel Zapotlan, (17) Ordeña Anguiano, (18) Hostal, (19) Palo Verde Ranch and (20) Housing zone.

3.1.2 Buildings

Small structures of wood and palm leaf (“palapas”) were spread along the beach. Close to the beach, where the terrain is gentle, hotels and larger private buildings were located. These buildings were made of wood and had stronger structures than the huts and buildings for residential use (Salazar, 1989; Hernández, 2009). Other hotels were located on the dune slopes; the largest was The Hotel Madrid, which was located on the top of the dunes, about 10 m a.s.l. Most of the houses were located on the strip of coastal plain, and built of shingles, palm and mud (Gaspar, 2010; Mojarro, 2010; De la Madrid, 2010). It is estimated that in total there were 80 to 100 homes with these characteristics (Salazar, 1989) (Fig. 5).

The main transport infrastructure was the railroad that connected Cuyutlán with the city of Colima, and with Manzanillo Bay. The railroad station, built of wood, was located in the same place as today, about 500 m from the coastline. Around the train station there were houses, built of wood and mud that belonged to the Salters’ Cooperative workers. Finally, a small chapel built of wood was located on the coastal plain near the residential area (Salazar, 1989; Gaspar, 2010).

3.2 Tsunami physical properties

3.2.1 Source and arrival time

Data explaining the source mechanism of the great 1932 tsunami have not yet been defined (Singh et al., 1998). Two hypotheses have been proposed to explain the origin of the 22 June event: (1) a tsunamigenic earthquake (Singh et al., 1998; NGDC, 2011; Okal and Borrero, 2011), or (2) an underwater landslide (Cumming, 1933). Cumming (1933) points out that the palm trees and infrastructure washed away by the tsunami at Cuyutlán were oriented to the northwest. This suggests that the tsunami came from the opposite, i.e. southeast direction. However the earthquake epicentre of 22 June 1932 was located northwest of the town (Cumming, 1933; Cruz and Wyss, 1983). Based on historical data analysis, the photographs and observations by Cumming (1933), we infer that the tsunami source was located somewhere southeast of Cuyutlán, a location that coincides with a submarine canyon in front of the mouth of the Armería River (Fig. 6). The time lapse between the earthquake and the arrival of the wave was five minutes (Salazar, 1985; Gaspar, 2010).

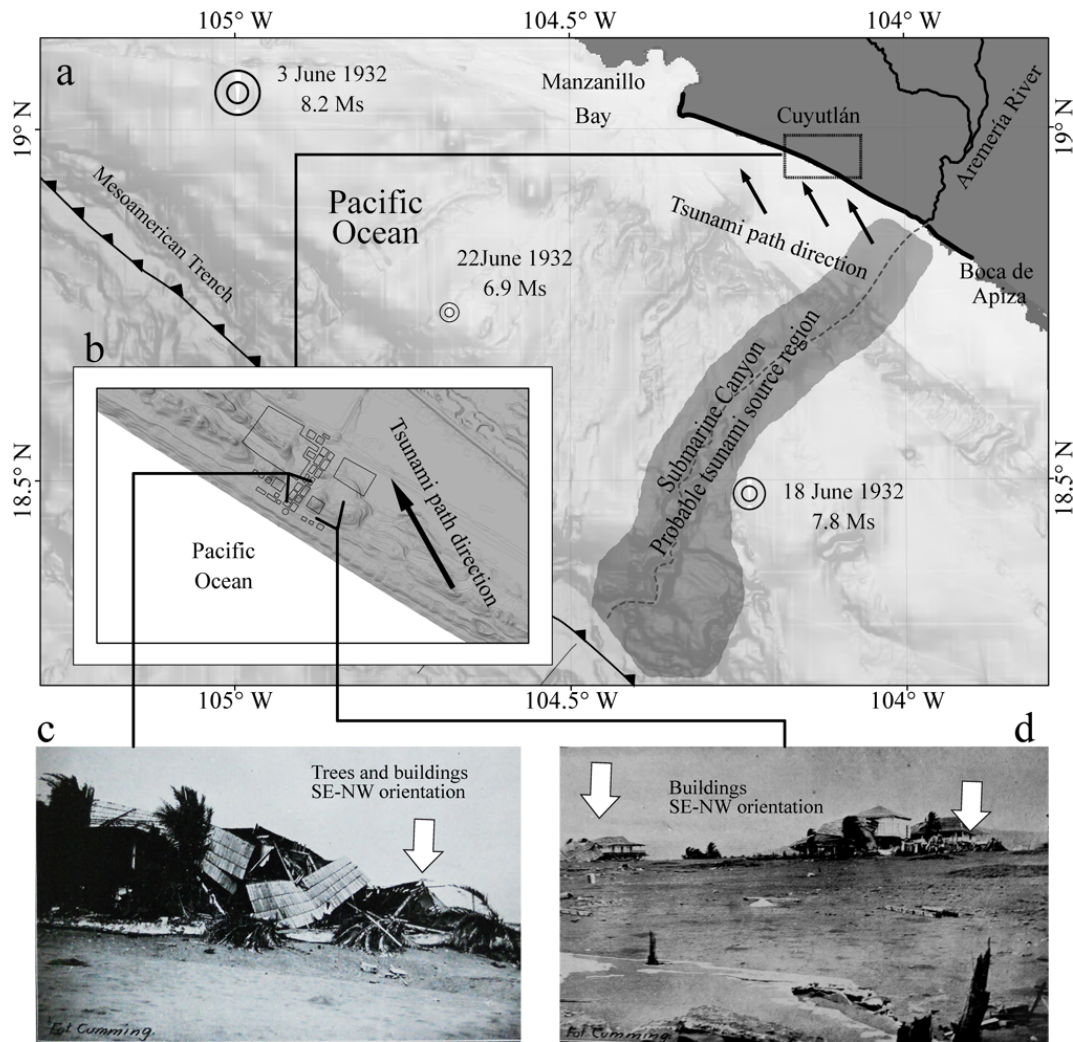


Fig. 6. Probable location of the 22 June 1932 tsunami source and path direction. (a) main earthquake epicentres of June 1932 (Cumming, 1933; Cruz and Wyss, 1983; SSN, 2010), dark grey transparent polygon shows the submarine canyon in front of the mouth of the Armería river, where the probable source of the 22 June 1932 tsunami was located, dark arrows show the probable SE–NW path direction of the tsunami; (b) main affected zone at Cuyutlán; (c and d) pictures of the some trees and buildings demolished and washed away by the tsunami, shown with white arrows (Cumming, 1933).

3.2.2 Mean sea level and sea retreat

A relative sea level change was reported on 3 June as a result of the $M_s = 8.2$ earthquake (Cumming, 1933). The testimony of the mayor of Cuyutlán at the time confirms this apparent change: “The sea level was higher after the earthquake... the stone roundabout was not so close to the sea (before the event), and it was at a distance of approximately 50 meters”. Cumming (1933) also suggests a probable drop (subsidence) of the coast by one meter. On the other hand, the calculated tide by a tide gauge at 07:00h (UTC-6) on 22 June was at -329 mm below m.s.l. (MAR, 2010). Considering this data, we infer that sea level in Cuyutlán at the time of the tsunami was most probably close to 671 mm a.m.s.l. on 22 June. Prior to the 22 June tsunami, the sea retreated ap-

proximately 200 m from the coastline (Excélsior, 1932a). It is inferred that the sea retreat occurred in ranges between 150 and 300 m from the Cuyutlán coastline. Sea retreat was reported as only about 9 m (30 feet) to the northwest, in the Manzanillo Bay (El Informador, 1932a).

3.2.3 Inundation height

The maximum height reached by the water column, 2 m, was recorded at the Hotel Madrid located 10 m a.m.s.l. (El Informador, 1932c; Salazar, 1989; De La Madrid, 2010). It is estimated that the maximum tsunami inundation height and the maximum water level, 12 m, was reached at this point (Fig. 7). Another watermark was identified along the main avenue on the coastal plain, 450 m from the shoreline and at

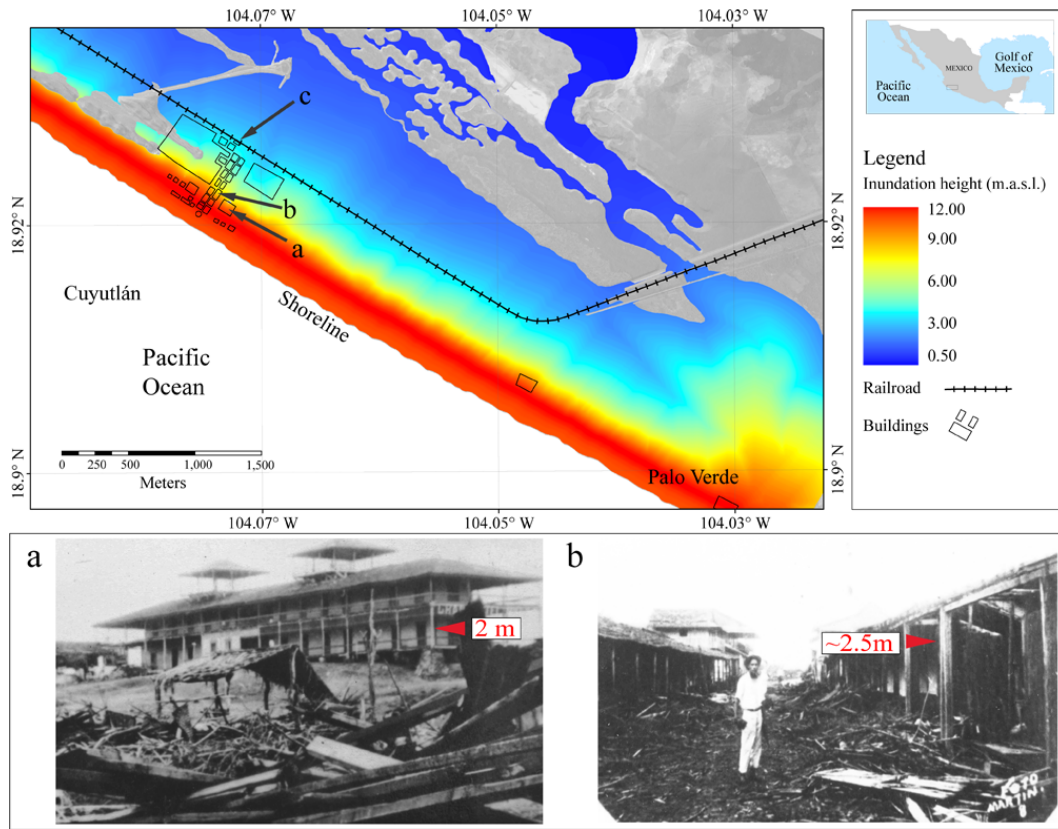


Fig. 7. Inundation height distribution model of the 22 June 1932 tsunami; (a) Madrid Hotel; (b) Main Street (El Informador, 1932c); (c) Train station.

5 m a.m.s.l., reaching about 2.5 m. Therefore the inundation height was inferred to be about 7.5 m. At the train station, located at 3.5 m a.m.s.l. and 720 m from the shoreline, according to the description by Ms. Pachita Gaspar: “... when we climbed like cats onto the train cars, the height of water in the railway station was approximately 1.5 m high...” (Gaspar, 2010), indicating that the tsunami height reached 5 m (Fig. 7).

Identified water level at shoreline, maximum water level, and inundation height points were sampled and correlated with the path distance model for the interpolation modelling (Table 3). The correlation coefficient resulting from the best-fit equation (Eqs. 1 and 2) was 0.999, where “y” is the interpolated inundation height (in m a.m.s.l.) value and “x” is the PDM value (in m),

$$y^{-1} = a + bx^{1.5} + cx^2. \tag{1}$$

In addition to Eq. (1),

$$y = \frac{1}{a + bx^{1.5} + cx^2}, \tag{2}$$

in addition to Eqs. (1) and (2),

$$a = 0.0833 \tag{3}$$

$$b = -1.45 \times 10^{-6} \tag{4}$$

$$c = 4.33 \times 10^{-8}. \tag{5}$$

Substituting the values of “x” with the values of the path distance model a inundation height tsunami distribution model was generated (Fig. 7).

3.2.4 Inundation depth

The maximum inundation depth reached during the 22 June tsunami was 12 m on the shoreline (water level at shoreline). At the Hotel Madrid, located on the top of a sand dune 10 m a.m.s.l., inundation depth reached 2 m, and 2 to 3 m toward the sand dunes, 450 m inland on the main street in Cuyutlan (Farreras and Sánchez, 1991). While further inland, 720 m at the train station, inundation depth reached 1.5 m (Gaspar, 2010). The inundation depths varied across the study area because of the local relief and the height of the dunes. Southeast of the town, lower sand dunes gradually lose height close to the Palo Verde salt flats (Reyes, 2004), where the mouth of the estuary is located. These relief characteristics produced variations in the extent of inland inundation, that at minimum reached 500 m from the shoreline around the train station (Salazar, 1989) to a maximum of

Table 3. Control points list and corresponding values of digital terrain models.

Id control point	PDM* Values (m)	Control Points		
		Inundation depth (m)	DEM** (m a.m.s.l.)	Inundation height values (m a.m.s.l.)
Shoreline	0.00	12.00	0.00	12.00***
Hotel Madrid	1394.88	2	10	12.00****
Main Street	1559.93	2.50	5	7.5
Train Station	3000.00	1.50	3.5	5

* Path Distance Model; ** Digital Elevation Model; ***Water level at shoreline; **** Maximum water level

about 3000 m (El Nuevo Mexicano, 1932) from the shoreline in the east and southeast of the town (Fig. 8).

Cuyutlán was inundated in two minutes up to a distance of about 450 m from the shoreline. Southeast of Cuyutlán, 2.5 km from the shoreline, close to a section of the railroad, the area was inundated in 3 min (El Nacional, 1932; Excélsior, 1932d). Considering these two parameters, it is estimated that the mean water flow velocity was 5 to 5.5 m s⁻¹, which is consistent with average velocities observed by other tsunamis (e.g. Camfield, 1994; Nott, 1997; Titov and Synolakis, 1997; EERI, 2011)

The area drained in about three hours. Drainage went in two directions, one heading southeast through the beach, and the other to the sea through the estuary, southeast from Boca de Apiza (Farreras and Sánchez, 1991). This drainage most probably went through the Armería River, located 11 km southeast of Cuyutlán, because the estuary and Cuyutlán lagoon are connected by the Armería River.

An inundation depth model was generated from the inundation height values minus the heights values on the DEM (Fig. 8).

3.2.5 Materials transported by the tsunami

Different materials were transported by the tsunami, including sands, remains of buildings, trees and coconut palms (Salazar, 1985, 1989; Gaspar, 2010). Fish were swept from the ocean and deposited around the town as far as the railroad tracks, as De la Madrid indicated: "...my dad came from the well ... coming down the railroad and there were plenty of fish..." (De la Madrid, 2010). The tsunami transported domestic animals and larger livestock to a lesser extent. Among other things, a truck was dragged inland (Salazar, 1985).

3.2.6 Others

Many eyewitness and written documents indicate that people heard thunder, a sound that was followed by the retreat of the sea and the arrival of the water at the coast (Salazar, 1985; Chávez, 2010; De La Madrid, 2010; Gaspar, 2010; Mojarro, 2010).

Data also refers to the effects of previous earthquakes in June 1932, mainly damage produced by the 3 and 18 June events. Cumming (1933) states that buildings were not damaged by the earthquake of 22nd. Eyewitness and written documents also indicate that motion produced by the 22 June earthquake was not felt or perceived by residents (Salazar, 1985; De la Madrid, 2010; Gaspar, 2010; Mojarro, 2010).

3.2.7 Direct effects

The death toll was 50 people (El Informador, 1932c). The vast majority of deaths occurred among children (Salazar, 1985). Initially it was believed that there were more victims, but as Vidal Mojarro Vázquez said: "...there were people who we thought had been drowned, but they went far away... Those persons appeared later ... " (Mojarro, 2010). The number of injured was 67, the main causes for this were the impact of construction debris dragged by the wall of water (El Informador, 1932a). The number of people living in Cuyutlán who were affected by the tsunami was 1181 (Excélsior, 1932c; INEGI, 2010).

Tourist infrastructure located between the beach and sand dunes was the most damaged. Of the seven hotels in town, six were destroyed: Hotel Ceballos, Santa Cruz # 1, Santa Cruz # 2, Hotel Palacio, Hotel Zapotlan and El Gran Hotel (Fig. 9). Four of the largest chalets built of timber were destroyed: Chavez's House, Aguayo's Chalet, and Solórzano Chalet (Excélsior, 1932d; Salazar, 1989).

In general, all baths made of palm wood (locally named "enramada") near the beach were destroyed. Furthermore, all the smaller buildings, made mostly of shingle, mud, and palm with palm leaf roofs, were completely destroyed (El Universal Gráfico, 1932; Excélsior, 1932c, d; Salazar, 1989). In total, approximately 80 homes were destroyed (Fig. 9)

The paved streets of Cuyutlán were completely stripped and rocks were transported as far as the railway. Railroad tracks were partially buried by sand deposits and vegetation. A one-kilometer stretch of railroad track was blocked by debris, trees, fish and trash (El Informador, 1932b; El Universal Gráfico, 1932; Excélsior, 1932d, e).

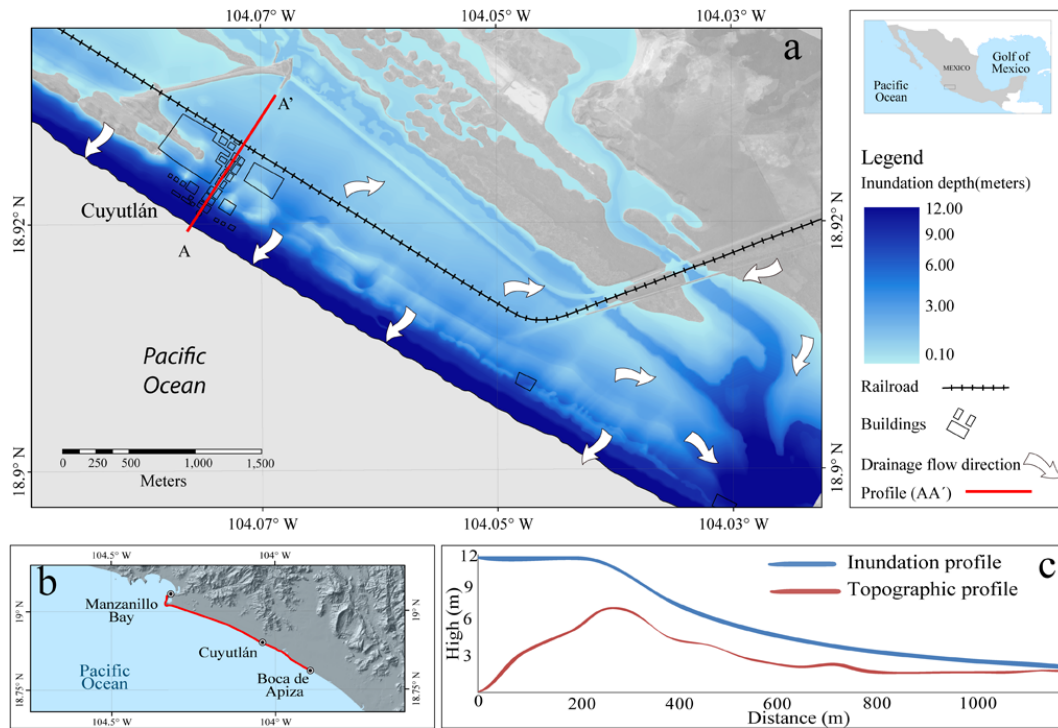


Fig. 8. Inundation depth model of the 22 June 1932 tsunami. (a) Map of the estimated inundation depth model, (b) the 22 June 1932 tsunami extension along the Pacific Coast (NGDC, 2011). (c) Topographic and inundation profile (A–A') across of the Cuyutlán town. White arrows represent an indicative probable drainage flow direction.

It was not possible to calculate the amount and type of material goods that were lost. However, data collected indicate that the main economic activities at the time were tourism and salt industry. The tourism infrastructure was very badly damaged; with the exception of the Madrid, all the hotels were completely destroyed or so seriously damaged that they could not be restored. The salt industry was also affected because 2000 tons of salt that were stored in the salt warehouse were lost and only 300 tons were recovered (El Informador, 1932d, e; De La Madrid, 2010; Mojarro, 2010).

3.2.8 Indirect effects

One indirect effect produced by the tsunami was the pollution of the Palo Verde Ranch Salinas (saltflats). One interviewee noted that the salinas were buried by sand after the tsunami, leaving them useless for salt extraction (Mojarro, 2010). At Palo Verde, as described by Reyes (2004): “In the past the estuary was connected with the ocean in its southeastern corner, through the Palo Verde marsh; that connection was lost in 1932 when the tsunami filled and covered the estuary with sand” (Fig. 10).

Tsunami erosion was most evident in the sand dunes (El Informador, 1932f; Salazar, 1985; Chávez, 2010; Mojarro, 2010). Comparison of eyewitness descriptions with current geomorphological features shows that sand dune segments were eroded. The sand and material brought by the tsunami

overwash was deposited in lower areas inland, corresponding to the coastal plains and the outer edge of the estuary and salt marsh areas (El Informador, 1932a; Excélsior, 1932b; Salazar, 1985, 1989; Chávez, 2010; De la Madrid, 2010). In the tsunami backwash, remains of buildings, trees and trash were deposited widely over the sandy beach (Fig. 10).

3.3 Tsunami intensity

To determine the 22 June tsunami intensity the Papadopoulos and Imamura (2001) scale was used. This scale is a qualitative assessment of the tsunami effects on the people, objects, and buildings. Applying the characteristics of each intensity level in the Papadopoulos and Imamura scale it was found that the great 1932 tsunami had an intensity level of VIII. Table 2 shows the list of characteristics of a VIII tsunami intensity level.

4 Discussion and conclusions

The reconstruction of the 22 June tsunami through a historical analysis allowed us to determine that on 22 June 1932, sea level was higher than normal due to coastal subsidence produced by the $M_s = 8.2$, 3 June event; a sea retreat occurred before the tsunami arrival at the Cuyutlán coast. Inundation heights were estimated to be up to 12 m, and tsunami

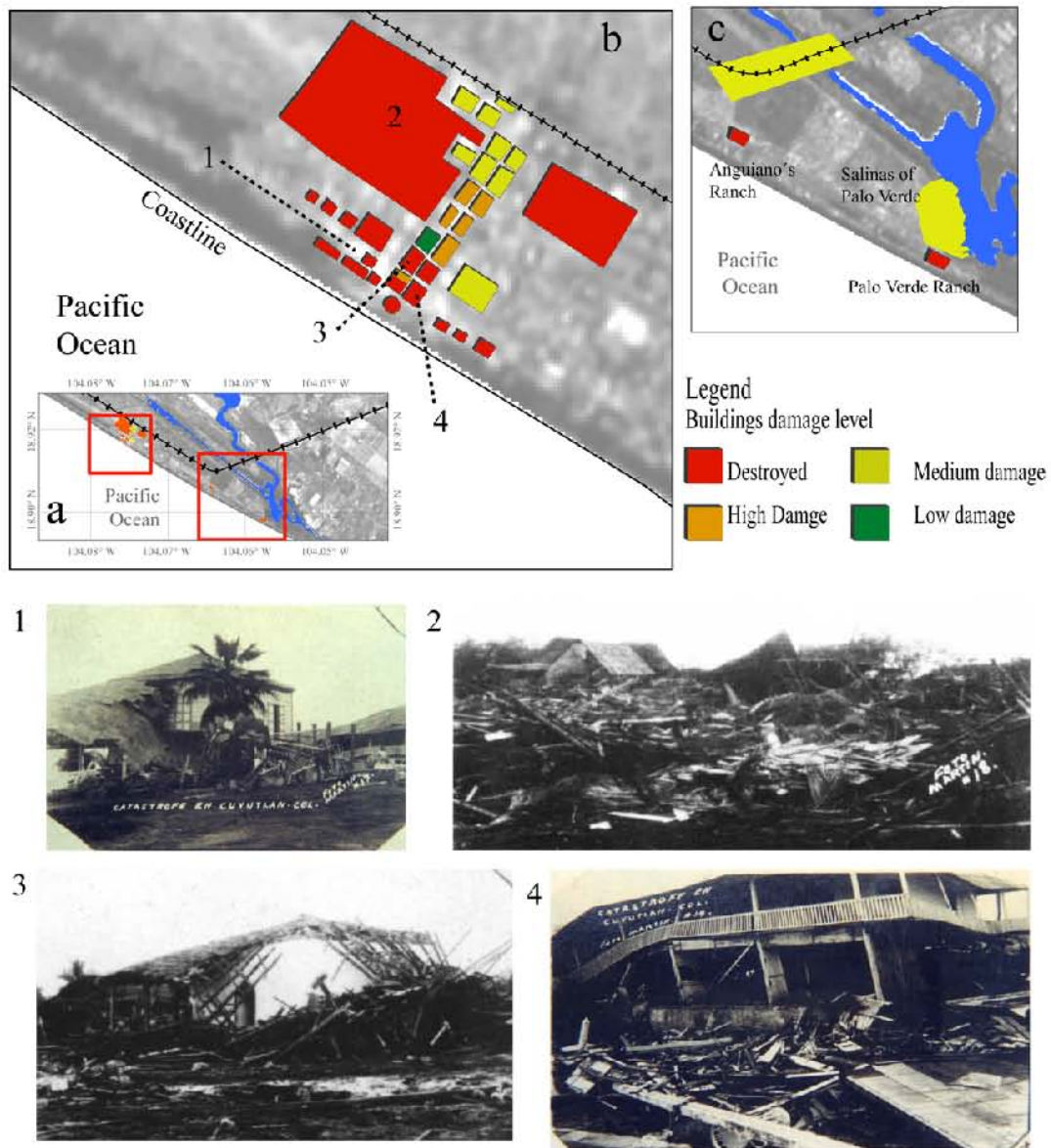


Fig. 9. Direct effects and building damage level map. (a) Cuyutlán, Colima map. Squares show the most affected zones, (b) most affected zone at Cuyutlán and damage level on each building. (1) Aguayo's Chalet, (2) view to destroyed houses, (3) Hotel Santa Cruz #1 (El Informador 1932c), and (4) Hotel Ceballos. (c) The settlements of Anguino's Ranch and Palo Verde Ranch completely destroyed, railroad section with medium damage level and medium damaged Salinas of Palo Verde.

inundation extension varied according to the local topography. The water level was estimated from photographs with an error of ± 10 cm. Modelling was based on four well identified control points (Table 3), and the selection of the best fit equation allowed to built a continuous map of the distribution of inundation levels. The tsunami inundated the study area 450–2000 m inland within 2–3 min and water drained out in about 3 h. We realize the simplicity of the proposed inundation distribution model that shows a distribution pattern based only on the available data. This model does not include the topographic conditions present before the tsunami

event nor does it include morphologic changes on the coast after the event, merely because no detailed topographic data exists previous to the event. The proposed model does not pretend to substitute a complex hydrodynamic model, but to offer a simple model that allows to infer the inundation distribution on places and situations that lack the necessary data to run more complex models. The reconstruction of the tsunami physical characteristics made it possible to elucidate the source mechanism that generated it. Most probably an earthquake-triggered submarine landslide is the source mechanism, based on the fact that probably the 3 and

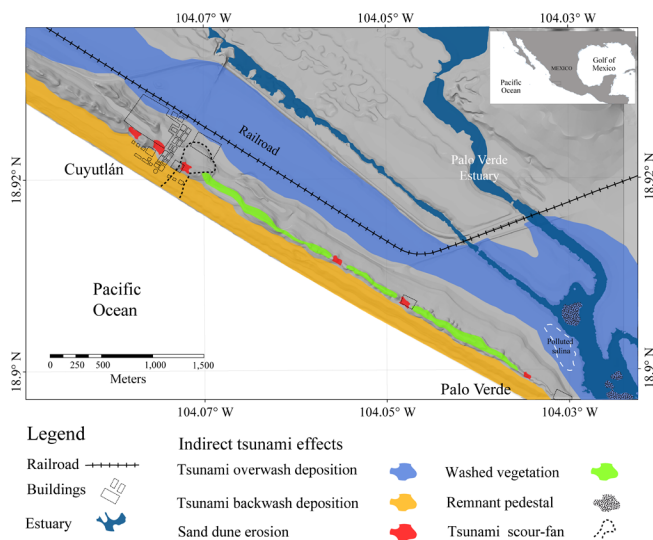


Fig. 10. Indirect tsunami effects map.

18 June earthquakes destabilized the sediments on the submarine canyon walls (Fig. 6), and the 22 June earthquake probably triggered their collapse. Besides, considering the tsunami direction indicated by Cumming (1933), it makes more sense that the tsunami source was at the submarine canyon. However, this statement requires further work to corroborate it. The 22 June tsunami characteristics fit a VIII tsunami intensity level (Papadopoulos and Imamura, 2001). We were able to determine the economic loss and damage in the local infrastructure, the number of deaths and injuries and changes on the landscape produced by the tsunami. Modelling of the inundation heights and inundation depth are two of the main elements in tsunami hazard assessment.

The gradual anthropogenic land use change produced after 1932 (e.g. coconut cultivation, new infrastructure and buildings) posed a difficulty in the geomorphologic interpretation of tsunami effects (Goff et al., 2008). Nevertheless, the interpretation and identification of some morphologic features produced by the 1932 tsunami was possible. Tsunami-scour fan associated with the overwash flow were identified close to the current main street (Goff et al., 2007, 2008, 2009). Broken dunes features formed by tsunami erosion were found in several segments of the beach ridges that run parallel to the beach front (Fig. 10). Likewise, probable remnant pedestals were located in the estuary at a distance of 400 to 850 m from the shoreline, behind the Palo Verde Ranch (Fig. 10). Other morphological features associated with the tsunami, such as hummocky topography, usually located landward on the overwash deposition zone (Goff et al., 2007), were not identified because of the post-1932 land changes. In a broad sense, the 1932 Cuyutlán tsunami fits with the description of a large event, with 10 m and greater inundation height (Goff et al., 2007).

Although the historical approach has proven its potential in the reconstruction of different kind of natural phenomena (e.g. Gianfreda et al., 2001; Glade et al., 2001; Pelinovsky et al., 2001; Kates et al., 2006; Ribera et al., 2011), the ethnographic approach is not enough when no written documents are available and when most eyewitness have died; if this is the case, then other techniques have to be applied. Clearly, the limitations on historical tsunami reconstruction relate to the availability of reports and eyewitness survival.

The importance of rescuing eyewitness testimonies and oral tradition, often forgotten, combined with document review and the use of GIS has proven to be a useful tool in interpreting the physical characteristics and behaviour of the great 1932 tsunami. This information is needed in hazard planning programmes, land use regulations, building codes, evacuation programmes and preparedness strategies.

Acknowledgements. N. Corona acknowledges CONACYT for a PhD scholarship. M. T. Ramírez-Herrera acknowledges research funds provided by PAPPIT UNAM grant IN123609 and SEP-CONACYT grant No. 129456. Help, advice and logistical help came from L. M. Morales, P. Urquijo, Sedna Monter and GTT Imaging S.A de C.V. Photographs signed by “Martin” and used on Figs. 6 and 8 came from “El Gordo” (Resident of Armería) private collections. Proof-reading help came from M. Skutsch. We thank the editor Stefano Tinti, Josep Carles Balasch Solanes and an anonymous reviewer for valuable comments that help to improve this manuscript.

Edited by: S. Tinti

Reviewed by: J. C. Balasch Solanes
and another anonymous referee

References

- Ambraseys, N. N.: A test case of historical seismicity: Is-fahan and Chahar Mahal, Iran, *Geogr. J.*, 145, 56–71, 1979.
- Ambraseys, N. N.: Magnitudes of Central American earthquakes 1898–1930, *Geophys. J. Int.*, 121, 545–556, doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb05732.x, 1995.
- Ambraseys, N. N. and Adams, R. D.: Large-magnitude Central American earthquakes, 1898–1994, *Geophys. J. Int.*, 127, 665–692, doi:10.1111/j.1365-246X.1996.tb04046.x, 1996.
- Ambraseys, N. N., and Finkel, C. F.: The Marmara Sea earthquake of 1509, *Terra Nova*, 2, 167–174, doi:10.1111/j.1365-3121.1990.tb00059.x, 1990.
- Astiz, L. and Kanamori, H.: An earthquake doublet in Ometepec, Guerrero, Mexico, *Phys. Earth Planet. Int.*, 34, 24–45, 1984.
- Balasch, J. C., Ruiz-Bellet, J. L., Tuset, J., and Martín de Oliva, J.: Reconstruction of the 1874 Santa Tecla’s rainstorm in Western Catalonia (NE Spain) from flood marks and historical accounts, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 2317–2325, doi:10.5194/nhess-10-2317-2010, 2010.
- Barnikel, F.: The value of historical documents for hazard zone mapping, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 599–613, doi:10.5194/nhess-4-599-2004, 2004.
- Barriados, M., Coeur, D., Lang, M., Llasat, M. C., Naulet, R., Lemaitre, F., and Barrera, A.: Stationarity analysis of historical

- flood series in France and Spain (14th–20th centuries), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 583–592, doi:10.5194/nhess-3-583-2003, 2003.
- Benito, G. and Thorndycraft, V. R. (Eds.): *Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation*, UE-CSIC, Madrid, 2004.
- Calcaterra, D., Parise, M., and Palma, B.: Combining historical and geological data for the assessment of the landslide hazard: a case study from Campania, Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 3–16, doi:10.5194/nhess-3-3-2003, 2003.
- Camfield, F. E.: Tsunami effects on coastal structures, *J. Coastal Res.*, 12, Special Issue, 177–187, 1994.
- Casanova, L.: *Topografía Plana*, Taller de Publicaciones de Ingeniería-ULA, Mérida, 2002.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED): available at: <http://www.em-dat.net/figures2004.htm>, access: 2 January 2011, 2005.
- Chávez, M.: The day when the sea went out, interview conducted by Corona, N.: November 10, 2010, in Colima, Colima, 2010.
- Cruz, G. and Wyss, M.: Large Earthquakes, mean sea level, and tsunamis along the Pacific Coast of Mexico and Central America, *B. Seismol. Soc. Am.*, 73, 553–570, 1983.
- Cumming, J. L.: Los terremotos de Junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco, *Universidad de México*, 31–32, 68–104, 1933.
- De la Madrid, I.: The day when the sea went out, interview, conducted by Corona, N.: June 10, 2010, in Cuyutlán, Colima, 2010.
- Denscombe, M.: *The Good Research Guide: for small-scale social research projects*, Open University Press, Maidenhead/Philadelphia, 2003.
- Earthquake Engineering Research Institute (EERI): The Tohoku, Japan, Tsunami of March 11, 2011: Effects on Structures, *Earthquake Engineering Research Institute, Special Earthquake Report*, 1–14, available at: <http://www.eqclearinghouse.org/2011-03-11-sendai/files/2011/03/Japan-Tohoku-report-tsunami-bldgs.pdf>, 2011.
- Eissler, H. K. and McNally K. C.: Seismicity and tectonics of the Rivera Plate and implications for the 1932 Jalisco, Mexico, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 86, 4520–4530, 1984.
- El Informador: Cuyutlán a punto de desaparecer bajo las aguas del Océano Pacífico, *El Informador*, p. 1, p. 2, June 22, 1932, 1932a.
- El Informador: La catástrofe ocurrida anteayer en Cuyutlán no tiene precedente, p. 1, p. 2, June 24, 1932, 1932b.
- El Informador: Gráficos del estado en que quedo el famoso balneario de Cuyutlán, Col., p. 1, p. 2, June 26, 1932, 1932c.
- El Informador: Se perdió gran cantidad de sal, p. 7, June 26, 1932, 1932d.
- El Informador: Han sido formidables los recientes terremotos, p. 4, June 28, 1932, 1932e.
- El Informador: Las víctimas de Cuyutlán arrojan un saldo de doce muertos y 67 heridos, p. 6, June 28, 1932, 1932f.
- El Nacional: Todo cuanto encontró a su paso arrasó furiosamente el mar, 1 pp., June 24, 1932, 1932.
- El Nuevo Mexicano: Un testigo presencial describe las escenas crispantes-Total destrucción del balneario-niños ahogados flotan en charcos, p. 2, June 21, 1932, 1932b.
- El Universal Gráfico: En Cuyutlán no quedó piedra sobre piedra, p. 15, June 23, 1932, 1932.
- EM-DAT: available at: http://www.emdat.be/result-disaster-Profiles?disgroup=natural&period=900%242011&dis_type=
- [Earthquake+%28seismic+activity%29&Submit=Display+Disaster+Profile](#), access: 10 January 2011.
- Excélsior: Una extensa zona marítima afectada por el sismo de ayer, p. 3, June 23, 1932, 1932a.
- Excélsior: Cuyutlán arrasado por la invasión del océano: Gigantescas olas arrasaron las casas y la gente, p. 1, June 23, 1932, 1932b.
- Excélsior: Dos veces más Cuyutlán barrido por las olas, p. 1, June 24, 1932, 1932c.
- Excélsior: Mil doscientos huyen hacia Colima, *Excélsior*, p. 3, June 24, 1932, 1932d.
- Excélsior: Tres Minutos Fueron Suficientes Para Arrasar el Balneario de Cuyutlán, p. 1, p. 2, p. 3, June 25, 1932, 1932e.
- Farreras, S. and Sánchez, J. A.: The tsunami threat on the Mexican West Coast: A historical analysis and recomendations for hazard mitigation, *Nat. Hazards*, 4, 301–316, 1991.
- Fliri, F.: *Naturchronik von Tirol*, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, 1998.
- Flores, T.: Las invasiones bruscas del mar a los litorales Mexicanos, *Annales de la Commission pour L'etude des Raz de Maree*, 4, 94–99, 1934.
- Fréchet, J., Meghraoui, M., and Stucchi, M. (Eds.): *Historical seismology: interdisciplinary studies of past and recent earthquakes, Modern approaches in solid earth sciences*, Springer-Verlag New York Inc., United States, 2008.
- Gaspar, P.: The day when the sea went out, interview, conducted by Corona, N.: March 10, 2010, in Cuyutlán, Colima, 2010.
- Gianfreda, F., Mastronuzzi, G., and Sansò, P.: Impact of historical tsunamis on a sandy coastal barrier: an example from the northern Gargano coast, southern Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 1, 213–219, doi:10.5194/nhess-1-213-2001, 2001.
- Gianluca, L.: La Inundación de Vajont: Representaciones periodísticas de un desastre italiano, *Desacatos*, 19, 71–84, 2005.
- Glade, T., Albin, P., and Frances, F. (Eds.): *The use of historical data in natural hazards assessment*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2001.
- Goff, J.: Evidence of a previously unrecorded local tsunami, 13 April 2010, Cook Islands: implications for Pacific Island countries, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1371–1379, doi:10.5194/nhess-11-1371-2011, 2011.
- Goff, J. R., Hicks, M. D., and Hurren, H.: Tsunami geomorphology in New Zealand: a new method for exploring the evidence of past tsunamis, NIWA technical report No. 18, Wellington, 69 pp., 2007.
- Goff, J. R., McFadgen, B., Wells, A., and Hicks, M.: Seismic signal in coastal dune systems, *Earth-Sci. Rev.*, 89, 73–77, doi:10.1016/j.earscirev.2008.03.002, 2008.
- Goff, J. R., Lane, E., and Arnold, J.: The tsunami geomorphology of coastal dunes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 847–854, doi:10.5194/nhess-9-847-2009, 2009.
- Gregory, I. and Ell, P.: *Historical GIS: Technologies, Methodologies and Scholarship*, Cambridge University Press, New York, 2007.
- Guidoboni, E.: Vesuvius: A historical approach to the 1631 eruption “cold data” from the analysis of three contemporary treatises, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 178, 347–358, doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.09.020, 2008.
- Hernández, F.: *El Colima de Ayer*, 4th. Ed., Universidad de Colima, Colima, 2009.

- Historical Tsunami Database for the World Ocean (HTDB/WLD): available at: <http://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>, last access: 10 August 2011.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI): available at: <http://www.inegi.org.mx/lib/Olap/consulta/>, last access: 10 December 2010.
- Kanamori, H.: Lessons from the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 364, 1927–1945, doi:10.1098/rsta.2006.1806, 2006.
- Kates, R. W., Colten, C. E., Laska, S., and Leatherman, S. P.: Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: A research perspective, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 103, 14653–14660, doi:10.1073/pnas.0605726103, 2006.
- Kovalerchuk, B.: Visual Correlation Methods and Models, in: *Visual and Spatial Analysis: Advances in Data Mining, Reasoning, and Problem Solving*, edited by: Kovalerchuk, B. and Schwing, J., Springer, Netherlands, 175–207, 2004.
- Lagos, M. and Cisternas, M.: El Nuevo Riesgo de Tsunami Considerando el Peor Escenario en Actas del X Coloquio Internacional de Geografía: Diez años de cambios en el mundo, en *la geografía y en las ciencias sociales, 1999–2008*, Barcelona, 2008.
- Levin, B. and Nosov, M.: *Physics of Tsunamis*, Springer, 2009.
- Liseikin, V. D.: *Grid Generation Methods*, 2, Springer, Russia, 2010.
- Llasat, M.-C., Barriendos, M., Barrera, A., and Rigo, T.: Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records, *J. Hydrol.*, 313, 32–47, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.02.004, 2005.
- Lübken, U. and Mauch, Ch.: Uncertain Environments: Natural Hazards, Risk and Insurance, in: *Historical Perspective, Environment and History*, 17, 1–12, doi:10.3197/096734011X12922358301012, 2011.
- Luhr, J., Nelson, S., Allan, J., and Carmichael, I.: Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump, *Geology*, 13, 54–57, doi:10.1130/0091-7613(1985)13<54:ARISMM>2.0.CO;2, 1985.
- MAR V0.9 2010: Gonzalez J. I., CICESE, Ensenada, Mexico, computer program, 2010.
- Mimura, N., Yasuhara, K., Kawagoe, S., Yokoki, H., and Kazama, S.: Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami – A quick report, *Mitig. Adapt. Strategies Glob. Chang.*, 16, 803–818, doi:10.1007/s11027-011-9297-7, 2011.
- Mojarro, V.: The day when the sea went out, interview, conducted by Corona, N.: April, 13, 2010, in Cuyutlán, Colima, 2010.
- Murchison, J. M.: *Ethnography Essentials: Designing, conducting, and presenting your research*, Jossey-Bass, San Francisco, United States of America, 2010.
- National Geodata Base Center, Historical Tsunami Database (NGDC): available at: http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml, Access: 8 June 2011.
- Naulet, R., Lang, M., Coeur, D., and Gigon, C.: Collaboration between historians and hydrologists on the Ardeche River (France), in: *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments*, edited by: Glade, T., Albini, P., and Frances, F., Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 113–129, 2001.
- Nixon, G. T.: The relationship between quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and the structure of subducted ocean lithosphere, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 93, 514–523, doi:10.1130/0016-7606(1982)93<514:TRBQVI>2.0.CO;2, 1982.
- Nott, J.: Extremely high-energy wave deposits inside the Great Barrier Reef, Australia: Determining the cause, – tsunami or tropical cyclone?, *Mar. Geol.*, 141, 193–207, doi:10.1016/S0025-3227(97)00063-7, 1997.
- Okal, E. A. and Borrero, J. C.: The tsunami earthquake of 1932 June 22 in Manzanillo, México: seismological study and tsunami simulations, *Geophys. J. Int.*, 187, 1–17, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05199.x, 2011.
- Ordóñez, E.: Seismic Activity in Mexico during June, 1932, *B. Seismol. Soc. Am.*, 23, 80–82, 1933.
- Orfanogiannaki, K. and Papadopoulos, G. A.: Conditional probability approach of the assessment of tsunami potential: Application in three tsunamigenic regions of the Pacific Ocean, *Pure Appl. Geophys.*, 164, 593–603, doi:10.1007/s00024-006-0170-7, 2007.
- O’Sullivan, D. and Unwin, D.: *Geographic Information Analysis*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
- Oseguera, J.: *Colima en panorama: Monografía histórica, geográfica, política y sociológica*, S.P.I., Colima, 1967.
- Papadopoulos, G. A. and Imamura, F.: A proposal for a new tsunami intensity scale, ITS, Seattle, 569–577, 2001.
- Pedersen, G.: Modeling Runup with Depth Integrated Equation Models, in: *Advances numerical models for simulating tsunami waves and runup*, edited by: Liu, P. L. F., Yeh, H., and Synolakis, C., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 3–42, 2008.
- Pelinovsky, E., Kharif, C., Riabov, I., and Francius, M.: Study of tsunami propagation in the Ligurian Sea, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 1, 195–201, doi:10.5194/nhess-1-195-2001, 2001.
- Pfister, C.: *Wetternachhersage, 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen*, Haupt, Bern, 1999.
- Ramírez-Herrera, M. T., Kostoglodov, V., Summerfield, M., Urrutia-Fucugauchi, J., and Zamorano-Orozco, J.: A reconnaissance study of the morphotectonics of the Mexican subduction zone, *Z. Geomorphol.*, 118, 207–226, 1999.
- Ramírez-Herrera, M. T., Kostoglodov, V., and Urrutia-Fucugauchi, J.: Overview of Recent Coastal Tectonic Deformation in the Mexican Subduction Zone, *Pure Appl. Geophys.*, 168, 1415–1433, doi:10.1007/s00024-010-0205-y, 2011.
- Reyes, J. C.: Sal, el oro blanco de Colima, México, Gobierno del Estado de Colima/Secretaría de Cultura, Colima, 36–40, 2004.
- Ribera, P., Gallego, D., Pena-Ortiz, C., Del Rio, L., Plomaritis, T. A., and Benavente, J.: Reconstruction of Atlantic historical winter coastal storms in the Spanish coasts of the Gulf of Cadiz, 1929–2005, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1715–1722, doi:10.5194/nhess-11-1715-2011, 2011.
- Salazar, J.: Una Montaña de Agua, *Diario de Colima*, p. 2, p. 3, June 30, 1985, 1985.
- Salazar, J.: El Maremoto de Cuyutlán, 1932, *Investigaciones Históricas 2*, Sociedad Colimense de Estudios Históricos, Colima, México, 1989.
- Sánchez, A. J. and Farreras, S. F.: Catalog of tsunamis on the Western Coast of México, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Boulder: National Geophysical Data Center/NOAA, 1993.

- Satake, K. and Atwater, B.: Long-term perspectives on giant earthquakes and tsunamis at subduction zones, *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.*, 35, 349–374, doi:10.1146/annurev.earth.35.031306.140302, 2007.
- Secor, A. J.: Social surveys, interviews, and focus groups, in: *Research methods in geography: a critical Introduction*, edited by: Gomez, B. and Jones III, J. P., Wiley-Blackwell, Singapore, 194–205, 2010.
- Seidel, J., Imbery, F., Dostal, P., Sudhaus, D., and Bürger, K.: Potential of historical meteorological and hydrological data for the reconstruction of historical flood events – the example of the 1882 flood in southwest Germany, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 175–183, doi:10.5194/nhess-9-175-2009, 2009.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN): available at: <http://www.ssn.unam.mx>, last access: 2 November 2010.
- Sigurdsson, H., Carey, S., Cornell, W., and Pescatore, T.: The eruption of Vesuvius in A.D. 79, *Natl. Geogr. Res.*, 1, 332–387, 1985.
- Singh, S. K., Asitz, L., and Havskov, J.: Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican Subduction Zone: A reexamination, *B. Seismol. Soc. Am.*, 71, 827–843, 1981.
- Singh, S. K., Ponce, J., and Nishenko, S. P.: The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: subduction of the Rivera Plate, *B. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1301–1313, 1985.
- Singh S. K., Pacheco, J., and Shapiro, N. M.: the earthquake of 16 november, 1925 ($M_s=7.0$) and the Reported tsunami in Zihuatenejo, Mexico, *Geofís. Int.*, 37, 49–52, 1998.
- Soloviev, S. L. and Go, Ch. N.: *Catalogue of tsunamis on the eastern shore of the Pacific Ocean*, Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences, Ottawa, 1984.
- Stein, S.: Limitations of a young science, *Seismol. Res. Lett.*, 77, 351–353, 2006.
- Stein, S. and Okal, E. A.: Ultralong period seismic study of the December 2004 Indian Ocean earthquake and implications for the regional tectonics and the subduction process, *B. Seismol. Soc. Am.*, 97, 279–295, doi:10.1785/0120050617, 2007.
- Strunz, G., Post, J., Zosseder, K., Wegscheider, S., Mück, M., Riedlinger, T., Mehl, H., Dech, S., Birkmann, J., Gebert, N., Harjono, H., Anwar, H. Z., Sumaryono, Khomarudin, R. M., and Muhari, A.: Tsunami risk assessment in Indonesia, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 67–82, doi:10.5194/nhess-11-67-2011, 2011.
- Titov, V. V. and Synolakis, C. E.: Extreme inundation flows during the Hokkaido-Nansei-Oki Tsunami, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1315–1318, doi:10.1029/97GL01128, 1997.
- UNESCO-IOC: *Tsunami Glossary*, IOC information document, 1221, UNESCO, Paris, 2006.
- Walliman, N.: *Social Research Methods*, GAGE Publications, London, 2006.
- Walsh, T. J., Titov, V. V., Venturato, A. J., Mofjeld, H. O., and Gonzalez, F. I.: *Tsunami Hazard Map of the Elliott Bay Area*, Seattle, Washington: Modeled Tsunami Inundation from a Seattle Fault Earthquake, Washington division of geology and earth resources, Seattle, Washington, open file report 2003-14, 2003.
- Wagner, K. and Suda, M.: Natural hazards in the perspective of the public: A big black box, *Internationales Symposium zum Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren, Lawinen und Hangbewegungen*, 4 (IX), 285–296, 2004.
- Wang, P. and Zhang, D.: An introduction to some historical governmental weather records of China, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 69, 753–758, doi:10.1175/1520-0477(1988)069<0753:AITSHG>2.0.CO;2, 1988.
- Yanagisawa, K., Imamura, F., Sakakiyama, T., Annaka, T., Takeda, T., and Shuto, N.: Tsunami assessment for risk management at nuclear power facilities in Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 164, 565–576, doi:10.1007/s00024-006-0176-1, 2007.
- Zhan, C., Menon, S., and Gao, P.: A directional path distance model for raster distance mapping, *Lect. Notes Comput. Sc.*, 716, 434–443, doi:10.1007/3-540-57207-429, 1993.

Técnicas histórico-etnográficas en la reconstrucción y caracterización de tsunamis: El ejemplo del gran tsunami del 22 de junio de 1932, en las costas del Pacífico Mexicano¹

Néstor Corona Morales² y María Teresa Ramírez-Herrera³

RESUMEN

La magnitud de los desastres ocasionados por tsunamis en la última década ha motivado a ampliar el conocimiento sobre su dinámica y comportamiento. Este estudio propone la aplicación de técnicas de análisis multidisciplinarias, incluyendo las histórico-etnográficas, en la reconstrucción y caracterización de los tsunamis sin un registro instrumental. Se usa el ejemplo del tsunami del 22 de junio de 1932, el segundo más destructivo registrado en las costas del Pacífico Mexicano. El origen del tsunami es incierto y se plantan dos hipótesis: 1) sísmico y 2) por un deslizamiento submarino. Archivos históricos, entrevistas y mapeo en Sistemas de Información Geográfica, permitieron identificar componentes clave de la dinámica del tsunami: tiempo de arribo, directividad, superficie afectada y alturas máximas de ola en la costa. Se aplicaron modelos numéricos (*GEOWAVE* y *FUNWAVE*) basados en datos históricos, usando dos posibles mecanismos de generación. Los resultados demuestran que un deslizamiento submarino explica mejor la causa del tsunami de 1932.

Palabras clave: Datos históricos, enfoque etnográfico, tsunamis, tsunami-deslizamientos, modelación de tsunamis.

ABSTRACT

The magnitude of damage caused by tsunamis in the past decade has encouraged scientists to expand our knowledge about tsunami dynamics and behavior. This study applies a multidisciplinary analysis, including historical and ethnographic techniques, in the reconstruction and characterization of tsunamis with no instrumental record. The example of the 22 June 1932 tsunami, the second most destructive recorded in the Pacific Coast of Mexico is used. The cause of this tsunami

¹ N. Corona agradece al CONACYT por proporcionar la beca para realizar los estudios de Doctorado. M.T. Ramírez-Herrera agradece a PAPPIT UNAM por proporcionar los fondos de investigación mediante el apoyo IN123609 y a SEP-CONACYT por el apoyo N° 129456. Se agradece a P. Urquijo, por su apoyo en el tratamiento y búsqueda de fuentes hemerográficas. Artículo recibido el 15 de agosto de 2012, aceptado el 20 de septiembre de 2012 y corregido el 29 de septiembre de 2012.

² Centro de Estudios en Geografía Humana, El Colegio de Michoacán y Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (México).

E-mail: ncorona@pmip.unam.mx

³ Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México y Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (México).
E-mail: mtramirez@ciga.unam.mx

is uncertain. Two hypotheses are proposed: 1) seismic slip, and 2) a submarine landslide. Historical archives, interviews with local witnesses, and GIS mapping, aided in identifying key components of the tsunami dynamics: arrival time, directivity, affected area, and maximum wave heights at the coast. Based on historical data, we applied numerical models (*GEOWAVE* and *FUNWAVE* codes) to the two possible mechanisms of tsunami generation. The results show that a submarine landslide explains best the cause of the 1932 tsunami.

Keywords: Historical data, ethnographic approach, tsunami, landslide tsunami, tsunami modeling.

En la última década, los desastres y daños causados por los tsunamis han sido de dimensiones gigantescas e incomparables a las de otros fenómenos naturales, tan solo el tsunami del 11 de marzo de 2011, causó el 64.5% de las muertes asociadas a desastres naturales (Guha-Sapir *et al.*, 2012). Uno de los principales retos para mitigar los efectos de los tsunamis implica en gran medida el conocimiento de la probabilidad de ocurrencia y la magnitud del mismo. Al ser eventos de baja frecuencia, gran potencial destructivo (Birkmann & Fernando, 2008) presentan un reto, ya que se trata de un campo de investigación en constante desarrollo, basta señalar el cambio de paradigma del potencial sísmico y tsunamigénico en zonas de subducción que antecedía al tsunami del 2004 en el Océano Índico (Stein, 2006).

Los modelos de valoración de peligro por tsunamis se basan principalmente en análisis de datos de sismos con potencial tsunamigénico. Una forma de estimar el periodo de retorno de los tsunamis se deriva del análisis de las tasas de convergencia en zonas de subducción, para determinar la cantidad de energía que se puede acumular en la interfaz de los bloques y derivar la magnitud del sismo resultante de dicho esfuerzo, la deformación del fondo oceánico y por tanto la probabilidad de que un tsunami se presente (Løvholt *et al.*, 2012). Otro enfoque consiste en el análisis estadístico de datos sísmicos, el principal inconveniente es la escasa cobertura histórica de los registros sísmicos. Un tercer enfoque consiste en determinar el peligro de tsunamis a partir de las estadísticas de run-up provenientes de catálogos (Løvholt *et al.*, 2012). Este grupo de modelos se pueden aplicar cuando se cuenta con mediciones instrumentales, sin embargo, las prácticas de recolección de información instrumental se

viene realizando solamente desde la segunda mitad del siglo XVII (Fliri, 1998; Barriendedos *et al.*, 2003; Llasat *et al.*, 2005). Los sismos y tsunamis cuyos periodos de gestación superan la cobertura de los datos instrumentales difícilmente pueden ser analizados con estos enfoques, *i.e.*, el predecesor del mega-tsunami del 2004 en el océano Índico ocurrió entre 550-700 años atrás (Jankaew *et al.*, 2008).

Por otro lado, se ha recurrido al empleo de modelos determinísticos, en los cuales, si bien no es posible determinar periodos de retorno, es posible identificar las alturas máximas de tsunamis extremos mediante el análisis de registros observacionales históricos (*e.g.* Kulikov *et al.*, 2005 y Usha *et al.*, 2012). En general, los datos históricos pueden ser más directos, claros y en la mayoría de los casos más reveladores que datos generados con técnicas que miden parcialidades de los fenómenos (Wang & Zhang, 1988). Aún tratándose de meras descripciones, al ser validados pueden generar datos importantes en el entendimiento de fenómenos naturales (Barnikel, 2004; Giannecchini & D'Amato Avanzi, 2012).

El tsunami del 22 de Junio de 1932, su contexto sismotectónico y tsunamigénico

La costa del Pacífico Mexicano se ubica en la zona limítrofe y de convergencia de las placas Norteamericana (NAP), de Cocos (CP) y de Rivera (RP); definida por la Trinchera Mesoamericana (MAT), en donde subducen las placas de Rivera y Cocos bajo la NAP (Singh *et al.*, 1981; Nixon, 1982; Eissler & McNally, 1984; Luhr *et al.*, 1985; Singh *et al.*, 1985). En la zona de subducción de las costas mexicanas se han presentado 70 tsunamis

Okal y Borrero (2011), basados en el trabajo de (Fukao, 1979), proponen que el tsunami fue generado por un mecanismo "sismo-tsunami" que se produjo en una falla adyacente a la falla principal (*Splay fault*), capaz de generar tsunamis de mayor magnitud que la esperada (Fukao, 1979). Sin embargo, en su modelo de mejor ajuste, reportan alturas máximas de ola de hasta 7 m en la Bahía de Manzanillo y en Cuyutlán, valores que no se ajustan a los datos reportados. En Manzanillo no hay reportes de daños y en Cuyutlán la altura de ola fue superior a 10 m (El Universal Gráfico, 1932b; Excelsior, 1932b; Soloviev & Go, 1975; Salazar, 1985; Farreras & Sanchez, 1991; Sánchez y Farreras, 1993). El modelo propuesto presenta, además una distribución homogénea, es decir alturas de 7 metros a lo largo de toda la costa de Colima.

Por otro lado, los modelos que apoyen la tesis de un deslizamiento submarino como causa del tsunami, carecen hasta ahora de argumentos sólidos (El Informador, 1932a; Excelsior, 1932c) o están basadas en observaciones directas en campo (Cumming, 1933).

En la presente investigación se efectuó la caracterización del tsunami a partir de información histórica y testimonios de sobrevivientes. Los resultados de la caracterización histórico-etnográfica fueron comparados con

los patrones de comportamiento de tsunamis generados por causas sísmicas y por deslizamientos. A su vez, dichos patrones fueron generados a partir de la modelación numérica de generación y propagación de tsunamis por ambas condiciones.

Métodos

La estrategia de investigación consistió en: 1) caracterización del tsunami a partir de datos históricos -tiempo de arribo, dirección de la propagación, área afectada y amplitud máxima del tsunami en la costa- obtenidos mediante el uso de técnicas históricas, etnográficas y geográficas; 2) modelado numérico de los tsunamis por causas sísmicas y por deslizamiento submarino y 3) comparación de datos compilados histórico-etnográficos y de datos modelados.

Las técnicas históricas-etnográficas consistieron en el análisis de contenido de: archivos históricos, material hemerográfico, reportes técnicos, artículos científicos y catálogos, así como, la aplicación de entrevistas a testigos presenciales o a sus descendientes. Las técnicas geográficas consistieron en representar los atributos del tsunami, cualitativos como cuantitativos sobre mapas históricos.

Cuadro N° 1
Parámetros sísmicos de la modelación de las condiciones iniciales del tsunami.

Parámetro	Valor
Longitud del centroide de la falla (°)	-104.680
Latitud del centroide de la falla(°)	18.739
<i>Strike</i> (°)	310
<i>Dip</i> (°)	14
<i>Rake</i> (°)	90
Magnitud del sismo (Ms)	6.9
Profundidad (m)	30.000
Longitud de la falla (m)	80.000
Ancho de la falla (m)	40.000
Modulo de corte (N)	4E+10
Profundidad del piso oceánico	860

Fuente: Ajustada a partir de Corona y Ramírez-Herrera (2012a).

Cuadro N° 2
Parámetros de la modelación por deslizamiento submarino.

Parámetro	Valores
X = Longitud	-104.0376
Y = Latitud	18.7586
γ = Densidad específica	1.906
b (km) = Longitud del cuerpo del deslizamiento	3.5
T (m) = Espesor máximo del deslizamiento	450
ω (km) = Ancho máximo del cuerpo del deslizamiento	3.0
d (m) = Profundidad promedio del deslizamiento	460
θ (°) = Pendiente promedio	6.0

Fuente: Ajustada a partir de Corona y Ramírez-Herrera (2012a).

La modelación de los tsunamis tuvo como objetivo obtener los parámetros de alturas máximas de tsunami en la costa, dirección de propagación, tiempos de arribo e identificación de la extensión de la costa que fue afectada. Los modelos fueron generados con los códigos de modelación *GEOVAWE* y *FUN-WAVE*. Los parámetros de la modelación por causas sísmicas (MGTS) (Cuadro N° 1) y por deslizamientos (Cuadro N° 2) fueron tomados de Corona y Ramírez-Herrera (2012a). Los datos batimétricos fueron tomados de la colección del *Global Multi-Resolution Topography* de Ryan *et al.* (2009) obtenida mediante el software *GeoMapApp 3.0.1*, y generalizada a pixeles de ~200 x 200 m.

La modelación del tsunami generado por deslizamiento (MGTD) se realizó usando como insumos los parámetros de Corona y Ramírez-Herrera (2012a), plantean que el tsunami se genero por la combinación de dos eventos consecutivos: 1) el sismo de 6.9 Ms (Singh *et al.*, 1985), tomando los mismos parámetros del modelo sísmico, y 2) un deslizamiento submarino de tipo rotacional (slump) que fue desencadenado ~10 segundos después de la generación de sismo.

Caracterización del tsunami en base a datos histórico-etnográficos

La revisión hemerográfica estuvo comprendida por 46 notas periodísticas de diarios

de circulación nacional publicadas entre el 23 y el 30 de junio de 1932; de las cuales destacaron 13 publicaciones que enlistan elementos referentes a los datos requeridos para la caracterización del tsunami (Cuadro N° 3). De igual forma se consultaron 206 notas de prensa internacional, estadounidense, de las cuales destacó sólo una nota (Chávez, 1932), por tratarse de una transcripción literal del diario *Ecos de la Costa*, periódico de circulación local, misma que se perdió en un incendio del archivo del periódico. La revisión documental se centró en: el informe técnico de Cumming (1933), El catálogo tsunamis de Soloviev y Go (1975), El catálogo de tsunamis de Sánchez y Farreras (1993) y la descripción de Salazar (1989). Las entrevistas fueron aplicadas a: un testigo ocular, Doña Pachita Gaspar (92 años), a hijos de testigos oculares: el Sr. Ramón Cortez (70 años), al Sr. Vidal Mojarro Vázquez (76), Sra. María de Jesús Morales (50 años), Ignacio de la Madrid (78 años) y esposa (76 años), al Sr. José Solórzano (52 años) y al cronista de municipio de Armería, Lic. Miguel Chávez Michel (62 años). Los datos fueron clasificados de acuerdo a diez categorías de información cuya lectura permitió identificar o inferir las características del tsunami, extensión afectada, altura del tsunami, directividad y tiempo de arribo (Ver Cuadro N° 3).

Los resultados indican que a las 7:00 (UTC-6) del 22 de Junio de 1932 se produjo un sismo de Ms = 6.9 con epicentro a ~86 km de la Bahía de Manzanillo (Soloviev &

Cuadro N° 3
Relación de fuentes de información consultadas

Tipo de Fuente	Referencia	Clave	Categoría del dato	
Hemergráfica	El Informador	(1932a)	(1)	d, j
		(1932b)	(2)	b, d
	El Nacional (1932)		(3)	i
	El Universal Gráfico (1932)	(1932a)	(4)	b, d, e, f
		(1932b)	(5)	b, g, i
		(1932c)	(6)	h
	Excélsior	(1932a)	(7)	d, f, i
		(1932b)	(8)	a, b, d, h, i
		(1932c)	(9)	i
		(1932d)	(10)	d, j
		(1932e)	(11)	d, g
	Salazar (1985).		(12)	a, b, d, e, f
	El Nuevo Mexicano (1932).		(13)	a d, e, h
Libros	Salazar (1989).		(14)	a, b, d, e, f, h
Reportes técnicos	Cumming (1933).		(15)	a, b, c, d, e, f, g, h, i
Entrevistas	Sobrevivientes		(16)	a, b, d, e, f, k
	Hijos de sobrevivientes		(17)	a, b, d, e, f, k
Catálogos	Soloviev & Go (1984).		(18)	a, b, d, e, f
	Sánchez & Farreras (1993).		(19)	a, b, d, e, f, g
	NGDC (2011).		(20)	a, b, e
	HTDB/WLD (2011).		(21)	a, b, e
Artículos Científicos	Ordoñez (1933).		(22)	a, b, e
	Flores (1934).		(23)	a, b, e
	Farreras & Sánchez (1991).		(24)	a, b, d, e, f, g
	Okal & Borrero (2011).		(25)	a, b, i
	Corona & Ramírez-Herrera (2012).		(26)	a, b, c, d, e, f, g, h, i, j

Notas: Claves de los tipos de dato: a) Altura del tsunami, b) nombres de localidades afectadas, c) dirección del tsunami, d) daños en sitios específicos, e) hora de arribo del tsunami, f) datos puntuales de inundación, g) extensión afectada, h) fotografías, i) origen del tsunami, j) acciones de contingencia.

Fuente: Elaboración propia.

Go, 1975; Singh et al., 1981; Cruz & Wyss, 1983; Singh et al., 1985; Farreras & Sanchez, 1991; Sánchez & Farreras, 1993; Servicio Sismológico Nacional, 2011). Cinco minutos después (7:05 UTC-6), un tsunami con alturas de olas de más de 10 m golpeó la costa del estado de Colima, desde la Bahía de Manza-

nillo hasta por lo menos, las Salinas del Guasango (Sánchez & Farreras, 1993), penetrando en algunos sectores hasta 2 km en el continente (El Universal Gráfico, 1932b, 1932c; Excélsior, 1932b; Soloviev & Go, 1975; Salazar, 1985; Sánchez & Farreras, 1993).

Las localidades que reportaron el tsunami fueron Manzanillo, Cuyutlán, Palo Verde, Las Boquillas, El Real y Tecuanillo (Salinas de Guasango) y Boca de Apiza (ver Cuadro N° 4). Cuyutlán fue la localidad que más daños sufrió, además de ser la localidad que aparece en todas las fuentes de información. Manzanillo, aunque cuenta con el registro del tsunami, no cuenta con datos de la altura del tsunami. La localidad de Palo Verde, situada a 3 km al SE de Cuyutlán fue totalmente devastada. En la localidad de Las Boquillas, el mar penetró hasta unirse con el estero. La localidad de El Real también fue arrastrada por el tsunami. En cuanto a Tecuanillo, que se localizaba prácticamente en los alrededores de las Salinas del Guasango, sufrió daños similares a los de Palo Verde. Finalmente, los entrevistados señalan que el tsunami alcanzó a la localidad de Boca de Apiza, pero que en este punto no se reportaron daños. A partir de la distribución geográfica de las localidades afectadas, algunos reportes de prensa señalan que la longitud de afectación fue de 25 km, desde Cuyutlán hasta la localidad de El Tecuanillo (Salinas del Guasango).

El Cuadro N° 4 presenta la relación de las localidades que reportaron el tsunami, algunos detalles de su comportamiento en ese punto y la relación de fuentes de información en las que se hace referencia a cada una.

En cuanto a la directividad del tsunami, sólo el reporte técnico de Cumming (1933) hace referencia a este atributo del tsunami. Menciona que por la dirección de las que tomaron los árboles y postes arrasados frente a la playa de Palo Verde y El Guasango, parece que el centro de propagación del tsunami está situado a unos 10 km al S-SW de la Boca de Pascuales (c.a. 3 km al SE de Las Boquillas).

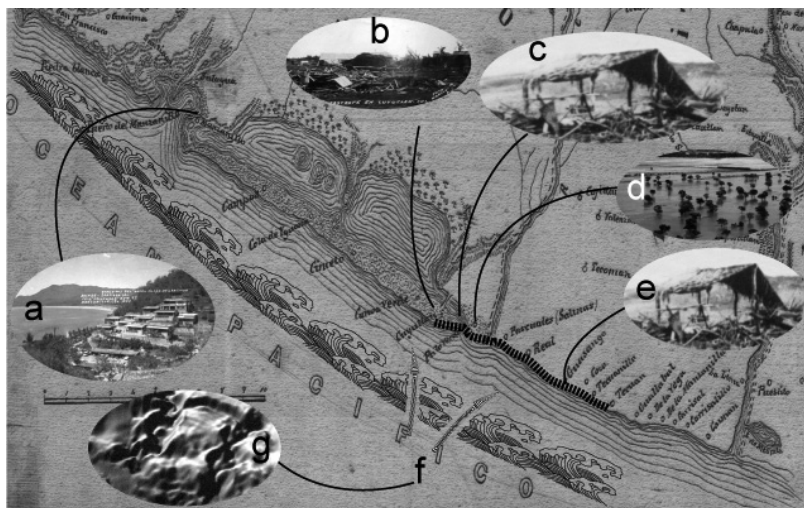
Las características del tsunami fueron mapeadas sobre cartografía antigua que contiene a todas las localidades enunciadas en las descripciones (Figura N° 2). El mapa captura la visión completa del tsunami, considerando los aspectos de localización y directividad observada del tsunami de acuerdo a las notas técnicas de Cumming (1933), quien sitúa la fuente tsunamigénica al S-SW de la desembocadura del río Armería (Figura N° 2).

Cuadro N° 4
Listado de localidades afectadas según fuente de información.

Localidades Afectadas	Descripción	Fuente*
Manzanillo	Sin daños registrados, solo reporta el tsunami	(4), (5), (7), (18), (19), (21), (24) y (25).
Cuyutlán	Totalmente destruido con olas de más de 10 metros	(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22), (23), (24), (25), (26), (27) y (28).
Palo Verde	Totalmente destruido	(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22), (23), (24), (25) y (26).
Las Boquillas	Se unió el mar con el estero	(12), (13), (16) y (17).
El Real	Registro sin dato de altura de tsunami, pero con detalle de daños	(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22), (23), (24), (25) y (26).
Tecuanillo (Salinas de Guasango)	Daños similares a Palo Verde	(8), (15), (18), (19), (20) y (21).
Boca de Apiza	Sin reportes de daños	(16) y (17).

* Las claves numéricas de esta columna corresponden a la columna 4 (Clave) del Cuadro N°3.
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 2
Mapeo de las descripciones del tsunami del 22 de junio de 1932.



Notas: a) Bahía de Manzanillo, b) Cuyutlán, c) Palo Verde, d) Las Boquillas, e) Tecuanillo (Salinas del Guasango), f) probable zona de generación del tsunami, g) gráfico alusivo al deslizamiento. Símbolos: Línea discontinua en la línea de costa, longitud de mayor afectación.

Fuente: Elaboración propia en base al plano histórico de Matute (1865).

Modelación del tsunami originado por el sismo (MGTS) de $M_s = 6.9$ del 22 de junio de 1932

Altura máxima del tsunami en la costa y superficie afectada

La Figura N° 4 muestra la secuencia de la deformación de la superficie oceánica causada por el tsunami del 22 de junio originado por sismo en intervalos de cinco minutos. La Figura N° 3A presenta la deformación inicial, que presenta valores de entre -0.19 y 0.45 m. Los valores máximos de altura del tsunami resultantes de esta modelación oscilan entre los 0.08 y 2.2 m. El valor máximo de 2.2 m se presenta en la sección Noroeste del interior de la bahía de Manzanillo (Figura N° 3F). En el resto de la costa, presenta valores de altura máxima del tsunami de inferiores a 1.2 m, y mantiene un promedio de 0.6 m, valores que se extienden a lo largo de la costa en una longitud de cerca de 75 km. Específicamente en la localidad de Cuyutlán los valores resul-

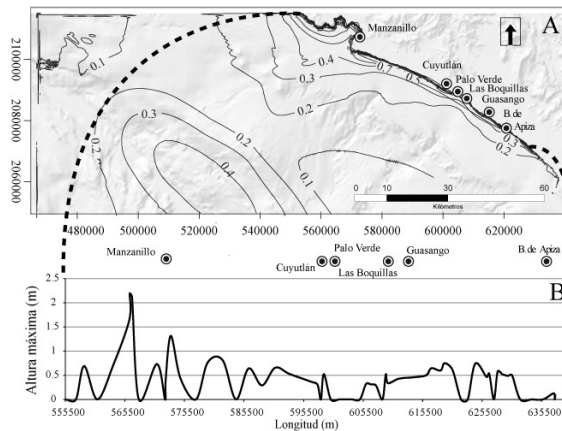
tantes son de entre 0.3 y 0.55 m (Figuras N° 3F y 3G).

Tiempo de Arribo y directividad

El tiempo estimado de arribo (TEA) a Cuyutlán resultó entre 12 y 12.5 min. Para la Bahía de Manzanillo, entre 9 min., en la boca de la Bahía y 18 min. en la zona del puerto y playa. Para lo localidad de Palo Verde es TEA de 12 a 12.5 min. En la localidad de Las Boquillas (Paraíso) los tiempos son de 11.5 a 11.7 min. Para la localidad de El Real de entre 14.5 y 15.6 min., y en la localidad de Salinas del Guasango (Tecuanillo) de 15 min. Finalmente el extremo SE de la costa afectada, en la localidad de Boca de Apiza, los tiempos son del orden de entre 15 y 16 min. (ver Figura N° 4).

La dirección de los flujos de propagación del tsunami se extiende de forma perpendicular al eje de ruptura del sismo, en dirección WSW-ENW y conserva este patrón desde la localidad de Manzanillo hasta la localidad de Salinas del Guasango (Tecuanillo).

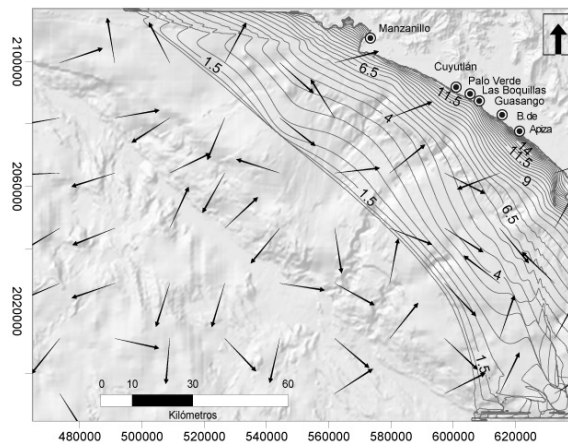
Figura N° 3. Máxima deformación de la superficie oceánica a causa del sismo.



A) Deformación máxima de la superficie oceánica. Las líneas negras representan isólinas a intervalos de 0.1 metros. B) Perfil de la altura máxima del tsunami en la costa.
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 4

Tiempos de arribo del tsunami y directividad del modelo de generación por sismo. Símbolos: Las flechas indican la dirección del flujo, líneas negras, las isocrónas del TEA con intervalos de 0.5 minutos.



gura N° 5). En la localidad de Las Boquillas (actualmente la localidad de El Paraíso) de 8.7 m. En la localidad de El Real, el valor es de 12.1 m. En la localidad de Salinas del Guasango (actual poblado de Tecuanillo), los valores son de entre 4.3 y 6.4 m. Por último, para la localidad de Boca de Apiza, son de entre 1.7 y 1.9 m (Figura N° 5).

Tiempo de Arribo y directividad

El tiempo estimado de arribo (TEA) a Cuyutlán es de 8.5 minutos. Para la Bahía de Manzanillo, los valores de TEA son de entre 9 (en la boca de la Bahía) a 14 min. en la zona del puerto y playa. Para lo localidad de Palo Verde es de 7 min. En la localidad de Las Boquillas (Paraíso) el tiempo resultado en 6 min. Para la localidad de Salinas del Guasango (Tecuanillo) es de 10 min. Finalmente el extremo sureste, en la localidad de Boca de Apiza, los tiempos son del orden de entre 15 y 16 min (ver Figura N° 6).

La dirección de los flujos de propagación del tsunami se extiende de forma perpendicular al eje de la falla del deslizamiento y

con un fuerte componente SSE-NNW (Figura N° 6). El ángulo de ataque en la localidad de Cuyutlán y Palo Verde tiene un ligero componente SSE. En las localidades de Las Boquillas (Paraíso), El Real y Salinas del Guasango la dirección predominante es SW-NE. En la localidad del Tecuanillo la dirección del flujo es perpendicular a la línea de costa. Para la localidad de Boca de Apiza, los flujos se disipan drásticamente y corren en sentido NW-SE, casi paralelo a la línea de costa (Figura N° 6).

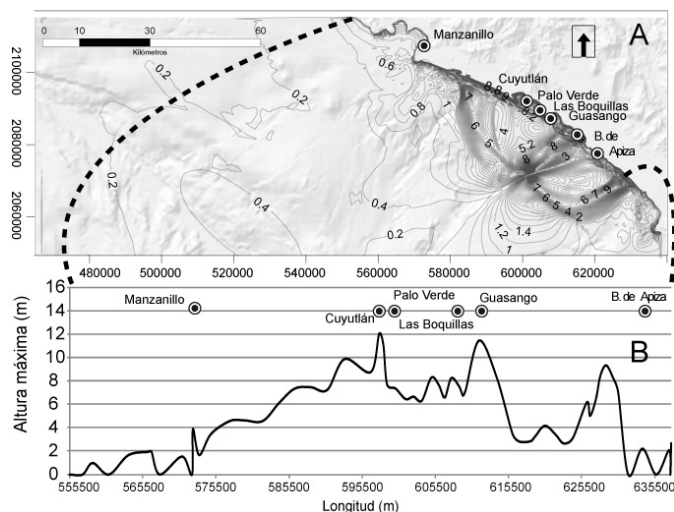
Discusión, comparación de los datos histórico-etnográficos versus los modelos numéricos

Distribución de las alturas del tsunami y extensión afectada

Se encontró que los registros de las alturas máximas del tsunami son escasos, de las pocas fuentes que reportan este dato se puede mencionar el Catálogo de Tsunamis Históricos del *National Geophysical Data Center* (2011), el cual tiene el registro de cin-

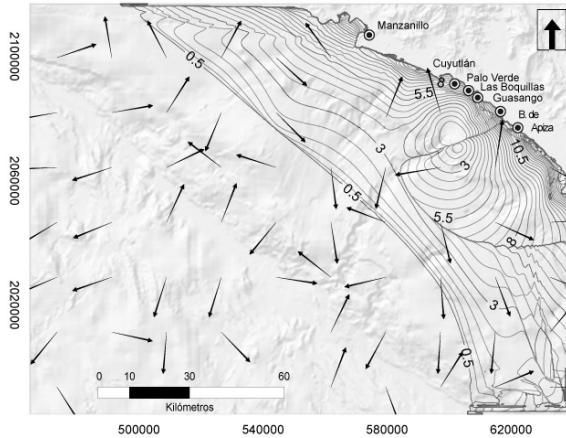
Figura N° 5

Máxima deformación de la superficie oceánica a causa del deslizamiento submarino. Símbolos: A) Deformación máxima de la superficie oceánica. Las líneas negras representan isolíneas a intervalos de 0.2 m en las zonas más con menor deformación y de 1 m en las zonas más cercanas a la zona de generación del tsunami. B) Perfil de la altura máxima del tsunami en la costa.



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 6
Tiempos de arribo del tsunami y directividad del modelo de generación por deslizamiento submarino. Símbolos: Las flechas indican la dirección del flujo, líneas negras, las isocronas del TEA con intervalos de 0.5 minutos.



Fuente: Elaboración propia.

co localidades afectadas: Manzanillo, el Real, Salinas del Guasango, Tenancingo y Cuyutlán, sólo para el último se registró el valor de altura máxima del tsunami, con un valor de 10 m. Reportes posteriores plantean que el valor pudo ser mayor de 10 m (Salazar, 1985, 1989; Farreras & Sanchez, 1991) y hasta 12 m (Corona & Ramírez-Herrera, 2012), valores que coinciden con los del modelo de generación por deslizamiento (Figura N° 7).

En el caso de la localidad Palo Verde, en donde las referencias históricas indican que fue totalmente destruido, los valores de 8 m de altura del tsunami resultantes en el MGTD pudieron haber ocasionado dichos efectos; tomando en cuenta que las casas de madera (material de construcción más empleado en la zona en aquel entonces) son potencialmente derribadas cuando la inundación es de por lo menos de 2 m (Hatori, 1964; Koshimura *et al.*, 2009; Reese *et al.*, 2011). Dado que en el MGTs las alturas están por debajo de 1 m de altura; se asume que el valor del MFGD es capaz de explicar la magnitud de los daños mencionados en las fuentes históricas (Figura N° 7).

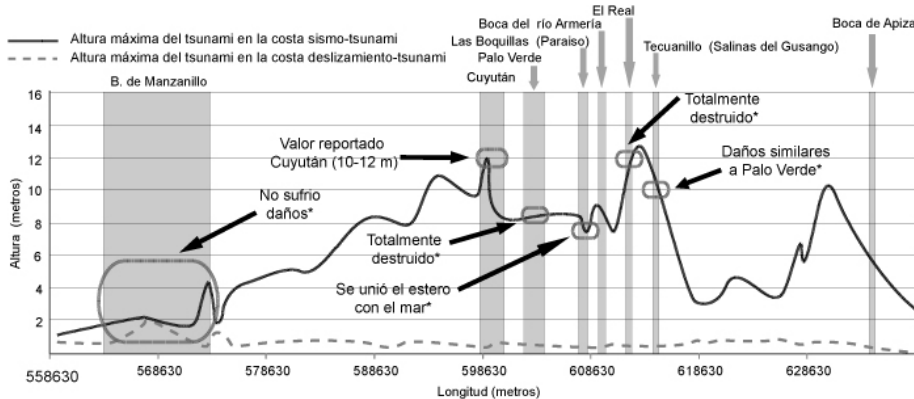
Por otro lado, el trabajo post-sísmico efectuado por Cumming (1933), reporta que los

daños ocasionados por el tsunami afectaron de forma proporcional a las localidades de Palo Verde y el Guasango situados a 3 y 21 km al SE de Cuyutlán, información que se ratifica en datos de prensa, en donde se señala que la localidad del Tecuanillo (en aquel entonces localizado junto a las salinas del Guasango), también sufrió daños (El Universal Gráfico, 1932b). Interpretando los valores de altura máxima del MGTD, de 8 m en Palo Verde y 6.4 m en el Guasango; inferimos que las dimensiones a las que alude Cumming (1933) y las notas de prensa, cobran mayor sentido que en el MGTs, ya que en este los valores resultantes estuvieron por debajo de 1 m. Por otro lado, Salazar (1989) señala que en la zona conocida como “Las Boquillas”, actual localidad de El Paraíso, a 18 km al SE de Cuyutlán, se unió el mar con el estero. En este punto los valores de altura máxima del MGTD de 8.7 m reflejan este comportamiento (Figura N° 7).

Respecto a las zonas de menor afectación, que no cuentan con datos precisos de la altura que alcanzó el tsunami, ni reportes de daños asociados a éste, como es el caso de la Bahía de Manzanillo, que no sufrió desperfectos (El Universal Gráfico, 1932a), se reporta que parte de los damnificados se

Figura N° 7

Comparativo de alturas máximas del tsunami, datos histórico-etnográficos vs. Datos de la modelación numérica. Símbolos: Los óvalos señalan las zonas en las que se recabaron datos por medio de técnicas histórico-etnográficas, la intersección del dato de la modelación de tsunami generado por deslizamiento y una breve descripción de las afectaciones en cada sitio.



* Observaciones que corresponde con los sitios que registraron el tsunami, pero que carecen del dato de la altura máxima del tsunami.

Fuente: Elaboración propia.

refugiaron en Manzanillo (El Universal Gráfico, 1932b), y que la población de Manzanillo participó activamente asistiendo al desastre de Cuyutlán (Excélsior, 1932a). Por tanto, asumimos que los datos de alturas máximas resultantes en el MGTD, de entre 1 y 2.3 m reflejan el comportamiento del tsunami en esta zona (Figura N° 7). El extremo sur, Boca de Apiza, sin datos históricos, sólo ha sido referido para señalar que hasta esa zona pudo haber llegado la perturbación del tsunami. Como se observa en el MGTD (Figuras N° 5 y 7), en esta región extrema de la costa, los valores de altura máxima apenas rebasan valores de altura de 2 m, lo cual no representa amenazas significativas en los poblados localizados esas zonas.

La longitud de 25 km de afectación por el tsunami (El Informador, 1932b; Excélsior, 1932a, 1932e; Cumming, 1933; Soloviev & Go, 1975; Farreras & Sanchez, 1991; Sánchez & Farreras, 1993; National Geophysical Data Center, 2011; Novosibirsk Tsunami Laboratory, 2011) coincide con los segmentos de costa que concentran los mayores valores alturas máximas del tsunami en el MGTD,

entre las localidades de Cuyutlán y Tecuanillo (Figuras N° 7).

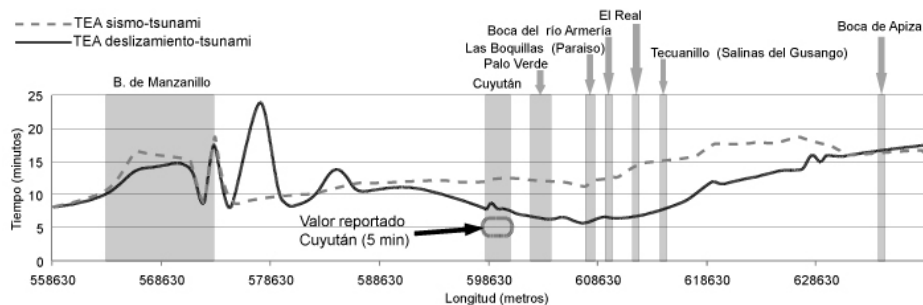
Tiempos de Arribo

Cuyutlán es la única localidad que cuenta con el dato de tiempo de arribo, reportado como 5 min. Considerando que el MGTs presentó valores de entre 12 y 12.5 min, mientras que el MGTD resultó en valores de 8.5 min; asumimos que al presentar un valor más próximo al observado, puede satisfacer la condición de tiempo de arribo del tsunami (Figura N° 8).

Directividad

La dirección de propagación del tren de ondas del tsunami resultante del MGTD se ajusta a las descripciones de Cumming (1933:73), quien señala que: "Por la dirección que tomaron los árboles y postes arrasados frente a la playa de Palo Verde y El Guasango, parece que el centro de propagación del tsunami está situado a unos 10 km al S-SW de la Boca de Pascuales" (c.a. 3 km al SE de Las Boquillas); por lo tanto, se asume

Figura N° 8
Comparativo de los tiempos de arribo por localidad, modelos vs. Datos históricos-etnográficos.
Símbolos: El óvalo señala el lugar en donde se encontraron datos con métodos histórico-etnográficos.



Fuente: Elaboración propia.

que el componente de directividad coincide con el MGTD.

Conclusiones

La información colectada con técnicas histórico- etnográficos, representados espacialmente con técnicas de localización geográfica; permitió reconstruir y caracterizar el comportamiento del tsunami del 22 de junio de 1932 en las costas de Colima. A partir de esta información, en su mayoría cualitativa, se realizaron dos ejercicios de modelación de tsunami usando las dos hipotéticas fuentes y mecanismos de generación, por sismo y por un deslizamiento submarino. Al comparar los datos histórico-etnográficos con el comportamiento del tsunami 22 de junio resultante de los modelos aplicados, concluimos que el tsunami se ajusta a un patrón de comportamiento característico de tsunamis generados por deslizamientos submarinos.

Al emplear métodos combinados de distintas disciplinas se logró identificar y definir la causa y los mecanismos de generación uno de los eventos más destructivos en la zona de estudio. De igual forma se demostró que esta estrategia de investigación permite generar el conocimiento necesario de fenómenos naturales que no cuentan con mediciones instrumentales.

Al esclarecer los mecanismos de generación del tsunami del 22 de junio de 1932, contribuimos a reducir el porcentaje de tsunamis atribuidos a causas desconocidas o poco claras.

Referencias bibliográficas

- BARNIKEL, F. The value of historical documents for hazard zone mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, N° 4, p. 599-613.
- BARRIENDOS, M.; COEUR, D.; LANG, M.; LLASAT, M.-C.; NAULET, R.; LEMAITRE, F. & BARRERA, A. Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, N° 3, p. 583-592.
- BIRKMANN, J. & FERNANDO, N. Measuring revealed and emergent vulnerabilities of coastal communities to tsunami in Sri Lanka. *Disasters*, 2008, N° 32, p. 82-105.
- CORONA, N. & RAMÍREZ-HERRERA, M.-T. Revealing the origin of the great tsunami of June 22, 1932 off the Pacific Coast of Mexico. *Geology*, 2012a, N° (Sometido el 16 de Julio de 2012).

CORONA, N. & RAMÍREZ-HERRERA, M. T. Mapping and historical reconstruction of the great Mexican 22 June tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012b, N° 12, p. 1337-1352.

CRUZ, G. & WYSS, M. Large earthquakes, mean sea level, and tsunamis along the Pacific Coast of Mexico and Central America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1983, N° 73, p. 553-570.

CUMMING, J. L. Los terremotos de Junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco. *Universidad de México*, 1933, N° 31-32, p. 68-104.

CHÁVEZ, L. Dramático relato de la reciente catástrofe del balneario de Cuyutlán. *El Nuevo Mexicano*, Santa Fe, Nuevo México, Julio 21, 1932, Sección I, p. 2.

EISSLER, H. K. & MCNALLY, K. C. Seismicity and Tectonics of the Rivera Plate and Implications For the 1932 Jalisco, Mexico, Earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 1984, N° 89, p. 4520-4530.

EL INFORMADOR. Han sido formidables los recientes terremotos. *El Informador*, México, Junio 28, 1932a, Sección II, p. 4.

EL INFORMADOR. La catástrofe ocurrida anteayer en Cuyutlán no tiene precedente. *El Informador*, México, Junio 24, 1932b, Sección I, p. 1-2.

EL UNIVERSAL GRÁFICO. En Cuyutlán no quedó piedra sobre piedra. *El Universal Gráfico*, México, Junio 23, 1932a, Sección I, p. 15.

EL UNIVERSAL GRÁFICO. En el risueño balneario no queda ahora sino una media docena de personas. *El Universal Gráfico*, México, Junio 23, 1932b, Sección I, p. 2.

EL UNIVERSAL GRÁFICO. Las primeras gráficas de la catástrofe de Cuyutlán. *El Universal Gráfico*, México, Junio 25, 1932c, Sección I, p. 1.

EXCÉLSIOR. Cuyutlán arrasado por la invasión del océano: gigantescas olas arrasaron las casas y la gente. *Excélsior*, México, Junio 23, 1932a, Sección I, p. 1, 4.

EXCÉLSIOR. Dos veces más Cuyutlán ha sido barrido por las olas. *Excélsior*, México, Junio 24, 1932b, Sección I, p. 1.

EXCÉLSIOR. Gigantesco derrumbe submarino a causa de los sismos en Colima. *Excélsior*, México, Junio 25, 1932c, Sección I, p. 4-5.

EXCÉLSIOR. Mil doscientos huyen hacia Colima. *Excélsior*, México, Junio 24, 1932d, Sección II, p. 3.

EXCÉLSIOR. Una extensa zona marítima afectada por el sismo de ayer. *Excélsior*, México, Junio 23, 1932e, Sección I, p. 1.

FARRERAS, S. F. & SANCHEZ, A. J. The tsunami threat on the Mexican west coast: A historical analysis and recommendations for hazard mitigation. *Natural Hazards*, 1991, N° 4, p. 301-316.

FLIRI, F. *Naturchronik von Tirol*. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner, 1998.

FUKAO, Y. Tsunami earthquakes and subduction processes near deepsea trenches. *Journal of Geophysical Research*, 1979, N° 84, p. 2303-2314.

GIANNECCHINI, R. & D'AMATO AVANZI, G. Historical research as a tool in estimating hydrogeological hazard in a typical small alpine-like area: The example of the Versilia River basin (Apuan Alps, Italy). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2012, N° 49, p. 32-43.

GUHA-SAPIR, D.; VOS, F.; BELOW, R. & PONSERRE, S. *Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends*. Brussels: CRED, 2012.

HATORI, T. A Study of the Damage to Houses due to a Tsunami. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 1964, N° 42, p. 181-191.

JANKAEW, K.; ATWATER, B. F.; SAWAI, Y.; CHOOWONG, M.; CHAROENTITIRAT, T.; MARTIN, M. E. & PRENDERGAST, A. Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature*, 2008, N° 455, p. 1228-1231.

- KOSHIMURA, S.; NAMEGAYA, Y. & YAN-AGISAWA, H. Tsunami Fragility: A New Measure to Identify Tsunami Damage. *Journal of Disaster Research*, 2009, N° 4, p. 479-480.
- KULIKOV, E. A.; RABINOVICH, A. B. & THOMSON, R. E. Estimation of Tsunami Risk for the Coasts of Peru and Northern Chile. *Natural Hazards*, 2005, N° 35, p. 185-209.
- LØVHOLT, F.; GLIMSDAL, S.; HARBITZ, C. B.; ZAMORA, N.; NADIM, F.; PEDUZZI, P.; DAO, H. & SMEBYE, H. Tsunami hazard and exposure on the global scale. *Earth-Science Reviews*, 2012, N° 110, p. 58-73.
- LUHR, J. F.; NELSON, S. A.; ALLAN, J. F. & CARMICHAEL, I. S. E. Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology*, 1985, N° 13, p. 54-57.
- LLASAT, M.-C.; BARRIENDOS, M.; BARRERA, A. & RIGO, T. Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology*, 2005, N° 313, p. 32-47.
- MATUTE, J. *Croquis de los límites del Departamento de Colima / Formado a vista por los ingenieros D. Juan B. Matute y D. Miguel M. Orozco*, Escala de 10 leguas. México: MAPAMEX, 1865.
- NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER. *Global Historical Tsunami Database*. 2011. Disponible en Internet: http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml
- NIXON, G. T. The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 1982, N° 93, p. 514-523.
- NOVOSIBIRSK TSUNAMI LABORATORY. *Historical Tsunami Database for the World Ocean*, 2011. Disponible en: http://tsun.sccc.ru/nh/tsun_descr.html
- OKAL, E. A. & BORRERO, J. C. The 'tsunami earthquake' of 1932 June 22 in Manzanillo, Mexico: seismological study and tsunami simulations. *Geophysical Journal International*, 2011, N° 187, p. 1443-1459.
- ORDOÑEZ, E. Seismic activity in Mexico during June, 1932. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1933, N° 23, p. 80-82.
- REESE, S.; BRADLEY, B. A.; BIND, J.; SMART, G.; POWER, W. & STURMAN, J. Empirical building fragilities from observed damage in the 2009 South Pacific tsunami. *Earth-Science Reviews*, 2011, N° 107, p. 156-173.
- RYAN, W. B. F.; CARBOTTE, S. M.; COPLAN, J. O.; O'HARA, S.; MELKONIAN, A.; ARKO, R.; WEISSEL, R. A.; FERRINI, V.; GOODWILLIE, A.; NITSCHKE, F.; BONCZKOWSKI, J. & ZEMSKY, R. Global Multi-Resolution Topography synthesis. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2009, N° 10, p. Q03014.
- SALAZAR, J. Una Montaña de Agua. *Diario de Colima*, Colima, 1985, Sección Agora: Suplemento cultural del Diario de Colima, p. 2-3.
- SALAZAR, J. *El maremoto de Cuyutlán, 1932*. Colima, México: Sociedad Colimense de Estudios Históricos, 1989.
- SÁNCHEZ, A. J. & FARRERAS, S. F. *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México*. Boulder, Colorado: National Geophysical Data Center, 1993.
- SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL. *Catálogo de sismos*. Disponible en Internet: <http://www.ssn.unam.mx/>
- SINGH, S. K.; ASTIZ, L. & HAVSKOV, J. Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: A reexamination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, N° 71, p. 827-843.
- SINGH, S. K.; PACHECO, J. F. & SHAPIRO, N. The earthquake of 16 November, 1925 (Ms=7.0) and the reported tsunami in Zihuatanejo, Mexico. *Geofísica Internacional*, 1998, N° 37, p. Short Note.

SINGH, S. K.; PONCE, L. & NISHENKO, S. P. The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera plate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, N° 75, p. 1301-1313.

SOLOVIEV, S. L. & GO, C. N. *Catalogue of tsunamis on the eastern shore of the Pacific Ocean, Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences No. 5078*. Moscow: Nauka Publishing House, 1975.

STEIN, S. Limitations of a Young Science. *Seismological Research Letters*, 2006, N° 77, p. 351-353.

USHA, T.; MURTHY, M. V. R.; REDDY, N. T. & MISHRA, P. Tsunami vulnerability assess-

ment in urban areas using numerical model and GIS. *Natural Hazards*, 2012, N° 60, p. 135-147.

VALDIVIA-ORNELAS, L.; CASTILLO-AJA, M. D. R. & ESTRADA-TREJO, M. Elements for an historical review of the 3 June, 1932 tsunami on the coast of Jalisco, Mexico. *American Geophysical Union*, 2011.

WANG, P. & ZHANG, D. An introduction to some historical governmental weather records of China. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1988, N° 69, p. 753-758.

WYSS, M.; HABERMANN, R. & GRIESSER, J.-C. Seismic Quiescence and Asperities in the Tonga-Kermadec Arc. *Journal of Geophysical Research*, 1984, N° 89, p. 9293-9304.

Revealing the origin of the great tsunami of June 22, 1932 off the Pacific Coast of Mexico.

Néstor Corona. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México. ncorona@pmip.unam.mx

María Teresa Ramírez-Herrera. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México. Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México. mtramirez@ciga.unam.mx

ABSTRACT

On June 22, 1932 a tsunami with wave height >10 m struck ~60 km of the Pacific Mexican coast. Its origin and causal mechanisms were previously unclear. Historic documents, survivor testimony, tsunami catalogs, post-tsunami survey and modeling aid in identifying the cause and mechanism of the event. Four different scenarios of tsunami generation and propagation were modeled based on a rotational submarine landslide to identify a behavioral pattern similar to what was observed and recorded with this tsunami event. We determined the elapsed time between the seismic event and the arrival of the tsunami wave to be approximately 5-9 min, the direction from which the wave train originated - SSE-NNW, the affected surface area ~60km, and the maximum height of the tsunami ~11.6 m. The determined maximum height, arrival time and affected land area suggest that the causal mechanism was, in fact, a rotational submarine landslide, that originated several kilometers to the east of the epicenter of the June 22 event and no more than 20km southeast of Cuyutlán, in the submarine canyon facing the Armería River. In determining the cause and mechanisms of generation of the 1932 tsunami in Cuyutlán, using a combination of historical data and modeling, the percentage of tsunamis attributed to unknown causes or with unclear causes is reduced.

Keywords: tsunami, submarine canyons, modeling, landslide

INTRODUCTION

The tsunami event of June 22, 1932 occurred during a period of high seismic (Ordoñez, 1933), and tsunami activity (Farreras and Sanchez, 1991; Sánchez and Farreras, 1993), see Figure 1. An earthquake $M_s = 6.9$ with an epicenter approximately 86 km south of the Bahía de Manzanillo occurred on June 22 1932, at 7:00 (UTC-6) (Cruz and Wyss, 1983; Farreras and Sanchez, 1991; Sánchez and Farreras, 1993; Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2011; Singh et al., 1981; Singh et al., 1985; Soloviev and Go, 1975). Minutes later, a tsunami struck the coastline of the state of Colima, from the Bahía de Manzanillo to at least Salinas del Guasango (Sánchez and Farreras, 1993), coming as far inland as 2 km, with maximum tsunami height 10 - 12 m, recorded in Cuyutlán (El Universal Gráfico, 1932b; Excélsior, 1932a; Salazar, 1985; Sánchez and Farreras, 1993; Soloviev and Go, 1975). The tsunami resulted in ~50 deaths, 1500 surviving victims (El Informador, 1932b; El Universal Gráfico, 1932a; Excélsior, 1932c; Ordoñez, 1933) and the complete destruction of various coastal communities (Cumming, 1933; Chávez, 1932).

The specific causal mechanism of the June 22 tsunami has previously not been explained (Singh et al., 1985). Part of the uncertainty arises from the fact that while the seismic event of June 22 was relatively small (Okal and Borrero, 2011) resulted in the incongruently large maximum wave height of 10-12 m (Farreras and Sanchez, 1991). Two complementary, causal mechanisms are hypothesized here: 1) seismicity (National Geophysical Data Center / World Data Center (NGDC/WDC), 2011; Okal and Borrero, 2011; Sánchez and Farreras, 1993; Singh et al., 1998), and 2) a submarine landslide (Cumming, 1933; El Informador, 1932a; Excélsior, 1932b). Until now, these hypotheses associated with this tsunami event has neither been proved nor disproved. The present study offers arguments

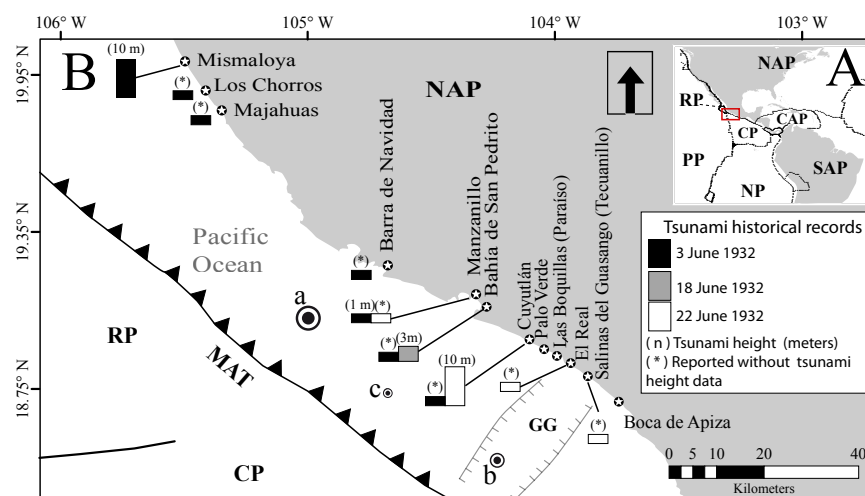


Figure 1. A) Regional tectonics; B) Seism-tectonics and series of tsunami events in June 1932. MAT, Mesoamerican Trench; RP, Placa de Rivera; CP, Cocos plate; GG, Graben el Gordo; NAP, North American plate; PP, Pacific plate; CAP, Caribbean plate; SAP, South American plate; NP, Nazca plate; a) and b) Epicenters of the earthquakes from June 3 and 18, respectively (Cumming, 1933), c) Epicenter of the June 22 earthquake (Servicio Sismológico Nacional, 2011). The bars beside the locations indicate the locations where tsunamis have been recorded and maximum wave height data (National Geophysical Data Center / World Data Center, 2011).

that test the hypothesis that submarine landslide dynamics are at work based on interpretation of historic information, comparison with general landslide-tsunami behavior and the combination of two levels of numeric modeling. The first with the objective of pinpointing the probable origin of the landslide and the second involves submarine landslide dynamics and how this explains the behavior of the tsunami event of June 22, 1932.

METHODS

The methods employed in this study include: 1) the compilation of data characteristic of the June 22, 1932 tsunami (arrival time, affected coastal area, directivity, and maximum tsunami wave height) through review of historical data; 2) modeling for the identification of the probable location of origin of the tsunami; and 3)

tsunami-landslide scenario modeling. In order to infer the location of the submarine landslide which resulted in the June 22 tsunami, recorded data related to the arrival time as well as field observations were reviewed (Kulikov et al., 1996; Murty, 1979; Tappin et al., 1999; Tappin et al., 2001). This information was then used to develop a wave tsunami travel time model (WTTT), using the wave train propagation in shallow water given the gravitational acceleration constant and the depth of the ocean model (Levin and Nosov, 2009). The absolute marine depth value was taken from the values provided by the Global Multi-Resolution Topography (Ryan et al., 2009) obtained through GeoMapApp 3.0.1 software at ~200 x 200 m pixels (Fig. 2). The WTTT model was completed with the use of the cost-distance command in ArcGIS software, and Cuyutlán was considered the center of origin of the tsunami waves with a radial propagation

pattern (Fig. DR1 in the GSA Data Repository). Based on the post-tsunami survey by Cumming (1933), the southeast (SE) quadrant of the model was selected as the tsunami origin location. In this location, the morphological features are defined as the interface of the platform and continental shelf where the opening of the submarine canyon faces the mouth of the Armería River, within a bathymetric setting with slopes between 3°–12°. The canyon presents an active environment deposition of the terrigenous sediment coming from the Armería River (Ramírez-Herrera et al., 1999). The sea floor is lithologically defined by mud, mudstone and in smaller quantity sand and sandstone (Coulbourn et al., 1982) arranged in sediment packages of 400 and 500 m of thickness (Divins, 2003). Taking into account that all these factors increase the likelihood of developing a massive rotational landslide -slump-, during a seismic events or storms (Einsle, 1992; Lee et al., 2009); the location of the probable submarine landslide, i.e. the hypothetical source of the tsunami, was inferred.

In order to estimate the arrival time, affected coastal area, directivity, and maximum tsunami wave eight, the GEOWAVE and FUNWAVE codes were used, because of its capability to model submarine landslide generated tsunamis (Watts et al., 2003).

Four scenarios of the 22 June, 1932 tsunami was modeled using a combined tsumigenic source, following consecutive events of: a) the 6.9 Ms earthquake (Singh et al., 1985); see Table 1; and b) a hypothetical submarine landslide which was triggered ~10 seconds after the start of the earthquake (inferred according to the data recorded on the arrival of the first S-P waves at the station in Manzanillo by Singh et al. (1985)). The initial seismic conditions were applied to all modeling scenarios.

The landslide mass and its geometric dimensions were not directly measured due to the low resolution of the bathymetric data along with the lack of detailed marine geological data at the location. However the length, width and slope variables (Table 2) proposed in the four modeling scenarios, were within the observed numeric range according to the predictive models of rotational submarine landslide tsunami generation (Grilli and Watts, 2005; Watts et al., 2005). The modeling purpose was to isolate a pattern of tsunami: generation, propagation and distribution (Watts et al., 2003) that fit best with the reported data from the available information sources.

RESULTS AND DISCUSSION

Tsunami arrival time and Slump location

The elapsed time between the seismic event and the arrival of the tsunami wave was approximately 5 min (Salazar, 1985; Pachita Gaspar, survivor of the June 22, 1932 tsunami). However, the WTTT calculations (Fig. 2A) indicate

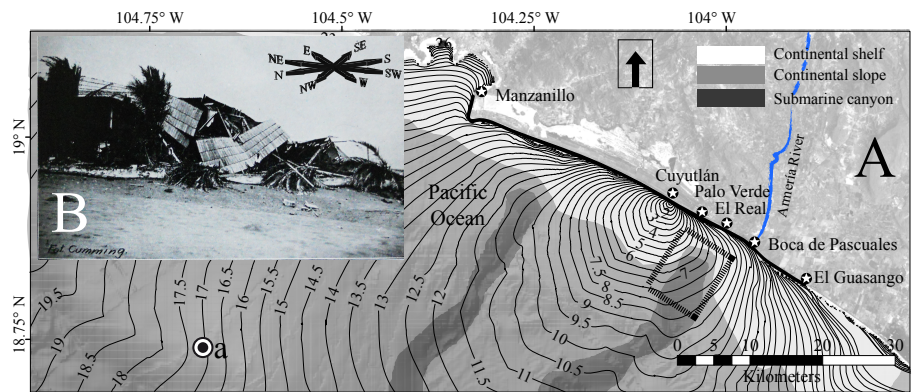


Figure 2. A) WTTT model with isochrones at intervals of 0.5 min, included is a general morphological profile of the ocean floor modified from Lugo-Hubp and Córdova (1990), the locations of the communities affected by the tsunami (indicated by a white star enclosed in a circle), the epicenter of the seismic event 22 June de 1932 (Singh et al., 1984; Servicio Sismológico Nacional, 2011;) and the approximate coastal extension affected (indicated by a black line). The perforated rectangle with dash lines indicates the arrival time zone (~5 min) direction (S-SW of the Armería River's mouth) and the submarine canyon. B) correspond to a sample of the post-tsunami photographs of Cuyutlán where orientation of the fallen palms and devastated buildings is clear, taken by Cumming (1933).

TABLE 1. PARAMETERS USED FOR SEISMIC STEP TSUNAMI MODELING

Quantities	Values
Input TOPICS	
x_0 (Longitude W)*	-104.680°
y_0 (Latitude N)*	18.739°
d (km)**	30
ϕ (degrees)**	310°
λ (deg.)***	90°
δ (deg.)**	14°
M_s **	6.9
L (km) ***	80
W (km)***	40
μ (Pa)	4E+10
Output TOPICS	
M_0 (J)	2.13E+20
λ_0 (km)	-0.19708
η_0 (m)	0.45453

Notes: The longitude of the earthquake centroid x_0 , the latitude of the earthquake centroid y_0 , the centroid depth d , the fault strike ϕ , the fault rake λ , the fault dip δ , the fault length along rupture L , the fault width across rupture W , and the shear modulus μ , seismic moment M_0 , the characteristic wavelength λ_0 , and the characteristic tsunami amplitude η_0
*Taken from Singh et al. (1984) and Servicio Sismológico Nacional (SSN) (2011).
** According to Singh et al. (1985).
***as per Okal and Borrero (2011).

that ~17 min elapsed for the tsunami to arrive from the epicenter location to Cuyutlán (Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2011; Singh et al., 1984). On the other hand, if one considers the distance from Cuyutlán at a radius of 5 min of wave train travel time, the source should be located at a distance no greater than 20 km. At such distance, the upper part of the submarine canyon, at the mouth of the Armería River, is located (Fig. 2A). This is a zone that coincides with Cummings (1933) observations, which place the probable zone of tsunami origin at S-SW of the mouth of the Armería River (Fig. 2A). Figure 2B shows the SE-NW orientation of some of the structures and palms demolished by the tsunami. According to Cumming (1933) this orientation aided in inferring the direction of tsunami propagation and the location of its

origin to the SE of Cuyutlán.

Submarine landslide-generated Tsunami Model

Figure DR2 shows the initial modeled deformation of the ocean floor subsequent to the 22 of June, 1932 seismic event. The maximum surface deformation values are -0.19 to 0.45 m. This pattern of deformation does not explain the observed maximum wave height values and June 22 tsunami behavior. Cumming (1933) reported no coastal coseismic deformation associated with the June 22 event. The only reported data of coastal coseismic deformation are related to the June 3, 1932 event.

Maximum tsunami wave height distributions and the length of affected coastline

Figure DR3 details the concentration of maximum tsunami wave height for all four models, from Cuyutlán to El Tecuanillo (an area of ~ 26 km). The rest of the coastline shows wave height values between 0.5 – 2 m, that it represent no significant inundation of the affected coastal zone. The Bahía de Manzanillo shows maximum wave height values between 0.9 y 2.3 m, with 2.3 m maximum values shown in the C4 model (Figs. 3 and DR3). The maximum variation was on the order of +/- 0.4 m for this zone in all of the models (Fig. DR3). While maximum wave height data for the tsunami are scarce, the Global Historical Tsunami Database NOAA (2011) has data records for five of the affected locations: Manzanillo, el Real, Salinas del Guasango, Tenancingo y Cuyutlán, and only for the last one a value for the maximum tsunami wave height is provided (10 m). Other reports state that the maximum height could be > 10 m (Farreras and Sanchez, 1991; Salazar, 1985, 1989) possibly being as great as 12 m (Corona and Ramírez-Herrera, 2012), which is consistent with the values, 8.4 - 11.6 m, given in the C4 model (Fig. 3D). In the case of Palo Verde, with no record of the tsunami wave height for the location, the historical references indicate

TABLE 2. PARAMETERS USED FOR THE SLUMP STEP TSUNAMI MODELLING.

Quantities	C1	C2	C3	C4
Input TOPICS				
Long (W)*	104.037	104.037	104.037	104.037
Lat (N)*	18.758	18.758	18.758	18.758
γ (Kg/m ³)**	1.906	1.906	1.906	1.906
b (km) ***	1.9	3.2	3.5	3.5
T (m) ****	450	450	450	450
ω (km)****	1.5	2.4	3.0	3.0
d (m)****	400	460	460	460
θ (deg.)****	12.0	3.9	5.0	6.0
Output TOPICS				
a_0 (m/s ²)	0.720	0.288	0.453	0.325
ut (m/s)	14.702	9.298	13.455	11.4
S_0 (Km)	300	300	400	400
t_0 (s)	20.41	32.26	29.73	35.00
λ_0 (Km)	2.56	4.33	3.99	4.71
η_0 (m)	-46.01	-27.49	-49.30	-34.00

Note: Input TOPICS, the specific density γ , the initial landslide length b , the maximum initial landslide thickness T , the maximum landslide width ω , the mean initial landslide depth d , and the mean initial incline angle θ . The outputs from TOPICS are the slide initial acceleration a_0 , the theoretical slide terminal velocity ut , the characteristic distance of slide motion S_0 , the characteristic time of slide motion t_0 , the characteristic wavelength λ_0 , and the characteristic tsunami amplitude η_0 from the depression wave at time $t = t_0$.

* Inferred due to its probable location in the quadrant of origin (Fig. 2) as per the observations in Cumming (1933).

** Inferred in agreement with sediment materials (Coulbourn et al., 1982).

*** Parameters taken directly from the topo-bathymetric model (Ryan et al., 2009).

**** Taken from the sediment deposit and thickness model (Divins, 2003).

that there was total destruction, which is consistent with the 8 m value of the C4 model (Figs. 3 and DR3) that would result in such devastation. On the other hand, Cumming's (1933) post-tsunami survey suggests that the tsunami proportionally affected both Palo Verde and el Guasango, located 3 and 21 km to the SE of Cuyutlán. This is corroborated by news reports that show Tecuanillo (located in 1932 around the saltworks bordering el Guasango) suffered damage (El Universal Gráfico, 1932c). The maximum height values, 8 m in Palo Verde and 6.4 m in el Guasango, of C4 model (Fig. 3) are consistent with the dimensions suggested by Cumming (1933) and newspaper reports at the time. Salazar (1989) notes that in the area known as "Las Boquitalla" (probably what is now known as El Paraíso) 18 km to the SE of Cuyutlán, the ocean merged with the estuary. wave height values (8.7 m) resulted from the C4 model (Fig. 3) corroborate this behavior.

The maximum wave height data resulting from model C4 (Fig. 3), between 1 and 2.3 m, reflect the tsunami behavior in the zone that was unaffected by the event (El Universal Gráfico, 1932b, c; Excelsior, 1932a) (Fig. 5). As it is apparent in all models (Fig. DR3), the coastal locations in the far ends barely register maximum wave height values above 2 m, which indicate no significant destructive threat to the communities located there.

The segments of the coast where the highest

concentration of high wave height values were recorded in all four models were between Cuyutlán and Tecuanillo. This corroborates that the coastal extension most affected by the tsunami was about 26 km, which is very close to the reported values (Cumming, 1933; El Informador, 1932g; Excelsior, 1932a, g; Farreras and Sanchez, 1991; National Geophysical Data Center/World Data Center (NGDC/WDC), 2011; Novosibirsk Tsunami Laboratory (NTL), 2011; Sánchez and Farreras, 1993; Soloviev and Go, 1975). Okal and Borrero (2011) used the model by Fukao (1979) to propose that the June 22 event was generated by a "seismic-tsunami". However, in their best fit model they reported wave height values of 7 m in the Bahía de Manzanillo and in Cuyutlán, which are not consistent with historic data reports: in Manzanillo there was no report of damage while in Cuyutlán, the wave height was greater than 10 m (El Universal Gráfico, 1932c; Excelsior, 1932b; Farreras and Sanchez, 1991; Salazar, 1985; Sánchez and Farreras, 1993; Soloviev and Go, 1975). Contrary to the seismic-tsunami model proposed by Okal and Borrero (2011), the C4 tsunami-landslide model proposed here reflects the observed and reported wave height values.

Arrival times

Cuyutlán is the only location with

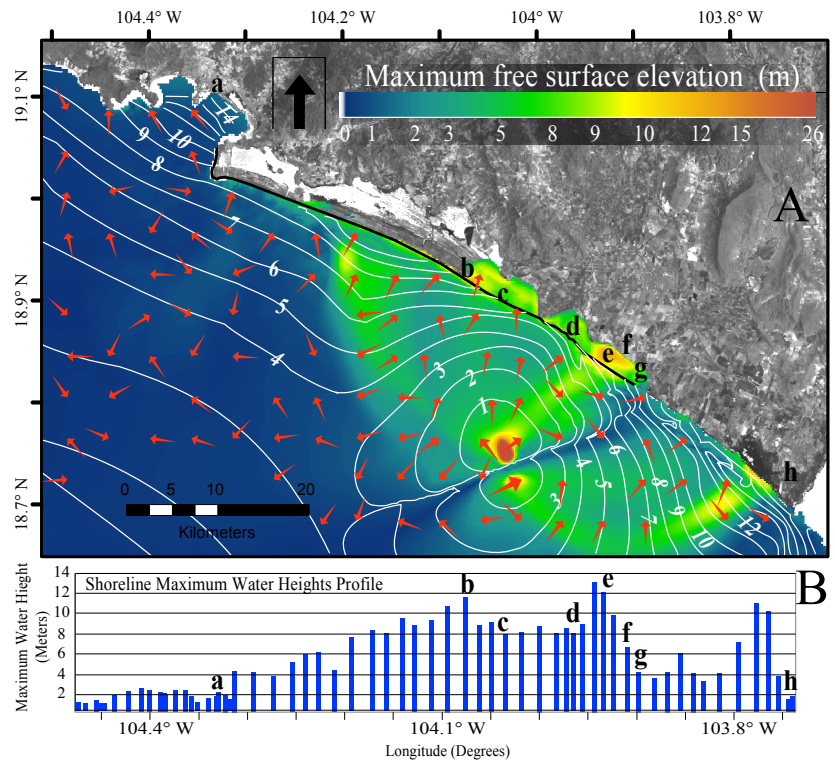


Figure 3. A) Model C4 Maximum free surface elevation during the modeling process, shoreline maximum water heights and directivity. a) Manzanillo, b) Cuyutlán, c) Palo Verde, d) Las Boquillas (El Paraíso), e) El Real y f) Salinas del Guasango, g) Tecuanillo, y h) Boca de Apiza (Castell-Blanch, 1900; Herrera, 1915; Le Harivel, 1900). White lines: isochrones of tsunami, at 1 min intervals. Red arrows, tsunami maximum water flux, interpreted such as directivity. B) Bars in the lower portion of each model correspond to the maximum tsunami height distribution along the coast.

recorded historical arrival time, reported as 5 min. The values that were modeled for the tsunami arrival time in Cuyutlán were very similar in all scenarios, between 8 – 9 minutes (Fig. DR3). In the C4 model (Fig. 3) the resulting time was 8.5 minutes. Given that the difference between the TEA of the C4 model and recorded time is 3.5 minutes, we can infer that the data generated by the models provides a reasonable arrival time approximation.

Directivity

The direction of the flow propagation is perpendicular to the slip fault with a strong SSE-NNW component in all model scenarios (Fig. DR3). The angle of attack has a slight SSE-NNW component in all model scenarios in Cuyutlán and Palo Verde (Fig. DR3). The predominant direction is SW-NE in Las Boquillas (El Paraíso), El Real and Salinas del Guasango, while is perpendicular to the coastline in Tecuanillo. The flows dissipate drastically and run from NW-SE, almost parallel to the coastline in Boca de Apiza (Fig. 3 and DR3).

The direction of propagation appears to fit the descriptions given by Cumming (1933): "According to the direction of the tree fall and posts dragged to the beach in Palo Verde and El Guasango, it appears that the propagation center of the tsunami is located of the wave train

approximately 10 km to the S-SW of Boca de Pascuales (ca. 3 km to the SE of Las Boquillas), which is the mouth of the Armería River. The axis of the landslide in all four models was located ~14 km to the S-SW of Boca de Pascuales, therefore, it is assumed that the directivity shown in all four models is consistent with the observed behavior (Figs. 2B, 3 and DR3).

CONCLUSIONS

The information obtained from various historical sources (arrival time, length of the affected coastline, maximum tsunami height values, damage, directivity of propagation and probable location of the tsunami origin) is accordant with the behavior pattern characteristic of submarine-landslide generated tsunamis. The resulting numerical data from modeling tsunami behavior, employing the parameters consistent with a rotational submarine landslide (slump), agree well with the data provided by historical archives. This confirms that the triggering mechanism of the June 22, 1932 tsunami was, in fact, a rotational submarine landslide that originated in the submarine canyon, at the mouth of the Armería River.

In determining the cause and mechanisms of generation of the 1932 tsunami in Cuyutlán, the percentage of tsunamis attributed to unknown causes or with unclear causes is reduced. A combination of historical data analysis and tsunami modeling provide a basis to identify the cause of otherwise unknown tsunami. Further reduced is the level of uncertainty with regard to tsunamis with high destructive potential along the Pacific coast and, as well, provide solid reasoning to improve alert systems.

ACKNOWLEDGMENTS

N. Corona thanks CONACYT for providing the grant support for Ph.D. graduate studies. M.T. Ramírez-Herrera acknowledges PAPPIT-UNAM for contributing to the funding of this study via the grant number IN123609 and SEP-CONACYT Ciencia Básica Grant number 129456.

REFERENCES CITED

- Castell-Blanch, L. B., 1900, Plano topográfico de los terrenos salitreros y anexos de la hacienda de Cuyutlán pertenecientes al Sr. Coronel Francisco Santa Cruz, scale 1:20 000, 1 sheet.
- Coulbourn, W. T., Aubouin, J., von Huene, R., Azema, J., Coulbourn, W. T., Cowan, S. S., Curiale, J. A., Dengo, C. A., Faas, R. W., Harrison, W. E., Hesse, R., Ladd, J. W., Muzylov, N., Shiki, T., Thomson, P. R., Westberg, M. J., and Orlofsky, S., 1982, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project covering Leg 67 of the cruises of the drilling vessel Glomar Challenger, Manzanillo, Mexico to Puntarenas.
- Cruz, G., and Wyss, M., 1983, Large earthquakes, mean sea level, and tsunamis along the Pacific Coast of Mexico and Central America: *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 73, no. 2, p. 553-570.
- Cumming, J. L., 1933, Los terremotos de Junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco: *Universidad de Geology*; May 2000; v. 28; no. 5; p. 407-410; 3 figures.
- México, v. 31-32, p. 68-104.
- Chávez, L., 1932, *Dramático relato de la reciente catástrofe del balneario de Cuyutlán, El Nuevo Mexicano*: Santa Fe, Nuevo Mexico, El Nuevo Mexicano, p. 2.
- Divins, D. L., 2003, Total Sediment Thickness of the World's Oceans & Marginal Seas, in NOAA National Geophysical Data Center, ed.: Boulder, CO.
- Einsele, G., 1992, *Sedimentary Basins: Evolution, Facies, and Sediment Budget*, Germany, Springer-Verlag, 628 p.
- Farreras, S. F., and Sanchez, A. J., 1991, The tsunami threat on the Mexican west coast: A historical analysis and recommendations for hazard mitigation: *Natural Hazards*, v. 4, no. 2, p. 301-316, doi: 10.1007/bf00162795.
- Grilli, S. T., and Watts, P., 2005, Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. I: Modeling, Experimental Validation, and Sensitivity Analyses: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 131, no. 6, p. 283-297.
- Herrera, E., 1915, Mapa del Estado de Colima, dibujado por orden de la Comandancia Militar del Estado Libre y Soberano de Jalisco: Secretaría de Guerra y Marina. Departamento de Ingenieros, scale 1:200 000, 1 sheet.
- Kulikow, E. A., Rabinovich, A. B., Thomson, R. E., and Bornhold, B. D., 1996, The landslide tsunami of November 3, 1994, Skagway harbor, Alaska: *Journal of Geophysical Research*, v. 101, no. 3, p. 6609-6615.
- Le Harivel, A., 1900, Mapa del Estado de Colima / Formado por el Ingeniero Arturo Le Harivel: Meisenbach Riffarth & Co., scale Undefined, 1 sheet.
- Lee, H. J., Locat, J., Desgagnés, P., Parsons, J. D., McAdoo, B. G., Orange, D. L., Puig, P., Wong, F. L., Dartnell, P., and Boulanger, E., 2009, Submarine Mass Movements on Continental Margins, *Continental Margin Sedimentation*, Blackwell Publishing Ltd., p. 213-274.
- Levin, B., and Nosov, M., 2009, *Physics of Tsunamis*, Russia, Springer.
- Lugo-Hubp, J., and Córdova, C., 1990, *Geomorfología Marina*: Instituto de Geografía/UNAM, scale 1:4 000 000.
- Murty, T. S., 1979, Submarine Slide-Generated Water Waves in Kitimat Inlet, British Columbia: *Journal of Geophysical Research*, v. 84, no. C12, p. 7777-7779, doi: 10.1029/JC084C12p07777.
- National Geophysical Data Center / World Data Center, 2011, *Global Historical Tsunami Database*: Boulder, CO, USA.
- Novosibirsk Tsunami Laboratory, 2011, *Historical Tsunami Database for the World Ocean*: http://tsun.ssc.ru/nh/tsun_desc.html (September 2011).
- Okal, E. A., and Borrero, J. C., 2011, The 'tsunami earthquake' of 1932 June 22 in Manzanillo, Mexico: seismological study and tsunami simulations: *Geophysical Journal International*, v. 187, no. 3, p. 1443-1459, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05199.x.
- Ordoñez, E., 1933, Seismic activity in Mexico during June, 1932: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 23, no. 2, p. 80-82.
- Ramírez-Herrera, M. T., Kostoglodov, V., Summerfield, M., Urrutia-Fucugauchi, J., and Zamorano, J., 1999, A reconnaissance study of the morphotectonics of the Mexican subduction zone: *Annals of Geomorphology*, v. 118, p. 207-226.
- Ryan, W. B. F., Carbotte, S. M., Coplan, J. O., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., Weissel, R. A., Ferrini, V., Goodwillie, A., Nitsche, F., Bonczkowski, J., and Zemsky, R., 2009, Global Multi-Resolution Topography synthesis: *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v. 10, no. Q03014, doi: 10.1029/2008GC002332.
- Salazar, J., 1985, *Una Montaña de Agua*, *Diario de Colima*, Volume 941: Colima, *Diario de Colima*, p. 2-3.
- Salazar, J., 1989, *El maremoto de Cuyutlán, 1932*, Colima, México, *Sociedad Colimense de Estudios Históricos, Investigaciones Históricas 2*.
- Sánchez, A. J., and Farreras, S. F., 1993, *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México*: Boulder, Colorado, National Geophysical Data Center, p. 79.
- Servicio Sismológico Nacional, 2011, *Catálogo de sismos*: <http://www.ssn.unam.mx/> (2 November 2011).
- Singh, S. K., Astiz, L., and Havskov, J., 1981, Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: A reexamination: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 71, no. 3, p. 827-843.
- Singh, S. K., Pacheco, J. F., and Shapiro, N., 1998, The earthquake of 16 November, 1925 (Ms=7.0) and the reported tsunami in Zihuatanejo, Mexico: *Geofísica Internacional*, v. 37, no. 001, p. Short Note.
- Singh, S. K., Ponce, L., and Nishenko, S. P., 1985, The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera plate: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 75, no. 5, p. 1301-1313.
- Singh, S. K., Rodríguez, M., and Espindola, J. M., 1984, A catalog of shallow earthquakes of Mexico from 1900 to 1981: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 74, p. 267-280.
- Soloviev, S. L., and Go, C. N., 1975, *Catalogue of tsunamis on the eastern shore of the Pacific Ocean*, Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences No. 5078, Moscow, Nauka Publishing House, v. K1A OS2.
- Tappin, D. R., Matsumoto, T., Watts, P., Satake, K., McMurtry, G. M., Matsuyama, M., Lafoy, Y., Tsuji, Y., Kanamatsu, T., Lus, W., Iwabuchi, Y., Yeh, H., Matsumoto, Y., Nakamura, M., Mahoi, M., Hill, P., Crook, K., Anton, L., and Walsh, J. P., 1999, Sediment slump likely caused 1998 Papua New Guinea tsunami: *EOS, Transactions American Geophysical Union*, v. 80, no. 30, p. 329, doi: 10.1029/99EO00241.
- Tappin, D. R., Watts, P., McMurtry, G. M., Lafoy, Y., and Matsumoto, T., 2001, The Sissano, Papua New Guinea tsunami of July 1998 — offshore evidence on the source mechanism: *Marine Geology*, v. 175, no. 1-4, p. 1-23, doi: 10.1016/S0025-3227(01)00131-1.
- Watts, P., Grilli, S. T., Kirby, T. J., Fryer, G. J., and Tappin, D. R., 2003, Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 3, p. 391-402, doi: 10.5194/nhess-3-391-2003.
- Watts, P., Grilli, S. T., Tappin, D. R., and Fryer, G. J., 2005, Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 131, no. 6, p. 298-310.
- Yamada, Y., Kawamura, K., Ikehara, K., Ogawa, Y., Urgeles, R., Mosher, D., Chaytor, J., and Strasser, M., 2012, Submarine Mass Movements and Their Consequences, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Volume 31, Springer, p. 756.